ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 71789— 2024

ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЕ СБОРКИ РЕАКТОРОВ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Расчет на прочность при действии динамических нагрузок

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2025

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

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

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

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 декабря 2024 г. № 2080-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

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

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

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2025

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

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения, сокращения и обозначения 2
4 Общие положения 3
5 Требования к расчету 4
6 Расчет на вибропрочность 7
Приложение А (рекомендуемое) Методы расчета тепловыделяющих сборок при внешних динамических воздействиях 9

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЕ СБОРКИ РЕАКТОРОВ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Расчет на прочность при действии динамических нагрузок

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

Дата введения — 2025—04—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает требования к проведению расчетов на прочность тепловыделяющих сборок реакторов с натриевым теплоносителем при действии 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, устанавливающими основные требования к обоснованию прочности и термомеханического поведения тепловыделяющих сборок и тепловыделяющих элементов в активной зоне реакторов с натриевым теплоносителем.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 24346 Вибрация. Термины и определения

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

ГОСТ Р 71786 Тепловыделяющие элементы реакторов с натриевым и свинцовым теплоносителем. Расчет на прочность

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

ГОСТ Р 71788—2024 Тепловыделяющие сборки реакторов с натриевым теплоносителем. Расчет на прочность при действии статических нагрузок

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

Издание официальное

3 Термины, определения, сокращения и обозначения

3.1 Термины и определения

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

3.1.1 **динамические характеристики:** Параметры механической системы, характеризующие ее собственные колебания.

Примечание — К динамическим характеристикам относятся собственные частоты и формы колебаний, модальные массы и жесткости форм колебаний, демпфирование, амплитудные и фазовые частотные характеристики (для установившихся вынужденных колебаний).

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

3.1.3 **механическая система:** Совокупность компонентов, рассматриваемая в расчете с учетом совместного взаимодействия.

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

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

3.1.6 **расчетный случай нагружения:** Сочетание условий нагружения тепловыделяющей сборки, рассматриваемое при расчете на прочность.

3.1.7 **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.

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

Примечание — Формы колебаний при расчете определяются как собственные векторы обобщенной проблемы собственных значений.

3.1.9 **собственная частота:** Частота колебаний механической системы по определенному тону собственных колебаний.

Примечание — Собственные частоты при расчете определяются в результате решения обобщенной проблемы собственных значений.

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

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

3.2 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

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;
ТВЭЛ — тепловыделяющий элемент;
УПА — условия проектной аварии;
УНП — ускорение нулевого периода;
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;

f — частота высокочастотных циклов нагружения, Гц;

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

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

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

$[\sigma]_w$ — номинальное допускаемое напряжение в болте (шпильке), МПа;

σ_{kr} — критическое 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;

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

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

χ — коэффициент снижения долговечности при наложении высокочастотных циклов.

4 Общие положения

4.1 Особенности учета динамических нагрузок

4.1.1 При оценке прочности ТВС в качестве динамических нагрузок рассматривают вибрационные воздействия, внешние динамические воздействия природного происхождения — сейсмические воздействия и внешние динамические воздействия техногенного происхождения — воздушная ударная волна, падение летательного аппарата.

4.1.2 Расчет на прочность ТВС при внешних динамических воздействиях природного и техногенного происхождения следует проводить на совместное действие эксплуатационных и динамических нагрузок. Динамические нагрузки на ТВС, возникающие от техногенных воздействий на строительные конструкции, при оценках прочности рассматривают как сейсмические нагрузки, соответствующие максимальному расчетному землетрясению. Общие положения и методы расчета принимаются по 4.2.

4.1.3 Расчет при вибрационных воздействиях следует проводить для ТВС совместно с твэлами, в соответствии с 4.3 и разделом 6.

4.2 Методология расчета при внешних динамических воздействиях

4.2.1 Расчет на прочность при ВДВ заключается в определении НДС и оценках прочности компонентов по допускаемым значениям параметров НДС, приведенным в 5.4. Твэлы учитываются в расчетных схемах ТВС, а оценки прочности твэлов проводятся по ГОСТ Р 71786.

4.2.2 Для проведения расчета выбирают расчетные случаи нагружения, являющиеся сочетаниями эксплуатационных нагрузок, действующих на компоненты и твэлы 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.

