МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ
(МГС)
INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND CERTIFICATION
(ISC)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ 33963— 2016

КОТЛЫ СТАЦИОНАРНЫЕ

Расчеты на сейсмическое и ветровое воздействия

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2017

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели, основные принципы и основной порядок проведения работ по межгосударственной стандартизации установлены ГОСТ 1.0—2015 «Межгосударственная система стандартизации. Основные положения» и ГОСТ 1.2—2015 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Правила разработки, принятия, обновления и отмены»

Сведения о стандарте

1 РАЗРАБОТАН Техническим комитетом по стандартизации ТК 244 «Оборудование энергетическое стационарное», Открытым акционерным обществом «Таганрогский котлостроительный завод «Красный котельщик» (ОАО ТКЗ «Красный котельщик»)

2 ВНЕСЕН Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии

3 ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 27 сентября 2016 г. № 91-П)

За принятие проголосовали:

Краткое наименование страны по МК (ИСО 3166) 004—97	Код страны по МК (ИСО 3166) 004—97	Сокращенное наименование национального органа по стандартизации
Армения	AM	Минэкономики Республики Армения
Беларусь	BY	Госстандарт Республики Беларусь
Киргизия	KG	Кыргызстандарт
Россия	RU	Росстандарт
Таджикистан	TJ	Таджикстандарт
Узбекистан	UZ	Узстандарт

4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 марта 2017 г. № 126-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 33963—2016 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июля 2018 г.

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном информационном указателе «Национальные стандарты» (по состоянию на 1 января текущего года), а текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячном информационном указателе «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

© Стандартинформ, 2017

В Российской Федерации 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 и определения . . . 1
4 Обозначения и сокращения . . . 2
5 Общие положения . . . 3
6 Требования к расчету . . . 4
7 Оценка сейсмостойкости . . . 7
8 Общие принципы построения динамических моделей . . . 7
9 Методы расчета на сейсмостойкость . . . 9
Библиография . . . 12

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

КОТЛЫ СТАЦИОНАРНЫЕ

Расчеты на сейсмическое и ветровое воздействия

Stationary boilers. Calculations for earthquake and wind influence

Дата введения — 2018—07—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает требования к расчету сейсмических нагрузок на паровые стационарные котлы, их элементы и трубопроводы горячей воды и пара. С помощью расчетов проводится оценка сейсмостойкости оборудования, а также определяются мероприятия по обеспечению сейсмостойкости на стадии проектирования и в процессе эксплуатации.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 23172—78 Котлы стационарные. Термины и определения

ГОСТ 33962—2016 Котлы стационарные водотрубные. Общие положения. Материалы и допустимые напряжения для деталей котлов, работающих под давлением.

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 ссылочный стандарт заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться заменяющим (измененным) стандартом. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 23172, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **землетрясение (сейсмическое воздействие):** Колебания земли, вызываемые прохождением сейсмических волн, излученных из какого-либо очага упругой энергии.

3.2 **интенсивность землетрясения:** Мера величины сотрясения грунта, определяемая параметрами движения грунта, степенью разрушения сооружений и зданий, характером изменений земной поверхности и данными об испытанных людьми ощущениях.

3.3 **сейсмичность площадки строительства:** Интенсивность возможных сейсмических воздействий на площадке строительства с соответствующими категориями повторяемости за нормативный срок. Сейсмичность устанавливается в соответствии с картами сейсмического районирования и (или) микрорайонирования площадки строительства. Она измеряется в баллах по шкале MSK-64.

Издание официальное

3.4 **сейсмостойкость энергетического оборудования:** Способность конструкции сохранять в определенной степени прочность, устойчивость, герметичность и работоспособность при землетрясении.

3.5 **акселерограмма землетрясения:** Зависимость от времени абсолютного ускорения грунта (основания) для определенного направления в виде графика или в табличной форме (оцифровка).

3.6 **аналоговая акселерограмма:** Запись реального землетрясения, используемая для расчета на сейсмостойкость.

3.7 **синтезированная акселерограмма:** Акселерограмма, полученная аналитическим путем на основе обработки и статистического анализа ряда аналоговых акселерограмм.

3.8 **ответная акселерограмма:** Акселерограмма точки конструкции, определяемая из расчета вынужденных колебаний при сейсмическом воздействии.

3.9 **поэтажная акселерограмма:** Ответная акселерограмма отдельных высотных отметок сооружения, на которых, установлено оборудование.

3.10 **спектр ответа (реакций):** Совокупность абсолютных значений максимальных ответных ускорений линейно-упругой системы с одной степенью свободы (осциллятора) при воздействии, заданном акселерограммой; эти значения определяются в зависимости от собственной частоты и значения относительного демпфирования осциллятора.

3.11 **расширенный спектр ответа:** Спектр, полученный путем расширения пиков спектра ответа с целью повышения надежности выполняемых расчетов на сейсмостойкость.

3.12 **огибающий спектр ответа:** Спектр, полученный по результатам обработки спектров ответа, для набора аналоговых и (или) синтезированных акселерограмм.

