ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 70429— 2022

ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЕ СБОРКИ ВОДО-ВОДЯНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

Расчет на прочность на стадии проектирования при действии динамических нагрузок

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. № 1655-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 1
4 Общие положения 3
5 Требования к расчету 4
6 Расчет на вибропрочность 7
Приложение А (рекомендуемое) Методы расчета тепловыделяющих сборок при внешних динамических воздействиях 9
Библиография 12

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЕ СБОРКИ ВОДО-ВОДЯНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

Расчет на прочность на стадии проектирования при действии динамических нагрузок

Fuel assemblies of the water-water power reactor. Rules for dynamic strength analysis at the design stage

Дата введения — 2023—02—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает требования к проведению расчетов на прочность тепловыделяющих сборок водо-водяных энергетических реакторов при действии динамических нагрузок.

1.2 Настоящий стандарт предназначен для применения при обосновании прочности тепловыделяющих сборок в соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии [1] на стадии проектирования.

1.3 Настоящий стандарт не устанавливает требований к проведению расчетов на прочность тепловыделяющих элементов.

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 70428 Тепловыделяющие сборки водо-водяного энергетического реактора. Расчет на прочность на стадии проектирования при действии статических нагрузок

ГОСТ Р 70430 Конструкционные материалы тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок водо-водяных энергетических реакторов. Общие требования

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

3 Термины, определения, сокращения и обозначения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по [1], ГОСТ Р 59115.1, а также следующие термины с соответствующими определениями:

Издание официальное

3.1.1 **динамические характеристики конструкции:** Параметры конструкции, характеризующие ее собственные колебания, включая собственные частоты и формы колебаний, модальные массы и жесткости форм колебаний, демпфирование, амплитудные и фазовые частотные характеристики (для установившихся вынужденных колебаний).

3.1.2 **механическая система:** Совокупность компонентов конструкции, рассматриваемая в расчете с учетом взаимодействия составляющих частей.

3.1.3 **парциальные динамические характеристики:** Характеристики собственных колебаний динамической подсистемы, определяемые в предположении неподвижности точек связи этой подсистемы с системой.

3.1.4 **подсистема:** Составляющая часть механической системы, обладающая собственными динамическими характеристиками.

3.1.5 **расчетный случай нагружения:** Сочетание условий нагружения компонентов конструкции, рассматриваемое при расчете на прочность.

3.1.6 **собственные колебания:** Колебания, которые совершает механическая система около положения устойчивого равновесия после первоначального возмущения под действием внутренних по отношению к системе упругих и инерционных сил.

3.1.7 **собственная форма колебаний:** Пространственное распределение амплитуд перемещений при колебаниях по определенному тону.

3.1.8 **собственная частота:** Частота колебаний механической системы по определенному тону собственных колебаний, f_i (i — номер тона).

3.1.9 **степени свободы**: Совокупность независимых переменных (обобщенных координат), необходимых для полного описания движения механической системы.

3.1.10 **тон колебаний:** Вид колебаний, характеризуемый определенной частотой и формой колебаний.

3.2 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ВВЭР — водо-водяной энергетический реактор;
ВДВ — внешние динамические воздействия;
ЛСМ — линейно-спектральный метод;
МДР — метод динамического расчета;
МКЭ — метод конечных элементов;
МРЗ — максимальное расчетное землетрясение;
НДС — напряженно-деформированное состояние;
ННУЭ — нарушение нормальных условий эксплуатации;
ННЭ — нарушение нормальной эксплуатации;
НУЭ — нормальные условия эксплуатации;
НЭ — нормальная эксплуатация;
ПЗ — проектное землетрясение;
РУ — реакторная установка;
ТВС — тепловыделяющая сборка;
УПА — условия проектной аварии;
CFD — вычислительная динамика жидкости (computational fluid dynamics).

3.3 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

a_2 — повреждения от высокочастотных напряжений при постоянных эксплуатационных напряжениях;

a_3^* — повреждения от высокочастотных напряжений в течение циклов переменных напряжений при переходных эксплуатационных режимах;

a_3^{**} — повреждения от высокочастотных напряжений в течение циклов переменных напряжений при прохождении резонансных частот;

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

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

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

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

$(\sigma_s)_s$ — напряжения смятия с учетом сейсмических воздействий, МПа;
σ_{kr} — критическое напряжение сжатия, МПа;
$[\sigma_c]$ — допускаемое напряжение сжатия, МПа;
$[\sigma]_w$ — номинальное допускаемое напряжение в болте (шпильке), МПа;
$(\tau_s)_s$ — касательные напряжения среза с учетом сейсмических воздействий, МПа;
ξ — относительное демпфирование, %.

