ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 56353— 2022

ГРУНТЫ

Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2022

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «Геологический научно-методический центр МГУ имени М.В. Ломоносова» (ООО «Геоцентр МГУ»), Ассоциацией «Инженерные изыскания в строительстве» — Общероссийским отраслевым объединением работодателей («АИИС») при участии Геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 465 «Строительство»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 апреля 2022 г. № 210-ст

4 В настоящем стандарте реализованы нормы Федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»

5 ВЗАМЕН ГОСТ Р 56353—2015

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

© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2022

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 Обозначения 3
5 Общие положения 5
6 Метод динамического трехосного сжатия 5
7 Метод малоамплитудных динамических испытаний в резонансной колонке 12
8 Метод крутильного сдвига 15
9 Метод динамического простого сдвига 16
Приложение А (справочное) Классификация дисперсных грунтов в целях изучения их динамических свойств 22
Приложение Б (рекомендуемое) Формы протоколов динамических лабораторных испытаний грунтов 24
Приложение В (рекомендуемое) Структурная схема установки для испытания грунтов методом динамического трехосного сжатия 29
Приложение Г (рекомендуемое) Методики количественной оценки динамических нагрузок на грунты 30
Приложение Д (обязательное) Примеры графического оформления результатов испытания грунта методом динамического трехосного сжатия 33
Приложение Е (рекомендуемое) Оценка вертикальных осадок поверхности массива в результате разжижения грунтов 36
Приложение Ж (рекомендуемое) Оценка латеральных деформаций грунтов в результате их разжижения 37
Приложение И (рекомендуемое) Классификация дисперсных грунтов по динамической устойчивости 39
Приложение К (справочное) Функциональная схема динамического нагружения образца при испытаниях на резонансной колонке 40
Приложение Л (рекомендуемое) Примеры графического оформления результатов испытания грунта методом резонансной колонки 41
Приложение М (рекомендуемое) Примеры графического оформления результатов испытания грунта методом крутильного сдвига 43
Приложение Н (рекомендуемое) Структурная схема установки для испытания грунтов методом динамического простого сдвига 44
Приложение П (обязательное) Примеры графического оформления результатов испытания грунта методом динамического простого сдвига 45
Библиография 47

Введение

Настоящий стандарт разработан взамен ГОСТ Р 56353—2015 с учетом требований федеральных законов от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» [1] и от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [2].

Настоящий стандарт разработан авторским коллективом под руководством доктора геолого-минералогических наук, профессора Е.А. Вознесенского. В основу настоящего стандарта положен опыт применения ГОСТ Р 56353—2015 и многолетний опыт авторов в области экспериментальных исследований динамических свойств грунтов, а также разработки и совершенствования методик динамических испытаний.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГРУНТЫ

Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов

Soils. Laboratory methods for determination of dispersed soil dynamic properties

Дата введения — 2022—05—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов (за исключением крупнообломочных) при инженерно-геологических изысканиях для строительства.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие документы:

ГОСТ 5180 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик

ГОСТ 12248.3—2020 Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия

ГОСТ 12248.4 Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия

ГОСТ 12536 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава

ГОСТ 22733 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности

ГОСТ 25100 Грунты. Классификация

ГОСТ 30416 Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения

СП 22.13330.2016 «СНиП 2.02.01-83* Основания зданий и сооружений»

СП 26.13330.2012 «СНиП 2.02.05-87 Фундаменты машин с динамическими нагрузками»

СП 38.13330.2018 «СНиП 2.06.04-82* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)»

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

Издание официальное

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 12248.3, ГОСТ 25100 и ГОСТ 30416, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **виброползучесть:** Накопление деформаций в дисперсных грунтах при длительных динамических нагрузках вследствие ослабления взаимодействия между частицами и их взаимной переупаковки.

3.2 **дилатансия (положительная или отрицательная):** Изменение объема некоторых грунтов при сдвиге.

Примечание — Отрицательная дилатансия также именуется контракцией.

3.3 **динамическая дилатансия:** Механизм деформирования и разрушения несвязных грунтов при динамических нагрузках, заключающийся в изменении их объема в связи с переупаковкой частиц при их взаимном смещении (уплотнении или разуплотнении) либо в развитии избыточного порового давления (положительного или отрицательного) в условиях водонасыщенной закрытой системы.

3.4 **динамический модуль деформации:** Приращение напряжения в условиях динамического нагружения, вызывающее единичное приращение относительной линейной деформации грунта и рассчитываемое как отношение приращения напряжений к возникшему приращению деформаций грунта в заданном диапазоне последних.

3.5 **динамическая нагрузка:** Переменная нагрузка, изменяющаяся во времени быстрее, чем рассеиваются вызванные ею в грунте напряжения.

3.6 **динамическая неустойчивость грунтов:** Увеличение деформируемости и снижение прочности при динамическом нагружении по сравнению со статическими условиями.

Примечание — Механизм проявления динамической неустойчивости рекомендуется обозначать, как указано в приложении А.

3.7 **динамические свойства грунтов:** Группа физико-механических свойств грунтов, характеризующих их реакцию на динамические нагрузки, в т. ч. свойства грунтов как среды распространения колебаний (тиксотропные, плывунные, упругие, демпфирующие, фильтрующие и др.).

3.8 **динамическое разжижение:** Переход водонасыщенных дисперсных грунтов в текучее состояние в результате разрушения структурных связей при динамических воздействиях.

3.9 **квазитиксотропные грунты:** Связные дисперсные грунты с преимущественно коагуляционными структурами, проявляющие при динамическом нагружении обратимое разупрочнение, следствием которого может быть как ускоренное накопление деформаций, так и разжижение чувствительных разностей.

Примечание — При этом после прекращения динамического воздействия прочность этих грунтов восстанавливается во времени до значений, превышающих либо не достигающих ее начального уровня.

3.10 **модуль деформации:** Приращение механического напряжения, вызывающее единичное приращение относительной деформации грунта соответствующего вида (сдвига, линейного или объемного сжатия) и рассчитываемое как отношение приращения приложенных напряжений к возникшему при этом общему приращению деформаций грунта.

3.11 **плывунность:** Способность дилатантно-тиксотропных и некоторых квазитиксотропных грунтов к быстрому разжижению при небольшой интенсивности динамической нагрузки, связанная с особенностями их структуры.

3.12 **разжижение грунта:** Переход водонасыщенного дисперсного грунта в текучее состояние под внешним воздействием.

3.13 **тиксотропия:** Физико-химическое явление, выражающееся в полном или частичном разрушении структурных связей коагуляционной дисперсной системы под действием динамической нагрузки и последующем самопроизвольном их восстановлении в покое, протекающее при неизменных температуре и влажности.

3.14 **циклическая подвижность грунта:** Прогрессирующее снижение прочности грунта под действием динамической нагрузки при неизменной пористости, положительном избыточном поровом давлении в части каждого цикла воздействия и пониженном внутреннем трении в фазе разгрузки.

3.15 **удельная рассеянная энергия:** Часть общей работы, совершенной над единицей объема грунта в ходе динамического нагружения и соответствующая изменению его внутренней энергии (определяется на момент достижения определенной деформации грунта — обычно 5 % в условиях динамического испытания).

4 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

a — эмпирический параметр;

a_{max} — максимальное ускорение колебаний при землетрясении на поверхности грунта, м/с^2;

b — эмпирический параметр;

B — параметр порового давления Скемптона;

C — скорость распространения сейсмической волны, м/с;

CSR — приведенные циклические сдвиговые напряжения;

D — коэффициент поглощения (или демпфирования);

D_{50L} — средний диаметр частиц грунтов, входящих в разжижаемую толщу, мм;

D_H — абсолютная величина латерального растекания грунтов при наклонной поверхности массива, м;

e — коэффициент пористости грунта;

e_0 — начальный коэффициент пористости грунта (в естественном залегании);

e_{min} — коэффициент пористости грунта в предельно плотном сложении;

E — модуль деформации грунта, кПа;

E_d — динамический модуль деформации (общей линейной) грунта, кПа;

$E^y{}_d$ — динамический модуль упругости грунта, кПа;

E_{red} — уменьшенное значение модуля деформации грунта, кПа;

f_0 — центральная частота сейсмического толчка, Гц;

FC_L — среднее содержание пылевато-глинистых частиц (фракции диаметром менее 0,074 мм) грунтов, входящих в разжижаемую толщу, в процентах;

F_L — потенциал разжижения грунта;

G — динамический модуль сдвига грунта, кПа;

h — высота образца, м;

H — мощность слоя грунта, м;

H_L — суммарная мощность потенциально разжижаемых грунтов, м;

H_w — расчетная высота штормовой волны, м;

I — момент инерции образца, кг·м^2;

I_0 — момент инерции силового привода установки, кг·м^2;

I_L — показатель текучести грунта;

K_0 — коэффициент бокового давления покоя грунта;

K_c — отношение главных эффективных напряжений при консолидации;

M — магнитуда землетрясения;

n — число зарегистрированных i-х значений;

N_L — число циклов динамического воздействия до возникновения разжижения грунта;

$p_Д$ — условное сопротивление динамическому зондированию, МПа;

p' — среднее эффективное напряжение, кПа;

q — максимальное касательное напряжение, кПа;

PGA — пиковое горизонтальное ускорение при землетрясении на поверхности почвы, м/с^2;

PPR — относительное (u/σ_m или $\Delta\sigma_v/\sigma_{vc}$) поровое давление;

R — расстояние до сейсмического источника, км;

R_S — коэффициент уплотняемости грунта;

r_d — коэффициент снижения напряжений с глубиной;

S — уклон поверхности, в процентах;

t — время, с;

T_w — период штормовой волны, с;

t_w — расчетная длительность шторма, с;

u — поровое давление, кПа;

V — скорость смещения частиц в волне данного типа, м/с;

V_S — скорость распространения поперечных волн, м/с;

W — энергия упругих деформаций, кДж/м^3;

ΔW — удельная рассеянная энергия, кДж/м^3;

Y — отношение высоты откоса к расстоянию от его подошвы до рассматриваемой точки, в процентах;

z — глубина, м;

β — безразмерный коэффициент;

γ — относительная деформация сдвига;

γ_{max} — максимальное значение относительной деформации сдвига;

γ_0 — пиковое значение относительной деформации сдвига в первом цикле свободных колебаний;

δ — логарифмический декремент затухания;

δ_L — дополнительная осадка поверхности массива грунтов после разжижения, м;

$\Delta\gamma$ — приращение относительной деформации сдвига;

$\Delta\sigma_v$ — изменение вертикального нормального напряжения при динамическом испытании, кПа;

$\Delta\tau$ — приращение касательных напряжений, кПа;

ε — относительная осевая деформация;

ε_d — относительная линейная деформация виброползучести;

σ' — эффективное значение нормального напряжения, кПа;

ρ — плотность грунта, т/м^3;

ρ_w — объемный вес воды, кН/м^3;

σ_1 — большее главное нормальное напряжение, кПа;

σ_2 — промежуточное главное нормальное напряжение, кПа;

σ_3 — меньшее главное нормальное напряжение, кПа;

σ'_1 — эффективное значение большего главного нормального напряжения, кПа;

σ'_3 — эффективное значение меньшего главного нормального напряжения, кПа;

σ_d — амплитуда динамических нормальных напряжений, кПа;

σ_m — среднее нормальное напряжение, кПа;

σ_{ov} — полное значение вертикального природного напряжения, кПа;

σ'_{ov} — эффективное значение вертикального природного напряжения, кПа;

σ_z — статическое вертикальное напряжение, кПа;

τ_d — амплитуда динамических касательных напряжений, кПа;

τ_{av} — среднее значение ожидаемых циклических напряжений сдвига при землетрясении, кПа;

σ_v — полное значение вертикальных нормальных напряжений на глубине z, кПа;

σ'_v — эффективное значение вертикальных нормальных напряжений на глубине z, кПа;

σ_{vc} — вертикальное нормальное напряжение при консолидации в приборе простого сдвига, кПа;

φ' — эффективное значение угла внутреннего трения грунта, градусы;

Θ — угол перекоса образца при кручении, рад;

ω — резонансная частота колебаний, Гц.

5 Общие положения

5.1 Настоящий стандарт устанавливает следующие методы лабораторных испытаний дисперсных грунтов для определения их динамических свойств:

- динамическое трехосное сжатие;
- малоамплитудные динамические испытания методом резонансной колонки;
- крутильный сдвиг;
- динамический простой сдвиг.

5.2 Общие требования к лабораторным испытаниям грунтов, оборудованию и приборам, лабораторным помещениям, способы изготовления образцов для испытаний приведены в ГОСТ 30416.

Примечание — По специальному заданию допускается применять другие методы испытаний и конструкции приборов, обеспечивающие моделирование процесса динамического нагружения грунта.

5.3 Для испытуемых грунтов должны быть определены физические характеристики по ГОСТ 5180: влажность, плотность, плотность частиц, влажность на границах текучести и раскатывания, гранулометрический состав песков, а в необходимых случаях — и глинистых грунтов по ГОСТ 12536, а также вычислены плотность сухого грунта, коэффициент пористости, коэффициент водонасыщения, число пластичности и показатель текучести.

Дополнительные необходимые характеристики грунтов приведены в описаниях отдельных методов испытаний.

5.4 Для обозначения механизма проявления динамической неустойчивости грунтов рекомендуется пользоваться их классификацией, приведенной в приложении А.

5.5 Для предварительной оценки необходимости проведения испытаний песчаных грунтов на разжижаемость рекомендуется пользоваться их классификацией по разжижаемости, приведенной в приложении А.

5.6 В процессе испытаний грунтов ведут протоколы по формам, приведенным в приложении Б.

6 Метод динамического трехосного сжатия

6.1 Сущность метода

6.1.1 Испытания песчаных, глинистых, органоминеральных и органических грунтов методом динамического трехосного сжатия проводят для определения:

а) возможности потери прочности грунтов в условиях динамических нагрузок (при любой степени водонасыщения) — количественной характеристикой является критическая (разрушающая) при заданных условиях величина τ_d или ее приведенная величина τ_d/σ';

б) дополнительных деформаций дисперсных грунтов в условиях наложения динамических нагрузок, в т. ч. возможности накопления критической для данного сооружения деформации грунтов основания в условиях динамического воздействия, — количественной характеристикой является величина ε_d для заданного периода эксплуатации сооружения;

в) деформируемости грунтов в условиях динамического нагружения — количественными характеристиками являются E_d и $E^y{}_d$;

г) возможности динамического разжижения водонасыщенного грунта — количественными характеристиками являются величина $PPR = \Delta u/\sigma_m$, критическая для разжижения при заданных условиях величина PGA либо N_L при ожидаемой амплитуде динамических напряжений;

д) последствий динамического разжижения грунтов — количественными характеристиками являются величины δ_L и D_H.

6.1.2 Эти характеристики определяют по результатам испытаний образцов грунта в камерах трехосного сжатия, дающих возможность бокового расширения образца грунта в условиях трехосного осесимметричного статического нагружения при $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ с одновременным дополнительным вертикальным динамическим нагружением.

Подготовленные образцы цилиндрической формы (нарушенного или ненарушенного сложения) после изотропной или анизотропной консолидации с заданным начальным напряженным состоянием (характеризуемым соотношением главных напряжений в массиве) подвергаются действию динамической нагрузки, изменяющей соотношение главных напряжений на момент окончания консолидации. Образец испытывает сначала увеличение осевого напряжения на значение заданной σ_d (при этом на

плоскости, проходящей под 45° к оси образца, развиваются сдвигающие напряжения значением $\sigma_d/2$), затем его уменьшение на то же значение, при котором направление сдвигающих напряжений меняется на обратное. Возможно также проведение динамического нагружения с увеличением осевого напряжения на $\sigma_d/2$ и одновременным уменьшением бокового напряжения на то же значение. При этом амплитуда возникающих максимальных касательных напряжений будет такой же. Во вторую половину цикла направление напряжений меняется на обратное при неизменных нормальных напряжениях на плоскостях максимальных касательных напряжений.

6.1.3 Есть два основных варианта динамических трехосных испытаний:

а) с контролем напряжений;

б) с контролем деформаций.

Допускается использовать оба варианта испытаний, но вариант а) предпочтительнее, поскольку позволяет задавать и поддерживать на заданном уровне (или изменять по заданной программе) параметры динамического воздействия в течение эксперимента, а поровое давление и осевая деформация образца при этом измеряются в функции числа циклов нагружения.

6.1.4 Динамические трехосные испытания дисперсных грунтов следует проводить по консолидированно-недренированной схеме с измерением порового давления. В обоснованных случаях (моделирование динамического воздействия на грунты, находящиеся в нестабилизированном состоянии под действием как природной, так и дополнительной нагрузки от сооружения) допускается использовать неконсолидированно-недренированную схему. Использование консолидированно-дренированной схемы в режиме динамического трехосного сжатия не допускается в связи с неравномерностью оттока поровой влаги из разных сечений образца из-за высоких скоростей деформации в динамическом режиме нагружения.

6.1.5 Для испытаний используют образцы грунта ненарушенного сложения с природной влажностью или образцы нарушенного сложения с заданными значениями плотности и влажности. Образцы должны иметь форму цилиндра диаметром не менее 38 мм (предпочтительнее не менее 50 мм) и с отношением высоты к диаметру от 2:1 до 2,5:1.

