ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ГОСТ Р ИСО 10137— 2016**

# ОСНОВЫ РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

## Эксплуатационная надежность зданий в условиях воздействия вибрации

**(ISO 10137:2007, Bases for design of structures — Serviceability of buildings and walkways against vibrations, IDT)**

**Издание официальное**

**Москва**
**Стандартинформ**
**2017**

gost.e-ecolog.ru

## Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Акционерным обществом «Научно-исследовательский центр «Строительство» (АО «НИЦ «Строительство»), Центральным научно-исследовательским институтом строительных конструкций им. В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко) на основе официального перевода на русский язык англоязычной версии указанного в пункте 4 международного стандарта, который выполнен Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия» (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 65 «Строительство»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 декабря 2016 г. № 1999-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО 10137:2007 «Основы расчета строительных конструкций. Эксплуатационная надежность зданий и пешеходных переходов в условиях воздействия вибрации» (ISO 10137:2007 «Bases for design of structures — Serviceability of buildings and walkways against vibrations», IDT)

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5 (пункт 3.5).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов и документов соответствующие им национальные и межгосударственные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*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

© Стандартинформ, 2017

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 . . . 2
4 Описание проблемы вибрации . . . 3
4.1 Общие замечания . . . 3
4.2 Источник вибрации . . . 3
4.3 Тракт передачи . . . 4
4.4 Приемник . . . 4
5 Динамические воздействия . . . 4
5.1 Общие замечания . . . 4
5.2 Машинное оборудование . . . 4
5.3 Движение транспортных средств (дорожных и рельсовых) . . . 5
5.4 Импульсные источники . . . 5
5.5 Деятельность человека . . . 6
5.6 Ветер . . . 7
5.7 Землетрясения . . . 7
6 Оценка амплитудно-частотной характеристики . . . 7
6.1 Общие замечания . . . 7
6.2 Методы анализа . . . 7
6.3 Численная оценка уровней вибрации . . . 8
6.4 Оценка уровней вибрации по результатам измерений . . . 9
7 Критерии вибрации для предельного состояния эксплуатационной надежности . . . 11
7.1 Общие замечания . . . 11
7.2 Вибрационные критерии для жителей или посетителей здания . . . 11
7.3 Вибрационные критерии для содержимого здания . . . 12
7.4 Вибрационные критерии для конструкций зданий . . . 13
8 Вибрационный контроль . . . 14
9 Уменьшение вибрации . . . 14
Приложение А (справочное) Динамические воздействия . . . 15
Приложение В (справочное) Примеры вибрационного анализа . . . 20
Приложение С (справочное) Примеры вибрационных критериев . . . 25
Приложение D (справочное) Оценка реакции людей на колебания в зданиях от воздействия ветра . . . 31
Приложение Е (справочное) Методы уменьшения вибрации . . . 32
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов и документов национальным стандартам и действующим в этом качестве межгосударственным стандартам . . . 34
Библиография . . . 35

## Введение

Применение высокопрочных и легких материалов при строительстве сооружений сделало их более чувствительными к динамическим воздействиям. Эта тенденция осложняется появлением новых источников вибраций, действующих на здания и переходы. Кроме того, для обеспечения нормального функционирования измерительных приборов, промышленных и лабораторных процессов и комфортных условий работы персонала в сочетании с ростом требований окружающей среды, «свободной от вибрации», необходимо более строго регламентировать уровни вибрации в зданиях и сооружениях.

Ранее колебания в зданиях в значительной степени контролировались заданными нагрузками или ограничениями прогибов. Часто уровни колебаний были незначительны из-за больших масс сооружений. В настоящее время достаточно часто наблюдаются повышенные уровни колебаний в ряде зданий. Косвенные критерии оценки вибраций утратили актуальность, в связи с чем и был разработан настоящий стандарт в целях обоснования принципов прогнозирования колебаний на стадии проектирования в качестве дополнения к оценке допустимости вибраций в существующих строениях.

Представленные рекомендации дают допустимые средние значения уровней вибраций для эксплуатационной надежности зданий и сооружений, а не для обеспечения их безопасности. Возможно, некоторые колебания (обычно ассоциированные с резонансом) могут стать потенциально опасными для этих зданий. Поэтому, при динамических воздействиях следует проверять возможность возникновения резонанса, предельных напряжений и деформаций с учетом усталостных явлений. В настоящем стандарте оцениваются параметры предельных состояний конструкций, подверженных динамическим воздействиям, с точки зрения эксплуатационной надежности в соответствии с ИСО 2394.

При разработке критериев, которые используются для оценки допустимых уровней колебаний сооружений, отдельных фрагментов и пешеходных переходов, необходимо учитывать следующие аспекты:

a) разная степень толерантности жителей домов и других людей вследствие культурных, региональных или экономических факторов;

b) чувствительность к вибрациям всего содержимого в здании, когда меняются условия его эксплуатации, число людей в помещениях, характер работы;

c) непредвиденные случаи новых динамических воздействий, которые не описаны в настоящем стандарте;

d) использование материалов, динамические характеристики которых могут изменяться со временем;

e) практическая непригодность существующих методов анализа вследствие сложности сооружения или сложности определения нагрузок;

f) социальные или экономические последствия неудовлетворительного функционирования.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# ОСНОВЫ РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

## Эксплуатационная надежность зданий в условиях воздействия вибрации

Bases for design of structures.
Serviceability of buildings against vibrations

**Дата введения — 2017—07—01**

## 1 Область применения

В настоящем стандарте приведены рекомендации по оценке эксплуатационной надежности зданий или пешеходных переходов внутри зданий, между зданиями или за их пределами при динамических воздействиях.

Стандарт охватывает три группы «приемников», воспринимающих колебания:

a) люди, проживающие или временно находящиеся в зданиях и пешеходных переходах;

b) оборудование, приборы и другая аппаратура, установленная в здании;

c) конструкции зданий и сооружений.

Настоящий стандарт не распространяется на мосты, по которым движется автотранспорт, а также на движение по мостам пешеходов, проектирование фундаментов и опорных конструкций машинного оборудования.

Для целей настоящего стандарта принять, что конструкции здания реагируют линейно на приложенные нагрузки. Это означает, что в конструкциях здания не происходит осадок или разрушений, и они не подвергаются значимым воздействиям, меняющим характер работы конструкции.

## 2 Нормативные ссылки

Следующие нормативные документы, на которые даны ссылки, являются обязательными для применения настоящего документа. Для датированных ссылок применяется только цитируемое издание. Для недатированных ссылок применяется последнее издание ссылочного документа (включая все поправки).

ISO 2041, Mechanical vibration, shock and condition monitoring — Vocabulary (Вибрация, ударные нагрузки и контроль технического состояния. Словарь)

ISO 2394:1998, General principles on reliability for structures (Общие принципы проверки надежности строительных конструкций)

ISO 3898, Bases for design of structures — Notations — General symbols; (Основы расчета строительных конструкций. Система обозначений. Общие обозначения)

ISO 4866:1990, Mechanical vibration and shock — Vibration of buildings — Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings (Вибрация и удар механические. Вибрация зданий. Руководящие положения по измерению вибраций и оценка их воздействия на здания)

ISO 2372, Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s Basis for specifying evaluation standards (Механическая вибрация станков с рабочими скоростями от 10 до 200 об/с. Принципы определения оценочных стандартов)

ISO 2631-1:1997, Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements (Вибрация и удар механические. Оценка воздействия вибрации всего тела на организм человека. Часть 1. Общие требования)

**Издание официальное**

ISO 2631-2:2003, Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz [Вибрация и удар механические. Оценка воздействия вибрации всего тела на организм человека. Часть 2. Вибрация в зданиях (от 1 Гц до 80 Гц)]

ISO 3010:2001, Basis for design of structures — Seismic actions on structures (Основы расчета конструкций. Сейсмические воздействия на конструкции)

ISO 4354, Wind actions on structures (Воздействие ветра на конструкции)

ISO 6897, Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low-frequency horizontal motion (0,063 to 1 Hz) [Вибрация. Рекомендации по оценке горизонтальных составляющих низкочастотных колебаний (от 0,063 до 1 Гц) на обитателей стационарных сооружений, особенно в зданиях и на морских сооружениях]

ISO 8041, Human response to vibration — Measuring instrumentation; (Воздействие вибрации на человека. Средства измерений)

ISO 8569, Mechanical vibration and shock — Measurement and evaluation of shock and vibration effects on sensitive equipment in buildings (Вибрация и удар механические. Измерение и оценка воздействия удара и вибрации на чувствительное оборудование в зданиях)

ISO 8930, General principles on reliability for structures — List of equivalent terms (Общие принципы надежности конструкций. Перечень эквивалентных терминов)

ISO/TS 10811-1, Mechanical vibration and shock — Vibration and shock in buildings with sensitive equipment — Part 1: Measurement and evaluation (Вибрация и удар. Вибрация и удар в помещениях с установленным оборудованием Часть 1. Измерения и оценка)

ISO/TS 10811-2, Mechanical vibration and shock — Vibration and shock in buildings with sensitive equipment — Part 2: Classification (Вибрация и удар. Вибрация в помещениях с установленным оборудованием. Часть 2. Классификация)

ISO 10816 (all parts), Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts [Вибрация, контроль состояния машины по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях (все части)]

ISO 14837-1, Mechanical vibration — Ground-borne noise and vibration arising from rail systems — Part 1: General guidance (Вибрация механическая. Шум и вибрация, создаваемые движением рельсового транспорта. Часть 1. Общее руководство)

## 3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ИСО 2041 и ИСО 8930, а также следующие термины с соответствующими определениями.

Примечание — См. также ИСО 3898 и ИСО 2394.

3.1 **усиление** (amplification): Увеличение амплитуд колебаний относительно начальной амплитуды.

3.2 **ослабление** (attenuation): Потеря энергии колебаний в тракте передачи.

3.3 **широкополосный спектр** (broadband spectrum): Спектр колебаний, распределенный по широким полосам частот (например, октавный спектр, третьоктавный спектр).

3.4 **демпфирование (затухание)** (damping): Рассеивание энергии в колебательной системе.

3.5 **динамические воздействия** (dynamic actions): Быстро меняющиеся воздействия, возбуждающие колебания.

3.6 **динамические силы** (dynamic forces): Быстро меняющиеся силы, возбуждающие колебания.

3.7 **преобразование Фурье** (Fourier transformation): Математическая процедура, которая преобразует запись сигнала во времени в комплексный частотный спектр (спектр Фурье) без потери информации.

3.8 **частотные компоненты** (frequency components): Центральные частоты в узких полосах частот, в которых концентрируется энергия спектра.

3.9 **амплитудно-частотная характеристика;** АЧХ (frequency response function): Функция частотного спектра выходного сигнала, деленная на функцию частотного спектра входного сигнала.

Примечание — АЧХ обычно дается графически кривыми, показывающими отношение амплитуд, а в приемлемом случае — сдвиг фаз или фазовый угол как функцию частоты. Альтернативно, АЧХ есть Фурье-преобразование реакции структуры на импульс.

3.10 **геометрическое расширение** (geometric spreading): Затухание амплитуд колебаний с увеличением расстояния от источника вибрации в результате рассеяния энергии в большем объеме.

3.11 **импульсный источник** (impulsive source): Источник, вызывающий динамическое воздействие короткой длительности по сравнению с периодом собственных колебаний рассматриваемого сооружения.

3.12 **вид вибрации** (mode of vibration): Форма колебаний, соответствующая какой-либо собственной частоте рассматриваемой системы.

3.13 **узкополосный спектр** (narrow-band spectrum): Спектр вибрации, сконцентрированной в узких полосах частот.

3.14 **собственная частота** (natural frequency): Одна из динамических характеристик линейной системы, которой соответствует одна из форм колебаний.

3.15 **октавный спектр** (octave-band spectrum): Спектр, определенный с помощью фильтра, отсекающего частоты за пределами полосы частот, где максимальная частота в каждой полосе равна минимальной частоте, умноженной на 2.

3.16 **приемник** (receiver): Человек, сооружение или все, что находится в здании, и подвергается воздействию вибраций.

3.17 **спектр отклика** (response spectrum): Максимальные отклики ряда систем с одной степенью свободы, подверженных заданному динамическому движению основания, представленные функцией собственных частот для определения демпфирования.

3.18 **удар** (shock): Динамическое воздействие, длительность которого короче периода собственных колебаний приемника.

3.19 **спектр удара** (shock spectrum): Спектр отклика для ударного воздействия.

3.20 **источник** (source): Источник происхождения вибрации.

3.21 **спектр** (spectrum): График функции времени, преобразованный в частотную область.

3.22 **незатухающая вибрация** (sustained vibration): Колебания, длительность которых состоит из многих периодов.

3.23 **третьоктавный спектр** (third-octave-band spectrum): Спектр, определенный с помощью фильтра, отсекающего частоты за пределами полосы частот в случае, когда максимальная частота в каждой полосе равна минимальной частоте, умноженной на $2^{1/3}$.

3.24 **передаточная функция** (transfer function): Для системы — математическое отношение в частотной области между выходом и входом этой системы.

3.25 **тракт передачи** (transmission path): Канал от источника до приемника.

3.26 **несбалансированная сила** (unbalanced force): Сила, вызванная дисбалансом вращающейся массы источника.

3.27 **пешеходный переход, пешеходный мостик** (walkway, footbridge, pedestrian bridge): Сооружение, по которому движутся пешеходы без моторизованных транспортных средств, в пределах здания, между зданиями или за пределами зданий.

## 4 Описание проблемы вибрации

### 4.1 Общие замечания

Колебания в конструкциях возникают при действии возмущений, которые изменяются во времени, и зависят от инерционных свойств рассматриваемой среды. Возмущение может быть в виде сил или функций смещения; рассматриваемая среда может быть твердым телом, жидкостью или газом. Процесс вибрации можно описать аналитически, используя законы и уравнения движения с учетом деформационных свойств рассматриваемой среды.

Оценка колебаний в зданиях и на пешеходных переходах должна учитывать характеристики источника вибрации, тракт передачи и приемник. Источник вибрации создает динамические силы или смещения. Среда или сооружение между источником и приемником составляют тракт передачи, а результирующие колебания на приемнике подлежат оценке по критериям предельного состояния заданной эксплуатационной надежности. Динамические действия являются функцией времени и пространства и рассмотрены в разделе 5. В разделе 6 приведены методы анализа отклика, а в разделе 7 — приемлемые вибрационные критерии. Некоторые данные, представленные в настоящем международном стандарте, взяты из других источников (например, в ИСО 2394:1998, пункт 6.2.1). В случае, когда данные являются доступными, следует использовать метод частных коэффициентов. В соответствии с ИСО 2394 его следует применять для проверки эксплуатационной надежности.

### 4.2 Источник вибрации

Источник вибрации может быть внутри или снаружи здания.

#### 4.2.1 Источники колебаний внутри здания

Вибрационные источники внутри зданий включают в себя:

- деятельность и движение людей;
- станки и механизмы, совершающие вращательное и возвратно-поступательное движение;
- ударное машинное оборудование (штампы, прессы и т. д.);
- перемещающиеся машины и механизмы (тележки, погрузчики с вилочным захватом, конвейеры, мостовые краны и т. д.);
- работу механизмов, обеспечивающих эксплуатацию сооружений или снос конструкций в других частях здания.

#### 4.2.2 Источники колебаний за пределами здания

Источники колебаний за пределами здания могут находиться на поверхности земли, под землей, в воздухе или воде, например:

- строительство, взрывные работы в шахтах или карьерах;
- работа механизмов на близлежащей стройке (забивка свай, уплотнение, выемка грунта и т. д.);
- дорожное и железнодорожное движение;
- звуковой удар или воздушная продувка;
- воздействие ветра или потоков воды;
- штамповочные прессы или другое машинное оборудование в близлежащих зданиях;
- толчки судов, находящихся у причалов;
- внезапные обрушения породы.