4 Общие положения

4.1 Особенности нагружения при внешних динамических воздействиях

4.1.1 При оценке прочности ТВС (компонентов ТВС) в качестве внешних динамических воздействий рассматривают внешние динамические воздействия природного (сейсмические воздействия) и техногенного (воздушная ударная волна, падение летательного аппарата) происхождения. При этом динамические нагрузки на ТВС, возникающие при действии ударной волны или летательного аппарата на строительные конструкции, рассматривают как сейсмические нагрузки, соответствующие максимальному расчетному землетрясению.

4.1.2 Внешние динамические воздействия представляют собой динамические нагрузки, действующие на элементы (компоненты) активной зоны РУ, т. е. изменяющиеся во времени распределенные и сосредоточенные силы, вызывающие вынужденные колебания компонентов ТВС. При колебаниях на компоненты ТВС действуют (дополнительно к весу и эксплуатационным нагрузкам) силы инерции, силы внутреннего трения и трения в подвижных механических соединениях, а в случае контакта компонента с теплоносителем — также гидродинамические силы, связанные с относительным движением участков конструкции и теплоносителя.

4.1.3 Расчет на прочность ТВС при внешних динамических воздействиях следует проводить на совместное действие эксплуатационных и динамических нагрузок. Общие положения и методы расчета принимаются по 4.2 и 4.3 соответственно.

4.1.4 Динамические нагрузки, обусловленные внешними динамическими воздействиями, оказывают влияние:

- на максимальные значения перемещений, деформаций, напряжений и опорных реакций в компоненте;
- на параметры циклического нагружения (дополнительные циклы изменения напряжений, вызывающие усталостное повреждение металла).

4.2 Методология расчета при внешних динамических воздействиях

4.2.1 Расчет на прочность при ВДВ заключается в определении НДС и оценках прочности компонентов ТВС по допускаемым значениям параметров НДС, приведенным в 5.4, а также проверке выполнения дополнительных требований, предусмотренных в проекте РУ.

Описание методов расчета ТВС при внешних динамических воздействиях приведено в приложении А. При проведении расчета допускается использование других методов, обеспечивающих выполнение установленных требований и отвечающих современному уровню развития науки и техники.

4.2.2 Расчет на прочность при ВДВ проводят с учетом совместного действия эксплуатационных нагрузок и динамических нагрузок, обусловленных внешним динамическим воздействием.

4.2.3 Для проведения расчета выбирают расчетные случаи нагружения, являющиеся сочетаниями эксплуатационных нагрузок, действующих на ТВС в расчетных режимах, и сейсмических нагрузок, согласно 5.1. Расчетные сочетания нагрузок по условиям эксплуатации, виду сейсмического воздействия и требований к прочности приведены в 5.4.

4.2.4 Допускается теплоноситель учитывать как присоединенная массу.

4.2.5 Влияние теплоносителя при расчетах прочности при действии ВДВ допускается выполнять численными методами, например МКЭ или CFD.

4.2.6 Расчеты методами CFD для учета влияния теплоносителя на ТВС со стороны теплоносителя при ВДВ могут быть проведены без учета податливости компонентов ТВС, которые допускается принять недеформируемыми. Расчет должен проводиться с использованием акселерограмм во всех действующих направлениях.

4.2.7 Метод учета динамических нагрузок, обусловленных внешними динамическими воздействиями, выбирают в зависимости от динамических характеристик конструкции ТВС, прежде всего собственных частот колебаний, имеющихся исходных данных и характеристик внешних воздействий.

В случае, если первая собственная частота колебаний выше 20 Гц, расчет на прочность при действии внешних динамических воздействий допускается выполнять статическим методом с умножением максимальных ускорений, определяемых исходными данными сейсмического воздействия, на коэффициент динамичности. Для частоты в диапазоне от 20 до 33 Гц коэффициент динамичности принимают равным 1,3, для частоты выше 33 Гц — равным 1.

4.2.8 Выбор метода расчета на прочность при действии внешних динамических воздействий должен проводиться с учетом положений, приведенных в 5.2.