6.2 Оборудование и приборы

6.2.1 Общие требования к составу, конструкции, измерительным устройствам и тарировке установок для испытания грунтов методом динамического трехосного сжатия в целом соответствуют требованиям ГОСТ 12248.3. Погрешности средств измерений (усилий, давлений, перемещений) для всех измерительных устройств должны соответствовать ГОСТ 30416. Датчики перемещений должны позволять измерять деформации образца с точностью ± 0,02 % базы измерения (высоты или диаметра образца).

6.2.2 Установки динамического трехосного сжатия должны иметь системы динамического нагружения, калиброванные в установленном порядке. Система динамического нагружения установки должна обеспечивать создание и контроль заданной амплитуды гармонически изменяющихся напряжений в диапазоне от 1 до не менее чем 100 кПа в течение испытания. Дрейф осевой нагрузки (отклонение осевого напряжения от расчетного синусоидального сигнала) не должен превышать 5 %. В дополнение к этому система может создавать и другие, в т. ч. сложные, формы волны нагружения. Структурная схема такого прибора приведена в приложении В. При необходимости калибровку системы нагружения на нужную амплитуду динамического нагружения проводят перед опытом, установив вместо образца металлический стержень.

6.2.3 Испытательная установка должна иметь в своем составе автоматическую систему регистрации данных и управления экспериментом на базе персонального компьютера или сервера с учетом быстротечности всех процессов при динамическом нагружении грунта. Эта система должна иметь техническую возможность регистрации деформации образца, порового давления и осевого усилия не менее 20 раз за каждый цикл динамического нагружения при выбранной частоте воздействия.

6.2.4 Измерение порового давления проводят по одному или обоим торцам образца либо в центральной части образца при использовании средств локальных измерений. Для измерения осевых деформаций образца используют внешние (по отношению к камере) или внутренние датчики перемещений, имеющие, как и датчики давления, обратную связь с системой нагружения, что обеспечивает автоматизированный режим работы всей установки. При необходимости контроля деформаций менее 0,01 % следует использовать датчики локального измерения осевых и радиальных деформаций образца, устанавливающиеся непосредственно на него внутри камеры прибора.

6.3 Подготовка к испытанию

6.3.1 Подготовку образца к испытанию проводят в целом в соответствии с требованиями ГОСТ 30416 и ГОСТ 12248.3. Образцы связных грунтов ненарушенного сложения также допускается вырезать из монолита глинистого грунта с помощью специальных ножей и струн на поворотном шаблоне. Для выравнивания торцов используют разъемные формы, позволяющие ровно подрезать образец жестким ножом.

6.3.2 Подготовку водонасыщенных образцов песчаных грунтов из проб нарушенного сложения ведут непосредственно на основании камеры способами осаждения в воде, влажного трамбования или сухой послойной отсыпки воздушно-сухого песка, которые позволяют исключить значительные вариации пористости по высоте образца и обеспечить их практическую идентичность в серии испытаний. При этом осаждение в воде пригодно лишь для чистых однородных песков, поскольку для песков со значительным содержанием тонких частиц возможна их сегрегация в столбе жидкости.

6.3.3 Образцы во всех случаях формируют в цилиндрической разъемной форме-шаблоне, установленной непосредственно на пьедестале камеры прибора трехосного сжатия, с растянутой на ее внутренней поверхности латексной мембраной. Для формирования образцов строго цилиндрической формы между внутренней стенкой формы и мембраной с помощью вакуумного насоса создается разрежение, обеспечивающее полное прилегание последней по внутренней поверхности шаблона. Массу грунта контролируют с точностью до 0,01 г.

6.3.4 Формирование образцов методом сухой послойной отсыпки ведут через воронку с выходным отверстием диаметром 5 мм с постоянной высоты около 20 мм над поверхностью формируемого образца. Постукиванием резиновым или пластиковым молотком по основанию камеры достигают более плотного сложения песка. После установки штампа и закрепления на нем верхнего конца мембраны, но до заполнения камеры прибора водой, к образцам для повышения эффективных напряжений и сохранения их однородности через верхнюю дренажную линию прикладывают разрежение, значение которого не должно превышать среднее эффективное напряжение при консолидации. Нижняя дренажная линия остается перекрытой. После этого герметически перекрывают верхнюю дренажную линию, удаляют разъемную форму-шаблон и (предпочтительно цифровым штангенциркулем) определяют высоту и диаметр образца с точностью 0,01 мм. Диаметр измеряют в верхней, средней и нижней частях образца не менее шести раз. В дальнейших расчетах используют полученное среднее арифметическое значение диаметра образца.

6.3.5 Подготовку образцов методом послойного осаждения в кипяченой и вакуумированной воде ведут из предварительно прокипяченной в двух колбах в течение 1 ч взвеси песка в воде, минуя воздушную среду. Это исключает образование пузырьков воздуха в формируемом образце и обеспечивает надежность последующего измерения порового давления. Для этого колбу, заполненную доверху водой, затыкают пробкой со стеклянной трубочкой диаметром 3—4 мм. Затем колбу переворачивают вертикально, а кончик трубочки опускают в воду. При этом песок постепенно оседает из колбы через трубочку в форму, минуя воздушную среду. Эквивалентный объем воды при этом вытесняется из формы в колбу. Перемещая понемногу колбу в горизонтальной плоскости, добиваются равномерной укладки песка по площади обоймы. Постукиванием легким пластиковым или резиновым молотком по основанию камеры можно получить более плотное сложение песка.

Установку штампа и сборку камеры трехосного сжатия проводят аналогично способу, описанному в 6.3.4.

6.3.6 Подготовку образцов методом влажного трамбования ведут путем послойной укладки и трамбования влажного песка из смеси, приготовленной при влажности 6 % — 7 % и выдержанной для выравнивания содержания влаги во всем ее объеме в течение не менее чем 12 ч в среде с относительной влажностью воздуха около 100 %. Образец формируют в такой же цилиндрической разъемной форме-шаблоне, установленной непосредственно на пьедестале камеры прибора трехосного сжатия, в пять-шесть слоев из соответствующего числа примерно одинаковых навесок влажного грунта из расчета получения образца с заданной пористостью. Интенсивность трамбования постепенно увеличивают снизу вверх для получения однородного сложения по высоте. Следует предварительно рассчитывать и контролировать в процессе укладки требуемую высоту образца после формирования каждого последующего слоя. Этот метод наиболее целесообразен для формирования образцов неоднородных песков с содержанием частиц мельче 0,05 мм более 15 % или частиц крупнее 2 мм более 5 % по массе.

Установку штампа и сборку камеры трехосного сжатия проводят аналогично способу, описанному в 6.3.4.

6.3.7 Водонасыщение исходно сухого или влажного песка проводят непосредственно в камере прибора трехосного сжатия. Сначала каждый образец подвергают гидростатическому сжатию до σ_3, равного 10—15 кПа, с одновременным снятием вакуума во избежание радиальных деформаций. Затем проводят насыщение песка углекислым газом снизу под давлением не более 10 кПа в течение 0,5 ч. Этим достигают вытеснения воздуха из пор грунта через верхнюю дренажную линию и насыщения его более плотным углекислым газом, который впоследствии растворяется в воде без защемления пузырьков газа, искажающих измеряемое поровое давление. Заполнение образца дистиллированной и предварительно вакуумированной для ее полной дегазации водой проводят снизу с напором около 30 см до прекращения выделения газовых пузырьков с водой через верхнюю дренажную линию. Такая подготовка позволяет получать полностью водонасыщенные образцы с параметром Скемптона B [формула (6.1)], равным 0,94—1,00 (в зависимости от их плотности сложения).

6.3.8 После установки полностью снаряженной камеры с образцом и его водонасыщения все управление испытанием и непрерывную регистрацию данных ведут с персонального компьютера через меню управляющей программы. Начальные установки программы испытания включают в себя:

- ввод исходных данных, необходимых для вычисления напряжений и деформаций в процессе испытания: высота, диаметр и масса образца, плотность частиц грунта; период нагружения; частота считывания показаний каждого датчика;
- ввод условия прекращения эксперимента: значение максимальной осевой деформации, число циклов или длительность нагружения; возможные дополнительные условия остановки испытания в зависимости от использующейся программы управления;
- фиксацию исходных (условно нулевых) показаний всех датчиков.

6.4 Проведение динамического консолидированно-недренированного испытания

6.4.1 Водонасыщение образцов

6.4.1.1 Перед началом проведения испытания проводят водонасыщение образца, что необходимо для контроля порового давления и эффективных напряжений в образце в процессе испытания. Водонасыщение проводят в соответствии с требованиями ГОСТ 12248.3.

6.4.1.2 Степень водонасыщения образцов и отсутствие воздуха в системе измерения порового давления контролируют параметром Скемптона:

$$B = \Delta u/\Delta\sigma_m, \qquad (6.1)$$

где Δu — изменение порового давления;

$\Delta\sigma_m$ — изменение среднего нормального напряжения, соответствующее изменению полного гидростатического давления в камере.

При полном водонасыщении B равно 1,00; для плотных песков B может быть существенно ниже 1,00 даже при полном заполнении пор водой. Контроль параметра B проводят при увеличении σ_3 с шагом 20 кПа в условиях закрытой системы до достижения $B \geq 0{,}95$. Полученное значение параметра Скемптона заносят в протокол испытаний (см. приложение Б).

Примечание — При испытаниях на виброползучесть возникающее поровое давление ничтожно, и поэтому образцы грунта допускается испытывать как при естественной влажности, так и при полном водонасыщении.

6.4.2 Предварительная консолидация образцов

6.4.2.1 Предварительную консолидацию (уплотнение) грунта проводят в целом в соответствии с требованиями ГОСТ 12248.3 при напряжениях, соответствующих условиям природного залегания испытуемого грунта с учетом природной и дополнительной нагрузки. Она может быть изотропной или анизотропной. При анизотропной консолидации отношение главных эффективных напряжений $\sigma'_1/\sigma'_3 \neq 1$ приводит к определенному сдвиговому деформированию грунта.

6.4.2.2 Значения и соотношение главных напряжений грунта в массиве могут существенно варьировать в зависимости от глубины, степени переуплотнения грунта и других обстоятельств, имея часто критическое значение для надежной экспериментальной оценки поведения грунтов. Величину отношения $K_c = \sigma'_3/\sigma'_1$ задают соответствующим соотношением давления в камере и осевого усилия. При консолидации до природного напряженного состояния осевое напряжение σ'_1 принимают равным эффективному значению вертикального природного напряжения σ'_{ov} на глубине опробования испытуемого грунта в массиве.

Горизонтальное напряжение рассчитывают по формуле

$$\sigma'_3 = K_0 \cdot \sigma'_{ov}, \quad (6.2)$$

где K_0 — коэффициент бокового давления покоя грунта, который следует предварительно определять экспериментально при уплотнении грунта до природного напряженного состояния при отсутствии радиальных деформаций.

6.4.2.3 Для нормально уплотненных несвязных грунтов значение K_0 может быть получено расчетом по формуле

$$K_0 = 1 - \sin \varphi', \quad (6.3)$$

где φ' — эффективное значение угла внутреннего трения грунта.

При невозможности определения или расчета значения коэффициента бокового давления покоя для нормально уплотненных грунтов допускается принимать:

- $K_0 = 0,5$ — для несцементированных песков;
- $K_0 = 1,0$ — для глинистых грунтов мягкопластичной и текучепластичной консистенций, а также для илов и торфов;
- $K_0 = 0,7$ — для всех остальных дисперсных грунтов.

Для переуплотненных грунтов значение K_0 следует определять экспериментально.

6.4.2.4 Анизотропная консолидация проводится после завершения изотропного обжатия в соответствии с ГОСТ 12248.3—2020 (пункты 8.2.1—8.2.5). Осевое давление передают ступенями в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 — Ступени нагрузки при анизотропной консолидации

Грунты	Давление в камере σ_3, кПа	Ступени вертикального давления $\Delta\sigma_1$, кПа
Пески гравелистые независимо от плотности, пески крупные и средней крупности плотные. Глины с $I_L \le 0,25$	До 500	$0,2\sigma_3$
Пески средней крупности рыхлые и средней плотности, пески мелкие плотные и средней плотности. Глинистые: супеси и суглинки с $I_L \le 0,5$; глины с $0,25 < I_L \le 0,5$	До 300	$0,1\sigma_3$
Пески мелкие рыхлые, пески пылеватые независимо от плотности. Глинистые: супеси, суглинки, глины с $I_L > 0,5$	До 200	$0,1\sigma_3$
Органоминеральные и органические грунты	До 100	$0,05\sigma_3$

Примечания

1 При значениях давления в камере, больших указанных в настоящей таблице, ступени давления принимают равными 10 % конечного давления.

2 Вертикальное давление прикладывают через 15 мин после достижения заданного давления в камере.

3 При конечном значении бокового напряжения, меньшем указанных в настоящей таблице, это напряжение создается в одну ступень.

4 При консолидации в камере трехосного сжатия с раздельным созданием напряжений на боковой поверхности и торцах образца [типа Б — ГОСТ 12248.3—2020 (приложение Б)] ступени вертикального давления следует задавать равными сумме ступеней давления в камере и вертикального давления, указанных в настоящей таблице.

6.4.2.5 При уплотнении грунта до природного напряженного состояния в отсутствие дополнительных нагрузок возможно проведение K_0-консолидации при нулевых радиальных деформациях, которая представляет собой разновидность анизотропной консолидации. Ее следует проводить в автоматическом режиме по схеме соответствующего модуля программного обеспечения, входящего в комплект поставки оборудования.

6.4.2.6 Объемная деформация при консолидации контролируется по изменению отжатой жидкости. Пересчет текущего коэффициента пористости грунта и размеров образца ведется автоматически. Данные консолидации на момент ее окончания заносят в протокол испытаний (см. приложение Б). Консолидацию ведут до полного завершения фильтрационных процессов. Для водонасыщенных грунтов за критерий окончания фильтрационной консолидации образца может быть также принято условие изменения объемной деформации не более 0,3 % за последние 4 ч.

Примечание — Если осевая деформация образца при анизотропной консолидации превысила 5 %, значение K_0 определено неверно.

6.4.3 Проведение динамического нагружения

6.4.3.1 После завершения консолидации перекрывают дренаж и проводят испытания образца грунта с заданными параметрами динамической нагрузки. Расчет динамических напряжений, если они не заданы каким-либо иным способом, приведен в приложении Г.

6.4.3.2 При исследовании виброползучести в грунтах, подверженных динамическим воздействиям от внешних источников уже в процессе возведения сооружения, допускается прикладывать расчетные динамические напряжения одновременно с вертикальным кинематическим или статическим нагружением в соответствии с ГОСТ 12248.3 после завершения консолидации образца при природном давлении.

6.4.3.3 При расчете амплитуды динамических напряжений и длительности испытания следует учитывать преобладающую частоту воздействия. При оценке сейсмической разжижаемости грунтов для обеспечения надежности измерения порового давления в ходе опыта рекомендуется использовать частоту динамического нагружения не более 0,5 Гц. При испытании на виброползучесть частота нагружения должна быть выше 0,01 Гц. Во всех случаях частоты нагружения ниже 0,01 Гц ввиду возможности проявления реологических и тиксотропных эффектов применять без обоснования не допускается.

Примечание — Надежность измерения порового давления снижается с ростом частоты нагружения.

6.4.3.4 Число циклов нагружения при оценке сейсмической разжижаемости следует определять в соответствии с магнитудой ожидаемого землетрясения (приложение Г). Число циклов нагружения при испытании на виброползучесть должно составлять не менее 500.

6.4.3.5 Динамическое нагружение в зависимости от задачи испытания ведут либо до разрушения (видимое разрушение образца или достижение осевой деформации более 10 %), либо до достижения заданной программой эксперимента осевой деформации образца или определенного числа циклов воздействия (см. приложение Г). Главные напряжения, поровое давление и осевая деформация должны регистрироваться автоматически не менее 20 раз за один цикл нагружения. При испытании песков на разжижаемость критерием остановки опыта служит достижение 100 %-ного *PPR* либо завершение расчетного числа циклов воздействия.

6.4.3.6 При необходимости оценки осадки поверхности массива в результате разжижения грунта соответствующее испытание перед разгрузкой завершается реконсолидацией. В этом случае по окончании циклического воздействия к образцу для обеспечения равномерного дренирования через канал(ы) дренирования прикладывают противодавление, эквивалентное возникшему при динамическом нагружении поровому давлению. Отток воды следует осуществлять при открытом дренаже по мере плавного снижения противодавления. Необходимо зафиксировать изменение объема грунта при реконсолидации по объему отжатой жидкости.

6.4.3.7 По окончании испытания образец грунта разгружают, сбрасывают давление в камере и сливают рабочую жидкость.

6.4.3.8 Образец грунта извлекают из камеры и отбирают из него пробы для контрольного определения влажности. Все результаты испытания заносят в протокол (см. приложение Б).

6.5 Проведение неконсолидированно-недренированного динамического испытания

Испытание проводят при постоянно закрытом дренаже в соответствии с 6.4.1 и 6.4.3, минуя стадию предварительной консолидации.

6.6 Обработка результатов испытаний

6.6.1 Для обработки результатов используют файлы данных, созданные программой испытаний. Расчет напряжений и деформаций следует проводить в соответствии с положениями ГОСТ 12248.3 в части обработки результатов трехосного сжатия, при этом соответствующие операции могут также проводиться системой в автоматическом режиме при формировании файлов данных.