3.13 **спектр коэффициентов динамичности:** Безразмерный спектр, полученный делением значений спектра ответа на максимальное пиковое значение ускорения соответствующей акселерограммы.

3.14 **статический метод расчета на сейсмостойкость:** Упрощенный метод, согласно которому распределение сейсмических нагрузок, действующих на конструкцию, принимается подобным распределению массы, а величины этих нагрузок определяются при помощи набора коэффициентов.

3.15 **линейно-спектральный метод расчета на сейсмостойкость:** Метод, в котором величины сейсмических нагрузок определяются по спектрам ответа в зависимости от частот и форм собственных колебаний конструкции.

3.16 **метод динамического анализа сейсмостойкости:** Метод численного интегрирования уравнений движения, применяемых для анализа вынужденных колебаний конструкции при сейсмическом воздействии, заданном акселерограммами землетрясений.

3.17 **проектное землетрясение:** Землетрясение со средней повторяемостью один раз за срок службы станции.

3.18 **нормальные условия эксплуатации**: Стационарный режим работы оборудования при номинальной производительности.

4 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения и сокращения:

σ_{ms} — общие мембранные напряжения с учетом сейсмического воздействия, МПа;

σ_{mms} — местные мембранные напряжения, возникающие от неравномерного распределения нагрузок, с учетом сейсмического воздействия, МПа;

σ_{bs} — общие изгибные напряжения с учетом сейсмического воздействия, МПа;

σ_{Cms} — напряжение смятия, МПа;

τ — напряжение среза, МПа;

K — относительное демпфирование (в долях от критического коэффициента демпфирования);

N — число степеней свободы расчетной модели;

G — нормальное ускорение свободного падения, м/с^2;

$a(t)$ — зависимость ускорения основания от времени;

[M] — матрица коэффициентов инерции;

[C] — матрица коэффициентов жесткости;

$p(f)$ — частота собственных колебаний, рад/с (Гц);

НУЭ — нормальные условия эксплуатации;

ПЗ — проектное землетрясение;

СА — синтезированная акселерограмма;

ЛСМ — линейно-спектральный метод;

МДА — метод динамического анализа;

MSK-64 — 12-балльная шкала интенсивности землетрясений 1964 г., разработанная С. Медведевым, В. Шпонхоером и В. Карником.

5 Общие положения

5.1 Расчет на сейсмостойкость является обязательным этапом поверочного расчета и служит для определения возможности использования оборудования в районах с повышенной сейсмической активностью.

5.2 Целью поверочного расчета на сейсмостойкость является:

- проверка прочности элементов оборудования;
- оценка взаимных смещений, соударений элементов конструкций;
- разработка мероприятий, направленных на снижение расчетных динамических нагрузок, в случаях, когда расчет не подтверждает обеспечение требований сейсмостойкости.

5.3 Основные критерии сейсмостойкости оборудования базируются на таких факторах, как:

- необходимость обеспечения безопасности оперативного персонала станции;
- важность компонент технологического оборудования и систем, необходимых для выработки электроэнергии и тепла;
- анализ начальной стоимости и объема потенциальных затрат на ремонт или замену оборудования, поврежденного в результате сейсмического воздействия;
- возможность использования альтернативных частей и систем оборудования;
- оценка поведения и взаимодействия отдельных систем при землетрясении;
- анализ возможных потерь от простоев блока вследствие повреждения оборудования при сейсмическом воздействии.

Основной критерий сейсмостойкости ТЭС и ТЭЦ можно сформулировать следующим образом: станция должна противостоять с минимальными структурными повреждениями и непродолжительным прекращением выработки электроэнергии и тепла землетрясению, которое вызывает ускорение грунта только с низкой (около 10 %) вероятностью превышения в течение проектного срока службы станции.

5.4 Поверочный расчет необходимо проводить с учетом действия эксплуатационных и сейсмических нагрузок. Ветровые нагрузки при расчете на сейсмостойкость не учитываются.

Проектное сейсмическое воздействие задается в соответствии с общей концепцией сейсмостойкости объектов теплоэнергетики в виде аналоговых акселерограмм для площадки строительства станции, имеющей максимальные пиковые ускорения, соответствующие повторяемости один раз за срок службы станции. При этом пиковые ускорения должны иметь не более чем 10 %-ную вероятность их превышения за принятый период повторяемости.

В процедуру определения интенсивности ПЗ в общем случае должны входить следующие этапы:

- определение региональной сейсмической активности и вероятности возникновения землетрясений различной интенсивности на основании анализа исторических и инструментальных данных;
- установление и классификация всех геологических разломов в зоне 80—100 км;
- определение максимально возможных землетрясений, которые могут инициироваться каждым из разломов, и установление повторяемости для каждого события землетрясения;
- расчет пиковых значений ускорений грунта на площадке, вызванных движениями отдельных разломов;
- определение параметров ПЗ (проектного спектра, акселерограмм и проектного максимального пикового ускорения грунта) для принятой проектной повторяемости землетрясения.