4.2.3 Допускается учитывать теплоноситель как жидкость с соответствующими физико-механическими характеристиками, либо как присоединенную массу. Рекомендуемые методы учета влияния теплоносителя приведены в А.1.

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

4.2.5 Расчеты методами CFD для учета влияния теплоносителя на компоненты и твэлы со стороны теплоносителя при ВДВ могут быть проведены без учета податливости компонентов и твэлов, которые допускается принять недеформируемыми. Расчет следует проводить с использованием акселерограмм во всех действующих направлениях.

4.2.6 Метод учета динамических нагрузок, обусловленных сейсмическим воздействием, выбирают в зависимости от динамических характеристик ТВС и твэлов, прежде всего собственных частот колебаний (включая колебания на узлах крепления) и имеющихся исходных данных при оценке прочности при ВДВ.

В общем случае выбор метода расчета на прочность при действии внешних динамических воздействий следует проводить с учетом положений, приведенных в 5.2.

4.3 Особенности расчета вибропрочности

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

5 Требования к расчету

5.1 Расчетные случаи нагружения

5.1.1 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.

5.1.2 При обосновании прочности при ВДВ и сейсмических воздействиях компонентов и твэлов должны быть учтены следующие нагружающие факторы и свойства ТВС:

- инерционные нагрузки, вызванные колебаниями ТВС при заданном сейсмическом воздействии;
- силы трения в компонентах ТВС, относительное вязкое демпфирование;
- масса теплоносителя и гидродинамические силы, возникающие при колебаниях теплоносителя;
- массогабаритные и жесткостные характеристики твэлов.

5.1.3 В расчете на сейсмическую прочность рассматривают эксплуатационные нагрузки, действующие во всех расчетных режимах нагружения ТВС, перечисленных в ГОСТ Р 71788, относящихся к следующим условиям эксплуатации:

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

5.1.4 Расчет компонентов 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 нагрузок НУЭ + ПЗ.

5.1.5 Сейсмические нагрузки на компоненты 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 ТВС от времени или частоты колебаний;
- определение результирующих параметров НДС компонентов и твэлов при совместном действии динамических и эксплуатационных нагрузок в выбранных расчетных режимах (см. 5.1.4);
- проверку выполнения других установленных в проекте РУ дополнительных требований (при их наличии).

5.2.2 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.

5.2.3 В общем случае динамическая реакция компонента или твэла должна анализироваться в рамках механической системы, в которую он входит, с учетом связей с другими составными частями системы и их влияния на колебания компонента.

5.2.4 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 или модального метода, в частотной области — с помощью ЛСМ или квазистатического метода.

Тот или иной метод следует выбирать в зависимости от параметров колебаний компонента, вида исходных данных, задающих сейсмическое воздействие, и возможного проявления факторов нелинейности, с учетом требуемой консервативности оценки прочности при ВДВ. При выборе метода расчета параметров динамической реакции следует руководствоваться таблицей 5.1.

Таблица 5.1 — Методы расчета параметров динамической реакции

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

5.2.5 К факторам нелинейности относятся:

- физическая нелинейность материала (нелинейная зависимость между напряжениями и деформациями);
- геометрическая нелинейность (связанная с существенными изменениями относительного положения или формы компонентов 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 и т. п.).

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

Возможность применения линейных методов должна быть обоснована в расчете.

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

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

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

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

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

При расчете ЛСМ или модальным методом следует определять все собственные формы механической системы, частоты которых не превышают частоту отсечки.

5.2.8 В диапазон частот, рассматриваемых при расчете в частотной области, следует 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.2. Ограничение рассматриваемого диапазона частот должно быть обосновано в расчете.

5.3 Исходные данные для расчета

5.3.1 Значения физических и механических характеристик конструкционных материалов следует принимать в соответствии с действующими нормативными правовыми актами и/или федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии, устанавливающими основные требования

к обоснованию прочности и термомеханического поведения тепловыделяющих сборок и тепловыделяющих элементов в активной зоне реакторов с натриевым теплоносителем, и/или проектной конструкторской документацией, и/или обосновывающим отчетом, разработанным в соответствии с ГОСТ Р 71787.

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

5.3.3 При расчете рассматриваемого компонента значение относительного демпфирования ξ следует принимать равным 2,0 %.