6.6.2 Обработка данных заключается в расчете для всех этапов динамического нагружения значений σ'_1, σ'_3, *PPR* и осевой деформации образца ε в зависимости от времени или числа циклов нагружения *N*. Следует также выполнить расчет средних эффективных напряжений p' и максимальных касательных напряжений q по следующим формулам:

$$p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3, \tag{6.4}$$

$$q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2. \tag{6.5}$$

6.6.3 При определении сейсмической разжижаемости грунтов (прямая задача) по вычисленным значениям строят зависимости $\varepsilon = f(N)$, $PPR = f(N)$ или траектории эффективных напряжений $q = f(p')$ (приложение Д). Факт разжижения фиксируют по достижении величиной *PPR* значения 1,00 либо по прохождении траектории эффективных напряжений через начало координат ($p' = 0$; $q = 0$), либо по достижении 5 %-ной осевой деформации (см. приложение Д) при $PPR \geq 0{,}95$ в зависимости от того, что наступит раньше. Для определения критической для возникновения разжижения при данных условиях величины τ_d/σ' или *PGA* (обратная задача) необходимо провести серию опытов с разными амплитудами, но одинаковым числом циклов воздействия в каждом испытании. В соответствии с СП 22.13330.2016 (пункт 6.13.2) грунты, способные к разжижению при сейсмических воздействиях, не допускается использовать в качестве оснований сейсмостойких сооружений без проведения предварительных мероприятий по их стабилизации.

6.6.4 При определении критического при заданных условиях значения τ_d (или τ_d/σ') проводят серию испытаний (не менее шести) с разными амплитудами, по результатам которых строят зависимости $\varepsilon = f(N)$, $PPR = f(N)$ (см. приложение Д). Последующий анализ заключается в определении способом интерполяции минимального значения τ_d, достаточного для достижения критической деформации грунта.

6.6.5 При определении деформации виброползучести ε_d по результатам испытания строят зависимость осевых деформаций от времени нагружения $\varepsilon = f(\ln t)$ (см. приложение Д). На график выносят значения максимальных осевых деформаций не менее чем для каждого десятого цикла нагружения. Полученную выборку значений деформации затем анализируют на предмет определения функции вида $\varepsilon_d = a \cdot \ln(t) + b$ (где a и b — эмпирические параметры), наилучшим образом описывающей полученный тренд, по которой может быть рассчитано прогнозное значение дополнительной относительной деформации виброползучести для слоя грунта известной мощности при заданном периоде эксплуатации сооружения. При убедительном обосновании допускается использование других аппроксимирующих функций. Полученное значение относительной деформации виброползучести следует использовать для расчета длительных осадок основания от совместного действия статических и динамических нагрузок в соответствии с СП 22.13330.2016 (пункт 6.14.4). Это значение следует также использовать для расчета уменьшенного значения модуля деформации грунта с учетом проявления виброползучести.

6.6.6 Уменьшенное значение модуля деформации E_{red} следует определять по формуле

$$E_{red} = E / (1 + (E\varepsilon_d / \beta\sigma_z)), \tag{6.6}$$

где E — модуль деформации, МПа, определяемый в соответствии с ГОСТ 12248.3;

$\beta = 0{,}8$ — безразмерный коэффициент в соответствии с СП 22.13330.2016 [формула (5.16)];

σ_z — статическое вертикальное напряжение.

Величину ε_d определяют при испытании в опыте в условиях действия статического вертикального напряжения σ_z, соответствующего глубине, для которой прогнозируется длительная деформация от совместного действия статических и динамических нагрузок.

При проведении испытаний по 6.4.3.2 уменьшенное значение модуля деформации грунта следует определять как указано в приложении Д.

6.6.7 Динамический модуль деформации определяют как указано в приложении Д, на основе зависимости σ'_1 от относительной осевой деформации ε, с которой снимаются соответствующие приращения напряжений и деформаций для расчета E_d и/или E^y_d. Если программой работ не задано иное, значение E_d следует рассчитывать в диапазоне относительных осевых деформаций от 0 до 10^{-5} или в заданном числе циклов воздействия.

6.6.8 В случае зафиксированного факта разжижения песчаного грунта следует провести расчет последующей осадки поверхности массива (приложение Е) и оценить возможность латерального растекания грунтов при разжижении (приложение Ж).

6.6.9 Для количественной характеристики динамической устойчивости грунтов по результатам динамических трехосных испытаний также могут быть использованы энергетические критерии. Удельную рассеянную энергию ΔW, кДж/м^3, рассчитывают на момент достижения определенной осевой деформации грунта в условиях динамического трехосного сжатия по формуле

$$\Delta W = \sum_{i=1}^{n-1} 0{,}5\,(\sigma_{i+1} + \sigma_i)\,(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i), \tag{6.7}$$

где σ — приращение девиатора напряжений $(\sigma'_1 - \sigma'_3) = (\sigma_1 - \sigma_3)$ относительно его начального уровня;

ε — относительная осевая деформация;

n — число зарегистрированных i-х значений.

При оценке удельной рассеянной энергии ΔW на уровне 5 %-ной осевой деформации степень устойчивости грунта может быть определена в соответствии с приложением И.

7 Метод малоамплитудных динамических испытаний в резонансной колонке

7.1 Сущность метода

7.1.1 Испытание песчаных, глинистых, органоминеральных и органических грунтов методом малоамплитудных динамических испытаний в резонансной колонке проводят для определения V_S, G и D грунта в диапазоне деформаций сдвига порядка 10^{-6}—10^{-4}, а также для изучения изменения этих показателей в диапазоне малых сдвиговых деформаций (не более 0,001) в целях расчета колебаний сооружений и сейсмического микрорайонирования территории.

7.1.2 Эти характеристики определяют по результатам испытаний образцов грунта в резонансных колонках — камерах трехосного сжатия, дающих возможность бокового расширения образца грунта в условиях трехосного осесимметричного статического нагружения при $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ с одновременным возбуждением в образце малоамплитудных крутильных колебаний заданного диапазона частот. Метод основан на теории распространения колебательного движения в упругом стержне, нижний торец которого закреплен и деформации сдвига на котором равны нулю.

7.1.3 Подготовленные образцы (нарушенного или ненарушенного сложения) в форме цилиндра (сплошного или трубчатого) помещают в камеру трехосного сжатия и после предварительной изотропной или анизотропной консолидации с заданным соотношением главных напряжений в массиве подвергают действию динамической нагрузки путем приложения крутильных колебаний переменной частоты к верхнему (свободному) торцу образца. В процессе колебаний грунт испытывает деформацию простого сдвига. Амплитуду деформации сдвига определяют на каждой частоте заданного диапазона, что позволяет получить амплитудный спектр реакции грунта и определить резонансную частоту образца. По первой собственной частоте образца рассчитывают V_S, а затем G.

7.1.4 Величину D грунта определяют по затуханию свободных колебаний либо по ширине резонансной кривой вблизи резонанса при вынужденных колебаниях, при этом поглощение полагают классическим по своей природе. В ходе опыта амплитуда динамической нагрузки постепенно увеличивается, что позволяет определить снижение G и рост D с увеличением достигаемой амплитуды сдвиговых деформаций.

7.1.5 Динамические испытания дисперсных грунтов методом резонансной колонки следует проводить только по консолидированно-недренированной схеме, поскольку любое изменение формы или массы образца в процессе испытания изменяет его момент инерции и искажает итоговый результат.

7.1.6 Для испытаний используют образцы грунта ненарушенного сложения с природной влажностью или образцы нарушенного сложения с заданными значениями плотности и влажности. Образцы должны иметь форму цилиндра или трубки внешним диаметром не менее 50 мм и отношением высоты к диаметру от 2:1 до 2,5:1. При использовании трубчатых образцов толщина их стенки должна составлять не менее 5 мм.

7.2 Оборудование и приборы

7.2.1 Общие требования к составу, конструкции, измерительным устройствам и тарировке установок для испытания грунтов с камерами трехосного сжатия — по ГОСТ 12248.3—2020 (раздел 6). В качестве сжимающей среды в камере допускается использовать воздух, воду или иную неагрессивную к компонентам установки гидравлическую среду совместно с воздухом в верхней части в связи с присутствием внутри камеры силового привода динамического нагружения.

7.2.2 Резонансные колонки должны иметь электромагнитную или электромеханическую систему создания крутильных колебаний, привод которой находится внутри камеры трехосного сжатия, а также устройства для измерения малых угловых перемещений (поворотов) образца, в качестве которых допускается применять, например, оптоволоконные датчики или акселерометры. Система динамического нагружения установки должна обеспечивать создание и контроль заданной τ_d и частоты динамических напряжений в течение всего опыта. Система нагружения должна обеспечивать возбуждение крутильных колебаний в диапазоне от 0 до 200 Гц. Схема камеры трехосного сжатия приведена в приложении В, а принципиальная схема динамического нагружения образца при испытаниях в резонансной колонке — в приложении К.

7.2.3 Учитывая быстротечность всех процессов при динамическом нагружении грунта, резонансная колонка должна иметь в своем составе автоматическую систему регистрации данных и управления экспериментом на базе персонального компьютера или сервера.

7.3 Подготовка к испытанию

Подготовку образцов к испытанию проводят в соответствии с 6.3. При изготовлении трубчатых образцов несвязных грунтов требуется двойная форма, позволяющая вести укладку грунта в зазор между двумя растянутыми по ее поверхностям под вакуумом мембранами.

7.4 Проведение испытания

7.4.1 Водонасыщение и предварительную консолидацию образца проводят в соответствии с 6.4.1, 6.4.2.

7.4.2 Проведение динамического испытания

7.4.2.1 После завершения консолидации перекрывают дренаж и проводят испытания образца грунта с заданными параметрами динамической нагрузки, которые не связаны с ожидаемыми динамическими воздействиями на грунтовое основание и создаются для определения характеристик грунтов как среды распространения колебаний. Значение τ_d задается значением момента вращения, прикладываемого к верхнему (свободному) торцу образца. Для каждого опыта момент вращения подбирают исходя из особенностей динамической реакции и жесткости испытуемого образца. Диапазон частот колебаний, в которых ожидается резонанс, и шаг изменения частоты в ходе опыта задают подбором исходя из ожидаемой реакции грунта, и корректируют в последующих испытаниях. В ходе опыта измеряют максимальные значения угловых смещений (поворотов) на каждом шаге изменения частоты колебаний.

7.4.2.2 Начальный момент вращения следует выбирать таким образом, чтобы возникающие сдвиговые деформации были как можно меньше, но при этом позволяли уверенно зафиксировать резонансную частоту. Следует учитывать, что значение начального момента вращения зависит также от значения сжимающих напряжений. Если не задано иначе программой эксперимента, диапазон изменения частоты следует принять от 20 до 200 Гц. В последующих опытах диапазон изменения частоты может быть сужен до 20—30 Гц в каждую сторону от резонансной частоты. Шаг изменения частоты колебаний в опыте следует задавать не более 2 Гц. На каждой частоте выбранного диапазона проводят по 5—10 циклов колебаний для получения устойчивой реакции грунта. В рамках одного испытания проводят несколько последовательных этапов нагружения с постепенным увеличением момента вращения от этапа к этапу испытания в соответствии с программой испытания. Если программой не предусмотрено иное, проводят 7—10 этапов нагружения с последовательным увеличением момента вращения до достижения максимальной сдвиговой деформации, которая не должна превышать 0,001.

7.4.2.3 После завершения вынужденных колебаний на каждом шаге нагружения фиксируют затухание свободных колебаний образца, изменение амплитуды которых позволяет в последующем рассчитать коэффициент поглощения.

Примечание — При использовании современных автоматизированных систем управление всей процедурой испытаний проводят из меню управляющей программы, входящей в комплект поставки лабораторного оборудования.

7.4.2.4 По окончании испытания образец грунта разгружают, сбрасывают давление в камере и сливают рабочую жидкость (при ее наличии).

7.4.2.5 Образец грунта извлекают из камеры, отбирают из него пробы для контрольного определения влажности, а для образцов связных грунтов проводят также контрольные измерения размеров и взвешивание. Все результаты испытания заносят в протокол (см. приложение Б).

7.5 Обработка результатов испытаний

7.5.1 Для обработки результатов используют файлы данных, созданные программой испытаний. Расчет напряжений и деформаций следует проводить в соответствии с положениями ГОСТ 12248.3 в части обработки результатов трехосного сжатия, при этом соответствующие операции могут также проводиться системой в автоматическом режиме при формировании файлов данных.

7.5.2 Обработка данных заключается в расчете для всех шагов динамического нагружения значений относительной деформации сдвига γ, определении ее максимальной величины γ_{max} при резонансной частоте ω и расчете для этой частоты скорости поперечных волн V_S с последующим определением динамического модуля сдвига G и коэффициента поглощения D.

7.5.3 Значения γ рассчитывают по измеренным угловым смещениям как тангенс угла перекоса Θ в точке, удаленной от центра образца на 0,707 радиуса r для сплошных образцов, и для среднего сечения для трубчатых образцов (см. приложение К) на каждом шаге изменения частоты возбуждения.

Примечание — 0,707 радиуса r представляет собой поправочный коэффициент, учитывающий неравномерное напряженное состояние сплошного образца от центра к периферии. При соответствующем обосновании допускается использовать другой поправочный коэффициент. Его значение не влияет на рассчитываемые G и D, но изменяет сдвиговую деформацию, для которой измерены их значения.

По результатам расчета строят резонансную кривую (приложение Л), с которой снимают значение резонансной частоты колебаний ω при $\gamma = \gamma_{max}$.

7.5.4 Значение скорости поперечных волн V_S вычисляют по формуле

$$V_S \approx \omega h \cdot (I/I_0)^{-1/2}, \quad (7.1)$$

где h — высота образца;

I — момент инерции образца (рассчитывается по массе и геометрическим размерам образца в соответствии с известными физическими соотношениями на момент окончания консолидации):
$I = ½\ mr^2$ для сплошного цилиндрического образца массой m и радиусом r;
$I = ½\ m\ (r_0^2 - r_i^2)$ для трубчатого образца с внутренним радиусом r_i и внешним r_0;

I_0 — момент инерции силового привода установки (указывается изготовителем в технической документации на прибор).

Определив по формуле (7.1) значение V_S, рассчитывают динамический модуль сдвига по формуле

$$G = \rho V_S^2, \quad (7.2)$$

где ρ — плотность грунта.

Примечание — Если использующееся для испытаний оборудование позволяет создавать также и осевые динамические нагрузки, то на одном образце грунта возможно последовательно определить и динамический модуль сдвига G, и динамический модуль упругости (см. приложение Д), что позволяет получить упругие коэффициенты равномерного и неравномерного сжатия и равномерного и неравномерного сдвига для расчета колебаний фундаментов машин с динамическими нагрузками по СП 26.13330.2016 (пункты 6.1.2, 6.1.3).

7.5.5 По результатам наблюдений за затуханием свободных колебаний во времени строят график изменения во времени сдвиговых деформаций (см. приложение Л), по пиковым значениям которых строят линейную зависимость

$$\gamma_{max}(t) = \gamma_0 - \delta \ln t, \quad (7.3)$$

где γ_0 — пиковое значение относительной деформации сдвига в первом цикле;

δ — логарифмический декремент затухания.

Коэффициент поглощения D рассчитывают по формуле

$$D = \sqrt{\delta^2/(4\pi^2 + \delta^2)}. \quad (7.4)$$

7.5.6 Дальнейший анализ представляет собой построение и изучение зависимостей динамического модуля сдвига и коэффициента поглощения от уровня возникающих деформаций сдвига (см. приложение Л).

Примечание — Указанные в 7.5.3—7.5.6 расчеты могут проводиться программным обеспечением системы в автоматическом режиме при формировании файлов данных.

8 Метод крутильного сдвига

8.1 Сущность метода

8.1.1 Испытания песчаных, глинистых, органоминеральных и органических грунтов методом крутильного сдвига проводят для оценки снижения G и роста D с увеличением деформации сдвига в диапазоне 0,1 % — 1,0 %.

8.1.2 Характеристики G и D определяют по результатам испытаний образцов грунта в приборах крутильного сдвига или резонансных колонках, имеющих техническую возможность создания значительных вращательных усилий и измерения соответствующих деформаций. Принцип испытаний в целом аналогичен испытанию методом резонансной колонки, однако образец подвергается крутильным колебаниям с постоянной частотой и возрастающим усилием.

8.1.3 Динамические испытания дисперсных грунтов методом крутильного сдвига проводят по консолидированно-недренированной схеме.

8.1.4 Для испытаний используют образцы грунта ненарушенного сложения с природной влажностью или образцы нарушенного сложения с заданными значениями плотности и влажности. Образцы должны иметь форму цилиндра или трубки внешним диаметром не менее 50 мм и отношением высоты к диаметру от 2:1 до 2,5:1. При использовании трубчатых образцов толщина их стенки должна составлять не менее 5 мм.

8.2 Оборудование и приборы

Общие технические требования к приборам крутильного сдвига соответствуют 7.2. Кроме того, испытательная установка должна обладать возможностью измерения относительных сдвиговых деформаций образца до 1 % и возможностью возбуждения крутильных колебаний низких (менее 1 Гц) частот.

8.3 Подготовка и проведение испытаний

8.3.1 Испытания по методу крутильного сдвига допускается проводить как самостоятельно, так и по завершении испытаний на резонансной колонке при малых деформациях сдвига на тех же образцах при условии сохранения ненарушенного сложения грунтов. В первом случае подготовку к проведению испытаний проводят в соответствии с 6.4.1 и 6.4.2. Во втором случае никакой дополнительной подготовки не требуется, и эксперименты проводят без перестановки образца, если используемое программное обеспечение позволяет переходить от одного вида испытаний к другому.