4.3 Особенности расчета вибропрочности

Расчет ТВС на вибропрочность должен проводиться в случаях, если экспериментальное обоснование вибропрочности и результаты измерений вибраций ТВС при пусконаладочных работах на реакторах ВВЭР не охватывают всех проектных режимов эксплуатации ТВС (включая НЭ и ННЭ), а опыт эксплуатации прототипов отсутствует или является недостаточным.

5 Требования к расчету

5.1 Расчетные случаи нагружения

5.1.1 Расчет на прочность при ВДВ следует проводить в соответствии с положениями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [1].

5.1.2 Сейсмические нагрузки рассматриваются для случаев ПЗ и МРЗ. Исходными данными для расчета являются наборы акселерограмм, спектров ответа (или обобщенный спектр ответа), определенных для трех взаимно перпендикулярных направлений — вертикального и двух горизонтальных в месте закрепления ТВС.

5.1.3 При обосновании прочности ТВС при внешних динамических воздействиях должны быть учтены следующие нагружающие факторы и свойства конструкции ТВС:

- инерционные нагрузки, вызванные колебаниями конструкции при заданном сейсмическом воздействии;
- силы трения в конструкции, относительное вязкое демпфирование;
- для компонентов ТВС необходимо учитывать массу теплоносителя и гидродинамические силы, возникающие при колебаниях теплоносителя.

5.1.4 В расчете на прочность при внешних динамических воздействиях рассматривают эксплуатационные нагрузки, действующие во всех расчетных режимах нагружения ТВС, перечисленных в ГОСТ Р 70428, относящихся к следующим этапам:

- нормальные условия эксплуатации;
- нарушение нормальных условий эксплуатации;
- условия проектной аварии.

5.1.5 Расчет ТВС следует проводить на сочетания эксплуатационных и сейсмических нагрузок, приведенные в 5.4. В случае, если принятые для расчета акселерограммы для ПЗ и МРЗ различаются только амплитудами, допускается не рассматривать сочетание эксплуатационных нагрузок и ПЗ.

5.1.6 Сейсмические нагрузки на ТВС должны быть заданы с учетом одновременного сейсмического воздействия по трем пространственным направлениям в виде акселерограмм и (или) спектров ответа для различных осей координат.

5.2 Методы расчета

5.2.1 Для расчета на прочность при ВДВ следует использовать методы, обеспечивающие:

- определение параметров динамической реакции компонентов на сейсмические воздействия в виде зависимостей перемещений, скоростей, ускорений, деформаций, внутренних усилий и напряжений в конструкции от времени или частоты колебаний;
- определение результирующих параметров НДС компонентов ТВС при совместном действии динамических и эксплуатационных нагрузок в выбранных расчетных режимах (см. 5.1.5);
- проверку выполнения других установленных в проекте РУ дополнительных требований (при их наличии).

5.2.2 Динамическая реакция компонента должна анализироваться в рамках механической системы, в которую он входит, с учетом связей с другими составными частями системы и их влияния на колебания компонента.

5.2.3 В случае если эксплуатационные нагрузки не вызывают существенного изменения параметров колебаний, возбуждаемых сейсмическим воздействием, то динамическую реакцию компонента и соответствующие динамические составляющие параметров НДС допускается определять независимо от расчета параметров НДС, вызванного эксплуатационными нагрузками. Допущение о независимости динамической реакции при сейсмическом воздействии от эксплуатационных нагрузок должно быть обосновано в расчете.

5.2.4 Диапазон частот, рассматриваемых при расчете, должен включать основные тона, вносящие наиболее существенный вклад в параметры его динамической реакции. При определении количества низших частот и форм колебаний, используемых в расчете, допускается использовать критерии, приведенные в А.3 приложения А. Ограничение рассматриваемого диапазона частот должно быть обосновано в расчете.

5.2.5 Для расчета параметров динамической реакции компонента допускается применять линейные методы, соответствующие линейной форме уравнений динамического равновесия анализируемой механической системы. Для учета факторов нелинейной природы, описываемых с помощью нелинейных уравнений динамического равновесия, следует использовать нелинейные методы. К таким факторам относятся:

- физическая нелинейность материала (нелинейная зависимость между напряжениями и деформациями);
- геометрическая нелинейность (связанная с существенными изменениями относительного положения или формы частей конструкции ТВС в процессе деформирования);
- структурная нелинейность (обусловленная изменением граничных условий, включая условия контакта и силы сухого трения, изменением, в том числе разрывом или наложением связей между частями конструкции ТВС).