5.3.4 Расчет на прочность ТВС при ВДВ следует проводить с учетом возможного различия в условиях сейсмического нагружения различных точек крепления. В частности, 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 следует выполнять по допускаемым напряжениям, допускаемым перемещениям, критериям циклической прочности и устойчивости.

5.4.2 Напряжения в компонентах ТВС не должны превосходить допускаемых значений, приведенных в таблицах 5.2—5.4 для сочетаний условий эксплуатации с различными ВДВ. Номинальные допускаемые напряжения $[\sigma]$ должны быть определены согласно ГОСТ Р 71788 по кратковременным механическим характеристикам конструкционных материалов, в соответствии с температурой эксплуатации соответствующего компонента и с учетом эксплуатационных факторов.

5.4.3 Расчет на циклическую прочность при сейсмических воздействиях следует проводить с использованием кратковременных механических характеристик конструкционных материалов в соответствии с положениями ГОСТ Р 71788.

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, если значение суммарного повреждения от эксплуатационных нагрузок, действующих на конструкцию без учета сейсмических воздействий, не превышает 0,8.

Таблица 5.2 — Допускаемые напряжения для компонентов

Сочетание условий эксплуатации с ВДВ	Расчетная группа категорий напряжений	Допускаемое напряжение
НУЭ + МРЗ	$(\sigma_s)_1$ $(\sigma_s)_2$	$1,4 \cdot [\sigma]$ $1,8 \cdot [\sigma]$
ННУЭ + МРЗ	$(\sigma_s)_1$ $(\sigma_s)_2$	$1,4 \cdot [\sigma]$ $1,8 \cdot [\sigma]$
УПА + ПЗ	$(\sigma_s)_1$ $(\sigma_s)_2$	$1,4 \cdot [\sigma]$ $1,8 \cdot [\sigma]$
НУЭ + ПЗ	$(\sigma_s)_1$ $(\sigma_s)_2$	$1,2 \cdot [\sigma]$ $1,6 \cdot [\sigma]$
ННУЭ + ПЗ	$(\sigma_s)_1$ $(\sigma_s)_2$	$1,2 \cdot [\sigma]$ $1,6 \cdot [\sigma]$

Таблица 5.3 — Допускаемые касательные напряжения среза

Сочетание условий эксплуатации с ВДВ	Категория напряжений	Допускаемое напряжение	
НУЭ + МРЗ	$(\tau_s)_s$	$0,7 \cdot [\sigma]_w$	$0,7 \cdot [\sigma]$
ННУЭ + МРЗ	$(\tau_s)_s$	$0,7 \cdot [\sigma]_w$	$0,7 \cdot [\sigma]$
УПА + ПЗ	$(\tau_s)_s$	$0,7 \cdot [\sigma]_w$	$0,7 \cdot [\sigma]$
НУЭ + ПЗ	$(\tau_s)_s$	$0,6 \cdot [\sigma]_w$	$0,6 \cdot [\sigma]$
ННУЭ + ПЗ	$(\tau_s)_s$	$0,6 \cdot [\sigma]_w$	$0,6 \cdot [\sigma]$

Таблица 5.4 — Значения допускаемых напряжений смятия

Сочетание условий эксплуатации с ВДВ	Категория напряжений	Допускаемое напряжение
НУЭ + МРЗ	$(\sigma_s)_s$	2,7 · [σ]
ННУЭ + МРЗ	$(\sigma_s)_s$	2,7 · [σ]
УПА + ПЗ	$(\sigma_s)_s$	2,7 · [σ]
НУЭ + ПЗ	$(\sigma_s)_s$	2,5 · [σ]
ННУЭ + ПЗ	$(\sigma_s)_s$	2,5 · [σ]

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 71788.

5.4.6 Допускаемые значения перемещений компонентов при сейсмическом воздействии задаются проектной (конструкторской) организацией в зависимости от условий эксплуатации ТВС.

6 Расчет на вибропрочность

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

6.2 Расчет на вибропрочность должен содержать:

- определение спектра собственных частот и форм колебаний и проверку условий их отстройки от детерминированных частот возбуждения;
- определение амплитуд и частот вынужденных колебаний;
- проверку на отсутствие виброударных взаимодействий компонентов с целью исключения повышенного износа;
- расчет на циклическую прочность с учетом вибронапряжений.