### 4.3 Тракт передачи

Тракт передачи видоизменяет колебания от источника к приемнику вследствие нарушений непрерывности, ослабления из-за геометрического расширения и затухания в материале и возможного усиления или ослабления колебаний в определенных частотных диапазонах.

### 4.4 Приемник

Приемником колебаний является объект или субъект, для которого надо оценить влияния вибрации. Определение приемника может охватывать строительные конструкции (или их компоненты, например, балки, плиты, стены, окна и т. д.), содержимое определенного здания (измерительное оборудование), люди, проживающие или временно находящиеся в этом здании.

## 5 Динамические воздействия

### 5.1 Общие замечания

Динамическими воздействиями являются силы, смещения или их производные (скорости, ускорения), или энергия, связанная с источником колебаний. Во многих случаях динамические воздействия не могут быть описаны детерминистскими зависимостями, поэтому в таких случаях рекомендуется рассматривать данные воздействия как случайные.

### 5.2 Машинное оборудование

#### 5.2.1 Машины и механизмы с вращающимися частями

Значения для несбалансированных сил от машин и механизмов с вращающимися частями следует получать от изготовителей. В отсутствие таких данных максимальные приемлемые несбалансированные силы для соответствующей категории машин могут быть приняты по ИСО 2372 (электрооборудование) или ИСО 10816 для крупных вращающихся станков, или по другим соответствующим стандартам. Эти силы возникают за счет несбалансированного изменения упругих опорных условий, а также в случае, когда рабочая частота выше или ниже резонансной частоты, рассчитанной для установленного машинного оборудования. Существует тенденция к увеличению несбалансированных сил по мере срока эксплуатации машин и механизмов, поэтому следует учитывать влияние старения машинного оборудования. Машины и механизмы, а также их компоненты могут возбуждать значительные силы во время аварий или быстрых остановок. Такие действия следует рассматривать при оценке предельного состояния эксплуатационной надежности. Несбалансированные силы от присоединенных к машинному оборудованию (трансмиссий, роторов и т. д.) также необходимо принимать во внимание.

Режим пуска, выхода на рабочий режим и остановки механизмов должен учитываться, когда рабочая частота выше любой из резонансных частот установленного оборудования или любого из опорных элементов или конструкций.

**5.2.2 Машинное оборудование с возвратно-поступательным движением масс**

Действия машинного оборудования с возвратно-поступательным движением масс зависят от типа и конструкции станка, рабочего режима, например скорости вращения и нагрузки, монтажных особенностей, срока эксплуатации и технического состояния машин и механизмов. Количественные характеристики динамических воздействий следует получать от изготовителя оборудования, но они могут быть измерены или вычислены в виде сил или перемещений (ускорений, скоростей) как функций от времени или спектров этих величин.

**5.2.3 Ударное машинное оборудование**

Это оборудование включает в себя, например, кузнечные молоты, штамповочные прессы и механизмы для забивки свай. Они, как правило, генерируют силы большой мощности. Действие ударного оборудования можно оценивать характером и значением смещения опорной конструкции (скоростью или ускорением) или энергией системы при расчете на удар. Необходимые данные следует получать от изготовителя, но они могут быть получены по результатам измерений или вычислены.

**5.2.4 Другие машины и механизмы**

Определенное машинное оборудование (например, шлифовальные, фрезерные станки) создают возбуждения случайного типа совместно с другими типами возбуждения, например вращательными или, возможно, ударными.

**5.3 Движение транспортных средств (дорожных и рельсовых)**

**5.3.1 Общие замечания**

Автомобили с пневматическими шинами и поезда на рельсах являются основными источниками колебаний, передающихся на сооружения через грунт. Действие подобных источников можно характеризовать функциями сила — время, частотным спектром, уровнем смещений при отдалении от источника. К числу источников вибраций, распространяющихся по грунту, также относятся стационарное оборудование, установленное на отдельные фундаменты или в соседних зданиях. Из-за сложности проблемы определения источников вибраций часто используются эмпирические подходы и, что наиболее достоверно, по результатам измерений. Данные методы могут комбинироваться с аналитическим и численным моделированием в зависимости от ситуации.

**5.3.2 Автотранспортные средства**

Колебания, вызванные автотранспортными средствами, зависят от характеристик подвески, массы, скорости, плотности трафика, типа и неровности дороги (включая дискретные неровности) и свойств дорожного полотна.

Влияния этих факторов являются взаимосвязанными и не могут быть определены простыми формулами.

**5.3.3 Железнодорожный транспорт**

К главным факторам, которые влияют на колебания, вызванные движением железнодорожных составов, относятся:

- тип поезда (пассажирский, грузовой, скорый, подземный и т. д.);
- вес, массы отдельных вагонов;
- тип подвески;
- скорость;
- тип пути или тип рельса (непрерывные или рельсы со стыками, неровности поверхности и т. д.);
- балласт, земляное полотно и общие грунтовые условия.

Влияния этих факторов являются взаимосвязанными и не могут быть определены простыми формулами. Общее руководство по вибрациям от железнодорожного транспорта приведено в ИСО 14837-1.

**5.4 Импульсные источники**

**5.4.1 Общие замечания**

Характеристики источника вибрации описываются зависимостью сила — время, величиной давления или функцией перемещения, скоростью или ускорением опорной конструкции в начале удара. Приблизительные оценки включают в себя следующее:

- пиковые значения и длительность (для импульсных источников);
- среднеквадратичное (r.m.s.) или пиковое значение и частотный спектр для незатухающих колебаний;
- статистические характеристики, такие как среднеквадратичные значения, третьоктавные, октавные и узкополосные спектры;
- спектры отклика (или удара).

Если используются среднеквадратичные значения, следует уделять внимание методу усреднения. Полагают, что имеется несколько случаев в день и что общая длительность действия носит времен-

ный характер (например, при строительстве). В этом случае рекомендуется использовать время усреднения 1 с, как показано в ИСО 2631-1:1997, пункт 6.3.1.

**5.4.2 Импульсные источники в грунте**

Главная характеристика импульсных источников, например при взрывных работах при строительстве, открытых горных работах и забивке свай — количество энергии, выделяемой в грунт. Параметры движения грунта на заданном расстоянии от источника могут быть получены эмпирическими методами на основе результатов измерений путем определения границ движения грунта и расчетных спектров отклика.

Обрушения горных пород, вызванные обвалом в подземных пустотах или локализованным перераспределением горной породы в результате горнодобывающей деятельности, близки по характеру воздействий к землетрясениям. Характеристики движения грунта на месте строительства можно описать пиковыми значениями, временным рядом и/или спектром отклика. Данные характеристики будут изменяться вместе с геологией и историей горных работ на строительной площадке или рядом с ней. Методы, с помощью которых оценивается характер движения грунта при обрушении горных пород для предельного состояния эксплуатационной надежности, приведены в ИСО 3010.

**5.4.3 Управляемые прерывистые и импульсные источники в пределах строения**

Колебания в пределах строения могут быть вызваны операциями организованного его сноса, а также процессами производства, которые не являются регулярными по времени и интенсивности. К таким источникам могут быть отнесены:

- тяжелое оборудование (транспортные средства, вибрирующие катки или отбойники, разрушающий инструмент и т. д.);
- управляемые взрывные работы в пределах строения;
- падение тяжелых предметов.

Краны и лифты (подъемники) также могут индуцировать импульсные силы в течение операций запуска и остановки.

Примечание — Случайные взрывы или другие типы аварийных ситуаций, которые вызывают колебания, в настоящем стандарте не рассматриваются.

**5.4.4 Источники, колебания от которых распространяются в воздушной или водной среде**

Воздействие зарядов взрывчатого вещества характеризуется выделением энергии или изменением избыточного давления во времени. Звуковой удар в результате прохождения самолетом звукового барьера можно описать в виде изменений давления во времени.

**5.5 Деятельность человека**

**5.5.1 Повторяющиеся скоординированные действия на фиксированной площади**

Для многих повторяющихся скоординированных действий людей динамическое воздействие распределяется более или менее равномерно по основной части сооружения. При этом активные участники или не изменяют свои позиции или вся группа людей движется таким образом, чтобы сохранялась более или менее равномерная нагрузка. К таким действиям относятся гимнастические упражнения, танцы, согласованные прыжки, бег группы людей, поведение болельщиков в залах или стадионах и другие подобные действия. При этом все эти воздействия можно характеризовать изменениями силы во времени или спектральными компонентами.

**5.5.2 Движение человека или группы**

Динамические воздействия одного человека или группы людей на опорные конструкции могут быть представлены как силы или совокупность сил, зависящих от времени, в местах их приложения или как их соответствующие частотные компоненты. Данные воздействия изменяются во времени и по положению одного человека или группы людей, пересекающих опорную конструкцию.

Примечание — Необходимо учитывать возможность возбуждения резонансных колебаний в пешеходных переходах с низкими горизонтальными и вертикальными собственными частотами и, при необходимости, принимать соответствующие меры. Некоторые рекомендации приведены в приложениях А и С.

**5.5.3 Одиночные импульсы**

Одиночные импульсы возникают в результате следующих воздействий:

- при соскоке людей с предметов;
- при соскоке людей со ступенек лестниц;
- случайное или преднамеренное сбрасывание предметов на пол;
- единичное согласованное действие, например подпрыгивание на ногах (как это делают болельщики на спортивных мероприятиях).

Данные действия можно описать некоторыми зависимостями усилия — время (или представить в виде разложения в ряд Фурье).

Примечание — Некоторые примеры динамических воздействий от человеческой деятельности приведены в приложении А.

### 5.6 Ветер

Воздействия ветра на сооружения приведены в ИСО 4354.

### 5.7 Землетрясения

Воздействия землетрясений на сооружения приведены в ИСО 3010.

## 6 Оценка амплитудно-частотной характеристики

### 6.1 Общие замечания

При анализе АЧХ используется расчетная модель, которая объединяет характеристики источника вибраций и тракт передачи и позволяет оценить реакцию объекта на воздействие вибраций. Тип и сложность расчетной модели зависят от ее близости к реальной работе конструкции (которую она моделирует) и определяется с точностью, необходимой для прогнозирования отклика на воздействие вибрации. При использовании расчетной модели необходимо учитывать принятые допущения. Такой анализ может касаться существующих строений и учитываться при проектировании новых сооружений.

Колебания в существующих строительных конструкциях следует оценивать по результатам измерений, если это возможно, что позволит во многих ситуациях проверить или уточнить результаты расчетов.

Методы аппроксимации для прогнозируемых колебаний могут быть применены в следующих случаях:

a) допущения при аппроксимации практически соответствуют известной реальности;

b) полученный результат был проверен опытной эксплуатацией и/или уточненными вычислениями.

### 6.2 Методы анализа

#### 6.2.1 Общие замечания

Параметры вибрации могут быть описаны несколькими показателями, например амплитудой, длительностью воздействия и частотным спектром. Требуемый анализ, в свою очередь, обусловлен типом источника и трактом передачи. Если динамические воздействия являются случайными, то целесообразно использовать теорию случайных колебаний.

Можно идентифицировать два широких класса проблем вибрации:

- класс А — действия источника вибрации изменяются во времени и пространстве;
- класс В — действия источника вибрации изменяются во времени, но они либо установившиеся, либо могут считаться установившимися в пространстве.

Примечание — Примеры класса А: транспортное средство, движущееся по улице, человек, идущий по этажу; примеры класса В: колебания от машинного оборудования, люди, подпрыгивающие в унисон на полу. Примеры эмпирических методов: прогноз колебаний в ходе взрывных работ, прогноз колебаний от дорожного движения.

Эмпирические методы применяются, когда полное аналитическое решение проблемы может быть некорректным. Эмпирические методы могут быть использованы, если они выведены из большого числа экспериментальных и теоретических результатов и в случае, когда для них была установлена область применимости. В случае, когда эмпирические методы и критерии используются при решении проблем, отличных от тех, для которых они были выведены, применимость этих методов к новой ситуации необходимо проверять.

Характеристики источника вибрации, тракта передачи и приемника не всегда определяются точно. В частности, когда люди одновременно являются источником вибрации и приемниками и когда само присутствие людей на сооружении может изменить его динамические свойства, как в случае нагрузки от группы людей, находящихся в здании. Подобные неопределенности могут быть присущи и другим проблемам вибрации. Следовательно, рекомендуется проводить анализ надежности (ИСО 2394).

#### 6.2.2 Колебания, уровень которых изменяется во времени, а положение источника — в пространстве

Если действие вибраций изменяется как во времени, так и в пространстве, аналитическое решение проблем вибрации становится затруднительным. Для этих целей используют возможные упрощения, с тем, чтобы разделить на отдельные фрагменты пространственную модель. Сложность данных проблем

является одной из причин применения эмпирических методов и широкого использования результатов измерений на аналогичных существующих сооружениях.

**6.2.3 Колебания, изменяющиеся во времени**

Если источник вибрации не перемещается в пространстве, многие методы анализа могут быть применены для решения проблем вибрации. Общая схема решения по возможности использует некоторую эквивалентную систему с одной степенью свободы или модальный анализ для непрерывных и дискретных систем.

**6.3 Численная оценка уровней вибрации**

**6.3.1 Общие замечания**

Для определения уровней вибрации на приемнике необходима двухступенчатая процедура:

a) математическое моделирование с возможно наиболее близкими динамическими характеристиками расчетной схемы объекта — сооружения, фундамента или фрагмента;

b) вычисление АЧХ на приемнике с учетом характеристик источника вибрации.

Математическая модель может базироваться либо на непрерывном, либо на дискретном распределении масс (система со многими степенями свободы).

Примечание — Некоторые примеры математического моделирования и вычисления АЧХ приведены в приложении В.

**6.3.2 Демпфирование для предельного состояния эксплуатационной надежности**

Демпфирование является важным свойством, определяющим уровень колебаний вблизи резонанса, и характер свободных колебаний. Демпфирование зависит от использованных материалов, конструктивных особенностей и присутствия ненесущих компонентов, например напольных покрытий, потолков, механического оборудования и перегородок. Присутствие людей также влияет на характер демпфирования. В общем случае демпфирование не может быть точно вычислено или надежно спрогнозировано. Опыт работы с подобными типами сооружений позволяет получить приемлемые данные по демпфированию. Если возможно, степень демпфирования следует устанавливать путем измерений. Следует отметить, что демпфирование в зданиях и компонентах здания часто зависит от амплитуды, и это следует учитывать при использовании измеренных данных для вычисления динамического отклика на разных амплитудах. Для ряда механизмов и элементов конструкций демпфирование можно идентифицировать (например, вязкое, фрикционное, гистерезисное и их комбинации) и учитывать, используя известные модели. Следует быть осторожным при выборе этих моделей и связанных с ними предельных значений.

Примечание — Некоторые модели и предельные значения параметров демпфирования приведены в приложении В. Модели и параметры демпфирования для разных предельных состояний эксплуатационной надежности надо выбирать, учитывая кроме всего прочего уровень отклика (например, при землетрясении по сравнению с колебаниями от дорожного движения), состояния бетона, имеющего трещины, по сравнению с бетоном без трещин.

**6.3.3 Колебания, распространяющиеся в непрерывной среде**

Непрерывная среда — физическая система, для которой длина распространяющейся волны существенно короче физических размеров рассматриваемой среды. Для таких случаев при вычислении передачи колебаний надо использовать принципы теории распространения волн.

При вычислении колебаний, распространяющихся в непрерывной среде, надо учитывать следующие факторы:

a) эффекты сопряжения на источнике;

b) материальные свойства передающей среды:
   1) масса (плотность),
   2) степень насыщения,
   3) жесткость,
   4) демпфирование (затухание);

c) геометрическое расширение передающей среды:
   5) разные формы расслоения,
   6) нарушения непрерывности и экранирование,
   7) геометрическое ослабление с удалением от определенного источника;

d) влияния взаимодействия строения с грунтом или с жидкостью;

e) передача к приемнику в пределах здания.