Возможность применения линейных методов или необходимость использования нелинейных методов должны быть обоснованы в расчете.

5.2.6 Рекомендуемые методы расчета ТВС на внешние динамические воздействия приведены в приложении А.

5.2.7 Проверку критериев прочности выполняют согласно положениям 5.4.

5.3 Исходные данные для расчета

5.3.1 Исходными данными для расчета на прочность при ВДВ являются:

- параметры конструкции ТВС (геометрические характеристики сборочных единиц и деталей, характеристики их соединения между собой, механические свойства основных и сварочных материалов), включая узлы крепления компонента внутри реактора или к другому компоненту;
- условия контакта компонента с теплоносителем и физико-механические свойства теплоносителя (плотность, вязкость и другие необходимые характеристики);
- характеристики сейсмических воздействий (ПЗ и МРЗ) в виде акселерограмм и (или) поэтажных спектров ответа, применимых для рассматриваемого компонента и соответствующих трем взаимно перпендикулярным направлениям (вертикальному и двум горизонтальным), включая колебания на узлах крепления;
- эксплуатационные нагрузки и/или параметры НДС в режимах НУЭ, ННУЭ и УПА;
- параметры внутреннего трения в конструкции ТВС.

5.3.2 Значения физико-механических характеристик материалов ТВС следует принимать согласно ГОСТ Р 70430, либо по проектной конструкторской документации.

5.3.3 Принимаемые при расчете значения физико-механических характеристик основных и сварочных материалов, а также теплоносителя, должны соответствовать рассматриваемым эксплуатационным условиям и воздействиям.

5.3.4 При расчете рассматриваемого компонента значения относительного демпфирования ξ, при отсутствии специального обоснования, следует принимать равным 2,0 %.

5.3.5 Расчет на прочность при ВДВ протяженных конструкций должен выполняться с учетом различия в условиях сейсмического нагружения различных точек крепления. При использовании спектров ответа следует рассматривать возможность неодновременного действия максимальных ускорений в разных точках крепления.

5.4 Критерии прочности

5.4.1 Оценку прочности ТВС при ВДВ выполняют по допускаемым напряжениям, по допускаемым перемещениям, по критериям циклической прочности и устойчивости.

5.4.2 Напряжения на компонентах ТВС не должны превосходить допускаемых значений, приведенных в таблицах 5.1—5.3. При выборе расчетных сочетаний и допускаемых напряжений нагрузки от ПС и ВУВ рассматриваются как соответствующие МРЗ. Номинальные допускаемые напряжения [σ] должны быть определены согласно ГОСТ Р 70428 по кратковременным механическим характеристикам материалов, в соответствии с температурой эксплуатации соответствующего компонента.

5.4.3 Расчет на циклическую прочность при сейсмических воздействиях следует проводить с использованием кратковременных механических характеристик материалов в соответствии с положениями ГОСТ Р 70428.

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 на стадии проектирования допускается не проводить в случае, если суммарное усталостное повреждение от эксплуатационных нагрузок, действующих на конструкцию без учета сейсмических воздействий, не превышает 0,8.

5.4.4 При расчете на устойчивость при сейсмических воздействиях допускаемые напряжения следует принимать равными

$$[\sigma_c] = 0{,}7\sigma_{kr} \text{ при } \sigma_{kr} < R^T_{p0,2}, \quad (5.1)$$

$$[\sigma_c] = 0{,}7R^T_{p0,2} \text{ при } \sigma_{kr} \geq R^T_{p0,2}. \quad (5.2)$$

5.4.5 При расчете устойчивости допускается использовать методы расчета, приведенные в ГОСТ Р 70428.

5.4.6 Допускаемые значения перемещений компонентов ТВС, влияющих на работу органов регулирования при сейсмическом воздействии задаются проектной (конструкторской) организацией в зависимости от условий эксплуатации ТВС.