8.3.2 При закрытом дренаже задают амплитуду и частоту крутильных колебаний. Значение τ_d задают значением момента вращения, прикладываемого к верхнему (свободному) торцу образца. Частота приложения нагрузки постоянна и определяется задачами испытаний. Значение τ_d увеличивают ступенями каждые два-три цикла для повышения надежности расчета G. В ходе опыта несколько раз за цикл измеряют касательные напряжения и угловые смещения (повороты) образца на каждом шаге изменения частоты колебаний. Образец при этом испытывает деформацию простого сдвига.

8.3.3 По окончании испытания проводят операции в соответствии с 7.4.2.4, 7.4.2.5.

8.4 Обработка результатов испытаний

8.4.1 Для обработки результатов испытаний используют файлы данных, созданные программой испытаний. Расчеты напряжений и деформаций могут также проводиться системой в автоматическом режиме при формировании файлов данных.

8.4.2 Обработка данных заключается в расчете для всех циклов динамического нагружения значений γ и касательных напряжений с последующим определением G и D.

8.4.3 Значения γ рассчитывают в соответствии с 7.5.3. По результатам расчета строят серию петель гистерезиса для каждого цикла (приложение М).

8.4.4 Величину G рассчитывают по среднему наклону осевой (т. н. «скелетной») линии петли гистерезиса по изменению деформации сдвига $\Delta\gamma$ при соответствующем приращении касательных напряжений $\Delta\tau$:

$$G = \Delta\tau/\Delta\gamma. \quad (8.1)$$

8.4.5 Величину D рассчитывают также по петле гистерезиса из соотношения общего количества рассеянной грунтом за один цикл энергии воздействия ΔW и энергии упругих деформаций W (см. приложение М):

$$D = \Delta W/4\pi W. \quad (8.2)$$

9 Метод динамического простого сдвига

9.1 Сущность метода

9.1.1 Испытания песчаных, глинистых, органоминеральных и органических грунтов методом динамического простого сдвига проводят для определения:

а) возможности потери прочности грунтов в условиях динамических нагрузок (при любой степени водонасыщения) — количественной характеристикой является критическая (разрушающая) при заданных условиях величина τ_d или ее приведенная величина τ_d/σ_v;

б) дополнительных деформаций дисперсных грунтов в условиях наложения динамических нагрузок (виброползучести) (при любой степени водонасыщения), в т. ч. возможности накопления критической для данного сооружения деформации грунтов основания в условиях динамического воздействия, — количественной характеристикой является величина ε_d для заданного периода эксплуатации сооружения;

в) возможности динамического разжижения водонасыщенного грунта — количественными характеристиками являются величина $PPR = \Delta s_v/\Delta\sigma_{vc}$, γ_{max}, критическая для разжижения при заданных условиях величина PGA либо N_L при ожидаемой амплитуде динамических напряжений.

9.1.2 Подготовленные образцы цилиндрической формы (нарушенного или ненарушенного сложения) после одномерной консолидации при заданном вертикальном напряжении и невозможности бокового расширения подвергаются действию горизонтальной динамической нагрузки, вызывающей скашивание образца — изменение положения его верхней части относительно нижней (режим простой деформации).

9.1.3 В условиях простого сдвига допускается проводить как дренированные, так и недренированные сдвиговые испытания. Недренированные испытания проводят в условиях постоянного объема образца при открытых в атмосферу дренажах.

9.1.4 Образец в приборе жестко зафиксирован по горизонтали, чтобы исключить латеральные деформации при консолидации и постоянную площадь поперечного сечения в ходе всего опыта. Это обеспечивается резиновыми мембранами, армированными тонкой стальной нитью, или стопкой тонких колец, поддерживающих гибкую мембрану снаружи. Если используется армированная резиновая мембрана, то в отчете об испытаниях должны быть указаны ее диаметр, допустимый изгиб и предельное напряжение сдвига, а также максимально допустимое вертикальное напряжение при уплотнении грунта.

9.1.5 Есть два основных варианта динамических испытаний при простом сдвиге:

а) с контролем напряжений;

б) с контролем деформаций.

Допускается использовать оба варианта испытаний.

9.1.6 Для испытаний используют образцы грунта ненарушенного сложения с природной влажностью или искусственно сформированные образцы нарушенного сложения с заданными значениями плотности и влажности. Образцы должны иметь форму цилиндра. Минимальный диаметр образца дол-

жен составлять 45 мм, минимальная высота — 12 мм, а отношение высоты к диаметру не должно превышать 0,4. Торцы образца должны быть плоскими и строго перпендикулярными его вертикальной оси.

9.2 Оборудование и приборы

9.2.1 В состав установки для испытания грунтов методом динамического простого сдвига должны входить:

- обойма для размещения и крепления образца, включающая верхнюю и нижнюю платформы с закрепленными на них жесткими фильтровальными дисками, стопку тонких металлических колец, фиксирующих снаружи гибкую мембрану, в которой размещается образец грунта, либо гибкую мембрану, армированную тонкой стальной проволокой;
- система вертикального статического нагружения;
- система горизонтального статического и динамического нагружения;
- силоизмерительные устройства;
- устройства для измерения вертикальных и горизонтальных перемещений;
- вспомогательные устройства (бюреты) для водонасыщения образца и сбора отжимающейся при консолидации влаги;
- система пассивного (механического) или активного [на основе пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД-регулятора)] контроля постоянной высоты образца;
- система регистрации данных.

Структурная схема такого прибора приведена в приложении Н.

9.2.2 Конструкция прибора должна обеспечивать невозможность бокового расширения образца и возможность дренирования из него влаги.

9.2.3 Погрешности измерений (усилий, давлений, перемещений) для всех измерительных устройств принимают в соответствии с требованиями ГОСТ 30416.

9.2.4 Воздействия на образец (усилия, давления, перемещения) должны передаваться с точностью не менее 5 % требуемого значения воздействия.

9.2.5 Система вертикального нагружения должна быть способна прикладывать необходимую вертикальную нагрузку при уплотнении, а также контролировать ее в ходе сдвига при постоянном объеме, когда невозможно жесткое пассивное ограничение изменения высоты образца. Внутреннее трение в системе приложения нагрузки не должно превышать 1,5 Н либо трение в системе приложения нагрузки с обратной связью должно быть компенсировано за счет расположения датчика усилия непосредственно перед штампом образца. В ходе испытаний на сдвиг при постоянном объеме высота образца должна поддерживаться постоянной с точностью ± 0,05 % его начальной высоты после консолидации. Для устройств с пассивным (механическим) контролем постоянной высоты образца описание и документация этого оборудования должны быть приведены в отчете об испытаниях.

9.2.6 Система горизонтального динамического нагружения должна быть способна прикладывать к образцу линейно нарастающее смещение или силу с переменной скоростью. Фактическая скорость не должна отклоняться от требуемого значения более чем на ± 10 %. Внутреннее трение в системе приложения нагрузки не должно превышать 1,5 Н, либо трение в системе приложения нагрузки с обратной связью должно быть компенсировано за счет расположения датчика усилия непосредственно перед штампом образца.

9.2.7 Система нагружения должна иметь возможность создавать напряжения с частотами 0,01—0,5 Гц. Оборудование должно поддерживать постоянную форму волны нагружения, амплитуду и частоту напряжений в ходе испытаний. Грунты следует испытывать при синусоидальной знакопеременной сдвиговой нагрузке, если иное не указано в программе испытаний. Система нагружения для динамических испытаний должна иметь техническое описание с указанием типа системы нагружения, производительности (по нагрузке, смещению, частоте), точности, а также условий соединения штока с поршнем.

9.2.8 Испытательная установка должна иметь в своем составе автоматическую систему регистрации данных и управления экспериментом на базе персонального компьютера или сервера с учетом быстротечности всех процессов при динамическом нагружении грунта. Эта система должна иметь техническую возможность регистрации деформаций образца, горизонтального и осевого усилий не менее 50 раз за каждый цикл динамического нагружения при выбранной частоте воздействия. К числу контролируемых параметров относятся:

- горизонтальная сила;

- горизонтальное смещение (динамическое и постоянное);
- изменение вертикальной нагрузки (для испытаний при постоянном объеме);
- изменение высоты в ходе уплотнения образца и в ходе сдвига (для дренированных испытаний).

9.2.9 Фильтровальные диски должны иметь плоскую и гладкую поверхность. Если существует вероятность проскальзывания между образцом и фильтровальным диском, поверхность последнего должна быть модифицирована, чтобы избежать этого, например, с помощью коротких (1,5 мм) тонких штырей, прикрепленных к фильтровальным дискам. Сжимаемость фильтровальных дисков должна быть несущественной по сравнению со сжимаемостью образца. Допускается применение фильтровальных дисков с коэффициентом фильтрации 5—10 м/с. Диски должны периодически очищаться от тонких частиц в ультразвуковой ванне или кипячением в воде. Проницаемость дисков должна регулярно контролироваться.

9.3 Подготовка к испытанию

9.3.1 Подготовку образца к испытанию проводят в соответствии с требованиями ГОСТ 30416. Измеряют высоту и диаметр образцов связных грунтов ненарушенного или нарушенного сложения и взвешивают, после чего осторожно перемещают из режущего кольца внутрь гибкой оболочки, края которой растянуты на стопке колец прибора или специальном шаблоне.

9.3.2 Торцы образца или непосредственно фильтровальные диски покрывают влажными бумажными фильтрами. Сверху устанавливают второй пористый диск и верхний штамп. Закрепляют оболочку на боковых поверхностях штампов резиновыми или металлическими уплотнителями.

Примечания

1 Могут быть использованы конструкции приборов, в которых пористые диски вмонтированы в платформы.

2 Бумажные фильтры могут не применяться для увеличения трения образца по поверхности диска либо для дисков с модифицированной поверхностью.

3 Перед проведением испытаний резиновую оболочку замачивают на 24 ч.

9.3.3 Фильтровальные диски могут быть сухими, влажными или предварительно водонасыщенными; используемый метод подготовки следует приводить в описании методики испытаний. Выбранный метод подготовки фильтров зависит от особенностей возможного взаимодействия образца с водой. Сухие фильтры допускается применять для всех грунтов. Влажные фильтры могут быть использованы для неполностью водонасыщенных грунтов, влажные или водонасыщенные фильтры — для испытаний водонасыщенных ненабухающих образцов. Влажный фильтровальный диск подготавливают путем удаления избытка воды помещением его на бумажное полотенце на несколько минут с последующей установкой на сухую платформу прибора. Водонасыщенные фильтры готовят путем установки водонасыщенного диска на платформу прибора в заполненной водой камере или при открытой дренажной линии и последующего удаления избытка воды бумажным полотенцем.

9.3.4 При использовании сухих фильтров вода (предпочтительно с той же минерализацией, что и поровый раствор образца) не должна поступать к фильтру до того, как вертикальное напряжение превысит давление набухания грунта. Следует зафиксировать напряжение в момент насыщения фильтра и исключить испарение влаги из образца до насыщения.

9.3.5 Для образцов грунтов ненарушенного сложения, водонасыщенных в условиях естественного залегания, вода может быть подведена к фильтру вскоре после приложения начальной нагрузки, которая должна быть немедленно увеличена, при необходимости, для предотвращения набухания. Необходимо также предотвратить испарение из образца за счет использования емкости с водой или бюреты(т), соединенной(ых) с верхним штампом и основанием, и заполненной(ых) водой до высоты образца.

9.3.6 Подготовку водонасыщенных образцов песчаных грунтов из проб нарушенного сложения ведут непосредственно на платформе прибора способами осаждения в воде, влажным трамбованием или сухой послойной отсыпки воздушно-сухого песка с последующим водонасыщением по 6.3. При этом формирование образцов влажным трамбованием следует проводить в один слой — сразу на полную высоту образца из предварительно рассчитанной навески.

9.3.7 Образцы во всех случаях формируют непосредственно на платформе прибора простого сдвига внутри армированной или окруженной стопкой тонких металлических колец и растянутой на ней гибкой мембраны. Массу уложенного грунта контролируют с точностью до 0,01 г. Более плотного сложения песка достигают периодическим трамбованием. Штамп, используемый для трамбования укладываемой смеси, должен иметь гладкий плоский торец и диаметр не более половины диаметра образца.

9.3.8 Диаметр готового образца может быть принят равным диаметру штампа, а высоту измеряют с точностью до 0,01 мм. Допускается измерять высоту образца датчиком вертикальных перемещений прибора при касании образца штампом.

9.3.9 Водонасыщение песчаных образцов проводят непосредственно в камере прибора. Маловлажные и сухие смеси первоначально могут быть насыщены углекислым газом снизу под давлением 10—20 кПа в течение 10 мин. Этим достигают вытеснения воздуха из пор грунта через верхнюю дренажную линию и насыщения его более плотным углекислым газом, который впоследствии растворяется в воде без защемления пузырьков газа. Заполнение образца дистиллированной и предварительно вакуумированной для ее полной дегазации водой проводят снизу с напором около 30 см до прекращения выделения газовых пузырьков с водой через верхнюю дренажную линию.

9.3.10 После сборки установки все управление испытанием и непрерывную регистрацию данных ведут с компьютера через меню управляющей программы. Начальные установки программы испытания включают в себя:

- ввод исходных данных, необходимых для выполнения испытания и вычисления напряжений и деформаций в процессе его проведения, — высота и диаметр образца, условия предварительной консолидации, частота и амплитуда нагружения;
- условия прекращения эксперимента — значение максимальной сдвиговой деформации или число циклов нагружения; иные возможные дополнительные условия остановки испытания в зависимости от использующейся программы управления;
- регистрацию исходных (условно нулевых) показаний всех датчиков.

9.4 Проведение динамического консолидированно-недренированного испытания

9.4.1 Предварительная консолидация образцов

9.4.1.1 Предварительную консолидацию грунта проводят в соответствии с требованиями ГОСТ 12248.4 при вертикальных напряжениях, соответствующих условиям природного залегания испытуемого грунта с учетом природной и дополнительной нагрузки.

9.4.2 Проведение динамического нагружения

9.4.2.1 Динамическое испытание при простом сдвиге может быть проведено с контролем напряжений или с контролем деформаций.

9.4.2.2 Недренированные испытания проводят при постоянном объеме образца и при открытых в атмосферу дренажах. Неизменность объема обеспечивается системой пассивного (механического) или активного (на основе ПИД-регулятора) контроля постоянной высоты образца. Высота образца должна поддерживаться постоянной с точностью ± 0,05 % его начальной высоты после консолидации. Возникающее при этом изменение вертикального напряжения $\Delta\sigma_v$ эквивалентно развивающемуся избыточному поровому давлению Δu (с противоположным знаком).

9.4.2.3 После завершения консолидации проводят испытания образца грунта с заданными параметрами динамической нагрузки при открытых дренажах. Расчет динамических напряжений, если они не заданы каким-либо иным способом, приведен в приложении Г.

9.4.2.4 Динамическое испытание проводят с частотой нагружения, выбираемой в зависимости от исследуемых проблем. При расчете длительности испытания следует учитывать преобладающую частоту ожидаемого воздействия. При оценке сейсмической разжижаемости грунтов для обеспечения надежности оценки порового давления в ходе опыта следует использовать частоту динамического нагружения не более 0,5 Гц. При испытании на виброползучесть частота нагружения должна быть выше 0,01 Гц. Во всех случаях частоты нагружения ниже 0,01 Гц ввиду возможности проявления реологических и тиксотропных эффектов применять без обоснования не допускается.

9.4.2.5 Число циклов нагружения при оценке сейсмической разжижаемости следует определять в соответствии с магнитудой ожидаемого землетрясения (приложение Г). Число циклов нагружения при испытании на виброползучесть должно составлять не менее 500.

9.4.2.6 Протокол динамических испытаний методом простого сдвига (см. приложение Б) должен включать в себя:

- определение критерия разрушения;
- число циклов воздействия;
- амплитуду и средний уровень динамического напряжения (для испытаний с контролем напряжений), динамической деформации при разрушении или максимальное число циклов;
- динамический и средний уровень деформации (для испытаний с контролем деформаций), максимальное число циклов до разрушения;

- приведенное поровое давление ($PPR = \Delta\sigma_v / \sigma_{vc}$);
- частоту нагружения;
- наличие предварительного сдвигового деформирования (при обоснованном включении этой стадии в программу испытаний).

9.4.2.7 Динамическое нагружение в зависимости от задачи испытания ведут либо до разрушения (достижение амплитуды сдвиговой деформации более 15 %), либо до достижения заданного программой испытаний числа циклов воздействия (см. приложение Г). Осевое, сдвиговое напряжение, осевая и сдвиговая деформация должны регистрироваться автоматически не менее 20 раз за один цикл нагружения. При испытании песков на разжижаемость критерием остановки испытания служит достижение 100 %-ного *PPR,* амплитуды сдвиговой деформации более 10 % либо завершение заданного числа циклов воздействия.

9.4.2.8 По окончании испытания образец грунта разгружают, извлекают из обоймы и отбирают из него пробы для контрольного определения влажности. Все результаты испытания заносят в протокол (см. приложение Б).

9.5 Проведение консолидированно-дренированного динамического испытания

9.5.1 Консолидированно-дренированное динамическое испытание проводят для определения параметров виброползучести при длительных динамических воздействиях умеренной интенсивности и в условиях возможности оттока влаги из грунтов основания.