6.3 Допускается расчет собственных частот колебаний и возникающих в компонентах вибронапряжений проводить численно, например с помощью МКЭ.

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

а) для первых трех собственных форм колебаний компонентов в каждой плоскости

$$\Omega_i \geq 1{,}3\omega \text{ или } \Omega_i \leq 0{,}7\omega,\ i = 1, 2, 3, \quad (6.1)$$

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

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

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

$$\Omega_i \geq 1{,}1\omega \text{ или } \Omega_i \leq 0{,}9\omega,\ i = 4, 5,\ldots. \quad (6.2)$$

В случае невыполнения условий (6.1) и (6.2) необходимо показать, что уровни вибраций (вибронапряжений) компонентов находятся в допустимых пределах, то есть подтвердить вибропрочность расчетным или экспериментальным путем.

6.5 Для исключения возможных соударений твэлов должно выполняться условие

$$A < \frac{t - d}{2}, \quad (6.3)$$

где A — максимальная амплитуда виброперемещения твэла, мм;

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

d — размер твэла в поперечном сечении, мм.

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

$$|A_1| + |A_2| < \Delta, \tag{6.4}$$

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

$$A = \overline{A} + 3\varphi, \tag{6.5}$$

где $\overline{A}$ — среднее значение амплитуды виброперемещения, мм;

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

6.6 Расчет на циклическую прочность с учетом вибронапряжений проводят в соответствии с ГОСТ Р 71788.

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

При широкополосном спектре значение a_2 определяют как сумму повреждений для тех амплитуд местных напряжений и соответствующих им частот, которые вызывают повреждения более 10 % максимального повреждения на одном из сочетаний амплитуды и 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 по ГОСТ Р 71788—2024 (раздел 10) 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 71788—2024 (раздел 10) следует определять значения χ_{1i}, χ_{2i}, χ_{3i} с использованием значений $\langle\sigma_a\rangle_1$, $\langle\sigma_a\rangle_2$, $\langle\sigma_a\rangle_3$ и f_1, f_2, f_3, а при определении a_3^* коэффициент χ_i следует определять по формуле

$$\chi_i = \sqrt{(\chi_{1i})^2 + (\chi_{2i})^2 + (\chi_{3i})^2}\ . \tag{6.6}$$

Долю повреждений a_3^{**} определяют по ГОСТ Р 71788—2024 (раздел 10) с учетом максимальной амплитуды высокочастотного напряжения при прохождении резонанса. Число циклов определяют с учетом времени 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 широкополосным спектром, имеющим случайный характер.

В этом случае вибропрочность оценивается расчетом долговечности ТВС по значениям амплитуд переменных напряжений, полученных экспериментально на моделях или натурных образцах ТВС.

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 Влияние 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 отображение вклада колебаний теплоносителя в динамическую реакцию компонента и учет гидродинамических сил, вызванных относительным движением участков компонентов и теплоносителя, в диапазоне частот сейсмического воздействия.

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 ТВС при ВДВ.

В зависимости от этих факторов выбирают способ моделирования теплоносителя. Для некоторых сочетаний факторов возможно моделирование теплоносителя аналитическими или упрощенными численными методами, как это описано в А.1.4 и А.1.5.

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

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

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

ν — коэффициент присоединенной массы;

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

А.1.5 Коэффициент присоединенной массы ν следует определять экспериментально. При отсутствии экспериментального обоснования, допускается для некоторых компонентов 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 $\nu = 1{,}0$;
- 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	ν
Длинный цилиндр ($l \geq 8d$)	Перпендикулярно продольной оси	1,0
Короткий цилиндр ($l < 8d$)	Перпендикулярно продольной оси	По рисунку А.1
Пакет цилиндрических стержней	Перпендикулярно продольной оси	По рисунку А.2
Примечания 1 l — длина цилиндра. 2 d — наружный диаметр цилиндра.		

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).

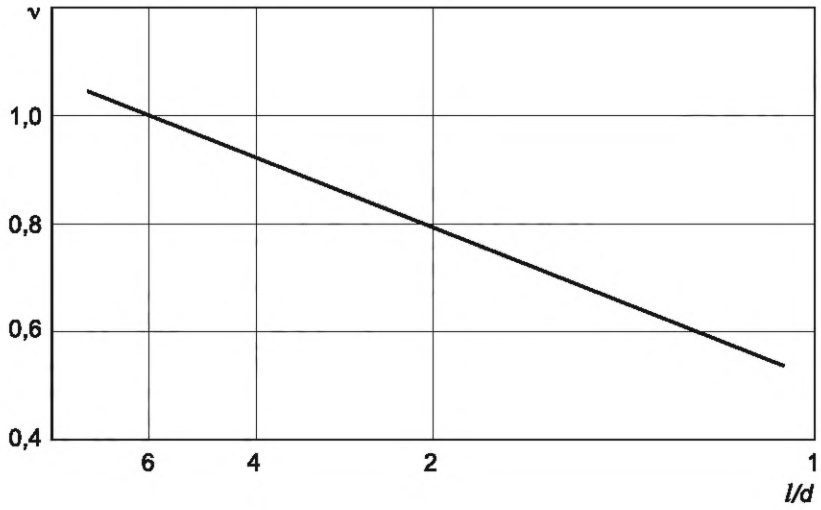
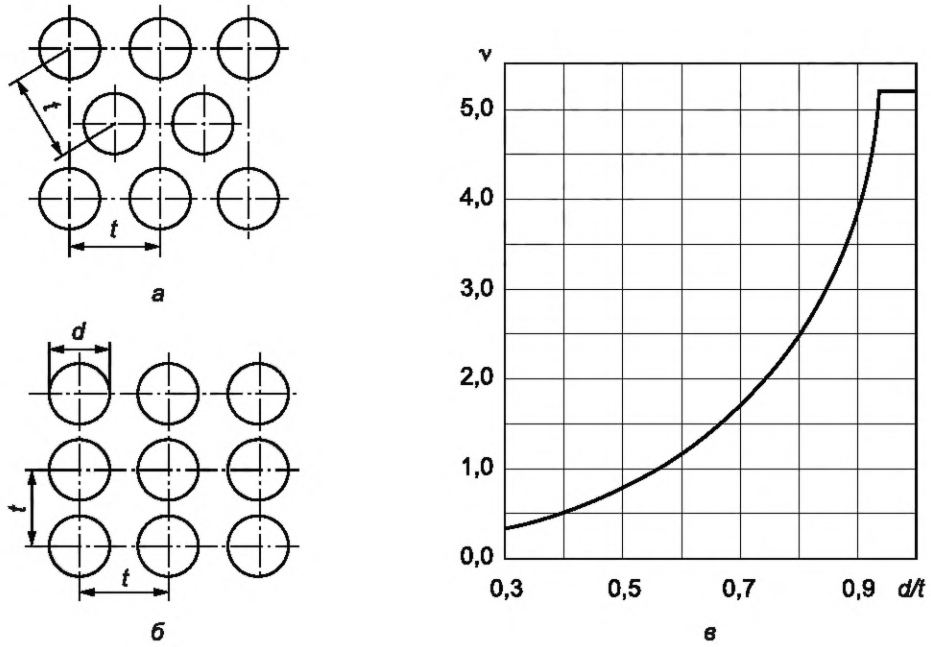


Рисунок А.1 — Коэффициент присоединенной массы ν для одиночных цилиндрических стержней при колебаниях в безграничном объеме жидкости



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

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

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 ТВС. К таким методам относятся МКЭ или CFD.

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

А.2 Количество собственных частот и форм, учитываемых в расчете

А.2.1 При суммировании составляющих динамического отклика от различных тонов колебаний допускается учитывать меньшее количество тонов (собственных форм колебаний), чем количество степеней свободы анализируемой механической системы.

А.2.2 Необходимое для учета количество тонов может быть определено методом последовательных приближений. При данном подходе динамический отклик механической 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 удовлетворять критерию 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 низших собственных частот и форм колебаний, учтенных в расчете;

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 вычисляют по формулам:

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

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

где $\{\phi_j\}$ — 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;

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

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

УДК 621.039:531:006.354 ОКС 27.120.20

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

Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 13.01.2025. Подписано в печать 05.02.2025. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,58.

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