Таблица 5.1 — Сочетания нагрузок и допускаемые напряжения для компонентов ТВС

Сочетание нагрузок	Расчетная группа категорий напряжений	Допускаемое напряжение
НУЭ + МРЗ	$(\sigma_s)_1$ $(\sigma_s)_2$	1,4[σ] 1,8[σ]
ННУЭ + МРЗ	$(\sigma_s)_1$ $(\sigma_s)_2$	1,4[σ] 1,8[σ]
УПА + ПЗ	$(\sigma_s)_1$ $(\sigma_s)_2$	1,4[σ] 1,8[σ]
НУЭ + ПЗ	$(\sigma_s)_1$ $(\sigma_s)_2$	1,2[σ] 1,6[σ]
ННУЭ + ПЗ	$(\sigma_s)_1$ $(\sigma_s)_2$	1,2[σ] 1,6[σ]

Таблица 5.2 — Сочетания нагрузок и допускаемые касательные напряжения среза

Сочетание нагрузок	Категория напряжений	Допускаемое напряжение	
		для болтов и шпилек	для компонентов ТВС, кроме болтов и шпилек
НУЭ + МРЗ	$(\tau_s)_s$	$0{,}7[\sigma]_w$	0,7[σ]
ННУЭ + МРЗ	$(\tau_s)_s$	$0{,}7[\sigma]_w$	0,7[σ]
УПА + ПЗ	$(\tau_s)_s$	$0{,}7[\sigma]_w$	0,7[σ]
НУЭ + ПЗ	$(\tau_s)_s$	$0{,}6[\sigma]_w$	0,6[σ]
ННУЭ + ПЗ	$(\tau_s)_s$	$0{,}6[\sigma]_w$	0,6[σ]

Таблица 5.3 — Значения допускаемых напряжений смятия

Сочетание нагрузок	Категория напряжений	Допускаемое напряжение
НУЭ + МРЗ	$(\sigma_s)_s$	2,7[σ]
ННУЭ + МРЗ	$(\sigma_s)_s$	2,7[σ]

Окончание таблицы 5.3

Сочетание нагрузок	Категория напряжений	Допускаемое напряжение
УПА + ПЗ	$(\sigma_s)_s$	2,7[σ]
НУЭ + ПЗ	$(\sigma_s)_s$	2,5[σ]
ННУЭ+ПЗ	$(\sigma_s)_s$	2,5[σ]

6 Расчет на вибропрочность

6.1 Расчет на вибропрочность ТВС следует проводить для компонентов ТВС, подвергающихся вибрационному нагружению.

6.2 Расчетом ТВС на вибропрочность должно быть обосновано, что вибрационные воздействия не приведут к появлению недопустимых амплитуд колебаний компонентов ТВС и ТВС в целом во всех проектных режимах эксплуатации ТВС.

6.3 Расчет на вибропрочность должен содержать:

- определение спектра собственных частот и форм колебаний;
- определение амплитуд и частот вынужденных колебаний;
- проверку на отсутствие виброударных взаимодействий элементов с целью исключения повышенного износа;
- расчет на циклическую прочность с учетом вибронапряжений.

6.4 Расчет собственных частот колебаний компонентов и возникающих в них вибронапряжений может быть проведен численно, например, с помощью метода конечных элементов.

6.5 Для исключения возможных соударений однотипных компонентов, объединенных в группы (пакеты), должно выполняться условие

$$A < \frac{t-d}{2}, \tag{6.1}$$

где A — максимальная амплитуда виброперемещения компонента;

t — шаг элементов с наибольшим размером d в поперечном сечении, мм;

d — размер компонента в поперечном сечении, мм.

Для произвольных компонентов, расположенных с зазором Δ, мм, данное условие следует использовать в виде

$$|A_1| + |A_2| < \Delta, \tag{6.2}$$

где A_1 и A_2 — амплитуды виброперемещений соответствующих компонентов, мм.

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

$$\overline{A} + 3\varphi, \tag{6.3}$$

где φ — среднеквадратическое отклонение от среднего значения амплитуды виброперемещений $\overline{A}$, мм.

6.6 Расчет на циклическую прочность с учетом вибронапряжений проводят в соответствии с ГОСТ Р 70428.

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

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

Повреждение a_3^* определяют с учетом трех максимальных амплитуд высокочастотных напряжений без учета концентрации $\langle\sigma_a\rangle_1$, $\langle\sigma_a\rangle_2$, $\langle\sigma_a\rangle_3$ и соответствующих им частот f_1, f_2, f_3 для каждого типа цикла переменного напряжения на переходных режимах. Для низкочастотного цикла i-го типа по формулам для χ в ГОСТ Р 70428 должны быть определены значения χ_{1i}, χ_{2i}, χ_{3i}, а при определении (a_3) коэффициент χ_i следует вычислять по формуле

$$\chi_i = \sqrt{(\chi_1)_i^2 + (\chi_2)_i^2 + (\chi_3)_i^2}. \quad (6.4)$$

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

6.7 Возбуждение, связанное с пульсациями давлений и скоростей потока теплоносителя, в частности возникающими при продольном и косом обтекании компонентов, в общем случае рассматривают как процесс нагружения с широкополостным спектром, имеющим случайный характер.