9.5.2 Испытание проводят при открытом дренаже и постоянном вертикальном напряжении в соответствии с 9.4.1, 9.4.2 по завершении стадии предварительной консолидации.

9.5.3 При испытании на виброползучесть частота нагружения должна быть выше 0,01 Гц. Число циклов нагружения при испытании на виброползучесть должно составлять не менее 500.

9.5.4 Динамическое нагружение ведут до достижения заданного программой эксперимента числа циклов воздействия либо до разрушения (достижение амплитуды сдвиговой деформации более 15 %), в зависимости от того, что наступит раньше.

9.5.5 По окончании испытания образец грунта разгружают, извлекают из обоймы и отбирают из него пробы для контрольного определения влажности. Все результаты испытания заносят в протокол (см. приложение Б).

9.6 Обработка результатов испытаний

9.6.1 Для обработки результатов используют файлы данных, созданные программным обеспечением при испытании. При этом соответствующие операции могут также проводиться системой в автоматическом режиме при формировании файлов данных.

9.6.2 Обработка данных заключается в расчете для всех этапов динамического нагружения значений $\Delta\sigma_v$, τ_d, *PPR,* осевой ε и сдвиговой γ деформации образца в зависимости от времени или числа циклов нагружения *N*. Результаты динамических испытаний должны включать в себя следующие зависимости:

- изменение сдвиговой деформации во времени или в зависимости от числа циклов для испытаний с контролем напряжений;
- изменение сдвиговых напряжений во времени или в зависимости от числа циклов для испытаний с контролем деформаций;
- изменение осевой деформации во времени или в зависимости от числа циклов;
- относительное поровое давление в зависимости от времени или числа циклов для испытаний с постоянным объемом образца (недренированных).

9.6.3 По измеренным в процессе испытания значениям горизонтальной сдвигающей и нормальной вертикальной нагрузок вычисляют сдвиговые и нормальные напряжения в соответствии с ГОСТ 12248.3. Сдвиговую деформацию рассчитывают по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta l}{h}, \tag{9.1}$$

где Δl — измеренное горизонтальное смещение подвижного торца образца относительно его начального положения после консолидации;

h — высота образца после консолидации.

9.6.4 При определении сейсмической разжижаемости грунтов (прямая задача) по вычисленным значениям строят зависимости $\gamma = f(N)$ и $PPR = f(N)$ (приложение П). Факт разжижения фиксируют по достижении величиной *PPR* значения более 0,95 при условии достижения двойной амплитуды (размаха) относительной деформации сдвига более 10 % (см. приложение П).

9.6.5 Для определения критического для возникновения разжижения при данных условиях значения τ_d/σ_v или *PGA* (обратная задача) необходимо провести серию опытов (не менее шести) с разными амплитудами, по результатам которых строят зависимости $\gamma = f(N)$, $\tau_d/\sigma_v = f(N)$ (см. приложение П). За критическое значение принимается полученная интерполяцией амплитуда, обеспечивающая разжижение грунта по критерию 9.6.4 при расчетном числе эквивалентных циклов воздействия (см. приложение Г). Это значение может быть использовано для расчета потенциала разжижения по ГОСТ 25100 при заданных характеристиках ожидаемого сейсмического воздействия.

9.6.6 При определении критического при заданных условиях значения τ_d (или τ_d/σ_v) проводят серию испытаний (не менее шести) с разными амплитудами, по результатам которых строят зависимости $\gamma = f(N)$, $PPR = f(N)$ (см. приложение П). Последующий анализ заключается в определении способом интерполяции минимального значения τ_d, достаточного для разрушения грунта, которое фиксируется по достижении $\gamma = 15$ % в заданном числе циклов воздействия.

9.6.7 При определении деформации виброползучести ε_d по результатам испытания строят зависимость осевых деформаций от времени нагружения $\varepsilon = f(\ln t)$ (см. приложение П). На график выносят значения максимальных осевых деформаций не менее чем для каждого десятого цикла нагружения. Полученную выборку значений деформации затем анализируют на предмет определения функции вида $\varepsilon_d = a \cdot \ln t + b$ (где a и b — эмпирические параметры), наилучшим образом описывающей полученный тренд, по которой может быть рассчитано прогнозное значение дополнительной относительной деформации виброползучести для слоя грунта известной мощности при заданном периоде эксплуатации сооружения. Допускается обоснованное использование других аппроксимирующих функций. Полученное значение относительной деформации виброползучести следует использовать для расчета длительных осадок основания от совместного действия статических и динамических нагрузок в соответствии с СП 22.13330.2016 (пункт 6.14.4). Это значение следует также использовать для расчета уменьшенного значения модуля деформации грунта с учетом проявления виброползучести.

9.6.8 Уменьшенное значение модуля деформации E_{red} следует определять по формуле (6.5). Величину ε_d определяют при испытании в опыте в условиях действия статического вертикального напряжения $\sigma_v = \sigma_z$, соответствующего глубине, для которой прогнозируется длительная деформация от совместного действия статических и динамических нагрузок.

9.6.9 В случае зафиксированного факта разжижения песчаного грунта следует провести расчет последующей осадки поверхности массива (см. приложение Е) и оценить возможность латерального растекания грунтов при разжижении (см. приложение Ж).

Приложение А
(справочное)

Классификация дисперсных грунтов в целях изучения их динамических свойств

Таблица А.1 — Классификация дисперсных грунтов по механизму динамической неустойчивости

Подклассы и виды грунтов	Подвиды грунтов	Группы грунтов по составу	Подгруппы грунтов по механизму динамической неустойчивости	Разновидности грунтов по особенностям проявления динамической неустойчивости
Несвязные	Крупнообломочные	Менее 30 % заполнителя	Дилатантные	Способные к динамическому уплотнению и разуплотнению
	Песчаные	Гравелистые и крупные		
		Средней крупности		Уплотняющиеся
		Мелкие	Дилатантно-тиксотропные	С преобладанием уплотнения
		Пылеватые		С преобладанием тиксотропных эффектов
Связные минеральные и органо-минеральные	Пылеватые	Преобладают пылеватые, глинистых менее 5 %	Квазитиксотропные	Частично восстанавливающиеся
	Глинистые	Глинистых ≥ 5 %		Упрочняющиеся

Таблица А.2 — Классификация[1)] водонасыщенных песчаных грунтов по разжижаемости при сейсмических воздействиях

Параметры	Разновидности песков				
	Гравелистые	Крупные	Средней крупности	Мелкие	Пылеватые
Легко разжижаемые (плывунные)					
Содержание частиц менее 0,05 мм, %	—	—	> 10	> 10	Не регламентируется
Глубина залегания*, м	—	—	< 12	< 12	< 12
$p_Д$, МПа	—	—	< 1,5	< 1,5	< 1,5
V_S, м/с	—	—	< 215	< 200	< 200
F_L	—	—	≤ 1,15	≤ 1,15	≤ 1,15
Разжижаемые					
Содержание частиц менее 0,05 мм, %	≥ 5	≥ 5	≥ 5	≥ 5	Не регламентируется
Глубина залегания*, м	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
$p_Д$, МПа	1,5—2,7	1,5—2,7	1,5—2,7	1,5—2,7	1,5—2,7
V_S, м/с	≤ 215	≤ 215	≤ 215	≤ 215	≤ 215
F_L	≤ 1,15	≤ 1,15	≤ 1,15	≤ 1,15	≤ 1,15
Практически неразжижаемые					

[1)] Классификацию допускается выполнять по любому числу имеющихся параметров. Использование большего числа классификационных параметров повышает надежность оценки потенциальной разжижаемости грунта.

Окончание таблицы А.2

Параметры	Разновидности песков				
	Гравелистые	Крупные	Средней крупности	Мелкие	Пылеватые
Содержание частиц менее 0,05 мм, %	< 5	< 5	< 5	< 5	Не регламентируется
Глубина залегания*, м	Не регламентируется				≥ 20
$p_Д$, МПа	> 2,7	> 2,7	> 2,7	> 2,7	> 2,7
V_S, м/с	> 215	> 215	> 215	> 215	> 215
F_L	> 1,15	> 1,15	> 1,15	> 1,15	> 1,15
* От планировочной отметки.					

Приложение Б
(рекомендуемое)

Формы протоколов динамических лабораторных испытаний грунтов

Протокол испытания методом динамического трехосного сжатия

Испытание №_____ Дата, оператор_____

Проект_____ Тип грунта_____

Привязка образца (место, дата, глубина отбора)_____

Описание грунта в лаборатории _____

_____

Сведения об образце (нарушенное сложение)

Масса сухого грунта, г	Масса поддона, г	Остаток грунта + поддон, г	Остаток грунта, г
Диаметр образца, см	Высота готового образца, см	Масса сухого образца, г	Объем образца, $см^3$
Плотность скелета, $г/см^3$	Плотность частиц грунта, $г/см^3$	Коэффициент пористости	Степень плотности

Сведения об образце (ненарушенное сложение)

Диаметр образца, см	Высота готового образца, см	Масса образца, г	Объем образца, $см^3$
Плотность грунта, $г/см^3$	Плотность частиц грунта, $г/см^3$	e	Влажность грунта до опыта/после опыта
			/

Контроль параметра Скемптона B

σ_3, кПа	$\Delta\sigma_3$, кПа	Δu, кПа	$B = \Delta u/\Delta\sigma_3$

Стадия предварительного уплотнения образца (консолидация)

σ'_3, кПа	σ'_1, кПа	$K_c = \sigma'_3/\sigma'_1$
Время консолидации	Изменение объема при консолидации, $см^3$	Осевая деформация ε, %

Сведения о параметрах динамической нагрузки и результаты испытания

Число циклов нагружения	Частота нагружения, Гц	Расчетная амплитуда касательных напряжений τ_d, кПа	Амплитуда осевых напряжений, кПа
Максимальная осевая деформация ε, %	Максимальное приведенное поровое давление *PPR*	Разжижение (да/нет)	Примечание

Протокол динамических испытаний методом резонансной колонки

Испытание №_____ Проект_____

Вид грунта_____ Дата, оператор_____

Привязка образца_____

Сведения об образце Нарушенное сложение Подготовка: _____

Масса сухого грунта, г	Масса поддона, г	Остаток грунта + поддон, г	Остаток грунта, г

Диаметр образца, мм	Высота готового образца, мм	Масса сухого образца, г	Объем образца, $см^3$

Плотность скелета грунта, $г/см^3$	Плотность частиц грунта, $г/см^3$	Коэффициент пористости	Степень плотности

Ненарушенное сложение

Диаметр образца, мм	Высота образца, мм	Объем образца, $см^3$	Масса влажного образца, г	Плотность грунта, $г/см^3$

Влажность грунта до опыта/после опыта	Плотность частиц грунта, $г/см^3$	Коэффициент пористости	Степень влажности
/			

Сведения о подготовке образца

σ'_3, кПа	σ'_1, кПа	$K_c = \sigma'_3/\sigma'_1$	$B = \Delta u/\Delta\sigma_3$	Изменение объема при консолидации, $см^3$	Осевая деформация

Сведения о параметрах нагрузки и результатах испытания

№ программы испытания	Начальная высота образца, мм	Начальный диаметр образца, мм

№ обр.	Полоса частот, Гц	Крутящий момент, Н·м	ε, %	u, кПа	ω, Гц	γ_{max}, %	V_S, м/с	G, кПа	D, %

Протокол динамических испытаний методом крутильного сдвига

Испытание №_____ Проект_____

Вид грунта_____ Дата, оператор_____

Привязка образца_____

Сведения об образце Нарушенное сложение Подготовка: _____

Масса сухого грунта, г	Масса поддона, г	Остаток грунта + поддон, г	Остаток грунта, г

Диаметр образца, мм	Высота готового образца, мм	Масса сухого образца, г	Объем образца, $см^3$

Плотность скелета грунта, $г/см^3$	Плотность частиц грунта, $г/см^3$	Коэффициент пористости	Степень плотности

Ненарушенное сложение

Диаметр образца, мм	Высота образца, мм	Объем образца, $см^3$	Масса влажного образца, г	Плотность грунта, $г/см^3$

Влажность грунта до опыта/после опыта	Плотность частиц грунта, $г/см^3$	Коэффициент пористости	Степень влажности
/			

Сведения о подготовке образца

σ'_3, кПа	σ'_1, кПа	$K_c = \sigma'_3/\sigma'_1$	$B = \Delta u/\Delta\sigma_3$	Изменение объема при консолидации, $см^3$	Осевая деформация

Сведения о параметрах нагрузки и результатах испытания

№ программы испытания	Начальная высота образца, мм	Начальный диаметр образца, мм

№ испытания	Частота, Гц	Крутящий момент, Н·м	Осевая деформация ε, %	Поровое давление u, кПа	Максимальная деформация сдвига γ_{max}, %

Протокол динамических испытаний методом простого сдвига

Испытание №_____ Проект_____

Вид грунта_____ Дата, оператор_____

Привязка образца_____

Лабораторный №_____

Сведения об образце Нарушенное сложение _____

Массы навесок m_L, г			Масса влажного образца	Влажность смеси, %	Масса сухого грунта

Высота готового образца h_0, мм	Объем образца, см^3, после консолидации	Плотность скелета, г/см^3	D_R

Ненарушенное сложение

W_e	Высота образца, мм	Масса влажного образца, г	Объем образца, см^3, после консолидации	Плотность грунта, г/см^3

1 Предварительная консолидация

σ_{vc}, кПа	Ступени нагрузки	CO_2/Насыщение	Время консолидации
Осевая деформация h_c, мм	Осевая деформация при тарировке h_t	Высота образца после консолидации $H = h_0 - h_c + h_t$, мм	Критерий стабилизации

2 Предварительное циклическое деформирование_____ да _____ нет

f, Гц	
N	
τ_d, кПа	

3 Динамическое нагружение

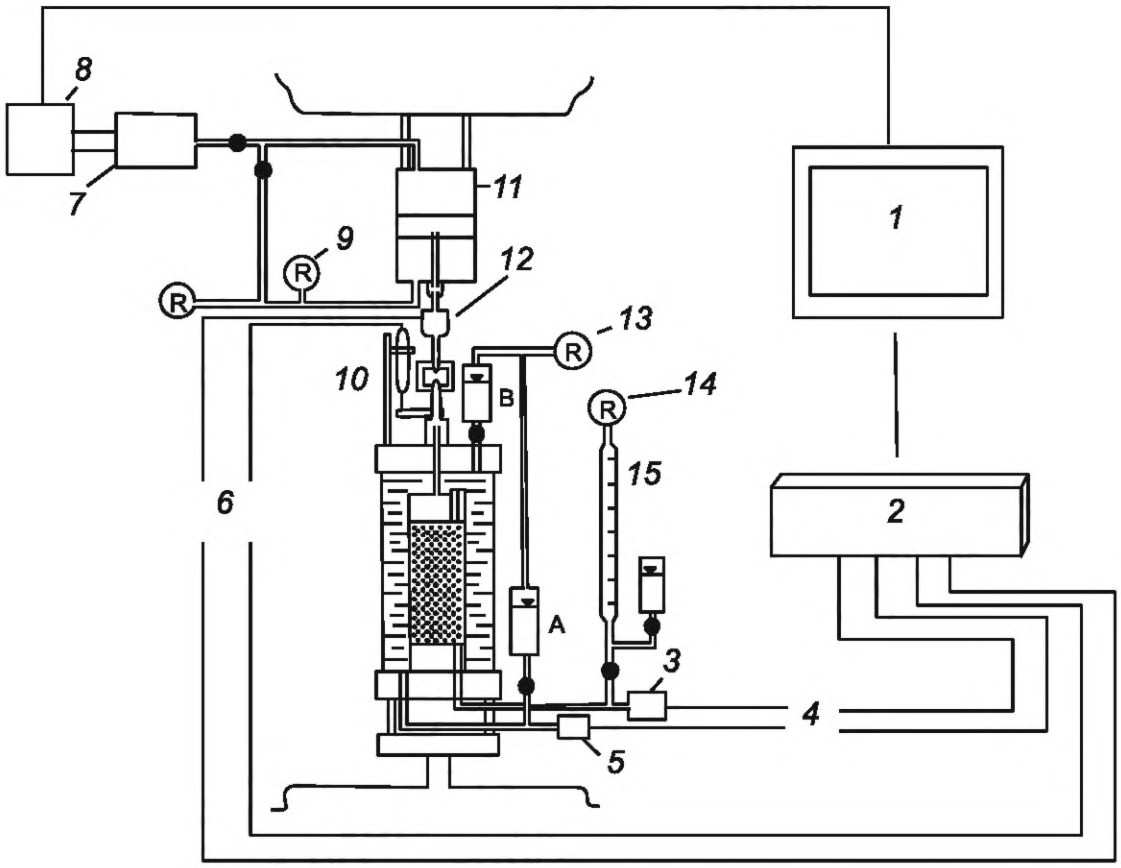
f, Гц		Тип испытания (дренированное, с постоянным объемом)	
N		Максимальная амплитуда сдвиговой деформации	
τ_d, кПа		Максимальное *PPR*	
τ_{av}, кПа		Максимальное достигнутое N	

4 Контроль влажности образца

	№ бюкса	Масса пустого бюкса	Масса бюкса с влажным грунтом	Масса бюкса с сухим грунтом	Влажность, %
До опыта					
После опыта					

Приложение В
(рекомендуемое)

Структурная схема установки для испытания грунтов методом динамического трехосного сжатия



1 — управляющий компьютер; *2* — система сбора данных; *3* — датчик порового давления; *4*, *6* — к системе регистрации; *5* — датчик давления в камере; *7* — электропневматический преобразователь; *8* — задающий генератор; *9* — регулятор противодавления; *10* — датчик осевых деформаций; *11* — пневмонагружатель двойного действия; *12* — датчик осевой нагрузки; *13* — регулятор давления в камере; *14* — регулятор обратного давления; *15* — бюрета

Примечание — Вместо бюреты может быть установлен волюмометр/контроллер противодавления.