Расслоение и изменения геометрии вдоль тракта распространения может привести к местному усилению или ослаблению колебаний в отдельных частотных диапазонах. Для грунтов степень уплотнения, насыщения (например, в зависимости от уровня подземных вод) и внутреннее трение материалов

влияют на характер колебаний, главным образом на зависимость уровней колебаний от расстояния до источника. Анализ подобных ситуаций достаточно сложен. Для количественной оценки параметров колебаний, как правило, используются эмпирические методы.

Характер распространения вибраций, а возможно — и некоторые количественные результаты, могут быть получены также аналитически или экспериментально как функции частоты (т. е. в виде амплитудно-частотных характеристик, функций передачи) или как функции времени (т. е. функции отклика на импульсное возмущение). Аналитические методы должны соответствовать принятой расчетной схеме. Результаты должны быть проверены на тестовых примерах. Аналитические или эмпирические формулы для функции передачи могут быть использованы, если их применимость к данной ситуации была подтверждена соответствующими теоретическими или экспериментальными методами. В дополнение к свойствам передачи вибраций через грунт необходимо рассмотреть возможные изменения его физических характеристик, например закрепление, осадка и разжижение грунта, формирование оползней. Данные изменения, как правило, ассоциируются с колебаниями большой амплитуды или продолжительной длительности.

Импульсы давления и суммарный импульс от подводных взрывов по линии распространения может быть вычислен исходя из отношений заряда/дистанции. Скальное или грунтовое покрытие и воздушные пустоты являются экраном для распространяющихся волн, что дает в результате существенное снижение пикового давления, однако увеличивает длительность воздействия импульса. Необходимо учитывать отражения от твердых пограничных слоев и водной поверхности, а также дифракция вокруг препятствий по линии распространения между источником и приемником.

#### 6.3.4 Колебания дискретных систем

Многие сооружения при правильном выборе количества и расположения масс, адекватных жесткостных характеристик и способов учета диссипативных сил могут быть удачно смоделированы дискретными системами. Во многих случаях могут быть использованы некоторые аналогии с системой с одной степенью свободы, или метод «нормальных форм», с помощью которого строятся методы решения задач для динамического расчета линейных систем. Возможность дискретизации систем зависит от конкретных случаев. Например, расчет отклика плиты междуэтажного перекрытия на прыжки людей может быть выполнен с помощью дискретного анализа методом «нормальных форм». Если надо оценивать высокочастотные колебания, например звуковые распространяющиеся по сооружению, и АЧХ удара, перекрытие необходимо рассчитывать с помощью континуумного подхода (используя теорию распространения волн).

### 6.4 Оценка уровней вибрации по результатам измерений

#### 6.4.1 Общие замечания

Когда уровни вибрации в существующих зданиях необходимо оценивать по результатам измерений, измерительные процедуры, применение приборов и оценка результатов должны быть проведены в соответствии с рекомендациями, изложенными в ИСО 8041.

#### 6.4.2 Измеряемые величины

Параметры вибрации, которые должны быть измерены и проанализированы, включают в себя смещения, скорость, ускорение и иногда деформацию в соответствующем частотном диапазоне. Выбор измеряемых параметров зависит от принятой методики анализа результатов измерений и соответствующих вибрационных критериев. Хотя каждая величина ускорения, скорости или смещения может быть выведена одна из другой путем интегрирования или дифференцирования, как правило, предпочтительно измерять искомую величину непосредственно или выполнить интегрирование. Применять дифференцирование не рекомендуется (кроме гармонических колебаний), поскольку при этом значительно искажается картина колебаний. Следует проводить измерения достаточно продолжительное время, чтобы после статистической обработки получить близкий к реальности уровень надежности.

#### 6.4.3 Измерительная аппаратура и диапазон измерений

Измерительную аппаратуру следует выбирать с учетом вибрационного параметра, который надо измерить, и ожидаемого диапазона его изменений.

Примечание 1 — Общепринятыми диапазонами измеренных величин колебаний зданий являются следующие:

- частота: от 0,15 до 100 Гц, за исключением импульсных откликов и зданий на скальных породах, где частота может быть выше 100 Гц;
- ускорения: от $10^{-3}$ до 10 м/с$^2$;
- скорости: от $10^{-5}$ до $10^{-1}$ м/с; для измерений, где используются микроэлектронное, оптическое и подобное оборудование (нано-технологии) могут применяться нижние пределы;
- смещения: от $10^{-7}$ до $10^{-2}$ м.

Примечание 2 — Комплект для измерения основной вибрации может состоять из датчиков, схемы коммутирования сигнала и приборов записи или текущего контроля.

Примечание 3 — Для комплексных колебаний можно использовать аналоговую или цифровую регистрацию или приборы непосредственного анализа.

**6.4.4 Расположение точек измерения**

6.4.4.1 Измерение колебаний зданий

Расположение точек измерения и выбор направлений зависят от типа сооружения и метода оценки, который будет использоваться. Эти данные должны быть точно указаны в программе измерения.

Места установки датчиков и направления измерений следует выбирать с учетом геометрии сооружения и источников возбуждения. Обычно используются прямоугольные координаты (*x* и *y* для горизонтальных; *z* для вертикальных). Расположение датчиков вдоль цилиндрической или другой координатной системы может быть более предпочтительным для специальных ситуаций.

В частных случаях необходимо соблюдать следующее.

a) Если параметры вибрации, которые надо измерять, используются для того, чтобы установить горизонтальные воздействия на существующее здание, то точки измерений следует располагать на стенах или вблизи стен; в многоэтажных зданиях следует располагать точки измерений на трех и более уровнях.

b) Если оценка влияния наведенных кинематических воздействий на здание, которое надо конструировать, базируется на измерениях вибрации, точки измерений следует располагать на грунте на месте планируемого строительства здания. Более надежные результаты могут быть получены, если точки измерений находятся на дне котлована, на уровне проектируемого фундамента.

c) Чтобы оценить интенсивность вибрации, используя шкалу динамических воздействий, точки измерений следует располагать на фундаменте или несущей нагрузку стене на уровне грунта со стороны, обращенной к источнику колебаний.

6.4.4.2 Измерения вибрации на машинах, механизмах и оборудовании в зданиях

При измерении подобных вибраций одну или несколько точек измерений необходимо располагать либо на опорной плите станка, либо на опорной конструкции оборудования в том месте, где ожидаются наиболее интенсивные колебания.

6.4.4.3 Измерения, которые проводятся для оценки влияния вибрации на людей, находящихся в зданиях

Точки измерений должны быть расположены в местах, где люди могут ощущать вибрацию. Колебания должны быть измерены по тем направлениям, по которым люди чувствуют себя некомфортно. При неопределенности необходимо измерять колебания по всем ортогональным направлениям.

**6.4.5 Измерения вибрации и анализ результатов**

Схемы установки датчиков и направления измерений должны быть указаны в программе исследования.

При сложных длительных вибрациях регистрируемые параметры должны быть записаны на аналоговом или цифровом оборудовании с последующим анализом. Максимальные зарегистрированные значения вибраций в контрольных точках необходимо сопоставить с критерием эксплуатационной надежности.

**6.4.6 Отчет по измерениям**

Отчет по измерениям должен включать в себя:

- цель измерения;
- официальный базис измерения (например, соответствующий стандарт);
- описание и местоположение источника вибрации;
- использованные измерительные приборы (тип, число, результаты поверки, диапазоны измерения);
- метод подсоединения преобразователей;
- подробности записи (длина записи, частота выборки, установки фильтров, усиление и т. д.);
- характеристику здания, включая его техническое состояние;
- расположение точек измерений с указанием расстояния между ними;
- сопутствующие условия и события (атмосферные условия, другие возмущения и т. д.);
- фамилии членов группы специалистов, проводящих измерения;
- краткую сводку показаний приборов или результаты.

# 7 Критерии вибрации для предельного состояния эксплуатационной надежности

## 7.1 Общие замечания

Вибрационные критерии должны соответствовать предельному состоянию эксплуатационной надежности, которое задано для приемника.

Разработчик должен принять решение по критериям эксплуатационной надежности и ее изменчивости. Изменение этих критериев в предельном состоянии обычно закладывается в критерий для приемника. В некоторых случаях с определенной степенью вероятности допускается превышение критерия эксплуатационной надежности. В ряде случаев, когда критерий эксплуатационной надежности не следует превышать, особенно при необратимых последствиях (например, образование трещин, осадка); в таком случае следует выбирать нижнюю вероятность превышения. Руководство см. в ISO 2394. Следует учитывать также возможность изменения частот собственных колебаний строения или его компонента.

Критерии в соответствии с данным стандартом относятся к трем категориям приемников:

a) люди, живущие или работающие в здании;

b) все, что находится в здании (его содержимое);

c) строительные конструкции.

### 7.1.1 Критерии для жителей и посетителей здания

Критерии реакции человека на колебания, можно сгруппировать по следующим категориям:

- «чувствительные» помещения, например операционные в больницах,
- «обычные» помещения, например офисы и жилые площади; и
- «активные» помещения, например площади или цеха промышленности.

Примечание — «Активные» помещения включают в себя ярусы в аренах, гимнастические залы и стадионы, подверженные воздействию такой деятельности, как танцы, бег, прыжки и согласованные движения зрителей.

### 7.1.2 Критерии для содержимого здания

Критерии для содержимого зданий должны обеспечивать уровни вибрации, которые гарантируют удовлетворительное функционирование чувствительных контрольно-измерительных приборов или определенных производственных процессов, которые размещаются в конкретном здании. Примерами такого содержимого здания являются микровесы, электронные микроскопы, фотографические проекционные системы интегральных схем, оборудование для выращивания кристаллов, средства лазерной интерферометрии, нанотехнологии и т. д.

### 7.1.3 Критерии для строительных конструкций

Критерии для строительных конструкций могут соответствовать предельному состоянию эксплуатационной надежности, однако могут также включать в себя небольшие повреждения конструктивных и неконструктивных элементов. В эти критерии не включаются перегрузки зданий или фрагментов, которые могут привести к чрезмерным постоянным напряжениям или разрушениям. Допустимые уровни вибрации зависят от типа конструкции, срока службы и важности (монументальная или историческая ценность, временное убежище и т. д.), состояния ремонта, типа и длительности колебаний и динамики приложения нагрузок. Некоторые примеры вибрационных критериев приведены в приложении С.

Примечание — Предельное состояние эксплуатационной надежности для строений может включать в себя образование трещин в чистовой отделке (штукатурки, наружной обшивки), волосяные трещины или видимое растрескивание армированного бетона или других материалов или максимальное допустимое динамическое смещение.

## 7.2 Вибрационные критерии для жителей или посетителей здания

### 7.2.1 Общие замечания

Для людей допустимые уровни вибрации в значительной степени зависят от окружающей среды, где наблюдается вибрация. Некоторые допустимые уровни вибрации приведены в приложениях С и D. Указанные вибрационные критерии, возможно, потребуют дальнейшей корректировки, с тем чтобы они удовлетворяли конкретным обстоятельствам.

Примечание — Реакция людей на вибрации в зданиях зависит от многих факторов. Непосредственное влияние оказывают частота, амплитуда, длительность воздействия, изменчивость, форма, направление вибрации и интервалы между вибрационными событиями, незащищенность отдельных участков тела человека от вибрации. Косвенное влияние на субъективную реакцию человека в окружающей среде, где присутствуют вибрации, оказывают следующие факторы: низкочастотный шум и инфразвук, визуальные сигналы, тип населения, осведомленность о вибрации, уверенность в строительной конструкции, высота над уровнем земли, предупреждение о предстоящих

событиях, деятельность, в которую вовлечены люди, знание источника вибрации и т. д. Во время интерпретации измеренных данных, относящихся к чувствительности человека к вибрациям, особое внимание следует уделять оценке пиковых значений и времени усреднения сигнала. См. ИСО 2631-1 и ИСО 2631-2.

Колебания, влияющие на людей в здании, можно разделить на следующие классы:

- класс a — ниже порога восприятия человеком;
- класс b — выше порога восприятия человека;
- класс c — раздражение, тревога и страх (они могут быть ассоциированы с рядом неблагоприятных комментариев);
- класс d — вмешательство в деятельность человека;
- класс e — возможность риска травматизма или риск для здоровья.

При классе a критерий базируется на помехах при работе с чувствительными приборами, когда оператор начинает понимать присутствие колебательного движения, хотя оно никак не воспринимается каким-либо нормальным органом чувств человека.

Критерий для нижней границы класса e учитывает возможность или необходимость выдачи работающему персоналу удерживающих строп или захватов для рук, с тем чтобы уменьшить риск получения травмы в результате воздействия низкочастотной механической вибрации или вибрации на более высоких частотах в зонах предела незащищенности, определенного в ИСО 2631-1 (см. также ИСО 6897).

Реакция человека на воздействие вибрации классов b, c и d оценивается как категория события, которая может быть:

- непрерывной;
- импульсной; или
- прерывистой.

В общем случае критерии для ограничения значений вибрации для обычных зданий базируются на минимальных неблагоприятных воздействиях на человека. Корректирующие поправки к базовым критериям следует применять в зависимости от категории события.

Примечание — Руководство по оценке реакции человека на вибрацию в зданиях на частотах от 1 до 80 Гц приведено в приложении C, а в диапазоне от 0,063 до 1 Гц в ИСО 6897. Оценка реакции человека на колебания сооружения, возбуждаемые ветром, приведена в приложении D. Разные личные факторы могут сочетаться, чтобы отрицательно воздействовать на субъективное восприятие вибрации человеком. Среди них присутствие шума, линейные и вращательные компоненты вибраций по нескольким осям, действующих одновременно. Индивидуальная реакция человека на вибрацию может меняться, если он будет знать о возникновении событий и гарантии безопасности людей и помещения.

#### 7.2.2 Требования для пешеходных переходов

Пешеходные переходы должны быть спроектированы так, чтобы амплитуды вибрации от источников колебаний не вызывали чувство тревоги у потенциальных пользователей.

Критерии эксплуатационной надежности для пешеходных переходов в пределах зданий или соединяющих здания будут отличаться от переходов над дорогами, железнодорожными или водными путями.

Примечание — Пример выбора вибрационных критериев для пешеходных переходов приведен в приложении C.

### 7.3 Вибрационные критерии для содержимого здания

#### 7.3.1 Общие замечания

Нормальное функционирование многих типов чувствительного оборудования или промышленных процессов требует низкого уровня вибрации в здании, в котором они размещаются. Ввиду большого разнообразия данного оборудования, процессов и быстро изменяющихся технологий невозможно определить какие-либо фиксированные уровни амплитуд колебаний, которые могли бы гарантировать удовлетворительную работу такого оборудования и процессов.

При этом можно выделить два основных случая:

a) проектирование и строительство нового помещения, которое должно удовлетворять определенному вибрационному критерию;

b) оценка на пригодность существующего здания или участка для размещения специальных приборов или процессов.

#### 7.3.2 Вибрационные критерии для оборудования и процессов в проектируемых зданиях

Вибрационные критерии для удовлетворительной работы оборудования или процесса следует получать от производителя. В отсутствие такой информации можно использовать имеющиеся критерии

[например, Gordon (1991)] или опыт эксплуатации подобного оборудования или процессов или следовать методу проб и ошибок. См. ИСО 8569, ИСО/TS 10811-1 и ИСО/TS 10811-2.

Примечание — Чувствительное оборудование и процессы предпочтительнее размещать на плите на уровне грунта, чем на перекрытии. В любом случае может потребоваться виброизоляция частей строения или конкретного оборудования.

### 7.3.3 Оценка колебаний в существующих зданиях

Для существующих зданий уровни вибраций в месте расположения оборудования или процессов можно измерить (см. ИСО 8569) и сравнить с их приемлемыми критериями. В случае, когда критерии отсутствуют, можно использовать опыт эксплуатации подобного оборудования или процессов или следовать методу проб и ошибок.