В этом случае следует выполнить расчет на циклическую прочность в соответствии с ГОСТ Р 70428 по значениям амплитуд переменных напряжений, полученных экспериментально на моделях или натурных конструкциях.

6.8 Для оценки уровня вибраций и вибронапряженности в случае отсутствия расчетных методик и сведений о параметрах действующих динамических нагрузок следует использовать методы экспериментального обоснования.

Приложение А
(рекомендуемое)

Методы расчета тепловыделяющих сборок при внешних динамических воздействиях

А.1 Моделирование теплоносителя

А.1.1 Определение влияния теплоносителя на формы и частоты колебаний, прочность при ВДВ рекомендуется определять экспериментально или численными методами. Допускается, для оценочных расчетов применять приближенные аналитические зависимости, представленные в данном приложении.

А.1.2 Моделирование жидкого теплоносителя должно обеспечивать учет влияния колебаний теплоносителя на динамическую реакцию компонента ТВС и учет гидродинамических сил, вызванных относительным движением участков конструкции и теплоносителя, в диапазоне частот сейсмического воздействия с требуемой точностью.

А.1.3 Вид колебаний теплоносителя и характер гидродинамических сил, действующих на ТВС, определяются следующими факторами:

- вязкостью и сжимаемостью теплоносителя в эксплуатационных условиях;
- формой и амплитудой колебаний конструкции при ВДВ.

В зависимости от этих факторов выбирают способ моделирования теплоносителя. Допускается моделирование теплоносителя аналитическими или упрощенными численными методами, как это описано в А.1.4—А.1.6.

А.1.4 В случае малых упругих колебаний конструкции, полностью погруженной в теплоноситель, являющийся ньютоновской жидкостью, поведение теплоносителя характеризуется изменениями давления в соответствии с колебаниями конструкции, а гидродинамическое воздействие теплоносителя на конструкцию можно учитывать посредством присоединенной массы. Для элемента, погруженного в теплоноситель, присоединенная масса $\left[\tilde{M}\right]_e$ определяется как

$$\left[\tilde{M}\right]_e = [M]_e + \upsilon[M_0]_e, \qquad (А.1)$$

где $[M_0]_e$ — матрица инерции теплоносителя в объеме конечного элемента в локальных координатах;

$[M]_e$ — матрица инерции конечного элемента в локальных координатах;

υ — коэффициент присоединенной массы.

А.1.5 Коэффициент присоединенной массы υ следует определять экспериментально. При отсутствии экспериментального обоснования, допускается для некоторых элементов простой формы определять коэффициент присоединенной массы по следующим правилам:

- для элементов, находящихся в безграничной жидкости — по таблице А.1;
- для пакета цилиндрических стержней, расположенных по квадратной или треугольной сетке — по рисунку А.2;
- для сосуда или трубчатого стержня, полностью заполненного жидкостью, а также для вертикальных цилиндрических сосудов с отношением высоты столба жидкости к радиусу сосуда более четырех, υ = 1,0;
- способ схематизации конструкции определяется в зависимости от требуемой точности приближения, допускается моделировать отдельным стержнем как отдельный твэл, так и ТВС в целом, в зависимости от особенностей конструкции.

Таблица А.1 — Значения коэффициента присоединенной массы

Форма элемента	Направление колебаний	υ
Длинный цилиндр ($l \geq 8d$)	Перпендикулярно к продольной оси	1,0
Короткий цилиндр ($l < 8d$)	Перпендикулярно к продольной оси	По рисунку А.1
Пакет цилиндрических стержней	Перпендикулярно к продольной оси	По рисунку А.2

А.1.6 В случае, если при сейсмическом воздействии компонент, полностью заполненный теплоносителем, движется как жесткое целое на узлах крепления, парциальные колебания теплоносителя можно не учитывать и принимать в расчет только его инерционные характеристики (т. е. отказаться от выделения в расчетной модели соответствующей колебательной подсистемы).

А.1.7 Для случаев, когда нельзя пренебречь вязкостью или сжимаемостью, для моделирования теплоносителя необходимо использовать численные методы, обеспечивающие адекватный учет всех факторов, которые оказывают существенное влияние на колебания теплоносителя и параметры его гидродинамического воздействия на конструкцию. К таким методам относятся МКЭ или CFD.