Рисунок В.1 — Пример структурной схемы установки с пневматической системой нагружения

Приложение Г
(рекомендуемое)

Методики количественной оценки динамических нагрузок на грунты

Г.1 Методика количественной оценки сейсмических нагрузок при землетрясениях разной интенсивности

Г.1.1 При неглубоком расположении очагов землетрясений (десятки километров) сейсмическую нагрузку характеризуют величиной *CSR* в разрезе при землетрясении заданной повторяемости:

$$CSR = \tau_{av}/\sigma'_v = (0{,}65\, a_{max}\sigma_v\, r_d)/(g\sigma'_v), \quad (Г.1)$$

где τ_{av} — среднее значение ожидаемых циклических напряжений сдвига при данной магнитуде очага;

a_{max} — максимальное ожидаемое ускорение колебаний на поверхности грунта;

σ_v и σ'_v — полное и эффективное значения соответственно вертикальных нормальных напряжений на глубине z;

g — ускорение свободного падения, м/с^2;

r_d — коэффициент снижения напряжений с глубиной, который в отсутствие результатов прямых сейсмических измерений на площадке принимают равным:

$$r_d = 1{,}0 - 0{,}00765z \text{ при } z \le 9{,}15 \text{ м}; \quad (Г.2)$$

$$r_d = 1{,}174 - 0{,}0267z \text{ при } 9{,}15 \text{ м} \le z \le 23 \text{ м}. \quad (Г.3)$$

Формулы (Г.2) и (Г.3) могут быть объединены для удобства расчетов в единое аналитическое выражение для любой глубины до 23 м:

$$r_d = \frac{1 - 0{,}4113z^{0{,}5} + 0{,}04052z + 0{,}001753z^{1{,}5}}{1 - 0{,}4117z^{0{,}5} + 0{,}05729z - 0{,}006205z^{1{,}5} + 0{,}00121z^2}. \quad (Г.4)$$

При достаточном обосновании допускается использовать и другие выражения для расчета r_d.

Расчет τ_{av} основан на представлении о том, что сейсмические сдвиговые напряжения в заданной точке массива возникают в связи с распространением в нем преимущественно поперечных волн в вертикальном направлении, а столб грунта над выделенным элементарным объемом грунта на заданной глубине z колеблется как абсолютно жесткое тело. Но поскольку этот столб грунта в действительности ведет себя как деформируемое тело, то реальные сдвиговые напряжения будут меньше, причем эта разница возрастает с глубиной. В связи с этим в расчеты и вводят коэффициент снижения напряжений r_d, меньший или равный 1.

Г.1.2 Реальная история сейсмического нагружения грунта носит случайный характер, и в целях проектных расчетов обычно ее приводят к эквивалентному в силовом отношении регулярному воздействию. Показано, что среднее значение циклических сдвиговых напряжений τ_{av} для такого эквивалентного воздействия можно с удовлетворительной точностью принимать равным примерно 65 % их максимального значения. Поэтому в выражении для *CSR* появляется соответствующий множитель. Величину a_{max} принимают равной среднему геометрическому значению для горизонтальных составляющих ожидаемого толчка.

Г.1.3 Число эквивалентных циклов регулярного нагружения N в лабораторном эксперименте, моделирующем сейсмическое воздействие, зависит от длительности сотрясений, а следовательно — от магнитуды толчка. Число циклов нагружения определяют по таблице Г.1, а для других магнитуд — интерполяцией приведенных данных.

Таблица Г.1 — Число циклов нагружения

Магнитуда	5,25	6,00	6,75	7,50	8,50
N	2–3	5	10	15	26

При заданных длительности t, с, и центральной частоте f_0, Гц, ожидаемого сейсмического воздействия (например, полученных из данных о характеристиках ранее зарегистрированных толчков) число циклов нагружения может быть рассчитано по формуле

$$N = t \cdot f_0. \quad (Г.5)$$

Описанный расчет дает максимальное значение ожидаемых циклических напряжений сдвига при землетрясении τ_{av}, которое при проведении трехосных динамических испытаний соответствует половине амплитуды осевой динамической нагрузки ($\pm\sigma_d$). Все необходимые для расчета параметры заносят в таблицу по форме таблицы Г.2.

Таблица Г.2 — Результаты расчета амплитуды динамической нагрузки

Образец	Глубина отбора z, м	σ_v, кПа	Период повторяемости T, лет	a_{max}, м/с^2	Магнитуда М	r_d	τ_{av}, кПа	σ_d, кПа

Г.1.4 Динамические нагрузки при испытаниях следует задавать в соответствии с характеристиками ожидаемых сейсмических воздействий при максимальном расчетном землетрясении: магнитудой M, пиковым горизонтальным ускорением на поверхности почвы PGA, м/с^2, и длительностью ожидаемых сотрясений. Если возможности оборудования позволяют, допускается воспроизводить и преобладающий частотный диапазон воздействий. Частота воздействия при испытаниях не должна превышать 10 Гц.

Г.1.5 В случае, когда очаги возможных землетрясений расположены на значительном удалении (сотни километров), и в спектре ожидаемого сейсмического воздействия будут преобладать поверхностные волны, рекомендуется проводить ориентировочный расчет возможных напряжений в поверхностной волне исходя из условий, описанных в Г.1.6.

Г.1.6 Напряжения в волне данного типа σ, кПа, могут быть рассчитаны в соответствии с формулой

$$\sigma = \rho C V, \qquad (Г.6)$$

где ρ — плотность грунта в слое распространения волны, т/м^3;

C — скорость распространения волны, м/с;

V — скорость смещения частиц в волне данного типа, м/с.

Полученная таким образом амплитуда динамических напряжений в поверхностной волне Рэлея от возможных удаленных источников должна рассматриваться как наиболее неблагоприятная для устойчивости грунта и дающая оценку сейсмической устойчивости грунтов.

Г.2 Методика количественной оценки динамических нагрузок от промышленного оборудования и линейных сооружений

Г.2.1 Для расчета динамических нагрузок от существующих источников необходимы сведения о следующих параметрах:

- виброскоростях колебаний частиц от интересующего источника, по которым далее возможно рассчитать виброускорения или амплитуды динамических напряжений;
- либо напряжениях, возникающих в грунтах при распространении волн напряжений.

Расчет по второй группе параметров является более надежным, но и более трудоемким. Необходимая информация может быть получена только по результатам полевых сейсмических наблюдений вблизи источника вибраций, включающих в себя:

а) измерение вибраций по трем компонентам вблизи площадок размещения объектов для получения скоростей смещения частиц грунта в сейсмических волнах;

б) малоглубинные сейсмические наблюдения;

в) измерение вибраций в скважинах для определения зависимости интенсивности колебаний от глубины.

Г.2.2 Для расчета пиковых напряжений на фронте волны от рассматриваемого источника измеренные значения скоростей V, м/с, смещения частиц следует пересчитать в напряжения σ, кПа, в соответствии с формулой (Г.6).

Г.2.3 Для проектируемых фундаментов оборудования с динамическими нагрузками ожидаемые воздействия на подстилающие грунты следует рассчитывать по характеристикам ожидаемого силового воздействия, которые указываются в паспорте оборудования изготовителем. Исходными параметрами являются масса, рабочая частота и амплитуда колебаний установки, а также конструктивные характеристики фундамента (геометрия, масса, площадь, глубина заложения).

При испытаниях грунтов на виброползучесть число циклов нагружения должно быть не менее 500 для получения надежного тренда накопления деформаций во времени по результатам испытаний.

Г.3 Методика количественной оценки волновых динамических нагрузок на акваториях

Г.3.1 Методика оценки штормовых воздействий на донные грунты

Для расчета динамических напряжений в донных грунтах или грунтах обратной засыпки траншей трубопроводов в результате штормовых воздействий необходимы сведения о расчетной высоте H_w, м, и периоде T_w, с, волн заданной обеспеченности, а также расчетной длительности такого шторма t_w. Эти характеристики определяют по данным многолетних гидрометеорологических наблюдений в районе размещения объекта. Штормовое воздей-

ствие в условиях трехосного сжатия моделируется квазигармоническим динамическим нагружением с заданной амплитудой.

Амплитуду динамических напряжений, кПа, рассчитывают по формуле

$$\sigma_d = 0{,}5\rho_w \cdot H_w, \quad (Г.7)$$

где ρ_w — объемный вес морской или пресной (в зависимости от водоема) воды, кН/м^3.

Частоту нагружения, Гц, принимают в соответствии с расчетным периодом волны

$$F = 1/ T_w , \quad (Г.8)$$

а число циклов воздействия определяют по формуле

$$N = t_w / T_w. \quad (Г.9)$$

Г.3.2 Методика оценки волновых воздействий на откосные сооружения

Динамические напряжения от волн на откосные сооружения, например на грунты в составе пойменных насыпей, следует рассчитывать как волновое давление в соответствии с СП 38.13330.2018 (приложение Д). Среднюю высоту волн, частоту и длительность воздействия следует определять по данным многолетних гидрометеорологических наблюдений в районе работ, моделируя воздействие квазигармоническим динамическим нагружением с рассчитанной амплитудой волнового давления.

Приложение Д
(обязательное)

Примеры графического оформления результатов испытания грунта методом динамического трехосного сжатия

Д.1 Примеры графиков зависимости приведены на рисунках Д.1—Д.4.



Рисунок Д.1 — График зависимости осевой деформации *1* и относительного порового давления *2* от числа циклов динамического нагружения

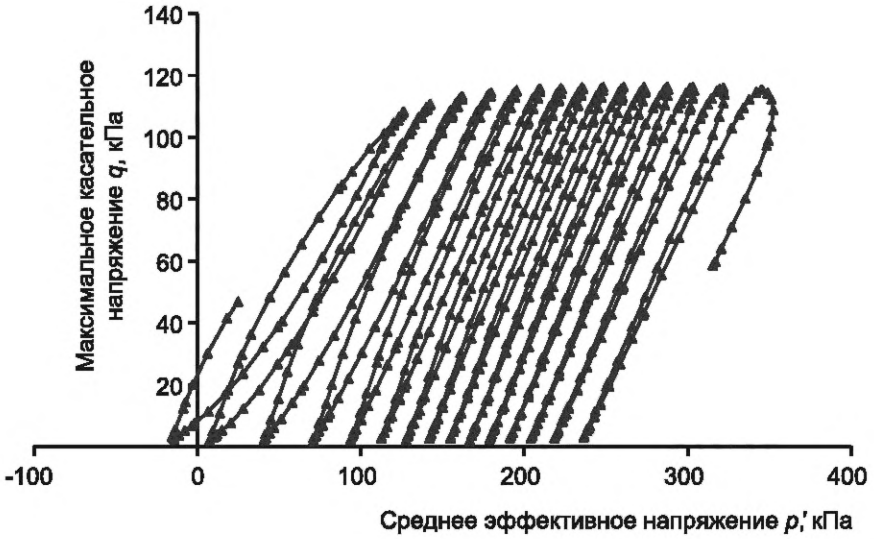


Рисунок Д.2 — График зависимости максимальных касательных напряжений q от средних эффективных p' (траектория эффективных напряжений)

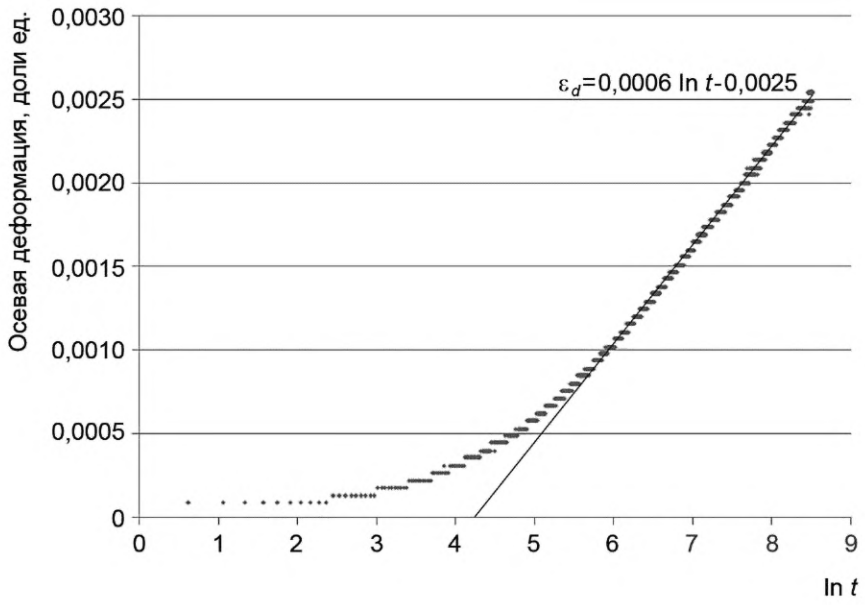
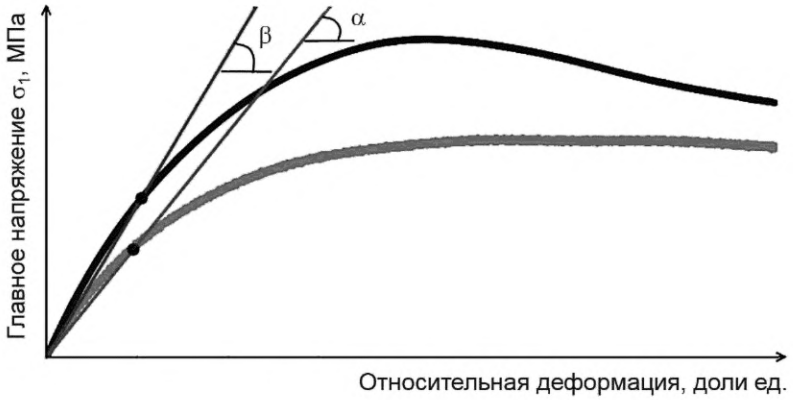


Рисунок Д.3 — График зависимости осевых деформаций от логарифма времени нагружения



α, β — углы наклона начальных (условно линейных) участков диаграмм динамического и статического нагружения соответственно

Рисунок Д.4 — Определение уменьшенного значения модуля деформации грунта по результатам кинематического нагружения с наложением динамического воздействия

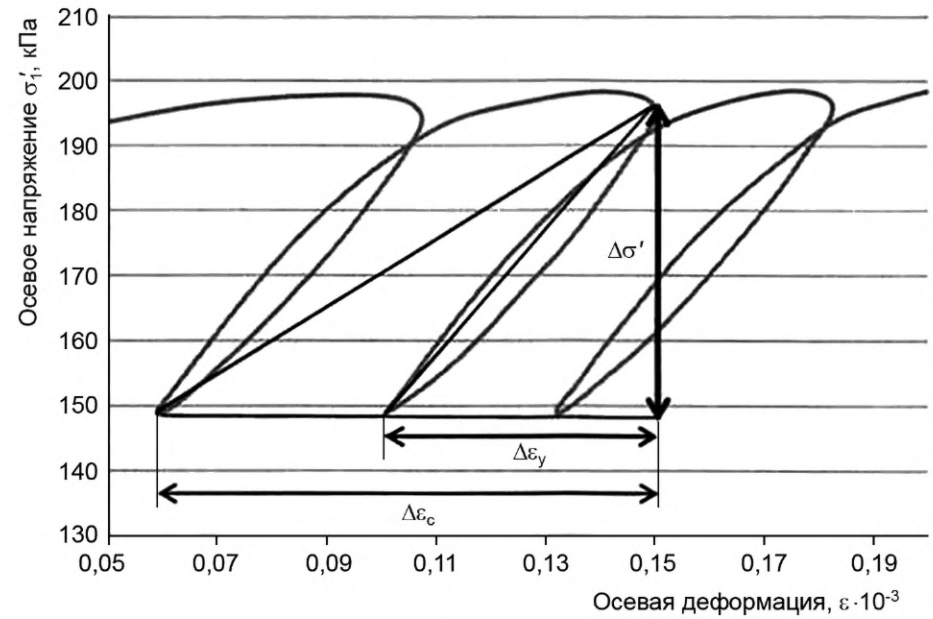
Д.2 Уменьшенный модуль деформации в кинематическом режиме нагружения с наложением динамического воздействия (рисунок Д.4) определяют по формуле

$$E_{red} = \text{tg}\ \alpha. \qquad (Д.1)$$

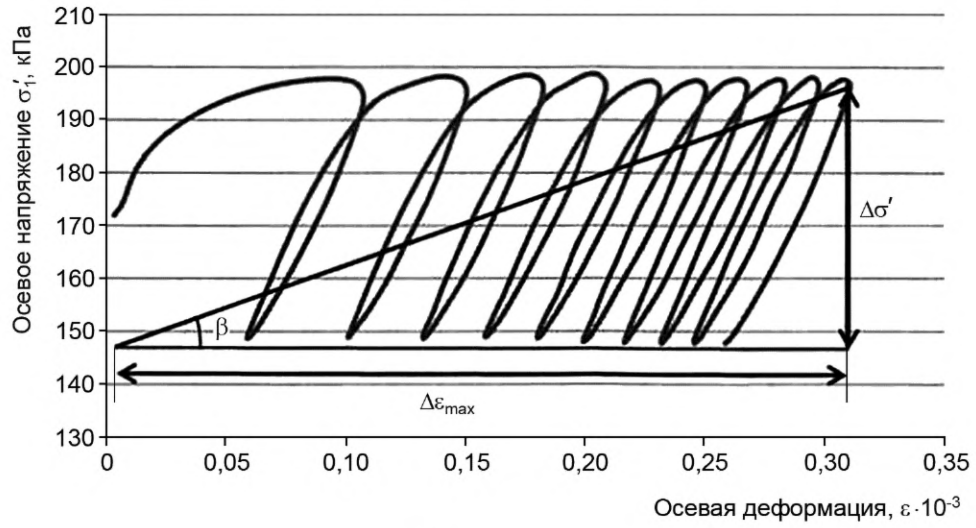
Секущий модуль деформации в кинематическом (статическом) режиме нагружения (см. рисунок Д.4) определяют по формуле

$$E = \text{tg}\ \beta. \qquad (Д.2)$$

Д.3 Пример диаграмм для определения динамического модуля упругости и динамического модуля деформации приведен на рисунке Д.5.



а



б

Рисунок Д.5 — Определение динамического модуля упругости (*а*)
и динамического модуля деформации (общей) (*б*) грунта по результатам динамического трехосного сжатия

Д.4 Динамический модуль упругости рассчитывают (рисунок Д.5, а) по формуле

$$E^{y}_{d} = \Delta\sigma'/\Delta\varepsilon_{y}\,. \qquad (Д.3)$$

Динамический модуль деформации рассчитывают (рисунок Д.5, б) по формуле

$$E_{d} = \Delta\sigma'/\Delta\varepsilon_{max} = \mathrm{tg}\,\beta. \qquad (Д.4)$$

Динамический модуль деформации в одном заданном цикле (одноцикловый модуль) может быть рассчитан по формуле

$$E_{d1} = \Delta\sigma'/\Delta\varepsilon_{c}. \qquad (Д.5)$$

Приложение Е
(рекомендуемое)

Оценка вертикальных осадок поверхности массива в результате разжижения грунтов

Е.1 Методика определения осадки массива в заданной точке заключается в выявлении мощности разжижающихся при землетрясении заданной силы отложений и экспериментальном определении уплотняемости массива в данных условиях. Уплотняемость несвязного грунта при разжижении количественно характеризуется коэффициентом уплотняемости

$$R_S = \frac{\Delta e}{e_0 - e_{min}}, \quad (Е.1)$$

где Δe — уменьшение коэффициента пористости при уплотнении после разжижения;

e_0 — начальный коэффициент пористости грунта (в естественном залегании);

e_{min} — коэффициент пористости в предельно плотном сложении [по данным стандартного уплотнения (ГОСТ 22733)].

По своему физическому смыслу эта величина характеризует долю потенциально возможной объемной деформации, реализованной при уплотнении грунта в данных условиях.

Задача сводится, таким образом, к определению Δe после циклического воздействия и решается экспериментально путем реконсолидации образца в дренированных условиях по окончании динамического трехосного сжатия или динамического простого сдвига при сжимающих напряжениях, соответствующих условиям естественного залегания.

Е.2 По окончании циклического воздействия в условиях трехосного сжатия к образцу для обеспечения равномерного дренирования через дроссель следует приложить противодавление, эквивалентное возникшему при динамическом нагружении поровому давлению. Отток влаги осуществляют по мере плавного снижения противодавления, а Δe рассчитывают по объему отжатой из образца влаги. Осадку слоя мощностью H далее рассчитывают по формуле

$$\delta_L = R_S (e_0 - e_{min}) \cdot \frac{H}{1 + e_0}. \quad (Е.2)$$

При наличии в разрезе основания нескольких разжижающихся слоев общую осадку массива следует рассчитывать послойным суммированием осадок этих неустойчивых горизонтов.

Е.3 При оценке разжижаемости в условиях простого сдвига по окончании циклического воздействия при постоянном объеме образца подвижную платформу прибора следует установить в положение нулевой сдвиговой деформации и постепенно создать вертикальное давление, соответствующее условиям естественного залегания, при открытых дренажах. После стабилизации вертикальных деформаций проводят расчеты в соответствии с формулой (Е.2).

Приложение Ж
(рекомендуемое)

Оценка латеральных деформаций грунтов в результате их разжижения

Ж.1 Латеральные деформации грунтов при их разжижении оценивают с помощью эмпирического подхода, а основу которого положены корреляционные зависимости между наблюдавшимися последствиями реальных землетрясений, их параметрами и мощностью разжижаемых грунтов.

Латеральные деформации рассчитывают только для потенциально разжижающихся грунтов, при этом длительность сейсмического воздействия учитывают введением в расчетные зависимости в качестве параметров моментной магнитуды толчка и эпицентрального расстояния. Кроме того, требуются сведения о гранулометрическом составе грунтов, который определяет их водопроницаемость, а следовательно, и скорость диссипации порового давления, а также влияет на вязкость разжиженного грунта.

Ж.2 Величину D_H следует рассчитывать в зависимости от особенностей рельефа участка.

Для пологосклонных участков используют следующую зависимость:

$$\lg D_H = -15{,}7870 + 1{,}1782M - 0{,}92751 \lg R - 0{,}0133R + \\ + 0{,}4293 \lg S + 0{,}3483 \lg H_L + 4{,}5270 \lg (100 - FC_L) - 0{,}9224 D_{50L}. \quad (Ж.1)$$

Для участков со свободным откосом (вблизи обрывов, крутых берегов) эта зависимость имеет вид:

$$\lg D_H = -16{,}3658 + 1{,}1782M - 0{,}92751 \lg R - 0{,}0133R + \\ + 0{,}6572 \lg Y + 0{,}3483 \lg H_L + 4{,}5270 \lg (100 - FC_L) - 0{,}9224 D_{50L}, \quad (Ж.2)$$

где M — магнитуда ожидаемого землетрясения;

R — расстояние до сейсмического источника (для магнитуд менее 6 — эпицентральное расстояние), км;

S — уклон поверхности, в процентах;

Y — отношение высоты откоса к расстоянию от его подошвы до рассматриваемой точки, в процентах;

H_L — суммарная мощность потенциально разжижающихся водонасыщенных несвязных грунтов с потенциалом разжижения (ГОСТ 25100) $F_L < 1{,}15$;

FC_L — среднее содержание пылевато-глинистых частиц (фракции диаметром менее 0,074 мм) грунтов, входящих в разжижаемую толщу, в процентах;

D_{50L} — средний диаметр частиц для этих грунтов, мм.

Ж.3 В случае развития с поверхности сейсмически мягких грунтов величина R должна быть скорректирована с учетом возможного усиления колебаний вблизи свободной поверхности массива. Корректировку проводят по номограмме на основании значений магнитуды и ожидаемого пикового горизонтального ускорения, а в соответствующие уравнения вместо R подставляют найденное эквивалентное значение. Такая процедура рекомендуется при магнитудах не более 8 и PGA, меньшем или равном $0{,}4g$. За пределами указанного диапазона надежность оценки латеральных смещений грунтов снижается, что следует учитывать при оценке последствий разжижения.

Ж.4 Приведенные зависимости неприменимы для оценки смещений грунтов при возникновении сейсмогенных оползней течения, а при S меньше 0,1 % разжижение приводит скорее к нерегулярным вертикальным деформациям, чем к растеканию грунтов.

При оценке суммарной мощности разжижающихся отложений необходимо руководствоваться следующими правилами:

а) при наличии тонкого слоя, разделяющего более мощные разжижающиеся пласты, его следует включить в H_L, поскольку в смещение будет вовлечена вся толща;

б) если разжижающиеся пласты разделены глинистым слоем значительной мощности (сопоставимой с мощностью каждого из них) либо слоем достоверно неразжижающихся грунтов, то для расчетов H_L следует последовательно принять равной мощности каждого из разжижающихся слоев, а полученные для них смещения затем суммировать;

в) при тонком переслаивании разжижающихся и неразжижающихся отложений ($H < 0{,}3$ м) следует принять H_L равной мощности всей слоистой толщи, а FC_L и D_{50L} характеризовать средневзвешенными значениями для всей толщи;

г) неразжижающиеся при заданных параметрах землетрясения грунты ($F_L > 1{,}15$), в т. ч. и разжижающиеся при более сильных толчках, исключаются из рассмотрения.

Ж.5 Описанный подход к оценке суммарной мощности разжижающихся отложений обоснован фактическими натурными наблюдениями при следующих значениях исходных параметров, приведенных в таблице Ж.1.

Таблица Ж.1 — Рекомендуемые диапазоны исходных параметров для оценки латеральных смещений при сейсмическом разжижении грунтов

Параметр	Диапазон изменения
Магнитуда	$6,0 < M < 8,0$
Отношение высоты откоса к расстоянию от подошвы до рассматриваемой точки	$1,0\ \% < Y < 20\ \%$
Уклон поверхности	$0,1\ \% < S < 6\ \%$
Мощность разжижаемой толщи	$0,3\ м < H_L < 12\ м$
Содержание тонких частиц	$0\ \% < FC_L < 50\ \%$
Средний диаметр частиц	$0,1\ мм < D_{50L} < 1\ мм$
Глубина до подошвы разжижаемых грунтов	$z < 15\ м$

Приложение И
(рекомендуемое)

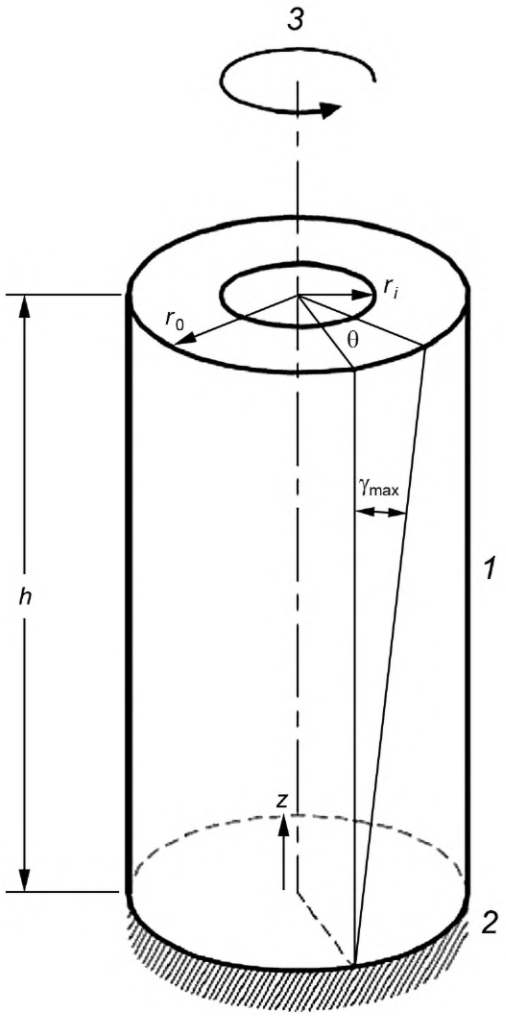
Классификация дисперсных грунтов по динамической устойчивости

Таблица И.1

Группы грунтов	Виды грунтов по составу	Удельная рассеянная энергия при осевой деформации 5 %, кДж/м^3	Разновидности дисперсных грунтов по динамической устойчивости
Несвязные	Песчаные	Более 60	Динамически устойчивые
		13—60	Динамически относительно устойчивые
		2—12	Динамически неустойчивые, в водонасыщенном состоянии разжижающиеся
		Менее 2	Плывунные
Связные минеральные и органоминеральные	Пылеватые и глинистые	Более 500	Динамически устойчивые
		61—500	Динамически относительно устойчивые
		6—60	Динамически неустойчивые, в водонасыщенном состоянии возможно разжижение
		Менее 6	Плывунные

Приложение К
(справочное)

Функциональная схема динамического нагружения образца при испытаниях на резонансной колонке



1 — образец грунта; *2* — фиксированный торец; *3* — крутящий момент; *h* — высота образца, r_0 — внешний радиус образца; r_i — внутренний радиус полого образца; *z* — направление вертикальной оси; γ_{max} — максимальное значение относительной деформации сдвига; θ — угол перекоса образца при кручении

Рисунок К.1

Приложение Л
(рекомендуемое)

Примеры графического оформления результатов испытания грунта методом резонансной колонки

Л.1 Примеры графического оформления результатов испытания грунта приведены на рисунках Л.1—Л.3.

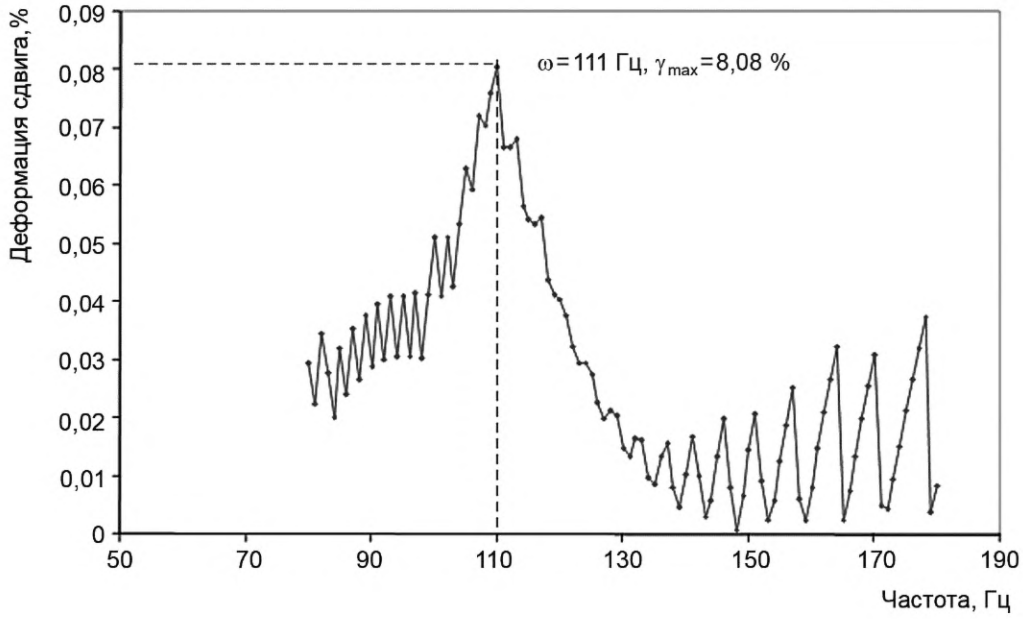


Рисунок Л.1 — Пример резонансной кривой образца грунта

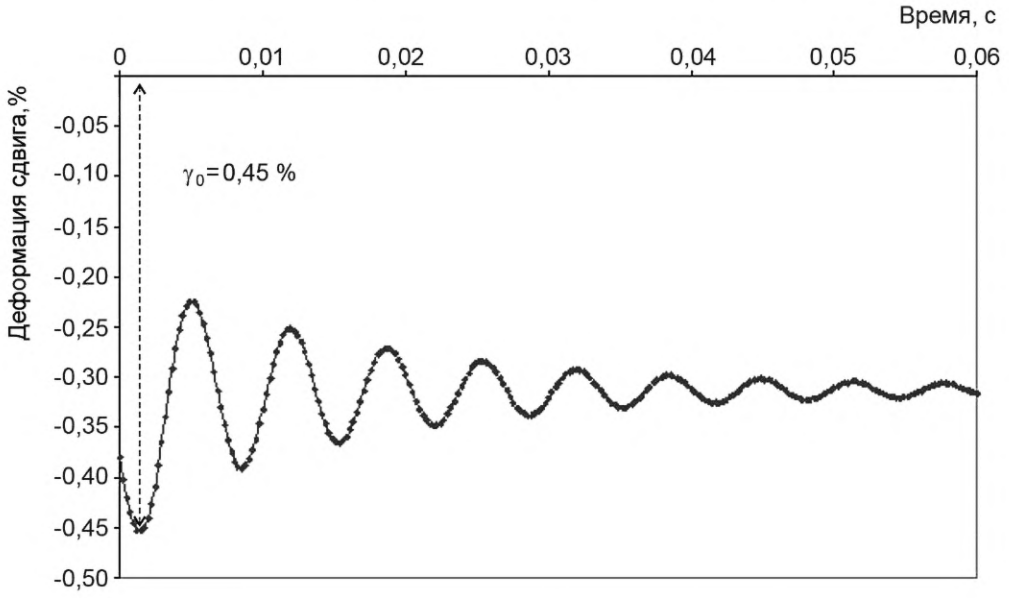


Рисунок Л.2 — Пример графика затухания свободных колебаний образца во времени

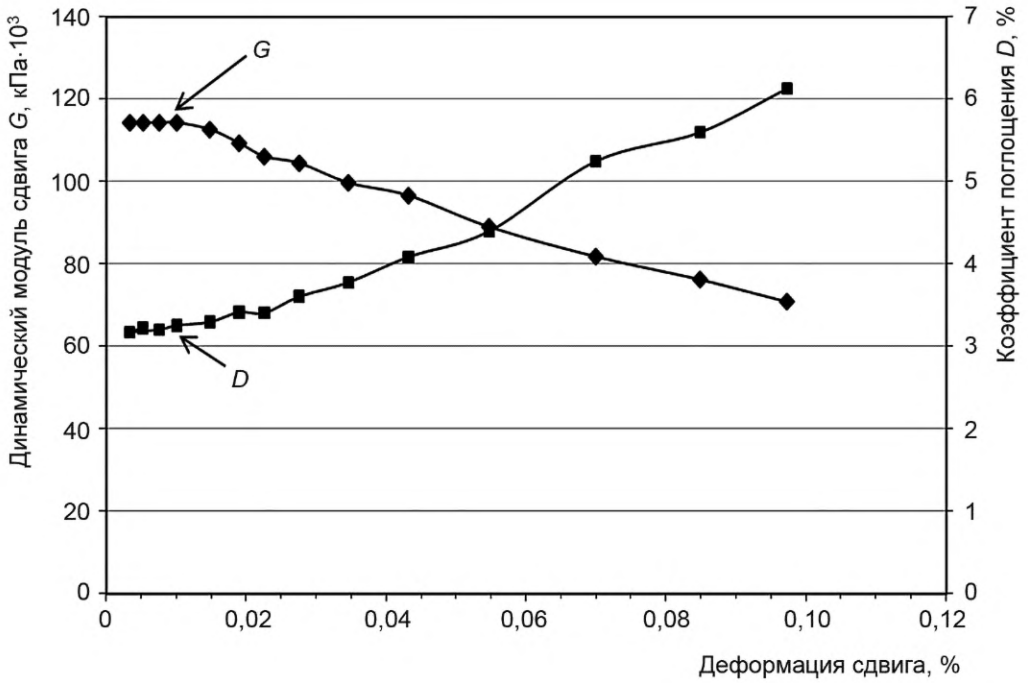


Рисунок Л.3 — Пример зависимости упругих и диссипативных характеристик глинистого грунта от уровня сдвиговых деформаций по результатам одного испытания на резонансной колонке

Л.2 Для получения каждой экспериментальной точки на рисунке Л.3 проводят операции, приведенные в Л.2.1—Л.2.3.

Л.2.1 Для расчета динамического модуля сдвига G с резонансной кривой каждого отдельного эксперимента снимают значение резонансной частоты колебаний ω в точке, соответствующей максимальной деформации сдвига (111 Гц для γ_{max} равно 0,08 % — см. рисунок Л.1). По полученному значению резонансной частоты в соответствии с формулой (7.1) рассчитывают скорость поперечной волны V_S, а из нее по формуле (7.2) — значение G при данной γ_{max}.

Л.2.2 Для расчета коэффициента поглощения D с графика затухания свободных колебаний (рисунок Л.2) снимают значения максимальной деформации сдвига в каждом цикле γ_{max} и строят линейную зависимость (см. рисунок Л.3):

$$\gamma_{max}(t) = \gamma_0 - \delta \ln t, \qquad (Л.1)$$

где γ_0 — пиковое значение относительной деформации сдвига в первом цикле;

δ — логарифмический декремент затухания.

По величине последнего в соответствии с формулой (7.4) рассчитывают значение D.

Приложение М
(рекомендуемое)

Примеры графического оформления результатов испытания грунта методом крутильного сдвига

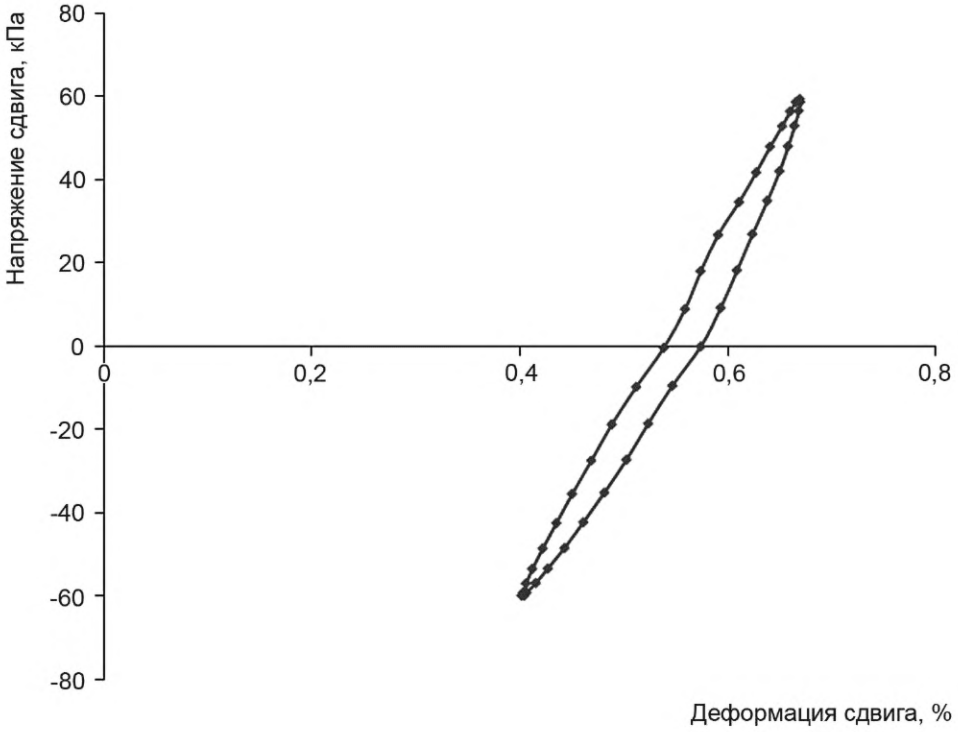
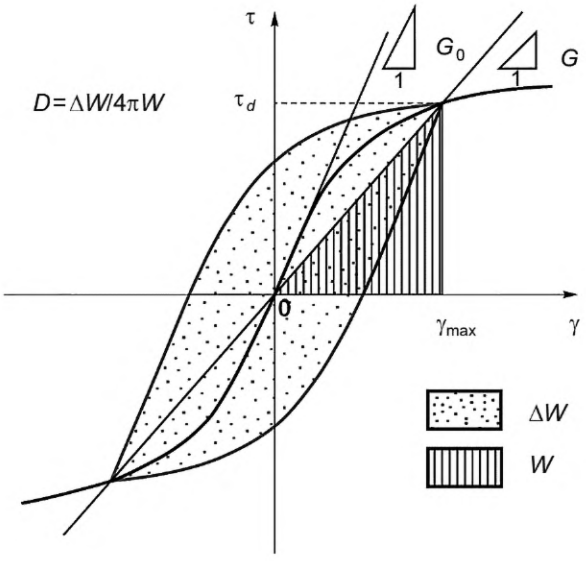


Рисунок М.1 — Пример деформирования грунта при крутильном сдвиге

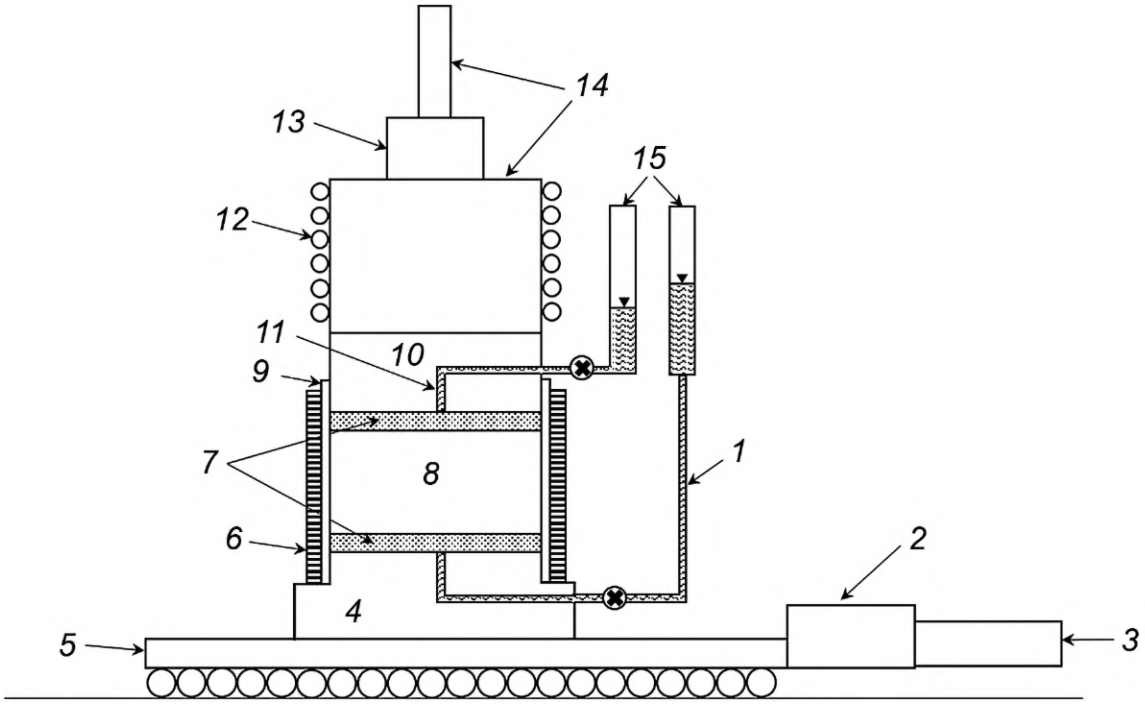


1 — единичная деформация; G_0 — начальное (максимальное) значение динамического модуля сдвига; *G*, *W*, ΔW, γ, γ_{max}, τ, τ_d — см. раздел 4

Рисунок М.2 — Определение динамического модуля сдвига и коэффициента поглощения по петле гистерезиса

Приложение Н
(рекомендуемое)

Структурная схема установки для испытания грунтов методом динамического простого сдвига



1 — нижний дренажный канал; *2* — горизонтальное силоизмерительное устройство; *3* — сдвиговой привод; *4* — основание; *5* — сдвиговая платформа; *6* — жесткие кольца (или армированная мембрана); *7* — фильтрующие диски; *8* — образец; *9* — латексная мембрана; *10* — штамп; *11* — верхний дренажный канал; *12* — направляющие осевой нагрузки; *13* — вертикальное силоизмерительное устройство; *14* — вертикальный привод; *15* — бюреты

Рисунок Н.1

Приложение П
(обязательное)

Примеры графического оформления результатов испытания грунта методом динамического простого сдвига

П.1 Примеры графиков зависимости приведены на рисунках П.1—П.3.

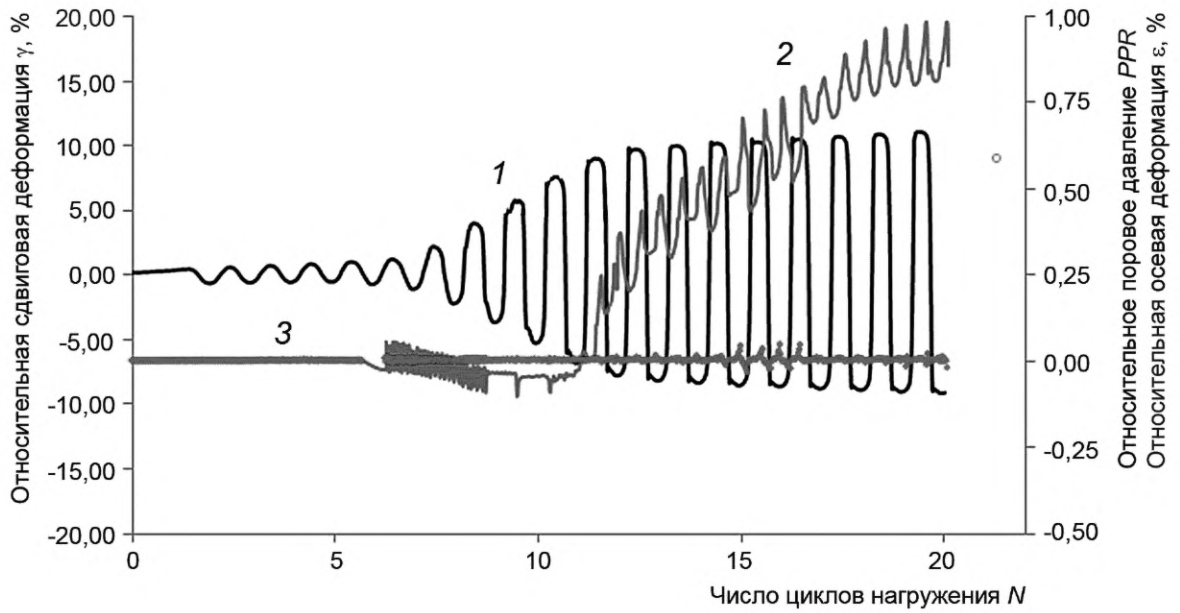


Рисунок П.1 — График зависимости сдвиговой деформации *1*, относительного порового давления *2* и осевой деформации *3* от числа циклов нагружения при простом сдвиге в условиях постоянного объема образца

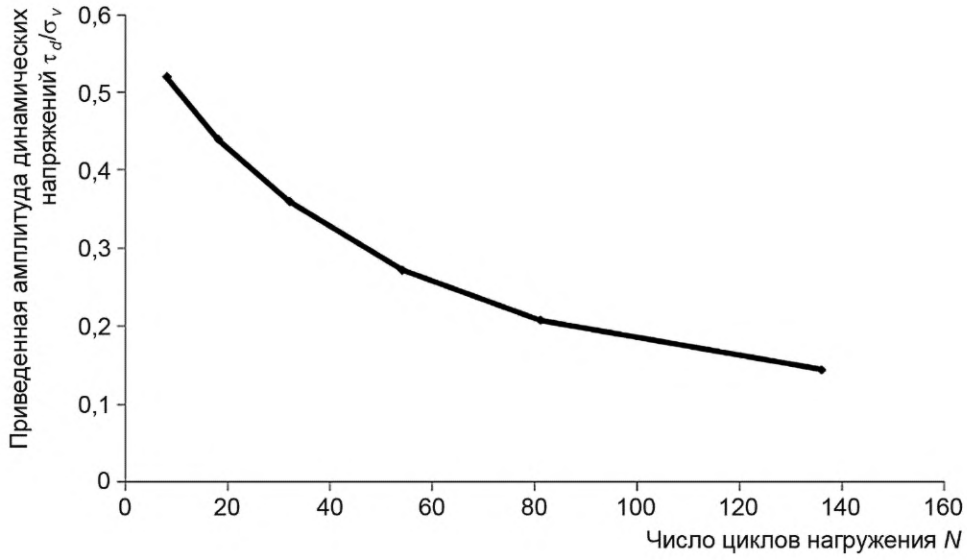


Рисунок П.2 — График зависимости разрушающей амплитуды динамических напряжений от длительности воздействия

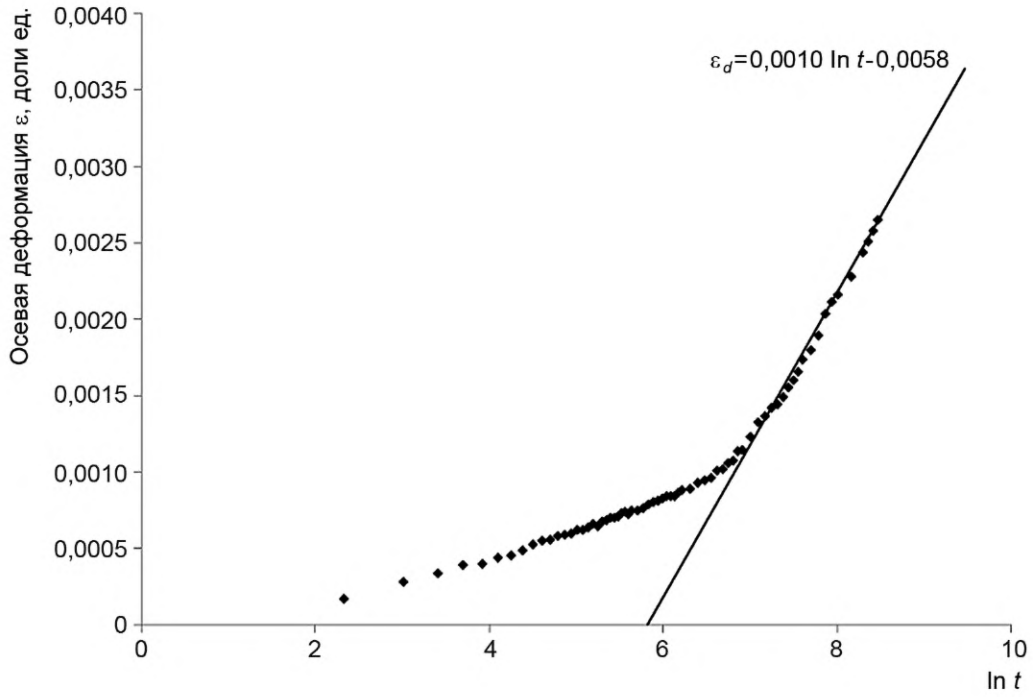


Рисунок П.3 — График зависимости осевых деформаций от логарифма времени нагружения при динамическом простом сдвиге

Библиография

[1] Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании»

[2] Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ«Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»

УДК 624.131:006.354 ОКС 93.020

Ключевые слова: дисперсные грунты, динамические испытания, динамическое трехосное сжатие, резонансная колонка, крутильный сдвиг, простой сдвиг, потенциал разжижения, виброползучесть, динамический модуль деформации, модуль сдвига

Редактор *Е.В. Якубова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *Е.А. Кондрашовой*

Сдано в набор 18.04.2022. Подписано в печать 20.04.2022. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 6,05. Уч.-изд. л. 5,14.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru