КАМЕНИКА

Автоматизация геотехнических лабораторных испытаний · K-Lab.Pro

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Методика трёхосных испытаний дисперсных грунтов на приборах серии ПВН-Т

Определение характеристик прочности и деформируемости методом трёхосного сжатия по ГОСТ 12248.3-2020

Программное обеспечение обработки — **K-Lab.Pro**

Приборы — установки трёхосного сжатия серии **ПВН-Т** (ПВН-1Т-01, ПВН-1Т-02)

© 2017–2026 КАМЕНИКА · kamenika-lab.ru

Содержание

1. Область применения

2. Нормативные ссылки

3. Термины, определения и обозначения

4. Общие положения

- 4.1. Сущность метода
- 4.2. Схемы испытаний

5. Средства испытаний

- 5.1. Установка серии ПВН-Т
- 5.2. Программное обеспечение K-Lab.Pro

6. Подготовка к испытанию

- 6.1. Отбор и подготовка образцов
- 6.2. Монтаж образца

7. Проведение испытания

- 7.1. Водонасыщение
- 7.2. Консолидация
- 7.3. Девиаторное нагружение
- 7.4. Разгрузка и повторное нагружение

8. Обработка результатов

- 8.1. Поправки
- 8.2. Коэффициент неравномерности расширения b
- 8.3. Прочностные характеристики
- 8.4. Деформационные характеристики

9. Оформление результатов и контроль качества

Приложение А. Типовые значения характеристик

1. Область применения

Настоящие методические указания устанавливают порядок проведения и обработки результатов испытаний дисперсных грунтов методом трёхосного сжатия на автоматизированных установках серии ПВН-Т с обработкой в программном обеспечении K-Lab.Pro.

Методика распространяется на определение характеристик прочности (угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c) и деформируемости (модули деформации, коэффициент Пуассона, угол дилатансии) песчаных и глинистых грунтов при статическом нагружении. Методика не распространяется на скальные грунты, а также на динамические испытания (проводятся по ГОСТ Р 56353-2022).

2. Нормативные ссылки

В настоящих указаниях использованы ссылки на следующие документы:

- **ГОСТ 12248.3-2020** — Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трёхосного сжатия;
- **ГОСТ 12248.1-2020** — общие требования к определению прочностных и деформационных характеристик грунтов;
- **ГОСТ 30416** — Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения;
- **ГОСТ 5180** — Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик;
- **СП 22.13330.2016** — Основания зданий и сооружений (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*).

При пользовании методикой следует проверять действие ссылочных документов по официальным источникам. Приоритет при расхождениях — за действующей редакцией **ГОСТ 12248.3-2020**.

3. Термины, определения и обозначения

Обозначение	Величина	Ед. изм.
σ_1	Вертикальное (осевое) главное напряжение	кПа
σ_3	Боковое (обжимающее, камерное) давление	кПа
$q = \sigma_1 - \sigma_3$	Девиатор напряжений	кПа
u	Поровое давление	кПа
$\sigma' = \sigma - u$	Эффективное напряжение	кПа
ε_1	Относительная осевая деформация	д.е.
ε_v	Относительная объёмная деформация	д.е.
φ, c	Угол внутреннего трения и удельное сцепление	°, кПа
E_{50}	Секущий модуль деформации при 50 % q_{max}	МПа
E_0	Общий (начальный) модуль деформации	МПа
E_{ur}	Модуль разгрузки/повторного нагружения	МПа
ν	Коэффициент Пуассона	д.е.
ψ	Угол дилатансии	°
b	Коэффициент неравномерности расширения образца	д.е.

4. Общие положения

4.1. Сущность метода

Образец грунта цилиндрической формы, заключённый в эластичную (латексную) оболочку, помещается в камеру и подвергается всестороннему обжатию камерным давлением σ_3. Затем к образцу прикладывается возрастающая вертикальная нагрузка (девиаторное нагружение) до разрушения. По результатам испытания нескольких образцов при разных σ_3 строятся круги Мора и определяется огибающая — прямая Кулона–Мора $\tau = \sigma \cdot \mathrm{tg}\varphi + c$.