А.1.8 Для верификации результатов расчетов с использованием указанных методов применимы экспериментальные данные, модельные решения на простых примерах или анализ чувствительности к вариации параметров моделирования.

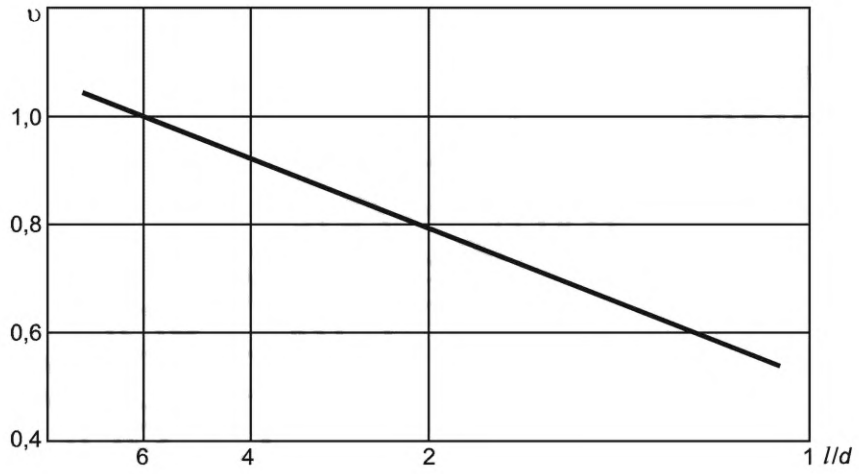
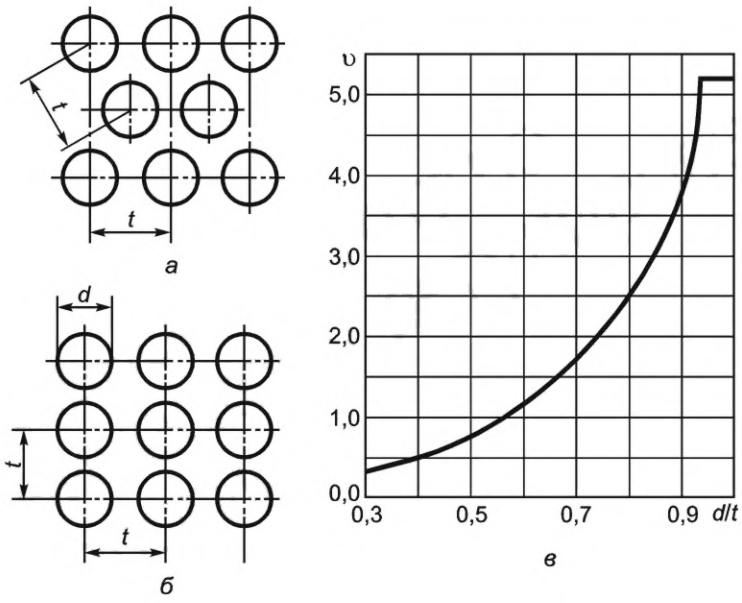


Рисунок А.1 — Коэффициент присоединенной массы υ для одиночных цилиндрических стержней при колебаниях в безграничном объеме жидкости



а — расположение стержней по треугольной сетке; *б* — расположение стержней по квадратной сетке; *в* — коэффициент υ

Рисунок А.2 — Коэффициент присоединенной массы υ для пакетов цилиндрических стержней

А.2 Выбор метода расчета

А.2.1 Расчет параметров динамической реакции компонента на сейсмическое воздействие проводят во временной или частотной области. Функции изменения искомых параметров динамической реакции во времени определяют с помощью МДР, в частотной области — с помощью ЛСМ.

Тот или иной метод выбирают в зависимости от вида исходных данных, задающих сейсмическое воздействие, и возможного проявления нелинейных факторов, с учетом требуемой точности оценки прочности при ВДВ. При выборе рекомендуется руководствоваться таблицей А.2.

Таблица А.2 — Рекомендуемые методы расчета параметров динамической реакции

Характеристика задачи в отношении нелинейных факторов	Вид исходных данных сейсмического воздействия	
	Спектры ответа	Акселерограммы
Линейная	ЛСМ	МДР
Нелинейная	—	МДР

А.2.2 ЛСМ является приближенным методом расчета параметров динамической реакции элементов РУ по спектрам ответа $a(f, \xi)$, которые задают максимальные ответные ускорения на сейсмическое воздействие линейно-упругой системы с одной степенью свободы (осциллятора) в зависимости от собственной частоты колебаний f и относительного демпфирования ξ.