5.5 В соответствии с общей концепцией и критериями сейсмостойкости принцип сейсмозащиты станции заключается в ее безопасном останове при ПЗ и последующем пуске через короткий промежуток времени при ограниченном объеме восстановительных работ. Для обеспечения этой задачи все технологическое оборудование и системы станции должны быть разделены на две категории сейсмостойкости.

Категория Is. Системы и оборудование, для которых выполняется обоснование сейсмостойкости (прочности и/или работоспособности):

- системы и оборудование, обеспечивающие аварийный останов блока;
- системы и оборудование, которые могут являться потенциальным источником пожара в результате сейсмического воздействия;
- средства пожаротушения;

- основное и дорогостоящее оборудование, которое не может быть восстановлено и заменено в ограниченный период времени и повреждение которого приведет к значительному экологическому или финансовому ущербу (например, котел, турбина, деаэратор, питательный насос, дымосос, силовые трансформаторы, дутьевые вентиляторы, мельницы, баки мазута, воды и т. д.);

- основные трубопроводы пара и питательной воды.

Категория IIs. Все прочие системы и оборудование, важные с точки зрения обеспечения работоспособности станции и не вошедшие в категорию Is, должны иметь практическую возможность быть восстановленными в ограниченный период времени после землетрясения, определяемый государственными, регулирующими и надзорными органами. Для этих систем выполняется упрощенная оценка ожидаемых повреждений в результате ПЗ.

Кроме того, необходимо уделять особое внимание конструкциям, системам и элементам оборудования, которые в результате сейсмического воздействия могут повредить системы и оборудование, отнесенное к категории Is, и таким образом нарушить функции обеспечения безопасности станции либо привести к большим материальным потерям. Должны быть предприняты меры по предотвращению возникновения указанных ситуаций.

5.6 Расчет на сейсмостойкость проводится для оборудования и трубопроводов станций, устанавливаемых в районах сейсмичностью 7 баллов и выше.

5.7 Интенсивность ПЗ (максимальный уровень ускорения на грунте) при отсутствии специального сейсмологического обоснования устанавливается в соответствии с картами сейсмического районирования для 1 категории повторяемости, согласно [1].

5.8 Максимальный уровень ускорения аналоговых и синтезированных акселерограмм, принимаемых в качестве характеристик ПЗ, должен соответствовать 5.7 или может быть принят в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 — Максимальный уровень ускорений ПЗ

Сейсмичность площадки, в баллах	7	8	9	10
Максимальный уровень ускорения, в долях g	0,1	0,2	0,4	0,8

5.9 При повышении или понижении установленной интенсивности ПЗ на 1 балл максимальный уровень ускорения заданных акселерограмм и (или) спектров ответа должен соответственно увеличиваться или уменьшаться в два раза.

5.10 За правильность проведения расчета на сейсмостойкость ответственность несет предприятие или организация, выполнявшие расчет.

6 Требования к расчету

6.1 Исходными данными для расчета на сейсмостойкость являются:

- балльность ПЗ и максимальные уровни ускорений расчетных акселерограмм;

- воздействия ПЗ в виде акселерограмм и (или) огибающих спектров ответа для мест установки котлов по трем взаимно перпендикулярным направлениям (вертикального и двух горизонтальных);

- напряжения или внутренние усилия при нормальных условиях эксплуатации.

6.2 Оценка сейсмостойкости производится при действии двух горизонтальных и вертикального направлений сейсмического воздействия, при этом величины сейсмических нагрузок в указанных направлениях допускается определять раздельно.

6.3 Горизонтальные расчетные сейсмические нагрузки следует принимать действующими в направлениях продольной и поперечной осей конструкции.

6.4 При отсутствии конкретной информации о пиковом ускорении вертикальной составляющей колебаний грунта целесообразно применение определенного соотношения между пиковыми ускорениями в вертикальном и горизонтальном направлениях. Это соотношение, как правило, варьируется от 0,5 до 1,0 и может быть максимальным на участках, прилегающих к очагу землетрясения. Указанное соотношение зависит от характеристик очага, самой площадки, ее удаленности от эпицентра, а также от других факторов. При отсутствии специального обоснования рекомендуется брать 2/3 от пикового ускорения в горизонтальном направлении.

6.5 Внутренние усилия в элементах конструкции определяются из условия одновременного сейсмического воздействия по всем учитываемым направлениям.

Если расчет производится отдельно по каждому из направлений, расчетные внутренние усилия (силы и моменты относительно главных осей сечения и относительные перемещения) вычисляют по формуле

$$N_k = \sqrt{N_{kX}^2 + N_{kY}^2 + N_{kZ}^2}, \quad (1)$$

где N_k — расчетное усилие в k-м сечении;

N_{kX}, N_{kY}, N_{kZ} — расчетное усилие определенного вида в k-м сечении при сейсмическом воздействии соответственно вдоль осей X, Y, Z (две горизонтальные и вертикальная составляющие).

6.6 Сейсмический анализ должен проводиться либо по одному из методов динамического анализа, либо, если доказана возможность использования, по методу эквивалентной статической нагрузки. Эти методы, как правило, основаны на линейно-упругом анализе систем при уровне допускаемых напряжений, близком к пределу текучести материала. Однако для специальных случаев может быть использован также нелинейный анализ систем и их опор с учетом пластических характеристик материала.