## 7.4 Вибрационные критерии для конструкций зданий

### 7.4.1 Общие замечания

Помимо людей, находящихся в здании, и его содержимого, непосредственно конструкция здания должна выдерживать имеющиеся вибрации. Уровень вибрации для определенной конструкции, рассматриваемой в настоящем стандарте, является одним из параметров эксплуатационной надежности и может проявляться в виде образования трещин, скалывания, незначительных осадок фундамента или превышения установленных максимальных амплитуд колебаний опор для станков и механизмов или фундаментов машинного оборудования. Такие воздействия обычно кратковременны и не подвергают риску безопасности конструкции, но при долговременном воздействии могут привести к отрицательным последствиям (например, коррозия, проникновение воды и промерзание, потеря внешнего вида, осадок или усталость) с возможными рисками при обеспечении безопасности или экономическим последствиям.

Колебания, которые конструкция может выдерживать, зависят от предела прочности при растяжении, сжатии или сдвиге конструкционного материала с должным допуском на усталость или допустимым деформациям, соответствующим предельному состоянию эксплуатационной надежности. По возможности, влияние вибраций на конструкцию должно быть объединено с воздействием на нее других факторов (статические нагрузки, деформации, осадка, ползучесть и т. д.). Также необходимо учитывать общее состояние здания (см. ИСО 4866).

Общий принцип оценки вибраций, описанный выше, на практике оказывается слишком трудоемким либо невозможным из-за недостатка имеющихся исходных данных или подходящей методики. На практике для прогноза или оценки влияний вибраций на здания часто используются эмпирические методики. Уровни колебаний должны регистрироваться в характерных или стандартизованных точках с допуском для возможных неопределенностей в характеристиках источника и приемника и тракта передачи. В случае, когда последствия превышения установленных пределов вибраций могут иметь серьезные последствия, рекомендуется выполнить контрольные вибрационные испытания (например, с использование взрывов малой мощности, вибрационных машин и т. д.). Полученные результаты могут быть сведены к определенному масштабу для заданного критерия с учетом законов амплитудного и частотного масштабирования.

Оценке воздействия вибраций должны подвергаться не только конструкции, расположенные в непосредственной близости от источника вибрации, но и основные несущие элементы здания (например, покрытие крыши, колонны, стены и т. д.), даже если здания находятся относительно далеко от источника вибрации. При этом необходимо принимать во внимание возможность передачи колебаний по воздуху, по конструкциям или через грунт. По возможности, параметры вибраций в существующих сооружениях следует определять по результатам измерений.

Примечание — Примеры критериев приведены в приложении С.

### 7.4.2 Критерии для колебаний от ударов/импульсов

Эти колебания включают в себя вибрации оборудования от взрывов, забивки свай, уплотнения грунтов, сноса строений и других ударных воздействий. Широко принятые эмпирические вибрационные критерии, соответствующие измерениям на стене подвала здания или рядом на грунте, используются в виде пиковых значений смещений, скоростей или ускорений. Данные значения могут быть увеличены (или уменьшены) при выполнении специальных теоретических и экспериментальных исследований, которые позволят обосновать эти изменения. Исследования должны учитывать также тип строения, материалы конструкции, частотные характеристики перемещения грунта, надежность оценки реакции конкретных частей строения и последствия превышения заданных критериев. Рекомендации по выбору критериев приведены в ИСО 4866.

**7.4.3 Критерии для колебаний от других источников**

Уровни колебаний от других источников (например, дорожного движения, машинного оборудования, ветра и деятельности человека) должны удовлетворять приемлемому предельному состоянию эксплуатационной надежности.

При оценке уровней колебаний особое внимание следует обращать на случаи, когда рабочая частота одной из преобладающих гармоник лежит в пределах 30 % нижней собственной частоты конструкции или ее компонента. Для более высоких собственных частот может быть достаточным более узкий диапазон частот.

**7.4.4 Эмпирический критерий**

Вибрационные критерии на основе опыта могут быть использованы для тех случаев, когда были определены область и пределы их применения.

**7.4.5 Применение вибрационных критериев к измеренным колебаниям**

Измеренные колебания можно сравнить с соответствующим критерием при условии, что данные были обработаны в форме, совместимой с заявленным критерием. Для колебаний случайного типа могут быть использованы амплитуды в третьоктавной полосе частот.

## 8 Вибрационный контроль

Вибрационный контроль включает в себя мониторинг колебаний у источника, в тракте передачи или у приемника, для того чтобы проверить колебания на соответствие заданному критерию.

Когда возникают новые источники вибрации (например, взрывные работы на строительной площадке и т. д.), и вибрации будут превышать допустимые критерии у приемника, вибрационный контроль должен проводиться под руководством компетентного персонала.

Вибрационный контроль может включать в себя следующие действия:

- периодические измерения вибрации и оценку ее влияния (см. 6.4);
- выборочную проверку интенсивности событий, вызывающих вибрацию (например, взрывные работы);
- установку регистрирующих самописцев на выбранных точках в строении для контроля изменения вибрации.

В случае, когда предельные состояния эксплуатационной надежности для конструкции здания или его содержимого будут превышены, необходимо провести обследование данного здания или его компонентов до введения в действие источника вибраций, что позволит выполнить сравнительную оценку влияния источника вибраций на изучаемый объект.

Контрольные точки для мониторинга вибрации следует выбирать там, где:

a) может наблюдаться максимальное воздействие вибраций;

b) контролируемые воздействия могут влиять на поведение отдельных элементов или всей конструкции (это особенно важно при взрывных работах при строительстве).

Вибрационный контроль может применяться для существующих зданий, когда они подвергаются воздействию вибраций, или для новых сооружений на стадии проектирования, если существует неопределенность при прогнозировании уровней вибраций. Для такого случая может быть разработана схема виброизоляции для последующей ее реализации, если предельно допустимые уровни вибраций будут превышены в построенном здании.

## 9 Уменьшение вибрации

Большинство методов позволяют снизить вибрационные воздействия, передающиеся на конструкции зданий. К ним можно отнести системы виброзащиты (виброизоляция, динамические или ударные гасители колебаний), балансировка или замена оборудования и т. п. К более трудоемким и дорогим способам можно отнести: изменения конструктивных решений отдельных фрагментов здания, главной целью которых является отстройка от резонансных режимов; ограничения при использовании и заселении зданий; изменение характеристик источников вибраций, модификации тракта передачи вибрации и т. д.

Эффективность принятых мер по уменьшению вибрации следует проверять измерением и сравнением уровней колебаний в тех же зонах.

**Приложение А**
**(справочное)**

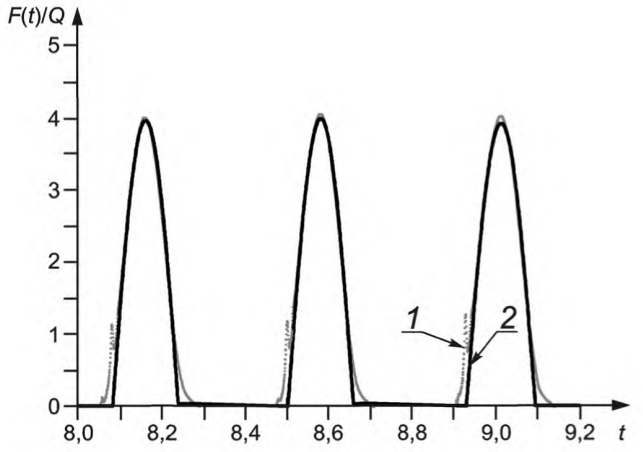
## Динамические воздействия

### А.1 Воздействия от движения людей

#### А.1.1 Периодические синхронные воздействия

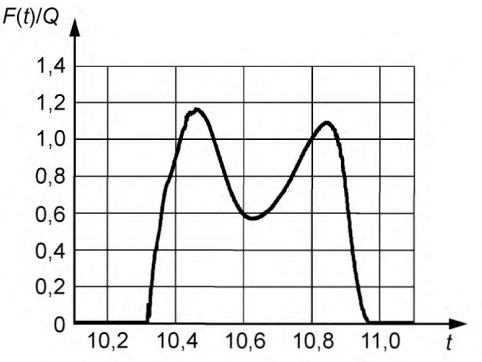
А.1.1.1 Динамические нагрузки

Динамическое воздействие $F(t)$, возбуждаемое человеком весом $Q$, который осуществляет повторяющиеся действия, может быть представлено как функция времени $t$ (последовательность импульсов). Примеры показаны на рисунках А.1, А.2 и А.3.



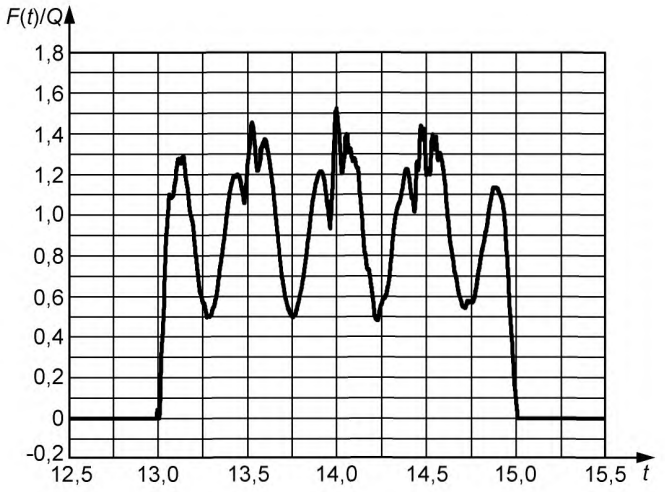

$t$ — время, с; $F(t)/Q$ — нормированная амплитуда; *1* — измеренный сигнал;
*2* — фильтрованная половина синусоидальной волны

Рисунок А.1 — Пример изменения вертикальной силы на жесткую спортивную площадку при периодических прыжках одного человека




$t$ — время, с; $F(t)/Q$ — нормированная амплитуда

Рисунок А.2 — Пример изменения вертикальной силы на жесткую площадку для одного шага




*t* — время, с; *F*(*t*)/*Q* — нормированная амплитуда

Рисунок А.3 — Пример силовой функции для одного человека, идущего через оснащенную измерительной аппаратурой платформу длиной 3 метра

Это действие может быть выражено во временной области в виде ряда Фурье:

$$F_v(t) = Q\left(1+\sum_{n=1}^{k}\alpha_{n,\mathrm{v}}\sin(2\pi nft+\phi_{n,\mathrm{v}})\right) \text{ в вертикальном направлении} \quad (A.1)$$

и

$$F_h(t) = Q\left(1+\sum_{n=1}^{k}\alpha_{n,\mathrm{h}}\sin(2\pi nft+\phi_{n,\mathrm{h}})\right) \text{ в горизонтальном направлении,} \quad (A.2)$$

где $\alpha_{n,\mathrm{v}}$ — числовой коэффициент, соответствующий *n-й* гармонике, вертикальное направление;

$\alpha_{n,\mathrm{h}}$ — числовой коэффициент, соответствующий *n-й* гармонике, горизонтальное направление;

*Q* — статическая нагрузка (вес человека);

*f* — частотный коэффициент повторяющейся нагрузки (для оценки поперечных горизонтальных колебаний *f* принимается половина скорости при ходьбе или беге);

$\phi_{n,\mathrm{v}}$ — фазовый угол *n-й* гармоники (вертикальное направление);

$\phi_{n,\mathrm{h}}$ — фазовый угол *n-й* гармоники (горизонтальное направление);

*n* — целое число, обозначающее гармоники основной частоты;

*k* — число гармоник, которые характеризуют силовую функцию в рассматриваемом частотном диапазоне.

В зависимости от характера воздействий число гармоник *k*, необходимых для адекватного моделирования данного процесса, будет меняться.

А.1.1.2 Числовой коэффициент

В таблице А.1 приведены примеры значений числового коэффициента $\alpha_n$ для некоторых скоординированных действий человека и соответствующего частотного диапазона основной гармоники силовой функции.

Т а б л и ц а А.1 — Примеры расчетных параметров для согласованных движений на стационарном объекте

| Действие | Общий диапазон силовой частоты, *f*, Гц | Плотность толпы | | Числовой коэффициент | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Общее значение, *a* | Наблюдаемый максимум | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
| Раскачивание (горизонтальная нагрузка) на площадках с сиденьями | 0,5—1,5 | Один человек на сиденье | | 0,25 | 0,05 | — |
| Площадки без сидений | 0,5—1,5 | | 6 человек на м$^2$ | | | |

*Окончание таблицы А.1*

| Действие | Общий диапазон силовой частоты, *f*, Гц | Плотность толпы | | Числовой коэффициент | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Общее значение, *a* | Наблюдаемый максимум | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
| Вертикальные действия для сидячей аудитории | 1,5—3,0 | Один человек на сиденье | | 0,5 | 0,25 | 0,15 |
| Синхронные прыжки [b] (включая танцы — скачки и ритмические упражнения) на площадках без сидений | 1,5—3,5 | 1,25 м$^2$ на человека | 6 человек на м$^2$ | 2,1—0,15 (*f*) | 1,9—0,17 (2*f*) | 1,25—0,11 (3*f*) |
| Площадки с сиденьями | 1,5—3,5 | Один человек на сиденье | | | | |

[a] Плотность участников получена в обычных условиях. Для специальных событий плотность участников может быть больше, и в любом случае ее следует проверить.

[b] В качестве первой аппроксимации значения $\alpha_1$, $\alpha_2$ и $\alpha_3$ могут быть приняты как постоянные значения 1,7, 1,0 и 0,4 соответственно.

А.1.1.3 Динамические воздействия от групп участников

Динамическое воздействие, вызванное группами участников, зависит в первую очередь от веса участников, максимальной плотности людей на единицу площади пола, которую они занимают, и степени согласованности их движений. Примеры расчетных значений коэффициентов $\alpha$ в зависимости от плотности группы людей представлены в таблице А.1.

Ввиду того, что в группе людей, являющейся репрезентативной для всех слоев населения, существует некоторая изменчивость по частоте *f*, фазовому углу $\phi_n$ и числовому коэффициенту $\alpha_n$, динамическая реакция конструкции будет снижаться, если сравнивать ее с группой, демонстрирующей более высокую согласованность. Данный уменьшенный отклик может быть учтен при аппроксимации с использованием координационного фактора *C*(*N*) в силовой функции:

$$F(t)_N = F(t) \cdot C(N), \qquad (A.3)$$

где *N* — число участников.

Координационный эффект будет зависеть от сложности движения. Для простого действия, подобного аплодисментам, координация может равняться единице; чем сложнее становится действие, тем меньше будет согласованность. Для комплексных действий согласованность будет сильно зависеть от индивидуальных ритмических способностей членов группы. Далее указаны три типичных сценария, объясняющие эту зависимость:

- гимнасты — все гимнасты являются хорошо натренированными и опытными, чтобы координировать движение в группе — это высокая степень согласованности;
- зрители, смотрящие спортивные мероприятия, — только отдельные люди являются хорошо тренированными, но большинство людей обладают опытом и могут координировать движение в группе — это средняя степень согласованности;
- зрители, присутствующие на поп-концерте, — только некоторые из присутствующих зрителей являются хорошо тренированными и большинство зрителей не имеют опыта и не координируют движение в группе — низкая степень согласованности.

Для комплексных действий степень влияния несинхронизированных движений на реакцию людей будет отличаться для разных гармоник. Как правило, уровень синхронизации плавно снижается с повышением гармоник. Чтобы оценить степень комфорта для лиц, не участвующих в мероприятиях, в таблице А.2 даны значения согласованности для групп, равных или превышающих 50 человек. Для групп из пяти человек и менее следует использовать координационный фактор, равный 1. Для групп промежуточной численности допускается использовать линейную интерполяцию.

Таблица А.2 — Рекомендованный координационный фактор *C*(*N*) для оценки комфорта пассивных людей в группе размером $N \geq 50$ для действия «согласованные прыжки»

| Согласованность | 1-я гармоника | 2-я гармоника | 3-я гармоника |
|---|---|---|---|
| Высокая | 0,80 | 0,67 | 0,50 |
| Средняя | 0,67 | 0,50 | 0,40 |
| Низкая | 0,50 | 0,40 | 0,30 |

Примечание — Данные значения *C*(*N*) применяются только для предельного состояния эксплуатационной надежности.

Для оценки эксплуатационной надежности при возможном появлении страха или паники рекомендуется использовать для всех гармоник координационный фактор 1-й гармоники. Для всех других действий (раскачивание, движения сидящей аудитории) рекомендуется координационный фактор, равный 1.

Фазовый угол для вертикальных нагрузок, наведенных ритмическими прыжками, можно принимать за нуль, для остальных действий используется консервативный подход, предусматривающий введение фазового сдвига 90° для гармонических составляющих ниже резонансной частоты опорной конструкции.

**А.1.2 Движение шагом или бег**

А.1.2.1 Динамические силы

Силы, возникающие при ходьбе или беге, зависят главным образом от физического состояния человека и скорости ходьбы или бега и в меньшей степени от типа обуви и конструкции пола. Пример отношения сила/время в вертикальном направлении для одного шага показан на рисунке А.2, а для множества шагов — на рисунке А.3, где сила $Q$ представляет статический вес человека. Динамическая сила $F(t)$ для цепочки последовательных шагов может быть представлена рядом Фурье, заданным уравнениями (А.1) и (А.2). Значения коэффициентов $\alpha_{n,v}$ и $\alpha_{n,h}$ для непрерывной серии шагов в разных диапазонах скоростей ходьбы или бега приведены в таблице А.3.

Числовой коэффициент для горизонтального направления $\alpha_{n,h}$ в таблице А.3 — номинальное значение, которое надо использовать для конструкций, имеющих горизонтальную собственную частоту в диапазоне 1/2 первой гармоники действия ходьбы или бега. Это значение $\alpha_{n,h}$ не учитывает влияния обратной связи между пользователем и сооружением, что наблюдалось, например, на Мосту Тысячелетия в Лондоне (Nakamura, 2003; Dallard et al., 2001).

Таблица А.3 — Примеры расчетных параметров для сил при движении одного человека

| Действие | Номер гармоники, $n$ | Общий диапазон воздействия, $nf$, Гц | Числовой коэффициент для вертикального направления, $\alpha_{n,v}$ | Числовой коэффициент для горизонтального направления, $\alpha_{n,h}$ |
|---|---|---|---|---|
| Ходьба | 1 | 1,2—2,4 | 0,37($f$ – 1,0) | 0,1 |
| | 2 | 2,4—4,8 | 0,1 | |
| | 3 | 3,6—7,2 | 0,06 | |
| | 4[a] | 4,8—9,6 | 0,06 | |
| | 5[a] | 6,0—12,0 | 0,06 | |
| Бег | 1 | 2—4 | 1,4 | 0,2 |
| | 2 | 4—8 | 0,4 | |
| | 3 | 6—12 | 0,1 | |

[a] Более высокие гармоники редко являются значимыми в случаях, касающихся восприятия человеком, но могут быть важными для более чувствительных объектов, находящихся в здании, например, чувствительной к вибрации контрольно-измерительной аппаратуры.

Для нескоординированных движений группы людей коэффициент координации можно представить с помощью следующего уравнения:

$$C(N) = \sqrt{N/N}.$$

Консервативный подход для фазового угла реализуется посредством введения фазового сдвига 90° для гармонических составляющих ниже резонанса.

**А.1.3 Подъем и спуск по лестницам**

А.1.3.1 Динамические силы

Нагрузка от шагов человека на лестницу во время подъема или спуска существенно отличается по величине и частоте от сил, возбуждаемых во время ходьбы по плоским поверхностям. Нагрузки на лестницы, как правило, намного выше; при этом скорость спуска с лестницы может составлять от 3 до 4 или 4,4 шагов в секунду.

Эти действия можно сравнить с нормальной ходьбой от 1,5 до 2,5 шагов в секунду. При этом должны учитываться только две первые гармоники при представлении динамических нагрузок на лестницу в виде рядов Фурье. Предлагаемые значения и частотные диапазоны, в которых они считаются постоянными, приведены в таблице А.4. Остальную информацию см. в [2].

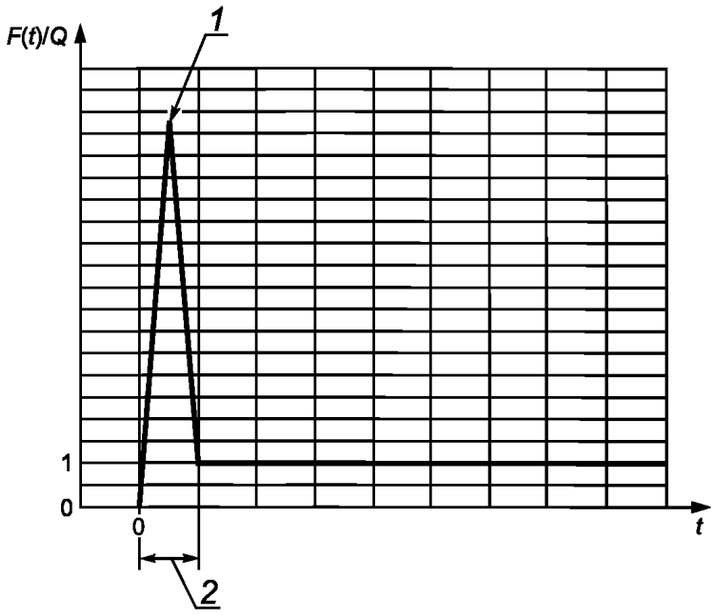
Таблица А.4 — Примеры расчетных параметров для сил, возбуждаемых одним человеком, поднимающимся или спускающимся по лестнице

| Действие | Номер гармоники, $n$ | Общий диапазон частот, $nf$, Гц | Числовой коэффициент для вертикального направления, $\alpha_{n,v}$ | Числовой коэффициент для горизонтального направления, $\alpha_{n,h}$ |
|---|---|---|---|---|
| Подъем или спуск по ступенькам лестницы | 1 | 1,2—4,5 | 1,1 | Нет данных |
| | 2 | 2,4—9 | 0,22 | |

**А.1.4 Ударные нагрузки от воздействия людей**

А.1.4.1 Динамические силы от ударных нагрузок, приложенных человеком

Идеализированный импульс силы в результате соскока человека с разных высот показан на рисунке А.4. Примеры отношения пиковых сил $F_{max}$ к весу человека $Q$ и длительность $t_d$ для разных высот $h$ приведены в таблице А.5.




$t$ — время, с; $F(t)/Q$ — нормированная амплитуда; *1* — $F_{max}/Q$ нормированная пиковая сила; *2* — $t_d$ — длительность импульса, с

Рисунок А.4 — Пример идеализированной функции сила — время для единичного ударного воздействия одним человеком

Т а б л и ц а А.5 — Примеры отношения $F_{max}/Q$ и длительности $t_d$ для соскока одного человека с разных высот $h$

| $h$ (m) | 0,20 | 0,40 | 0,60 | 0,80 |
|---|---|---|---|---|
| $F_{max}/Q$ | 8 | 10 | 12 | 14 |
| $t_d$ (s) | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,02 |

**Приложение В**
**(справочное)**

## Примеры вибрационного анализа

### В.1 Моделирование строения или компонента

Для того чтобы сделать правильный выбор динамической модели, требуется определенный опыт. Модель следует выбирать с учетом конструктивных особенностей сооружения и вида динамического воздействия, необходимой степенью точности и доступных средств анализа. Сила, приложенная к строению, может также зависеть от АЧХ опор источника вибрации. Примеры решений вибрационных проблем в зависимости от типа воздействия приведены в таблице В.1.

Примеры возможных вариантов моделирования указаны ниже.

a) Решения в аналитическом виде методами механики сплошных сред. Как правило, эти решения подходят для расчета простых, с четкой конструктивной схемой сооружений или фрагментов, из материалов с близкими свойствами (например, консоль, свободно опертый брус, стержни, гибкая полусфера). Используются нормальные формы колебаний и методы решения волновых задач.

b) Модель сосредоточенного параметра. В этой модели используются дискретные массы и жесткостные характеристики, которые достаточно точно соответствуют физической системе при ее моделировании (например, массы, сосредоточенные на каждом этаже многоэтажного здания). Непрерывные структуры и среда основания могут быть также смоделированы с помощью дискретной модели при условии, что выбирается достаточное число элементов, с тем чтобы характер колебаний и усилия в модели и реальной системе были близки. Нормальные виды вибрации (собственные формы системы) могут быть получены из характеристического уравнения и уравнений форм.

c) Модель на основе метода конечных и предельных элементов. Континуум представляется дискретными элементами, чей размер и динамические свойства определяются характером проблемы, которую надо решать. Для контроля могут быть использованы результаты расчета и их анализ типовой модели или методы волновой динамики.

d) Упрощенная динамическая модель. В отдельных случаях динамическая система с распределенной массой может быть представлена эквивалентной моделью как система с одной степенью свободы, которая имеет такие же собственную частоту и идентичную упругую деформацию (форму колебаний) при воздействии такой же динамической нагрузки.

e) Амплитудно-частотные характеристики. АЧХ могут быть получены по результатам анализа систем при гармонических воздействиях.

Таблица В.1 — Некоторые методы решения вибрационных проблем

| Класс (см. 6.2) | Характер воздействия | Пример математического метода |
|---|---|---|
| Класс А | Сила или смещение есть функция времени и пространства | Динамическая модель континуума в одном, двух или трех измерениях (прохождение волны, динамика континуума) |
| Класс В | Сила или смещение есть функция времени | |
| | 1) Динамические силы | АЧХ, импульсная АЧХ |
| | 2) Динамические смещения | Передаточная функция, функция усиления по частоте |
| | 3) Амплитуда или спектр мощности источника | Функция усиления или квадрат функции усиления |
| | 4) Уровень вибрации источника (r.m.s., пик) | Факторы усиления |
| | 5) Энергия у источника | Законы распространения и ослабления волн в среде |
| Примечание — Эмпирические характеристики источника могут принимать форму упрощенных математических моделей, например систем с одной степенью свободы. | | |

### В.2 Определение динамических характеристик конструкции аналитическим или численными методами

К методам, которые достаточно широко применяются при вычислении динамических характеристик конструкции, относятся:

a) Решение в аналитическом виде уравнений движения.

b) Процедура последовательного интегрирования при расчете вибратора, подвергнутого специальному возбуждению. Это может быть выполнено во временнóй области с помощью интеграла свертки (интеграла Дюамеля) или процедуры численного интегрирования, или в частотной области с помощью преобразований Фурье или Лапласа.

c) Спектр отклика или метод ударного воздействия. Данный метод дает пиковый отклик для вибратора с известными значением частоты (или периода) вибрации и параметром затухания, когда конструкции подвергаются заданному возмущению. Для отклика при многих видах колебаний необходимо выбирать подходящий метод суммирования отдельных форм колебаний.

d) Методы случайных колебаний. Данные методы дают отклик вибратора на возмущение, имеющее определенные статистические свойства. Присутствуют стационарные и нестационарные колебания. Как правило, должны быть известны передаточные функции или динамические свойства конструкции.

e) Вычисление импульсного отклика, т. е. отклика вибратора, у которого собственный период больше, чем длительность импульса. Пиковая начальная скорость может быть установлена данным методом.

f) Эмпирические процедуры. Они могут дать удовлетворительные результаты для некоторых классов задач. Такие процедуры выводятся либо на основе экспериментальных данных, либо из аппроксимаций математической модели. Они могут включать в себя основные положения и критерии, но часто ограничиваются областью применения.

### В.3 Динамический анализ специальных конструкций или элементов

#### В.3.1 Конструкция здания

В.3.1.1 Усиление колебаний в здании

Если колебания определяются у стены подвала или фундамента здания необходимо учитывать возможное усиление колебаний внутри здания в месте расположения приемника. В случае, когда подробный прогноз влияния колебаний на конструкцию является обоснованным, уровни колебаний могут быть вычислены численными методами или посредством измерений.

Для установившихся колебаний усиление сигналов от источника к приемнику задается АЧХ, которая может быть получена из решения уравнений движения или путем эксперимента. Для переходных режимов колебаний изменение колебаний во времени можно определить путем численного интегрирования или интеграла Дюамеля.

Демпфирование является важным параметром при определении динамической реакции конструкций. Поэтому при выборе модели и параметров затухания надо учитывать тип конструкции и амплитуду реакции. Значения параметров демпфирования следует определять по возможности, по записям свободных колебаний. Некоторые предложенные коэффициенты демпфирования, используемые для вычисления реакции конструкции на ветровые нагрузки, составляют 0,01 для зданий со стальным каркасом и 0,02 для зданий с бетонным каркасом. Другие конструкции могут иметь меньшие значения (см. также ISO 4354).

#### В.3.2 Компоненты здания

В.3.2.1 Фундаменты

Динамическое поведение элементов фундамента или целых конструкций опирающихся на грунт, и взаимодействие между конструкцией и грунтом надо рассматривать в рамках общих проблем вибрации, которая учитывает влияние грунта как передающей среды.

В.3.2.2 Балки и полы

Реакции конструктивных элементов здания на передвижение людей шагом или бегом зависит от характеристик конструкций и интенсивности возбуждаемой нагрузки человеком или группой людей. Ощутимые колебания пола наблюдаются главным образом на междуэтажных перекрытиях с длиной пролетов от 3 до 20 м. Для небольших пролетов характеристики демпфирования и жесткости обычно ограничивают колебания на определенных значениях, на более длинных пролетах общая масса перекрытия возрастает, и реакция пола становится незначительной. Тем не менее ощутимые колебания могут наблюдаться при резонансе некоторых междуэтажных перекрытий во время движения шагом. Колебания могут также передаваться на соседние междуэтажные перекрытия или этажи в зависимости от интенсивности возбуждения и динамических свойств конструкции. Примеры динамических воздействий, возбуждаемых людьми, приведены в приложении А. Методы анализа для проектирования и оценки межэтажных перекрытий даются в ссылках на работы [1], [11], [15], [13].

В.3.2.2.1 Динамические свойства полов

Для прогнозирования колебаний балок и полов требуются характеристики вибрации, ассоциированные частоты и значения демпфирования. Примеры значений демпфирования для некоторых типов полов приведены в таблице В.2.

Для вычисления динамического отклика и оценки в отношении приемлемых критериев эксплуатационной надежности полов, обычно встречающихся в зданиях, можно выделить две категории полов:

a) низкочастотные полы с основной собственной частотой $f_0$ меньше 8—10 Гц;

b) высокочастотные полы с $f_0$ свыше 10 Гц.

B.3.2.2.2 Реакция пола при передвижении шагом и беге

Колебания пола при передвижении шагом или беге могут быть вычислены, если известен характер изменения силы, геометрические размеры и динамические характеристики пола, из решения уравнения движения в виде интеграла свертки Дюамеля. При согласованной ходьбе, беге или маршировании под музыку или под ритм барабанного боя, или других синхронных перемещениях, надо принимать во внимание действие более чем одного человека. Для хорошо согласованных движений групп людей общий вибрационный эффект есть сумма отдельных воздействий, которые дадут верхний предел прогнозируемых уровней колебаний. Для больших групп может быть применен переходной множитель C(N), как показано в приложении A. Для людей, пересекающих пол, следует рассмотреть ограниченную длительность возбуждения при оценке отклика на это воздействие. Решение может быть получено расчетным путем с рассмотрением воздействия, которое принимается непрерывным.

Для несогласованного хождения или бега группы людей можно оценивать силы, действующие на пол так, как указано в общих чертах в приложении A, с помощью координационного фактора, заданного уравнением (A.3).

B.3.2.2.3 Оценка колебаний пола при согласованных действиях

Ряд людей, идущих, бегущих или подпрыгивающих синхронно часто в сопровождении музыкального ритма, могут возбуждать колебания пола до значимых уровней. Для равномерно распределенной нагрузки ускорение $\alpha_{max}$ в середине пролета балочной конструкции может быть получено по методам, представленным в [11] и [15].

Примеры значений расчетных параметров коэффициентов затухания для разных размеров и конструктивных решений полов приведены в таблице B.2.

При определении амплитуд следует суммировать вклады от разных гармоник возбуждающих сил.

Таблица B.2 — Примеры значений демпфирования для основного типа полов в зданиях

| Тип пола | Ширина пролетов для заданных коэффициентов демпфирования, м | Коэффициент затухания, долей от критического | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Типичная ширина | Наибольшая ширина | Значения для предварительного расчета полов без покрытия |
| Стальной брус/бетонная плита, свободно опертая | 9—15 | 0,8—3,0 | 0,6—7,4 | 1,3 |
| Стальной брус/бетонная плита, непрерывная конструкция из плит между стенами | 4—8 | 1,0—5,0 | 0,8—8,6 | 1,5 |
| Полностью многослойные стальные балки с жесткими упорами в бетонной плите | 6—20 | 1,5—5,0 | 0,5—8,0 | 1,8 |
| Предварительно напряженный бетон заводского изготовления | 2—15 | 0,8—3,0 | 0,5—6,5 | 1,3 |
| Армированный бетон, монолит | 5—15 | 1,0—3,0 | 0,6—5,0 | 1,5 |
| Полы на деревянных балках | 2—9 | 1,5—4,0 | 1,0—5,5 | 2,0 |
| Примечание — Коэффициенты затухания зависят от типа конструкции, материала, наличия неконструктивных элементов, срока службы, состояния конструкции, амплитуды и частоты вибрации. Для бетонных сооружений наличие или отсутствие трещин также является определяющим фактором. Для любой формы конструкции тип соединения и тип используемой опоры играют важную роль в гашении колебаний. Для междуэтажных перекрытий присутствие какого-либо отделочного покрытия пола или потолка может увеличивать гашение колебаний в значительной степени. | | | | |

Когда критическая точка восприятия вибрации не находится в центре свободно опертого пролета с равномерной массой и жесткостью, как указано в выше упомянутых расчетах, предельное ускорение $a_{max}$ может быть умножено на:

- $\sin(\pi x/L)$ для свободно опертых конструкций,
- $[6(x/L)^2 - 4(x/L)^3 + (x/L)^4]/3$ для балочных консолей, или
- $0{,}5[1 - \cos(2\pi x/L)]$ для конструкций с заделанными концами,

где $x$ — расстояние от места, где фиксируются вибрации, до опоры, м;

$L$ — длина пролета, м.

Специальное внимание необходимо уделять прогнозу амплитуд колебаний для полов на гибких опорах или перекрытий с многопролетными структурными конфигурациями. Рекомендуется использовать полный модальный

подход или по меньшей мере приблизительный расчет упругих свойств материалов, как для примера с методом Релех — Ритца или аппроксимацией Саутвэла–Данкерли.

B.3.2.2.4 Отклик пола на единичные импульсы

Для тех случаев, когда импульсную нагрузку надо принимать во внимание, реакцию системы междуэтажного перекрытия на единичный импульс можно вычислить с помощью:

a) интеграла Дюамеля,

b) преобразования Фурье,

c) аппроксимации импульсного отклика,

d) другими численными методами.

B.3.2.2.5 Приближенные методы вычисления при импульсном воздействии

Приближенные методы для вычисления реакции перекрытия на ударные воздействия, вызванные людьми, состоят из определения эквивалентной модальной массы и приведенной жесткости перекрытия и площади кривой сила/время (*P*/*Q*) для рассматриваемого удара. Такая процедура является достаточно точной.

Для приближенного прогноза вибрационного отклика междуэтажных перекрытий при ударе предпочтительно использовать экспериментальные измерения или теорию ударов.

B.3.2.3 Пешеходные переходы

Пешеходные переходы или мосты, используемые главным образом для движения пешеходов, подвергаются воздействиям от людей, идущих, бегущих или прыгающих, а также воздействиям ветра. Хотя пешеходные переходы часто можно считать аналогами балки, необходимо учитывать возможность возникновения горизонтальных колебаний. Данные колебания могут зависеть или не зависеть от вертикальной синхронизации.

Амплитуды колебаний от одного человека или группы людей, действующих в унисон, могут быть рассчитаны исходя из принципов структурной динамики. См. приложение А для примеров силовых функций. Для свободно опертой балочной конструкции ускорение может быть вычислено методом, изложенным в общих чертах в B.3.2.2.3. Для многопролетной непрерывной конструкции необходимо учитывать изменения жесткости и ее эквивалентную модальную массу.

Для пешеходных переходов с горизонтальными собственными частотами меньше 1,3 Гц необходимо учитывать влияние горизонтальных колебаний, вызванных движением пешеходов или бегунов. См. пример в [12]. В отсутствие более точных данных можно использовать значения коэффициентов демпфирования для вертикальных колебаний в таблице B.3.

Таблица B.3 — Примеры значений демпфирования для вертикальных колебаний пешеходных переходов

| Тип надземной части перехода | Коэффициент демпфирования $\xi$, долей от критического |
|---|---|
| Сталь с асфальтовым или эпоксидным покрытием поверхности | 0,5 |
| Многослойная сталь/бетон | 0,6 |
| Предварительно напряженный или армированный бетон | 0,8 |

### B.3.3 Распространение колебаний в грунте

B.3.3.1 Общие замечания

Распространение колебаний в грунте является сложным процессом и с практической точки зрения только некоторые случаи могут быть исследованы с помощью аналитических зависимостей. Поэтому эмпирические методы, как правило, используются в комбинации с результатами измерений.

В общем случае колебания с амплитудой $a$, исходящие от источника с амплитудой $a_0$, могут быть представлены как произведение коэффициента геометрического ослабления $C$ и коэффициента демпфирования материала $D$:

$$a = a_0 \, C \, D. \qquad \text{(B.1)}$$

Функция $C$ зависит от типа волны (волны сдвига, компрессионные волны, поверхностные волны и т. д.) и от геометрии источника (точечный источник, линейный источник). Коэффициент демпфирования материала может иметь разные формы частотной и амплитудной зависимости.

Характер распространения волн в гомогенной полусфере в случае, когда источник может считаться стационарным в пространстве, а свойства материала являются независимыми от частоты и амплитуды, оценивается следующими зависимостями:

$$C = (r_0/r)^n, \qquad \text{(B.2)}$$

$$D = \exp\,[-2\pi\,\xi(r - r_0)/\lambda], \qquad \text{(B.3)}$$

где $\xi$ — коэффициент демпфирования материала среды распространения;

$r$ — расстояние от источника;

$\lambda$ — длина волны колебаний;

$r_0$ — опорное расстояние от источника.

Для точечного источника вертикальных сил на поверхности гибкой полусферы:

$n$ = 0,5 для волн Релея;

$n$ = 2 для объемных волн (сжатия и сдвига) вдоль поверхности;

$n$ = 1 для объемных волн в стороне от окрестности поверхности.

Для линейного источника вертикальные силы на поверхности гибкой полусферы:

$n$ = 0 для волн Релея;

$n$ = 1,5 для объемных волн (сжатия и сдвига) вдоль поверхности.

Однако на практике гомогенная полусфера, в которой распространяются волны, практически никогда не существует и в том числе при отсутствии расслоения или высокого уровня подземных вод. Возможным исключением могут быть определенные скальные формации или сильно переуплотненные грунты. Поэтому упомянутые выше равенства следует рассматривать как усредненные отношения. Однако локально могут происходить значительные отклонения.

Необходимо учитывать и тот факт, что коэффициент демпфирования материала уменьшается с уменьшением амплитуд вибрации, зависит от частоты и обычно определяется экспериментально.

В.3.3.2 Колебания, вызванные движением дорожных транспортных средств

Из-за многих факторов, определяющих характер воздействий от источников и передачи этих воздействий через грунт, колебания, вызванные дорожным движением, оцениваются эмпирическими методами. Такие методики, как правило, рассматривают только часть общей модели прогнозирования вибрации. Подобные методики разработаны в ряде стран. Они были выведены опытным путем и отражают заранее определенные условия в конкретном месте, условия трафика, методы строительства, состояние грунтов и т. д. Следовательно, эти методики не могут иметь универсального применения.

В.3.3.3 Колебания, вызванные движением железнодорожного транспорта

Колебания, генерируемые поездами, можно оценивать с помощью переходных функций и зависимостями амплитуды колебаний от расстояния. Однако на практике данный метод не применяется и находится в стадии разработки. Чаще всего используются эмпирические процедуры вместе с программами измерений для калибровки эмпирических постоянных.

В.3.3.4 Колебания от оснований станков

Основания станков составляют часть тракта передачи от источника (работающего станка) до приемника. Конструкция основания станка должна обеспечить уровень вибрации, который соответствует требованиям для окружающей среды, а фундаменты здания, в котором находится машинное оборудование, должны в достаточной степени изолировать источник от соседних жилых зданий, с тем чтобы удовлетворялись приемлемые вибрационные критерии (см. приложение С). Для источников вибрации за пределами здания, создающих некомфортные условия жителям или помехи при работе оборудования внутри здания, должны быть использованы виброзащитные устройства, снижающие уровни вибрации до приемлемых значений. Виброзащитные устройства на основе резины могут быть использованы для виброизоляции источников вибраций. См. приложение Е.

В.3.3.5 Колебания в грунте, вызванные строительной деятельностью

Строительная деятельность может увеличивать колебания грунта, которые передаются через фундамент на все части здания. Часто уровни колебаний определяются на основе результатов подобного предыдущего опыта или эмпирическим методом, т. е. измерением уровней колебаний перед началом и во время строительства. К видам строительной деятельности, которые могут увеличивать колебания здания, можно отнести: взрывные работы, забивку свай, рытье котлована и работу машинного оборудования вблизи здания. Примеры методов оценки колебаний от строительной деятельности представлены в [4].

В.3.3.6 Передача колебаний от грунта на здание

Колебания, передающиеся на фундамент здания через грунт, распространяются внутри здания. Они могут усиливаться или ослабляться в зависимости от конструктивных и динамических характеристик отдельных фрагментов. Обычно эти колебания представляют интерес только в отдельных частях здания. Из-за сложности прогнозирования часто используются эмпирические методы и текущий контроль вибрации.

**Приложение С**
**(справочное)**

## Примеры вибрационных критериев

### С.1 Размещение людей

#### С.1.1 Здания

С.1.1.1 Общие замечания

Допустимые уровни колебаний в местах размещения людей в зданиях назначаются в соответствии с видом индивидуальной деятельности одного человека или группы людей, средой окружения или «атмосферой» и сравнением с уровнем колебаний, который до этого ощущали люди. Они также имеют культурный компонент. Например, участники социально значимого события более терпимо относятся к большим амплитудам колебаний, чем люди, присутствующие на деловой встрече.

С.1.1.2 Критерии ускорения

Для оценки уровней вибрации при эксплуатации зданий, как правило, используется ускорение. Однако нормируемые уровни колебаний изменяются с частотой, следовательно, необходимо использовать специальные фильтры. Подходящие фильтры или параметры частотного взвешивания приведены в ИСО 2631-1 для ситуаций, когда задается основное направление вибрации, или в ИСО 2631-2, если основное направление неизвестно. В ИСО 2631-1 также приведен метод определения подходящих значений среднеквадратического (r.m.s.) ускорения из фильтрованного сигнала. ИСО 2631-2:2003 нельзя рассматривать как руководство по приемочным критериям, так как диапазон потенциальных применений выходит за рамки данного стандарта. Хотя ИСО 2631-2:1989 «Оценка незащищенности человека от вибрации всего тела. Часть 2: Непрерывные и вызванные ударом колебания в зданиях (от 1 до 80 Гц)» был отменен, некоторые его разделы все еще являются актуальными в качестве критериев оценки вибраций в здании, и они приведены здесь в пересмотренном формате в таблице С.1. Множители для r.m.s. ускорения в таблице С.1 применяются к базисным кривым, представленным на рисунках С.1, С.2 и С.3.

Таблица С.1 — Множители, принятые в ряде государств, с помощью которых устанавливаются удовлетворительные значения вибрации здания с точки зрения воздействия колебаний на людей

| Место | Время | Множители к базисной кривой (рисунки С.1, С.2 и С.3)[a] | |
|---|---|---|---|
| | | Непрерывная и прерывистая вибрация[b] | Возбуждение импульсной вибрации несколько раз в день |
| Специальные рабочие зоны (например, операционные, лаборатории и т. д.) | День | 1 | 1 |
| | Ночь | 1 | 1[c)] |
| Жилые зоны (например, квартиры, дома, больницы) | День | 2—4[d)] | 30—90[d), e), f)] |
| | Ночь | 1,4 | 1,4—20 |
| Бесшумный офис с открытыми рабочими местами | День | 2 | 60—128[g)] |
| | Ночь | 2 | 60—128 |
| Офисные помещения (например, школы) | День | 4 | 60—128[g)] |
| | Ночь | 4 | 60—128 |
| Мастерские, цеха | День | 8 | 90—128[g)] |
| | Ночь | 8 | 90—128 |

Примечание 1 — Для оценки влияний сигнала вибрации, содержащего два или более дискретных частотных компонента, может быть использован метод среднеквадратического отклонения (r.m.q.) (см. ISO 2631-2:1989, приложение В).

Примечание 2 — Эта таблица была адаптирована из ИСО 2631-2:1989, приложение А.

[a)] Эти множители дают настоящие значения вибрации, ниже которых вероятность неблагоприятных случаев мала (любой акустический шум, вызванный вибрацией конструкций, не принимается во внимание).

[b)] Удвоение предложенных значений вибрации может привести к жалобам, и их будет больше, если значения вибрации увеличатся в четыре раза (можно обратиться к кривым доза — отклик). «Непрерывные колебания» — вибрация длительностью больше 30 мин за 24 ч; «прерывистые колебания» — это более 10 событий за 24 ч.

*Окончание таблицы С.1*

[c] Значения импульсного воздействия в операционных больницы и специальных рабочих зонах учитываются в моменты времени, когда делаются операции или выполняется работа. При других условиях значения вибрации, рассчитанные для жителей домов, являются удовлетворительными при условии взаимного согласия и предварительного предупреждения.

[d] В пределах жилых районов у людей формируется различное отношение к интенсивности вибрации. Специальные значения зависят от социальных и культурных факторов, психологического состояния и ожидаемой степени нарушения покоя.

[e] Соотношение между числом событий в день, их значениями и длительностью четко не установлено. В случае проведения взрывных работ для более трех событий в день можно использовать следующие предварительные соотношения, чтобы скорректировать множители в четвертой графе. Это требует дополнительного умножения на множитель

$$F = 1{,}7N^{-0{,}5}T^{-d},$$

где $N$ — число событий за 16 ч в сутки;

$T$ — продолжительность импульса и сигнала затухания для события в секундах;

$d$ — нуль при $T < 1$ с.

(Продолжительность события можно оценить с точностью до 10 % (–20 дБ)

Для кратковременного импульса установлено, что реакция человека на деревянных перекрытиях (полов) $d = 0{,}32$, а для бетонных настилов $d = 1{,}22$.

Это уравнение компромисса не применяется, когда значения ниже определенных множителями для непрерывной вибрации.

[f] При выемке скальных пород, когда подземные возмущения вызывают вибрацию на высоких частотах, множитель вплоть до 128 в некоторых странах считается удовлетворительным для условий проживания. Множители ниже 600 применяются только для легких строений или чувствительных зон.

[g] Допустимые значения импульсного удара в офисах и цехах не следует увеличивать без возможного значимого нарушения рабочей деятельности.

[h] Вибрация, действующая на операторов некоторых процессов, например при ковке или дроблении, которые возбуждают вибрацию рабочих мест, могут быть отдельной категорией от зон цеха, рассмотренных в таблице С.1. Значения вибрации, заданные в ИСО 2631-1, в таком случае применимы к операторам процессов, возбуждающих колебания.

Критерии для уровней колебаний в зданиях, вызванных ветром, представлены в приложении D.

С.1.1.3 Значения доз вибрации (VDV)

Если отношение пикового значения к r.m.s фильтрованного ускорения (взятого за полный период воздействия вибрации) больше 6, то приемочные критерии r.m.s. могут не подходить. Поэтому можно использовать значения доз вибрации (Vibration Dose Values — VDV), которые базируются на оценке среднего четырехугольника (root-mean-quad — r.m.q.). Выведенные значения VDV можно затем сравнить с приемочными критериями, представленными в таблице С.2. См. ИСО 2631-1 или ИСО 8041 для определений r.m.s. и VDV и ИСО 2631-2:1989, приложение В, для определения r.m.q.

Хотя значения величины вибрации (VDV) еще широко не используются, они применялись в ряде государств, если отношение пиковых значений к среднеквадратическим значениям фильтрованного ускорения превышает 6. Рекомендованные уровни приведены в таблице С.2.

Таблица С.2 — Значения величины вибрации (м/с$^2$), при превышении которых можно ожидать жалобы разной степени от людей в жилых домах

| Место | Низкая вероятность жалоб | Жалобы возможны | Жалобы вероятны |
|---|---|---|---|
| Жилые дома, 16-часовой день | 0,2—0,4 | 0,4—0,8 | 0,8—1,6 |
| Жилые дома, 8-часовая ночь | 0,13 | 0,26 | 0,51 |

Для значений VDV также подходят множители для среднеквадратических значений вибраций, указанных в таблице С.1. Примеры использования VDV для колебаний пола приведены в [5].

**С.1.2 Пешеходные переходы**

Проектные решения пешеходного перехода следует выбирать в зависимости от интенсивности движения пешеходов, которую надо учитывать в течение расчетного срока его эксплуатации. Рекомендуется рассмотреть следующие сценарии.

- Один человек идет по пешеходному переходу, а другой (приемник) стоит в середине пролета.
- Усредненный поток пешеходов на основе ежедневной интенсивности движения, например, группа из 8—15 человек, в зависимости от длины и ширины пешеходного перехода.

- Наличие групп пешеходов (превышающих 15 человек).
- Проведение праздничных или хореографических мероприятий.

В отсутствие более определенных данных уровни колебаний в вертикальном направлении (по оси *z*) для пешеходных переходов через дороги или водные пути не должны превышать колебаний, которые получены с помощью множителя 60 к составляющей базисной кривой (рисунок С.1). Исключением является случай, когда необходимо учитывать одного человека или некоторое число людей, спокойно стоящих на пешеходном переходе (например, первый сценарий). В этом случае следует применять множитель 30. Множитель для горизонтальных колебаний при движении пешеходов или воздействия ветра не должен превышать в 60 и более раз базисную кривую в горизонтальном направлении (по осям *x* и *y*), см. рисунок С.2. Для пересмотра эксплуатационной надежности см. [16].

Для вычисления среднеквадратичных значений ускорения рекомендуется выбирать время усреднения 1 с.

### С.2 Конструкция здания

#### С.2.1 Общие замечания

Базисным предельным состоянием эксплуатационной надежности при трещинообразовании или разрушении конструктивных элементов является превышение предела прочности на разрыв, сжатие или сдвиг хрупкого материала под действием динамической нагрузки или волнового воздействия. В существующих конструкциях деформацию при динамических воздействиях установить достаточно трудно, поэтому рекомендуется использовать косвенные измерения. Наиболее простым косвенным методом оценки динамической нагрузки является измерение скорости материальной точки или (менее распространенный метод) измерения ускорения или смещения. Корреляция с наблюдаемым повреждением дает необходимую связь между предельным состоянием и примененным критерием.

Если есть возможность установить непосредственно деформацию материала, то в этом случае измеренные значения следует сравнивать с критическими деформациями. Как для прямого, так и косвенного метода динамическая деформация может существенно превышать статические деформации, которые во многих случаях неизвестны. Поэтому существует значительная изменчивость в уровнях наведенной динамической деформации (или скорости материальной точки), которые соответствуют началу образования трещин в определенном материале. Таким образом, всегда имеется маловероятное событие, когда трещинообразование произойдет даже при очень небольших уровнях динамической нагрузки, т. е. уровней, которые ниже, чем уровни, заданные в разных критериях. В связи с этим до начала работ по оценке интенсивности колебания здания специалисту, ответственному за проект, рекомендуется провести предварительный анализ состояния зданий и зафиксировать существующие трещины. Допускается позже не принимать их в расчет в случае претензий на возможные повреждения, которые могут образоваться в результате проведения работ.

#### С.2.2 Вибрационные критерии для строительных конструкций

Так как здания сильно различаются по конфигурации, материалам, сроку эксплуатации, типу фундамента и другим факторам, вибрационные критерии были в значительной степени заданы эмпирическими правилами, которые различаются в каждом государстве, и типом возбуждения. Так как конструкции здания отличаются в разных государствах, то нельзя ожидать, что такие правила могут применяться универсально. Описание повреждений и классификация зданий в соответствии с их допуском на воздействия вибрации представлены в ИСО 4866. Для критических или нетипичных ситуаций надо провести специальные исследования на основе структурных динамических принципов и контрольные испытания на стройплощадке, руководство по которым приведено в [4].

#### С.2.3 Стадионы и полы в залах для собраний

Устойчивые колебания конструкций трибун, вызванные ритмичными движениями аудитории, могут возникать во время концертов на открытом воздухе, а также во время спортивных соревнований. При оценке влияния на отдельных людей приходится учитывать различие между пассивными и активными участниками. Что касается пассивных зрителей, т. е. людей, которые не участвуют в мероприятии, то относительно небольшие амплитуды колебаний могут быть для них ощутимыми, в то же время амплитуды колебаний должны быть большими, чтобы их замечали активные болельщики или зрители.

Необходимо рассмотреть два вибрационных критерия. Первый критерий касается комфорта пассивной части публики. Приемлемый уровень ускорений может зависеть от неуправляемых и/или непредсказуемых параметров, например погодных условий, шума окружающей среды и общего качества представления. При отсутствии более определенных данных предел максимальных уровней вибрации для комфорта пассивных участников при вертикальных колебаниях может быть получен как базисная кривая на рисунке С.1 с множителем 200.

Кроме того, должна быть принята во внимание безопасность публики. Большие амплитуды колебаний могут вызвать тревогу как пассивных, так и активных зрителей, а в экстремальных ситуациях вызвать панику. Уровни предельной вибрации при возникновении паники могут быть выше, чем для состояния комфорта, но в любом случае амплитуды колебаний с множителем 400 к базисной кривой не следует превышать. См. руководство по конструированию мест для зрителей в [7].

Для вычисления среднеквадратичных значений при измерениях рекомендуется принимать время усреднения 10 с для критерия комфортности и 1 с для критерия возникновения паники.

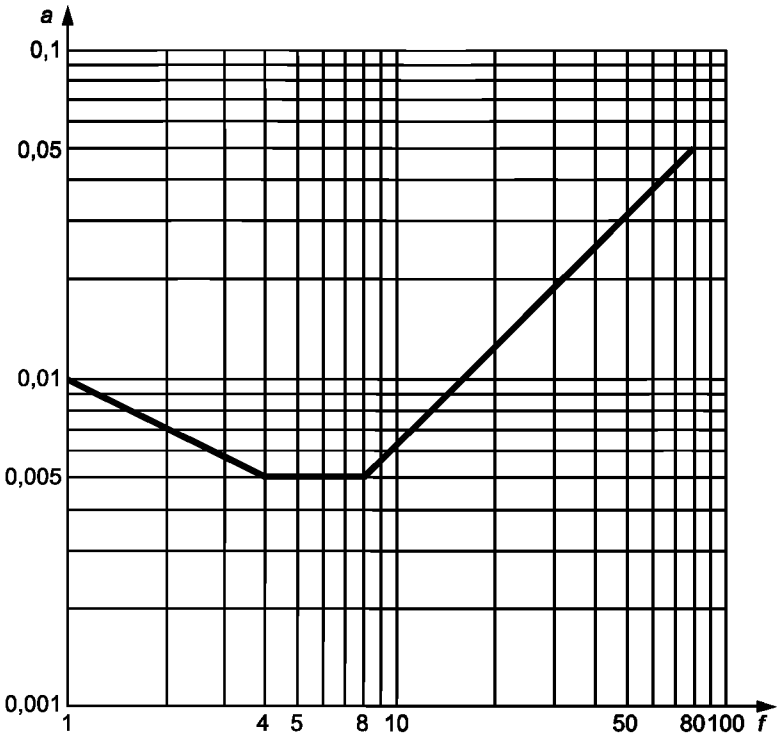
### С.3 Предметы и оборудование, установленные в зданиях

#### С.3.1 Общие положения

Здания содержат большое разнообразие предметов: мебель, оборудование и компьютеры, сложную контрольно-измерительную аппаратуру. Их восприимчивость к колебаниям сильно различается. Данный фактор необходимо учитывать в каждом случае. Большое количество предметов в зданиях, например мебель и работающее машинное оборудование, имеют большой допуск по уровню колебаний, прежде чем они перестанут выполнять свою функцию по назначению. Часть предметов очень чувствительны к колебаниям, например оптические приборы, оборудование по выращиванию кристаллов и производству компьютерных чипов. Большинство компьютеров удовлетворительно воспринимают колебания. Вибрационные критерии для нормального функционирования оборудования необходимо получать от производителя.

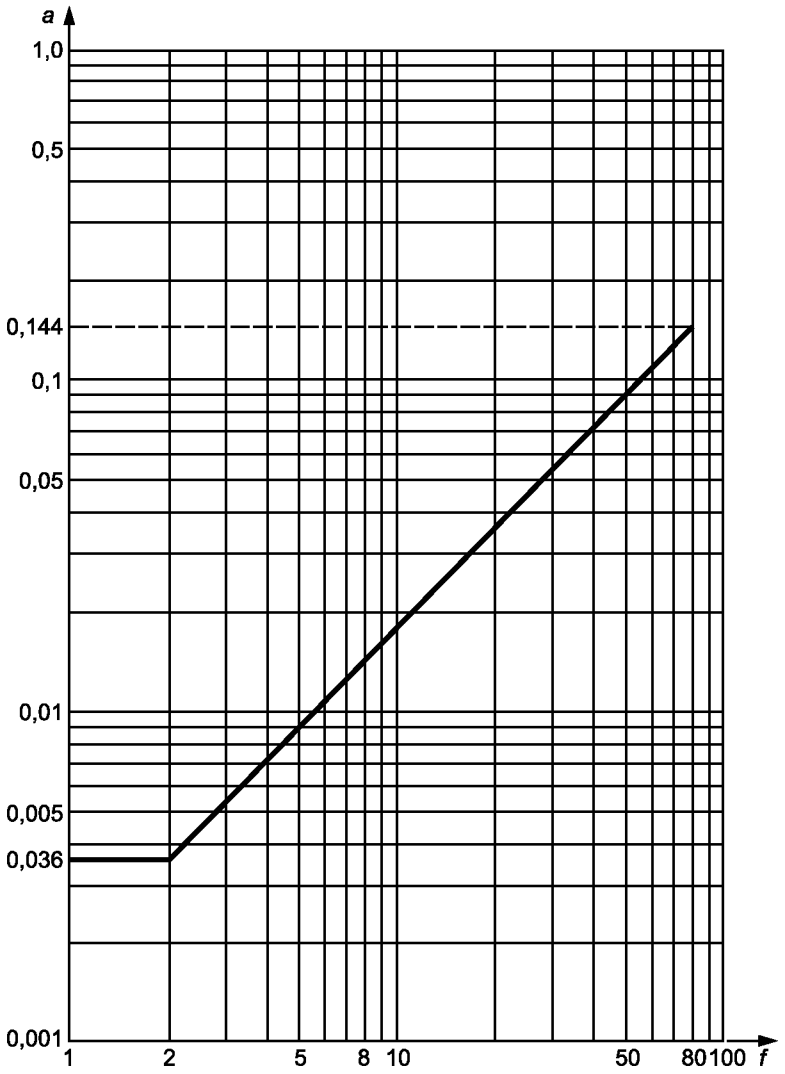
#### С.3.2 Вибрационные критерии для прецизионного оборудования

Многие чувствительные части оборудования требуют защиты от окружающей вибрации для правильного функционирования и работы. Для достижения этих условий требуется тщательно выбирать место строительства, тип здания, применяемые материалы, архитектурно-планировочные решения зданий, расположение аппаратуры в пределах здания, с учетом транспортного потока работников в здании, расположения и работы других машин и транспортных средств внутри и снаружи здания. Программа мониторинга вибрации является существенным компонентом такого процесса (см. ИСО/ТС 10811-1 и ИСО/ТС 10811-2). Дополнительное руководство для проектирования здания приведено в приложении Е, [1] и [6].



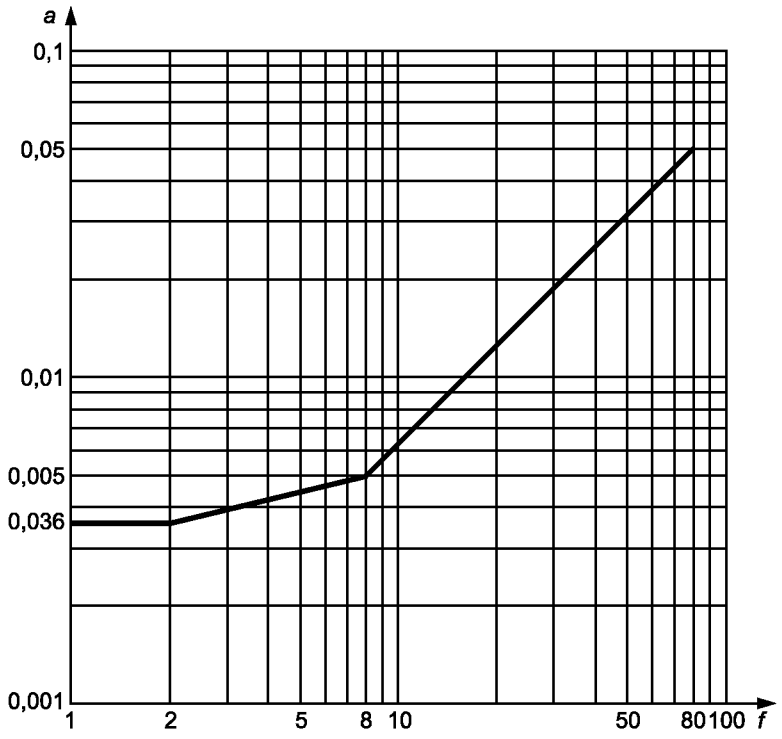

*a* — ускорение (r.m.s.), м/с$^2$; *f* — частота, Гц

Рисунок С.1 — Базисная кривая ускорения при колебаниях здания по оси *z* (направление колебаний снизу вверх)




*a* — ускорение (r.m.s.), м/с$^2$; *f* — частота, Гц

Рисунок С.2 — Базисная кривая ускорения при колебаниях здания по осям *x* и *y* (направление колебаний по взаимно перпендикулярным горизонтальным осям)




*a* — ускорение (r.m.s.), м/с$^2$; *f* — частота, Гц

Рисунок С.3 — Базисная кривая ускорения при пространственных колебаниях здания

**Приложение D**
**(справочное)**

## Оценка реакции людей на колебания в зданиях от воздействия ветра

### D.1 Основные положения

#### D.1.1 Общие замечания

Для сохранения приемлемых ежедневных условий проживания, включая реакцию человека на колебания, необходимо проводить измерения интенсивности колебаний зданий. Измерение горизонтальных ускорений здания с периодом временно́го ряда один год необходимо проводить для оценки комфортности проживания людей в зданиях.

Другие периоды временно́го ряда могут быть приняты ввиду более интенсивных колебаний вследствие сильных штормов или ураганов, которые могут происходить через интервалы в несколько лет или десятилетий. Для этого следует применять другие множители, отличные от использованных в настоящем стандарте. Настоящее приложение применяется к обычным офисным и жилым помещениям.