А.2.3 МДР представляет собой численный метод решения уравнений динамического равновесия элементов РУ, представленного расчетной динамической моделью с множеством степеней свободы, при возбуждении колебаний сейсмическими ускорениями, действующими на границе модели и заданными посредством акселерограмм $a(t)$.

А.2.4 При выборе в качестве метода расчета ЛСМ следует иметь в виду, что в спектрах ответа не учитываются парциальные динамические характеристики конструкции элемента, рассматриваемого как осциллятор, и их влияние на колебания конструкции, на которой он закреплен (строительной конструкции или другого элемента). Вследствие этого ЛСМ применим, в основном для расчета параметров динамической реакции компактных, жестких, сравнительно легких элементов, собственные колебания конструкции которых лежат за пределами диапазона частот сейсмического воздействия. Кроме этого, в спектрах ответа отсутствует информация о фазовых сдвигах составляющих ускорений, имеющих разные частоты, относительно друг друга. В результате с помощью ЛСМ можно получить только приближенную оценку максимальных значений параметров динамической реакции элемента на сейсмическое воздействие.

А.2.5 МДР обеспечивает определение параметров динамической реакции элемента в широком диапазоне частот колебаний, в том числе с учетом разновременности действия составляющих с разными частотами.

В случае, когда сейсмическое воздействие задано спектрами ответа, но необходим учет нелинейных факторов или требуется повышенная точность оценки прочности при ВДВ, возможно применение МДР при условии предварительного синтеза акселерограмм на основе спектров ответа.

А.3 Количество собственных частот и форм, учитываемых в расчете

А.3.1 При суммировании составляющих динамического отклика от различных тонов колебаний достаточная точность оценки может быть достигнута для количества тонов (собственных форм колебаний), значительно меньшем количества степеней свободы анализируемой системы.

А.3.2 Заданная точность может быть обеспечена методом последовательных приближений. При данном подходе динамический отклик системы вычисляют, последовательно увеличивая количество учтенных в расчете собственных частот и форм колебаний, начиная с меньших номеров, до тех пор, пока изменение отклика не станет приемлемо малым.

Для систем с большим числом степеней свободы допускается применение критерия учтенной массы. Учтенная масса M_a определяется следующим соотношением:

$$M_a = \sum_{j=1}^{s} \Gamma_j^2 m_j^*, \tag{А.2}$$

где s — количество учтенных в расчете собственных частот и форм системы;

Γ_j — модальный коэффициент участия j-й собственной формы колебаний;

m_j^* — модальная масса j-й собственной формы колебаний.

Модальные массы и модальные коэффициенты участия вычисляются по формулам:

$$m_j^* = \left\{ \varphi_j \right\}^T [M] \left\{ \varphi_j \right\}; \tag{А.3}$$

$$\Gamma_j = \frac{\left\{ \varphi_j \right\}^T [M] \left\{ J_x \right\}}{\left\{ \varphi_j \right\}^T [M] \left\{ \varphi_j \right\}}, \tag{А.4}$$

где $\{\varphi_j\}$ — вектор j-й собственной формы колебаний системы;

$\{J_x\}$ — вектор косинусов углов между направлениями перемещений по степеням свободы системы и направлением x ускорения основания. Для вращательных степеней свободы компоненты данного вектора должны быть приравнены нулю;

$[M]$ — матрица инерции системы;

$\{\varphi_j\}^T$ — транспонированный вектор j-й собственной формы колебаний системы.

Количество низших собственных частот и форм колебаний, учитываемых в расчете, s, должно выбираться таким, чтобы учтенная масса M_a составляла не менее 90 % полной массы системы по каждому из направлений x, y, z, в которых заданы ускорения основания.

Библиография

[1] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-094-15 Основные требования к обоснованию прочности и термомеханического поведения тепловыделяющих сборок и тепловыделяющих элементов в активной зоне водо-водяных энергетических реакторов

УДК 621.039:531:006.354 ОКС 27.120.20

Ключевые слова: прочность, расчет при динамических нагрузках, проектная стадия эксплуатации

Редактор *Л.В. Коретникова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Р.А. Ментова*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 29.12.2022. Подписано в печать 20.01.2023. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,64.

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