6.7 При выполнении поверочного расчета на сейсмостойкость должен быть использован один из методов динамического анализа, например метод расчета по спектрам ответа (ЛСМ) или метод расчета по акселерограммам сейсмического воздействия (МДА). При применении методов динамического анализа должны быть выполнены следующие условия:

6.7.1 Обеспечен правильный выбор метода динамического анализа (по спектрам ответа или по акселерограммам) исходя из особенностей анализируемой системы и задач анализа.

6.7.2 Должно быть обеспечено получение всей необходимой информации по напряженно-деформированному состоянию системы и ее опорно-подвесной системы с учетом всех возможных смещений, поворотов и опрокидывания конструкции, а также взаимодействия с соседним оборудованием и системами. Как правило, для достижения этой цели должны быть использованы программы расчета, основанные на методе конечного элемента.

6.7.3 Расчетная динамическая модель должна состоять из достаточного количества степеней свободы (масс). Количество степеней свободы считается достаточным, когда увеличение их числа не приводит к изменению реакции системы более чем на десять процентов. В качестве другого критерия достаточности учитываемого числа степеней свободы может быть использован следующий: количество степеней свободы системы должно по крайней мере в два раза превосходить количество учитываемых собственных форм колебаний при определении реакции системы.

6.7.4 В случае, если расчет на сейсмостойкость выполняется с учетом ограниченного числа форм колебаний, например только до частоты 33 Гц, при определении сейсмических нагрузок должны использоваться методы, учитывающие влияние высших форм колебаний. Если специальные методы учета высших форм колебаний не используются, число учитываемых форм должно быть увеличено. Число учитываемых форм считается достаточным, когда изменение их числа не приводит к изменению реакции на опоры более чем на 10 %.

6.7.5 Должны быть учтены относительные смещения точек опор системы трубопроводов и различное динамическое воздействие на опоры трубопровода при сейсмическом воздействии. Такой учет обеспечивается следующими расчетами:

- методом модального анализа по спектрам ответа на многоопорное воздействие;
- методом модального анализа по огибающей спектров ответа;
- методом интегрирования уравнений движения по времени с использованием синтезированной акселерограммы, построенной по огибающей спектров ответа.

Во всех случаях требуется дополнительный учет взаимного смещения опор трубопровода в наиболее неблагоприятном сочетании.

6.7.6 Должны быть адекватно учтены важные эффекты поведения системы при сейсмической нагрузке, такие как удары и взаимодействие с другим оборудованием и трубопроводами, влияние раскрепления специальными опорами (включая различные типы демпферов, механические и гидравлические амортизаторы), гидродинамические нагрузки, нелинейная реакция системы.

6.7.7 Вместо спектрального метода анализа может быть применен метод расчета по акселерограммам, который дает более реалистичную картину поведения анализируемой системы при сейсмическом воздействии, но вместе с тем требует значительных затрат времени на расчет. Ввиду этого данный метод используется обычно для расчета особо важных систем или систем с существенной нелинейностью.

6.8 Компоненты оборудования, имеющие многочисленные точки опирания

В ряде случаев оборудование и компоненты систем опираются на различные точки одного сооружения или конструкции или на две раздельные конструкции. При этом перемещения рассматриваемого оборудования или компонент систем в каждой точке опирания могут существенно различаться.

Для расчета многоопорных систем с различным воздействием в точках опирания может применяться консервативный подход, заключающийся в использовании верхнего огибающего спектра по всем индивидуальным опорным спектрам, который позволяет получить максимальную инерционную нагрузку многоопорной системы. В дополнение к этому учитываются относительные сейсмические смещения опорных точек системы в рамках обычного статического расчета системы.

Максимальные относительные смещения опорных точек могут быть получены из расчета здания (опорной конструкции) либо, как консервативное допущение, из поэтажных спектров ответа. Для последнего случая максимальное смещение каждой опоры S_d вычисляют по формуле

$$S_d = \frac{S_a g}{w^2} \quad (2)$$

где S_a — спектральное ускорение (в g) на высокочастотном конце спектра (максимальное ускорение отметки);

w — собственная частота колебаний основной конструкции, рад/с.

Определенное таким образом перемещение задается каждой опоре в наиболее неблагоприятном сочетании. Реакции системы, обусловленные инерционными эффектами и относительными смещениями опор, должны быть скомбинированы по методу абсолютного суммирования.

Для уменьшения консерватизма расчета на многоопорное воздействие рекомендуется использовать альтернативный метод, основанный на использовании при расчете на сейсмостойкость спектров ответа для каждой группы опор, размещенных на одной отметке или имеющих одинаковые характеристики сейсмического воздействия. При выполнении расчета на многоопорное сейсмическое воздействие также необходимо учитывать относительные смещения опор в наиболее неблагоприятном сочетании, используя обычные методы статического расчета.