Метод трёхосного сжатия воспроизводит напряжённое состояние грунта в массиве точнее одноплоскостного среза: позволяет задавать боковое давление, соответствующее натурным условиям, контролировать дренирование и измерять поровое давление.

4.2. Схемы испытаний

В зависимости от условий консолидации и дренирования применяют три схемы (ГОСТ 12248.3, разд. 8):

КАМЕНИКА · K-Lab.Pro · kamenika-lab.ru · Методические указания на основе ГОСТ 12248.3-2020

Схема	Условия	Определяемые характеристики
НН (UU)	Неконсолидированно-недренированная: быстрое нагружение без консолидации и дренажа	Недренированная прочность c_u
КН (CU)	Консолидированно-недренированная: консолидация, затем сдвиг без дренажа с измерением u	φ', c' (эффективные); φ_u, c_u
КД (CD)	Консолидированно-дренированная: полная консолидация и дренаж при сдвиге	φ', c'; деформационные характеристики

> **Примечание.** Схема КД реализуется в двух вариантах: «прочностные характеристики» (серия ≥ 3 образцов, определяются φ', c') и «деформационные характеристики» (один образец, определяются E, ν, ψ, E_{ur}). Выбор схемы задаётся оператором при создании испытания в K-Lab.Pro.

5. Средства испытаний

5.1. Установка серии ПВН-Т

Испытания проводят на автоматизированной установке трёхосного сжатия серии ПВН-Т (модификации ПВН-1Т-01, ПВН-1Т-02). Установка обеспечивает:

- независимое регулирование камерного давления σ_3, порового (противодавления) и осевой нагрузки;
- автоматическое поддержание заданных режимов водонасыщения, консолидации и сдвига по обратной связи;
- измерение осевой деформации, объёмной деформации (камерный и поровый волюметры), порового давления и усилия с записью в файл результатов;
- автоматическую выборку зазора между штоком и штампом перед началом девиаторного нагружения.

Средства измерений должны иметь действующую поверку. Диапазоны и погрешности каналов — по паспорту прибора и требованиям ГОСТ 12248.3.

5.2. Программное обеспечение K-Lab.Pro

Управление испытанием, регистрация данных и обработка результатов выполняются в ПО K-Lab.Pro. Программа ведёт базу образцов (объект → скважина → монолит → испытание → образец), формирует защищённый файл результатов (.klex) и рассчитывает все характеристики по ГОСТ 12248.3 с применением поправок.

6. Подготовка к испытанию

6.1. Отбор и подготовка образцов

Образцы вырезают из монолита ненарушенного сложения либо готовят из нарушенного грунта заданной плотности и влажности по ГОСТ 12248.3 и ГОСТ 5180. Форма образца — цилиндр с

отношением высоты к диаметру 2:1 (типовые размеры ⌀38×76 мм, ⌀50×100 мм).

КАМЕНИКА · K-Lab.Pro · kamenika-lab.ru · Методические указания на основе ГОСТ 12248.3-2020

До испытания определяют физические характеристики: плотность ρ, плотность частиц ρ_s, влажность w, коэффициент пористости e_0, пределы пластичности. Начальные размеры (высота h_0, диаметр d_0) измеряют в трёх сечениях с осреднением.

6.2. Монтаж образца

- образец заключают в латексную оболочку, устанавливают на нижний штамп с фильтром, надевают верхний штамп;
- оболочку герметизируют уплотнительными кольцами; собирают камеру и заполняют её рабочей жидкостью;
- в K-Lab.Pro создают запись образца с указанием размеров, схемы испытания (НН/КН/КД) и рабочего давления.

7. Проведение испытания

7.1. Водонасыщение

Для схем КН и КД образец водонасыщают ступенчатым повышением камерного давления и противодавления при постоянной разнице между ними. Степень водонасыщения контролируют по параметру Скемптона $B = \Delta u/\Delta\sigma_3$; водонасыщение считают достаточным при $B \geq 0{,}95$ (для набухающих грунтов — по требованиям ГОСТ 12248.3).

7.2. Консолидация

Образец консолидируют под эффективным давлением, соответствующим схеме и природному напряжённому состоянию. Консолидацию проводят до затухания объёмной деформации (условной стабилизации). Установка автоматически фиксирует высоту и объём образца после консолидации — эти значения используются при расчёте деформаций и поправок.

Изотропная консолидация — всестороннее эффективное давление одинаково по всем направлениям. **Анизотропная (K_0-консолидация)** — вертикальное эффективное напряжение доводится до σ'_{zg} при боковом $\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_{zg}$ (ГОСТ 12248.3, п. 8.4).

7.3. Девиаторное нагружение (сдвиг)

После консолидации прикладывают возрастающую осевую нагрузку. Скорость нагружения назначают из условия полного (КД) либо отсутствия (КН, НН) дренирования — для КН и КД по времени консолидации t_{100}. В процессе сдвига непрерывно регистрируют девиатор, осевую и объёмную деформации и поровое давление.

> **Зазор штока.** Между штоком и штампом всегда имеется технологический зазор; до его выборки девиатор практически не растёт, образуя начальную «полку» на кривой $q–\varepsilon_1$. Установка выбирает зазор автоматически, а при обработке начало отсчёта деформаций переносится в точку касания штока со штампом. Отдельная поправка на люфт оператором не вводится.

Критерий разрушения — максимум девиатора q_{max} (пик). Если пик не достигнут, за разрушающее принимают напряжение при относительной осевой деформации 15 % (ГОСТ 12248.3, Прил. Е — деформация образца свыше 15 % не допускается).

7.4. Разгрузка и повторное нагружение (E_{ur})

Для определения модуля разгрузки/повторного нагружения E_{ur} на стадии девиаторного нагружения выполняют цикл разгрузки–повторного нагружения. Модуль вычисляют по петле на прямолинейном участке (ГОСТ 12248.3, ф. 9.21).

8. Обработка результатов

Обработка выполняется автоматически в K-Lab.Pro; оператор контролирует корректность и, при необходимости, вручную указывает прямолинейные участки на графиках (принцип, аналогичный шаблонам обработки).

8.1. Поправки

К измеренному девиатору перед построением кругов Мора применяют поправки (ГОСТ 12248.3, разд. 9):

- на изменение площади сечения (9.6, 9.7): $A = A_0 \cdot (1 - \varepsilon v)/(1 - b \cdot \varepsilon_1)$ — для КД; $A = A_0/(1 - b \cdot \varepsilon_1)$ — для КН/НН; поправка применяется к девиаторной части ($\sigma_1 - \sigma_3$), камерное σ_3 не масштабируется;
- на оболочку (9.4, 9.5): $\Delta\sigma_1 m = k \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon v)$, $\Delta\sigma_3 m = k \cdot \varepsilon v/3$, где $k = 4 \cdot E_m \cdot t/D_i$; на девиатор — $\Delta q = k \cdot (\varepsilon_1 + 4/3 \cdot \varepsilon v)$;
- на трение штока q_d (Прил. Б.2.3) — определяется по записи и учитывается при обработке; на слабых грунтах может достигать 5–7 % девиатора.

8.2. Коэффициент неравномерности расширения b

Коэффициент b (ГОСТ 12248.3, Прил. Е) учитывает бочкообразование образца и определяется по замерам после опыта:

$$b = (1 - A_C / A_K) / (\Delta h_K / h_C)$$

где $A_K = \pi \cdot d_к^2/4$ — площадь по диаметру образца после опыта $d_к$ (замер штангенциркулем в среднем сечении); A_C, h_C — площадь и высота после консолидации; $\Delta h_K = h_0 - h_к$ — осадка по замеренной после разгрузки высоте $h_к$. При b = 1 применяется стандартная цилиндрическая коррекция. В K-Lab.Pro b рассчитывается автоматически по введённым $d_к$ и $h_к$.

8.3. Прочностные характеристики (φ, c)

По парам (σ_3, σ_1) при разрушении строят круги Мора и методом наименьших квадратов определяют общую касательную (ГОСТ 12248.3, ф. 9.9–9.12):

$$tg\,\varphi = (N - 1) / (2\sqrt{N}), \quad c = M / (2\sqrt{N})$$

где N, M — коэффициенты линейной регрессии σ_1 по σ_3. Прочностные характеристики определяют по полным напряжениям и, при измерении порового давления (КН, КД), по эффективным $\sigma' = \sigma - u$ (ф. 9.13, 9.14). Для построения огибающей необходимо не менее трёх образцов при разных σ_3.

8.4. Деформационные характеристики

Характеристика	Определение	Формула (ГОСТ 12248.3)
E_{50}, МПа	Секущий модуль при 50 % q_{max}	$E_{50} = q_{max} / (2 \cdot (\varepsilon_1)_{50})$ (9.20)
E_0, МПа	Модуль по начальному прямолинейному участку	$E_0 = \Delta q / \Delta \varepsilon_1$
E_{ur}, МПа	Модуль разгрузки/повт. нагружения	$E_{ur} = (\sigma'_{zb} - \sigma'_{zu})/(\varepsilon_{1B} - \varepsilon_{1A})$ (9.21)
ν, д.е.	Коэффициент Пуассона	$\nu = -\Delta\varepsilon_3/\Delta\varepsilon_1$, $\varepsilon_3 = (\varepsilon v - \varepsilon_1)/2$ (9.16, 9.17)
ψ, °	Угол дилатансии	$\sin\psi = \Delta\varepsilon v/(\Delta\varepsilon v - 2\cdot\Delta\varepsilon_1)$ (К.1)
G, МПа	Модуль сдвига	$G = E/(2(1+\nu))$ (9.18)
K, МПа	Объёмный модуль	$K = E/(3(1-2\nu))$ (9.19)

> **Ручной выбор точек.** Для ν и ψ прямолинейный участок кривой εv–ε_1, для E_0 и E_{ur} — участок кривой девиатора σ_1–ε_1 оператор может указать вручную кликами на графике (начальный участок для E_0 и ν, участок у разрушения для ψ, петля разгрузки для E_{ur}). Это соответствует практике обработки по шаблонам и уточняет автоматический расчёт по фиксированному окну.

9. Оформление результатов и контроль качества

Результаты испытания оформляют протоколом, содержащим: сведения об объекте и образце, физические характеристики, схему и условия испытания, круги Мора с огибающей, кривые «девиатор–деформация» и «объёмная деформация–деформация», таблицу определённых характеристик (φ, c, E_{50}, E_0, E_{ur}, ν, ψ).

Программа автоматически выполняет контроль качества кривых: достижение пика прочности, отсутствие скачкообразных изменений, физичность объёмной деформации, соответствие поведения образца заявленной схеме. Замечания приводятся в разделе «Контроль качества» протокола и не блокируют сохранение, но требуют внимания инженера-геолога.

Сырые данные испытания опечатываются в защищённый файл результатов (.klex) в момент завершения опыта и при последующей обработке не изменяются, что исключает подмену исходных данных.

Приложение А (справочное). Типовые значения характеристик

А.1. Угол внутреннего трения и удельное сцепление

Грунт	φ, °	c, кПа
Пески	28–40	0–5
Супеси	22–30	2–12
Суглинки	15–25	10–40
Глины	7–20	20–100

А.2. Модуль деформации E_{50}

Грунт	E_{50}, МПа
Пески рыхлые	10–30
Пески средней плотности	30–50
Суглинки	5–25
Глины полутвёрдые	15–40
Глины мягкопластичные	3–10

Значения приведены справочно; расчётные характеристики принимают по результатам испытаний.