#### D.1.2 Оценка приемлемых горизонтальных перемещений

Оценка приемлемых горизонтальных вибраций для офисных помещений задается пиковыми ускорениями на первых собственных частотах с учетом конструктивных особенностей здания, направлениями колебаний (нормально по ветру или поперек ветрового потока) с учетом крутильных колебаний. Допустимые вибрации определяют на основе изучения данных, полученных при анализе колебаний многих существующих зданий, находящихся в общем пользовании.

Уровень оценочной кривой для жилого дома соответствует 2/3 кривой для офисного помещения. Результирующая кривая для жилого дома близка к уровню 90 % вероятности ощущения [14].

Оценочные кривые для приемлемых горизонтальных вибраций показаны на рисунке D.1.

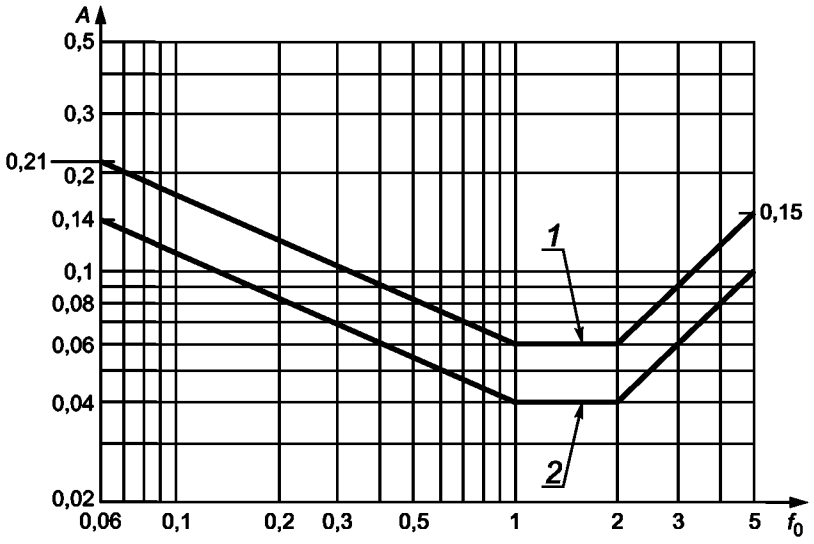
#### D.1.3 Оценка пиковых ускорений здания

Пиковые ускорения здания следует оценивать в соответствии с ИСО 4354.

### D.2 Критерии

#### D.2.1 Основные правила

Пиковые ускорения перекрытий здания с периодом временно́го ряда один год в горизонтальном направлении (нормально по ветру или поперек потока) и при крутильных колебаниях не должны превышать базисной оценочной кривой для соответствующих помещений, приведенную на рисунке D.1, где $f_0$ означает первую собственную частоту в конструктивных направлениях здания и при кручении. Здесь ускорение при кручении означает эквивалентное поступательное ускорение, определенное как $r \cdot A_\theta(t)$, где $r$ — дистанция от центра кручения до конечной точки, $A_\theta(t)$ — угловое ускорение крутильных колебаний. В более сложных ситуациях может потребоваться комбинация модальных откликов.




$A$ — пиковое ускорение, м/с$^2$; $f_0$ — первая собственная частота в конструктивном направлении здания при кручении, Гц;
*1* — офисы; *2* — жилые дома

Рисунок D.1 — Оценочные кривые уровней колебаний зданий в горизонтальном ($x$, $y$) направлении при ветровом воздействии для периода временно́го ряда один год

**Приложение Е**
**(справочное)**

## Методы уменьшения вибрации

### Е.1 Примеры уменьшения вибрации

В настоящем разделе приведены некоторые меры, которые могут быть применены для уменьшения колебаний в сооружениях:

a) изменение собственной частоты конструкции или приемника (изменение массы или жесткости);

b) увеличение демпфирования для снижения уровней колебаний при резонансах (фрикционные или гидравлические демпферы, демпферы с изменяющейся массой);

c) контроль динамических свойств источника (сдвиг частоты, балансировка машинного оборудования с вращающимися частями, управление скоростью движения или маршрутом транспортных средств, повышение качества поверхности или свойств полотна дороги или железнодорожного пути и т. д.);

d) изоляция источника вибрации, например введение барьеров при передаче вибрации (рвы или насыпи для колебаний, передаваемых по грунту, оптимальные технологии и контроль взрывных работ);

e) изоляция сооружения с помощью активных или пассивных средств (управляемые массы или реакции, сейсмическая или пневматическая изоляция измерительной аппаратуры, пружинная изоляция компонентов здания или всего сооружения).

Необходимо соблюдать осторожность, чтобы внесенные изменения непреднамеренно не изменили уровни вибрации вследствие усиления скрытых видов колебаний. Рекомендуется применять необходимые меры по уменьшению вибрации на стадиях проектирования, а не в качестве дополнительных мероприятий, после того как здание уже построено и заселено.

### Е.2 Рекомендации по проектированию зданий, в которых установлено чувствительное к вибрации оборудование

#### Е.2.1 Общие замечания

Количественный прогноз низких уровней вибрации является часто трудоемким или, как минимум, неопределенным. Некоторые направления могут быть рекомендованы для уменьшения уровней колебаний в зданиях. Приведенные ниже меры могут быть рекомендованы в качестве вариантов в процессе проектирования.

#### Е.2.2 Выбор строительной площадки

Место строительства нового сооружения следует выбирать с учетом приемлемых уровней возможной вибрации. Источники вибрации, например дорожное и железнодорожное движение, тяжелые производственные процессы и карьеры, должны быть расположены как можно дальше от строительной площадки. Существующий уровень вибрации в грунте следует постоянно контролировать в течение репрезентативного периода времени и сравнивать с требуемыми уровнями. Следует измерять как горизонтальные, так вертикальные уровни вибрации (см. ИСО 4866).

#### Е.2.3 Тип фундамента и конструкции

Конструкция на скальном основании будет подвержена в большей степени высокочастотным фоновым колебаниям, чем сооружения, стоящие на грунте. Амплитуды низкочастотных колебаний в этом случае, вероятно, будут меньше. Все это может влиять на проектное решение при устройстве котлована под фундамент на различных видах оснований: непосредственно на твердой скальной породе, на грунте, на сваях, забитых до скальной породы. Возможно, следует добавить изолирующие подушки или принять другие меры виброзащиты.

Выбранный тип конструкции здания должен обеспечивать необходимую жесткость, чтобы внешние и внутренние генерируемые колебания были в пределах допустимых уровней. Гибкая конструкция междуэтажного перекрытия генерирует колебания от хождения людей и других видов передвижений (тележки, элеваторы), а также от работы стационарного машинного оборудования. Механическое оборудование следует располагать в стороне от наиболее чувствительных зон и адекватно изолировать от вибрации. Необходимо учитывать, что ветер может возбуждать горизонтальные колебания в верхних этажах многоэтажных сооружений. Следует учитывать возможность усиления колебаний в здании от фундамента до участков, на которых уровни колебаний должны быть строго ограничены.

#### Е.2.4 Крепление измерительной аппаратуры

Крепления, используемые в качестве отдельных опор чувствительной к вибрациям измерительной аппаратуры или другого аналогичного оборудования, должны быть рассчитаны на нагрузки до твердого слоя грунта или скального основания и изолированы от жесткого контакта с остальными частями здания. Определяющими параметрами являются следующие:

- собственная частота опоры с учетом податливости основания и упругости материала;
- собственная частота аппаратуры;

- частоты и амплитуды возбуждения;
- вибрационные критерии для аппаратуры или оборудования.

**Е.2.5 Расположение оборудования внутри здания**

Большинство образцов чувствительной к вибрации аппаратуры или другое оборудование следует располагать на плитах на уровне грунта, который опирается на коренные подстилающие породы. Вспомогательные дороги или пандусы для транспортных средств надо удалять от зон с установленной аппаратурой и не сопрягать их со зданием. Использование устройств виброизоляции следует рассматривать в случае, когда вибрационное «окружение» является неадекватным. При выборе наиболее подходящих видов виброизоляции (пневматическая, пружинная и т. д.) следует принимать во внимание характеристики аппаратуры (собственная частота, демпфирование, физические размеры). В основном следует оценить горизонтальные и вертикальные колебания, а иногда следует принимать в расчет угловое и линейное перемещения опорных частей плит перекрытий или других опор. Источники вибрации внутри здания (хождение людей, закрывание дверей, перемещения операторов, вспомогательное машинное оборудование, изменения в атмосферном давлении при открытых дверях и т. д.) следует учитывать при анализе здания и отдельных помещений с точки зрения комфортного пребывания людей.

**Е.2.6 Меры для уменьшения вибрации**

Когда уровни колебаний превышают рекомендованные значения или они мешают нормальной работе, могут потребоваться изменения в конструкции или методах виброизоляции отдельной аппаратуры или группы приборов. Некоторые доступные варианты см. выше в Е.1.

**Приложение ДА**
**(справочное)**

## Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов и документов национальным стандартам и действующим в этом качестве межгосударственным стандартам

Таблица ДА.1

| Ссылочное обозначение международного стандарта (документа) | Степень соответствия | Обозначение и наименование соответствующего национального, межгосударственного стандарта |
|---|---|---|
| ISO 2041:2009 | IDT | ГОСТ Р ИСО 2041—2012 «Вибрация, удар и контроль технического состояния. Термины и определения» |
| ISO 2372 | — | * |
| ISO 2394:1998 | NEQ | ГОСТ 27751—2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» |
| ISO 2631-1:1997 | MOD | ГОСТ 31191.1—2004 (ИСО 2631-1:1997) «Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 1. Общие требования» |
| ISO 2631-2:2003 | MOD | ГОСТ 31191.2—2004 (ИСО 2631-2:2003) «Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 2. Вибрация внутри зданий» |
| ISO 3010:2001 | — | * |
| ISO 3898 | — | * |
| ISO 4354 | — | * |
| ISO 4866 | — | * |
| ISO 6897 | — | * |
| ISO 8041:2005 | IDT | ГОСТ ИСО 8041—2006 «Вибрация. Воздействие вибрации на человека. Средства измерений» |
| ISO 8569 | — | * |
| ISO 8930 | — | * |
| ISO/TS 10811-1:2000 | IDT | ГОСТ Р ИСО/ТС 10811-1—2007 «Вибрация и удар. Вибрация в помещениях с установленным оборудованием. Часть 1. Измерения и оценка» |
| ISO/TS 10811-2:2000 | IDT | ГОСТ Р ИСО/ТС 10811-2—2007 «Вибрация и удар. Вибрация в помещениях с установленным оборудованием. Часть 2. Классификация» |
| ISO 10816-1:1995 | IDT | ГОСТ ИСО 10816-1—97 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования» |
| ISO 10816-2:2009 | MOD | ГОСТ Р 55265.2—2012 (ИСО 10816-2:2009) «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 2. Стационарные паровые турбины и генераторы мощностью более 50 МВт с рабочими частотами вращения 1500, 1800, 3000 и 3600 мин$^{-1}$» |
| ISO 10816-3:1998 | IDT | ГОСТ ИСО 10816-3—2002 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин$^{-1}$» |
| ISO 10816-4:1998 | IDT | ГОСТ Р ИСО 10816-4—99 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 4. Газотурбинные установки» |

*Окончание таблицы ДА.1*

| Ссылочное обозначение международного стандарта (документа) | Степень соответствия | Обозначение и наименование соответствующего национального, межгосударственного стандарта |
|---|---|---|
| ISO 10816-5 | — | * |
| ISO 10816-6 | — | * |
| ISO 10816-7:2009 | MOD | ГОСТ Р 55265.7—2012 (ИСО 10816-7:2009) «Вибрация. Контроль состояния машин по измерениям вибрации на невращающихся частях. Часть 7. Насосы динамические промышленные» |
| ISO 14837-1:2005 | IDT | ГОСТ Р ИСО 14837-1—2007 «Вибрация. Шум и вибрация, создаваемые движением рельсового транспорта. Часть 1. Общее руководство» |

* Соответствующий национальный стандарт отсутствует. До его принятия рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта.

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие условные обозначения степени соответствия стандартов:
- IDT — идентичные стандарты;
- MOD — модифицированные стандарты;
- NEQ — неэквивалентные стандарты.

## Библиография


[1] Allen, D.E., Onysko, D.M., and Murray, T.M. *Minimizing Floor Vibration (Минимизация вибрации пола).* ATC Design Guide 1, Applied Technology Council, Redwood City, CA, USA, 1999, 49 pp.

[2] Bishop, N.W.M., Willford, M. and Pumphrey, R. *Human induced loading of flexible staircases (Вызванные человеком нагрузки на упругие лестницы)* Safety Science 18 (1995), pp. 261—276

[3] Dallard, P. et al. *The London Millennium Bridge (Мост Тысячелетия в Лондоне).* The Structural Engineer 9/22, Nov. 2001

[4] Dowding, C.H. *Construction Vibrations (Колебания сооружения).* Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1996, 610 pp.

[5] Ellis, B.R. *The influence of crowd size on floor vibrations induced by walking (Влияние размера толпы на колебания пола, возникающие при ходьбе).* The Structural Engineer, 18 March 2003, pp. 20—27

[6] Gordon, C.G. *Generic criteria for vibration-sensitive equipment (Общие критерии для оборудования, чувствительного к вибрации).* SPIE, vol.1619, 1991, San Jose CA, USA, pp. 71—85

[7] Institution of Structural Engineers. *Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action — Interim guidance on assessment and design (Требования к динамической характеристике постоянных трибун. Временное руководство по измерению и проектированию).* The Institution of Structural Engineers London, UK, November 2001

[8] Kanda, J., Tamura, Y., Nakamura, O., and Uesu, K., *Probabilistic criteria for serviceability limit of wind response (Вероятностные критерии предела эксплуатационной надежности для реакции на воздействия ветра)* Int'l Colloquium on Structural Serviceability of Building, Goteborg, Sweden, IABSE Reports, Vol. 69, 1993, pp. 59—66

[9] Langefors, V. and Kihlstrom, B. *The Modern Technique of Rock Blasting (Современная технология взрывных работ на скальных породах).* John Wiley, New York, USA, 1976

[10] Melbourne, W.H. and Palmer, T.R. *Accelerations and comfort criteria for buildings and undergoing complex motions (Ускорения и критерии комфорта для зданий и переносимых комплексных движений),* Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41—44, 1992, pp. 105—116

[11] Murray, T.M., Allen, D.E. and Ungar, E.E. Floor Vibrations due to Human Activity (Колебания пола под действием человека), Steel Design Guide Series 11, American Institute of Steel Construction, Chicago IL, USA, 1997, 69 pp.

[12] Nakamura, S-I. *Field measurements of lateral vibration on a pedestrian suspension bridge (Полевые измерения поперечной вибрации на пешеходном подвесном мосту).* The Structural Engineer, 18 November 2003, pp. 22—26

[13] Ohlsson, S. *Springiness and Human Induced Floor Vibrations (Упругость и колебания пола, порожденные человеком) — Руководство по проектированию* — A Design Guide. Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden, 1988, 139 pp. (Document D12)

[14] Tamura, Y. *Design issues for tall buildings from accelerations to damping (Вопросы проектирования высотных зданий от ускорений до демпфирования)*, The 11th International Conference on Wind Engineering, Lubbock, Texas, June, 2003

[15] Wyatt, T.A. *Design guide on the vibration of floors (Руководство для расчета вибрации междуэтажных перекрытий).* SCI Publication 076. The Steel Construction Institute, Berkshire. UK, 1989, 32 pp.

[16] Zivanovic, S., Pavic, A., and Reynolds, P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review *(Вибрационная эксплуатационная пригодность пешеходных мостов в условиях возбуждения человеком: обзор литературы).* J. Sound and Vibration, 279 (1—2), 2005, pp. 1—74

УДК 624.044:006.354 ОКС 91.080.01

Ключевые слова: вибрация, надежность, здания

Редактор *О.И. Пономарев*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *М.В. Бучная*
Компьютерная верстка *И.А. Налейкиной*

Сдано в набор 22.12.2016. Подписано в печать 01.02.2017. Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,32. Тираж 28 экз. Зак. 264.
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