6.9 Статический метод используется для предварительной оценки уровня сейсмических нагрузок на начальных стадиях проектирования. Если первая частота колебаний больше 20 Гц, расчет также допускается выполнять статическим методом с умножением ускорений, полученных по спектру ответа, на коэффициент 1,3 для частоты в диапазоне 20—33 Гц и на коэффициент 1,0 для частоты больше 33 Гц.

6.10 Линейно-спектральный метод следует использовать только для расчета линейно-упругих систем. Метод динамического анализа не имеет ограничений по применению.

При расчете по МДА необходимо учитывать рассеяние энергии, а в необходимых случаях нелинейные характеристики системы.

6.11 Метод сейсмической квалификации оборудования. Метод «обхода на месте»

Метод «обхода на месте» используется при оценке сейсмостойкости оборудования действующих станций. Этот метод основан на использовании следующих данных:

- опыта проектирования оборудования для сейсмоопасных районов;
- опыта эксплуатации и поведения оборудования на станциях, подвергавшихся сейсмическим воздействиям;
- обработки результатов экспериментальных исследований сейсмостойкости оборудования и его элементов.

На базе перечисленных выше данных формулируются требования, выполнение которых гарантирует сейсмостойкость определенного типа оборудования. Основная задача метода «обхода на месте» заключается в том, что специалист, имеющий определенную квалификацию, при инспекции оборудования на станции определяет, выполнены или нет при проектировании и на монтаже те требования, которые устанавливаются для того или иного оборудования с целью обеспечения его сейсмостойкости. Так, например, при инспекции оборудования, для которого предусмотрены мероприятия по обеспечению сейсмостойкости, в первую очередь проводится проверка правильности выполнения этих мероприятий.

Вспомогательные трубопроводы и системы воздуховодов могут быть квалифицированы как сейсмостойкие по анализу характера расположения и типу опор. Насосы, электродвигатели и компактные теплообменники, как правило, оцениваются по качеству и типу закрепления на фундаменте.

Важным моментом при сейсмической квалификации оборудования является оценка возможного динамического взаимодействия (ударов) между отдельными элементами оборудования, а также между оборудованием и строительными конструкциями при сейсмическом воздействии. Например, не допускается соударение приводов арматур с элементами оборудования и строительными конструкциями.

При выполнении инспекций по сейсмической квалификации оборудования на каждый тип оборудования оформляются обходные листы, в которых перечислены все требования, предъявляемые к определенному типу оборудования. Специалист, выполняющий инспекцию, заполняет листы, отмечая выполнение тех или иных требований по сейсмостойкости.

7 Оценка сейсмостойкости

7.1 Оценку сейсмостойкости элементов оборудования и трубопроводов следует выполнять по допускаемым напряжениям, по допускаемым перемещениям, по критериям циклической прочности и устойчивости.

7.2 При оценке сейсмостойкости по допускаемым напряжениям должны учитываться только те эксплуатационные нагрузки или внутренние усилия, которые не релаксируются при возникновении в элементах местной или общей пластической деформации (весовые нагрузки, внутреннее или наружное давление, наддув, нагрузки от присоединительных коммуникаций).

7.3 Уровень допускаемых напряжений при оценке сейсмостойкости назначается в зависимости от категорий напряжений. Действие ПЗ приравнивается к случаю нарушения нормальных условий эксплуатации.

7.4 Допускаемые напряжения [σ] определяются по ГОСТ 33962.

7.5 Оценка прочности элементов котлов, находящихся под давлением, производится по допускаемым напряжениям, приведенным в таблице 2.

Таблица 2 — Сочетание нагрузок и допустимые напряжения для элементов котлов

Сочетание нагрузок	Расчетная группа категорий напряжений	Допустимое напряжение
НУЭ+ПЗ	σ_{mx}	1,3 [σ]
НУЭ+ПЗ	[σ_{ms} или σ_{mms}]+ σ_{bs}	1,8 [σ]

7.6 Для деталей котлов, не находящихся под давлением, в зависимости от категорий напряжений (см. таблицу 3) коэффициент при допускаемых напряжениях должен умножаться на 1,1 с округлением в сторону меньшей величины.

7.7 Средние напряжения смятия не должны превышать:

- для подвижных шарниров $\sigma_{cms} = 2$ [σ].
- для неподвижных шарниров $\sigma_{cms} = 3$ [σ].

7.8 Средние касательные напряжения, вызванные срезывающими нагрузками, в шарнирах подвесок, в сварных швах и т. п. не должны превышать $\tau = 0,8$ [σ].

7.9 Средние напряжения растяжения по сечению резьбовой части подвесок, вызванные действием весовых и сейсмических нагрузок, не должны превышать величины 0,95 [σ].

Приведенные напряжения, определенные по суммам составляющих средних напряжений растяжения, изгиба и кручения в резьбовой части подвесок при сейсмических воздействиях, не должны превышать величины 1,65 [σ].

Средние касательные напряжения, вызванные действием весовых и сейсмических нагрузок в резьбе подвесок, не должны превышать $\tau = 0,8$ [σ].

7.10 Расчет на циклическую прочность проводится в соответствии с требованиями 5.4. При этом максимальная амплитуда напряжений определяется с учетом действия ПЗ и число циклов нагружения принимается равным 50.

Расчет на циклическую прочность не проводится, если повреждаемость от всех видов нагрузок на элементы котла не превышает 0,8.

7.11 Величины допускаемых перемещений (прогиб, смещение и т. п.) следует задавать в зависимости от условий эксплуатации и требований к жесткости элементов конструкции (предотвращение выбора зазора и соударения элементов, недопустимые перекосы и т. п.).

7.12 Оценка прочности элементов опор котлов и трубопроводов выполняется по соответствующим СНиП и по всем относящимся к ним нормативным документам с учетом сейсмических нагрузок, полученных расчетом на сейсмостойкость по настоящим нормам.

8 Общие принципы построения динамических моделей

8.1 Динамическая модель оборудования или трубопровода при анализе сейсмостойкости — это динамическая система с конечным числом степеней свободы, достаточно полно отражающая основные динамические свойства рассматриваемой конструкции, по реакции которой на заданное сейсмическое воздействие оценивается сейсмостойкость реальной конструкции.

8.2 Оборудование и трубопроводы могут быть представлены пространственными или плоскими динамическими моделями.

8.3 Плоская динамическая модель — это динамическая система, движение точек которой происходит в одной плоскости, а ее упругие связи работают при плоском деформированном состоянии.

8.4 Плоскую динамическую модель допускается использовать в тех случаях, когда конструкция имеет плоскость симметрии. В других случаях необходимо специальное обоснование возможности использования плоской модели.

8.5 Масса конструкции, создающая при колебаниях инерционные нагрузки, сосредотачивается в узловых точках (узлах) динамической модели.

8.6 Общие принципы построения расчетных моделей

8.6.1 Основная задача построения динамической модели при анализе сейсмостойкости состоит в определении рационального уровня идеализации конструкции, обеспечивающего необходимую точность оценки динамической реакции системы.

8.6.2 Динамические характеристики котла определяются инерционными, упругими и диссипативными параметрами конструктивных элементов.

8.6.3 Построение динамической модели проводится в следующей последовательности:

- предварительная разбивка системы на составные элементы;
- назначение узловых точек;
- назначение обобщенных координат;
- определение инерционных и упругих характеристик;
- анализ собственных частот отдельных структурных подсистем;
- оптимизация параметров динамической модели.

8.6.4 При построении упругой схемы динамической модели в первую очередь руководствуются требованиями, предъявляемыми к расчетным моделям при оценке статической прочности. Дополнительно учитываются особенности элементов конструкции, динамическая работа которых отличается от статической (подвески, соединения с зазорами, демпфирующие устройства и т. п.).

Разбивка системы на элементы приводит ее к дискретному виду, учитывающему динамические особенности взаимодействия отдельных элементов и их влияние на динамическую реакцию системы.

8.6.5 Разбивка системы на элементы производится с таким расчетом, чтобы узлы динамической модели располагались в местах наибольшей концентрации массы и наибольшей податливости конструкции, а также в точках, движение которых определяет взаимодействие элементов системы при колебаниях (места разветвления, присоединения к конструкции связей, демпферов и т. п.).

8.6.6 Для назначения обобщенных координат могут быть применены два подхода: формальный и аналитический.

При формальном подходе узловые точки назначаются в каждом граничном сечении составных элементов динамической модели. Каждый узел имеет от 3 до 6 степеней свободы, и анализ парциальных систем в этом случае не производится.

Аналитический подход предполагает анализ динамической модели, на основании которого исходя из заранее установленного уровня высшей собственной частоты расчетной динамической модели производится уточнение параметров динамической модели.

8.6.7 Так как сейсмическое воздействие представляет собой относительно низкочастотный процесс, характеризуемый частотным спектром от 0,1 до 30 Гц, при анализе сейсмостойкости линейно-упругих систем рекомендуется расчетные модели строить таким образом, чтобы значения парциальных частот не превышали 120—150 Гц.

Для нелинейных систем граничный частотный уровень принимается с учетом условий динамической работы элементов с нелинейными характеристиками.

8.6.8 При определении инерционных параметров рекомендуется использовать следующее:

- в протяженных системах с равномерно распределенной массой и погонной изгибной жесткостью (трубопроводы, балки и т. п.) инерционные параметры в узлах принимаются равными значению половины массы примыкающих к ним участков, заключенных между соседними узлами;
- для элементов конструкции, которые можно представить жестким телом, в узел, расположенный в центре масс, приводится вся масса тела;
- массовые моменты инерции для жесткого тела, соответствующие угловым обобщенным координатам, определяются относительно осей, проходящих через его центр масс.

8.6.9 Жесткостные характеристики упругих элементов динамической модели определяются на основании анализа работы элементов конструкции при всех возможных перемещениях узлов по направлению заданных обобщенных координат.

При этом в общем случае учитывается деформация изгиба, растяжения-сжатия, сдвига и кручения.

8.6.10 При расчете котлов подвесного типа в динамической модели необходимо учитывать жесткости присоединительных коммуникаций (газоходов, воздуховодов и трубопроводов).

Для оценки сейсмостойкости опорно-подвесной системы котлов подвесного типа динамическая модель котла должна быть построена таким образом, чтобы учесть все возможные перемещения элементов системы, влияющие на изменение нагрузки на подвески.

8.6.11 Учет влияния параметров диссипации в конструкции оборудования и трубопроводов при колебаниях производится введением в расчет относительного демпфирования, рекомендуемые значения которого для различных конструкций приведены в таблице 3.

Таблица 3 — Значение относительного демпфирования k (в долях от критического)

Элементы конструкции	Значение относительного демпфирования
Трубопроводы большого диаметра (D_y > 100 мм) и оборудование (теплообменники и т. п.)	0,02
Трубопроводы малого диаметра (D_y <100 мм) и внутренние элементы котла (ширмы, ПП, ЭК и т. п.)	0,01
Газоходы и воздуховоды котлов подвесного типа	0,1
Металлоконструкции котла: сварные на болтах	 0,02 0,04
Бетонные конструкции: предварительно напряженные армированные	 0,02 0,04
Примечание — При расчете котлов подвесного типа по ЛСМ значение относительного демпфирования для системы котел-здание (каркас) принимается k = 0,05.	

9 Методы расчета на сейсмостойкость

9.1 Статический метод

9.1.1 Значения сосредоточенной сейсмической нагрузки, действующей независимо в двух горизонтальных и вертикальном направлениях на k-ю точку опорной конструкции или корпуса котла (кроме корпусов подвесных котлов), вычисляют по формуле

$$Q_k = M_k k_b (1 + k_h) g,$$

где M_k — сосредоточенная масса конструкции котла, кг;

k_b — коэффициент балльности, значение которого определяется по таблице 4.

Таблица 4 — Значения коэффициента k_b

Балльность	7	8	9
k_b	0,25	0,5	1,0

k_h — коэффициент высоты размещения элемента конструкции:

$$k_h = h_k \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i h_i}{\sum_{i=1}^{n} M_i h_i^2}, \quad (3)$$

где n — число сосредоточенных масс;

M_i — масса i-й точки конструкции, кг;

h_i — высота расположения i-й точки конструкции, м;

h_k — высота отметки расположения k-массы, м.

9.1.2 При определении сейсмической нагрузки, действующей на котел в вертикальном направлении, значение k_b по 9.1.1 уменьшается в два раза, а k_h принимается равным 0.

9.1.3 При расчете котлов подвесного типа горизонтальную сейсмическую нагрузку, действующую на корпус котла, вычисляют по формуле

$$Q_k = 0{,}8\, M_k\, k_b\, k_j\, g, \tag{4}$$

где k_j — коэффициент интенсивности колебаний корпуса, принимаемый равным значению собственной частоты колебаний корпуса, Гц, но не более 2.

Вертикальную сейсмическую нагрузку на корпус подвесного котла вычисляют по формуле

$$Q_k = M_k\, k_b\, k_i\, g. \tag{5}$$

В этом случае при определении значения k_i учитывается суммарная вертикальная жесткость подвесок и k_b умножается на 2/3.

9.1.4 Сейсмическую нагрузку на отдельные элементы котлов и оборудование, установленное на котле, вычисляют по формуле

$$Q_{o.k} = M_o \frac{Q_k}{M_k} k_{o.i}, \tag{6}$$

где M_o — масса отдельного оборудования, кг;

$k_{o.i}$ — коэффициент интенсивности колебаний оборудования, принимаемый равным значению низшей собственной частоты оборудования, Гц, но не более 3.

Для оборудования, жестко закрепленного на котле, $k_{o.i} = 1$.

9.2 Линейно-спектральный метод

9.2.1 Для использования ЛСМ определяют собственные значения и векторы рассматриваемой динамической системы.

Значения собственных частот определяются числовым решением задачи о собственных значениях:

$$[[K] - \omega_n^2[M]]\{\Phi_n\} = 0, \tag{7}$$

где w_n — круговая частота n-й формы собственных колебаний;

$\{\Phi_n\}$ — собственный вектор для n-й формы;

[K] — матрица жесткости.

9.2.2 Вектор сил для n-й формы собственных колебаний вычисляют по формуле

$$[F_n] = [M]\,\{\Phi_n\} C_n a_n, \tag{8}$$

где C_n — фактор «участия» массы для n-й формы собственных колебаний, равный

$$\{\Phi_n\}^T[M]\{1\} / \{\Phi_n\}^T[M]\,\{\Phi_n\},$$

a_n — спектральное ускорение, определенное по частоте для n-й формы.

Для оборудования и трубопроводов, расположенных на различных отметках строительных конструкций, рекомендуется проводить расчет на многоопорное воздействие, при котором учитываются особенности поэтажных спектров ответа на каждой отметке закрепления.

9.2.3 Расчетные внутренние усилия (напряжения) в каждом рассматриваемом сечении системы определяют путем:

- суммирования по формам и направлениям — корень квадратный из суммы квадратов

$$[F] = \sqrt{[F_1]^2 + [F_2]^2 + [F_3]^2 + \ldots}, \tag{9}$$

- суммирования по группам поэтажных спектров — по абсолютному значению

$$[F] = [F_1] + [F_2] + [F_3] + \ldots; \tag{10}$$

- учета высших форм колебаний.

9.3 Метод динамического анализа

Для анализа динамического поведения системы рассматривается следующее уравнение движения:

$$M \cdot X'' + C \cdot X' + K \cdot X = -M \cdot r \cdot X''_g(t) - Fe, \quad (11)$$

где M — диагональная матрица масс;

C — матрица демпфирования;

K — матрица жесткости;

r — вектор направляющих косинусов между сейсмическим воздействием и обобщенными координатами;

$X''g(t)$ — сейсмическое воздействие, определенное в терминах ускорения грунта (основания);

Fe — вектор реактивных сил, возникающих от дополнительных, в том числе от нелинейных, связей системы;

X — вектор узловых перемещений;

X' — вектор узловых скоростей;

X'' — вектор узловых ускорений.

Для решения уравнения (11) выполняется модальное преобразование

$$X = \Phi \cdot Y, \quad (12)$$

где Φ — матрица, состоящая из n столбцов форм собственных колебаний системы;

Y — новые модальные обобщенные координаты.

Умножив каждое слагаемое формулы (11) на значения формулы (12) и все значения равенства умножив на Φ^T, получим:

$$\Phi^T \cdot M \cdot \Phi \cdot Y'' + \Phi^T \cdot C \cdot \Phi \cdot Y' + \Phi^T \cdot K \cdot \Phi \cdot Y = -\Phi^T \cdot M \cdot r \cdot X''_g(t) - \Phi^T \cdot Fe. \quad (13)$$

Учитывая свойства ортогональности матриц масс, жесткости и демпфирования, можно записать:

$$\Phi^T \cdot M \cdot \Phi = I, \quad (14)$$

$$\Phi^T \cdot C \cdot \Phi = 2 \cdot \xi_n \cdot \omega_n, \quad (15)$$

$$\Phi^T \cdot K \cdot \Phi = \Omega_n^2, \quad (16)$$

где I — единичная матрица;

$2 \cdot \xi_n \cdot \omega_n$ — диагональная матрица модального демпфирования;

Ω_n^2 — диагональная матрица модальной жесткости;

Ω_n — n-я собственная частота колебаний системы;

ξ_n — коэффициент модального демпфирования, соответствующий n-й собственной частоте.

После указанных преобразований уравнение (3) принимает вид:

$$Y''_n + 2 \cdot \xi_n \cdot \omega_n \cdot Y'_n + \Omega_n^2 \cdot Y_n = B_n, \quad (17)$$

где $B_n = -\Phi^T \cdot M \cdot r \cdot X''g(t) - \Phi^T \cdot Fe$.

Вектор B_n, представленный в правой части уравнения (17), может трактоваться как модальный вектор внешних и реактивных нагрузок. Следует отметить, что если размерность исходной системы формулы (11) соответствует общему числу степеней свободы, представленных в расчете (поступательные и вращательные перемещения расчетных сечений системы), то размерность формулы (17) соответствует числу форм собственных колебаний, учитываемых в расчете.

В рамках метода динамического анализа уравнение движения системы (17) решается прямым пошаговым интегрированием этих уравнений с применением центрально-разностной схемы. Начальные условия (перемещения, скорости и ускорения точек системы в нулевой момент времени) предполагаются нулевыми. Может быть применена следующая конечно-разностная аппроксимация для текущих значений скоростей и ускорений:

$$Y''_t = \frac{Y_{t+\delta t} - 2 \cdot Y_t - Y_{t\ \delta t}}{\delta t^2}, \quad (18)$$

$$Y'_t = \frac{3 \cdot Y_t - 4 \cdot Y_{t-\delta t} + Y_{t-2\delta t}}{2\delta t}. \quad (19)$$

Подставляя соотношения (18) и (19) в (17), получим выражение для $Y_{t+\delta t}$:

$$Y_{t+\delta t} = Y_t + \delta Y_{t+\delta t}. \quad (20)$$

$$\delta Y_{t+\delta t} = \delta Y_t + \delta t^2 \cdot (B_t - 2 \cdot \xi_n \cdot \omega_n \cdot Y'_t - \Omega_n^2 \cdot Y_t). \quad (21)$$

Библиография

[1] СНиП 1.2.-4—98 Строительство в сейсмических районах

УДК 621.18:006.354 МКС 27.010 ОКП 31 1000

Ключевые слова: котлы стационарные водотрубные, общие положения, сейсмостойкость, ветровые нагрузки, расчет на сейсмостойкость

Редактор *А.П. Корпусова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *С.В. Смирнова*
Компьютерная верстка *А.Н. Золотаревой*

Сдано в набор 15.03.2017. Подписано в печать 18.04.2017. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,69. Тираж 30 экз. Зак. 532.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru