



МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

Учебно-методическое пособие

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(МАДИ)

Кафедра «Аэропорты, инженерная геология и геотехника»

Утверждаю
Зав. кафедрой профессор
_____ И.В. Чистяков
« ____ » _____ 2017 г.

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

Учебно-методическое пособие

Под редакцией П.А. Фонарёва

МОСКВА
МАДИ
2017

УДК 624.131.43
ББК 38.581.12
Г365

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. МАДИ Э.М. Добров

Г365 Геотехнические свойства грунтов: учебно-методическое пособие / П.А. Фонарёв [и др.]; под ред. П.А. Фонарёва. – М.: МАДИ, 2017. – 56 с.

Учебно-методическое пособие «Геотехнические свойства грунтов» предназначено для выполнения и защиты лабораторных работ по курсам «Инженерная геология», «Дорожное грунтоведение» и «Механика грунтов» и служит вспомогательным материалом для закрепления теоретических знаний, которые студенты приобретают в лекционном курсе.

В учебно-методическом пособии приведены основные методы и методики определения геотехнических свойств грунтов, даны схемы и описание наиболее распространенных приборов, на которых можно определить свойства грунтов.

Пособие предназначено для студентов 1, 2 и 3 курса очной формы обучения по специальностям «Автомобильные дороги», «Аэродромы», «Автодорожные мосты и тоннели», «Городские транспортные сооружения» направление подготовки 08.03.01 «Строительство» и «Строительство автомагистралей, аэродромов и специальных сооружений» направление подготовки 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений».

УДК 624.131.43
ББК 38.581.12

Учебное издание

ФОНАРЁВ Павел Александрович
ЕМЕЛЬЯНОВ Сергей Николаевич
КОЧЕТКОВА Рима Габдуловна
ЛЕВОЧКИНА Татьяна Валентиновна
НАЗИПОВА Гюзель Анасовна

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

Учебно-методическое пособие

Под редакцией П.А. Фонарёва

Редактор В.В. Виноградова

Редакционно-издательский отдел МАДИ. E-mail: rio@madi.ru

Подписано в печать 19.06.2017 г. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 3,5. Тираж 100 экз. Заказ . Цена 120 руб.
МАДИ, Москва, 125319, Ленинградский пр-т, 64.

© МАДИ, 2017

ПРЕДИСЛОВИЕ

Инженерно-геологические и инженерно-геотехнические изыскания для транспортного строительства предполагают выполнение определенного объема лабораторных и полевых исследований геотехнических свойств грунтов.

Основной задачей при этом является накопление данных, необходимых для проектирования сооружений, с точки зрения характеристики состава и состояния грунтов основания, гидрогеологических условий, а также состояния грунтов с определением количественных характеристик их прочности и деформируемости.

Объем курса исключает возможность детального рассмотрения всех свойств грунтов применительно к различным видам транспортного строительства. Поэтому далее будут рассмотрены только основные геотехнические свойства грунтов, имеющие значение для инженера-строителя любого профиля.

Более полное описание свойств грунтов можно найти в учебнике «Дорожное грунтоведение» [1] или учебнике В.Д. Казарновского «Основы инженерной геологии, дорожного грунтоведения и механики грунтов» [2].

ВВЕДЕНИЕ

Для строительной практики наиболее важными являются геотехнические свойства грунтов, которые по Н.Н. Маслову [3] могут быть подразделены на два класса.

Показатели I класса дают количественную оценку свойств грунта и могут быть непосредственно использованы в расчетах. Показатели I класса нередко называются физико-техническими.

К показателям I класса относят:

- показатели сопротивляемости сдвигу и сжимаемости грунтов и горных пород;
- показатели вязкости и пластичности;
- коэффициент фильтрации;
- плотность грунта.

Эти показатели определяются на образцах ненарушенной структуры, т.е. с сохранением их природного состояния.

Показатели II класса дают лишь общую характеристику грунтов по составу и состоянию. Показатели II класса нередко называют физическими характеристиками грунтов.

К показателям II класса относят:

Показатели состава:

- петрографический, минералогический, химический, гранулометрический составы;
- плотность частиц грунта;
- показатели пластичности породы – предел текучести, предел пластичности, число пластичности.

Показатели состояния:

- влажность породы;
- показатели плотности – пористость, коэффициент пористости, плотность сухого грунта;
- показатель консистенции глинистых пород и др.

Показатели II класса, как правило, определяют на образцах с нарушенной структурой. Они оказывают значительное влияние на технологию производства земляных работ и обычно используются для описания инженерно-геологических условий возведения сооружений.

1. ПОКАЗАТЕЛИ СОСТАВА И СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ

1.1. Гранулометрический состав грунта

Гранулометрический состав грунта процентное содержание первичных (не агрегированных) частиц различной крупности по фракциям, выраженное по отношению их массы к общей массе грунта. Размер фракций, слагающих тот или иной грунт, выражают обычно в миллиметрах. По размерам слагающие дисперсный грунт элементы и их фракции подразделяют в соответствии с ГОСТ 25100-2011 [4] (табл. 1).

Таблица 1

Элементы грунта	Фракции	Размер фракций, мм
Валуны (глыбы)	Крупные	> 800
	Средние	400...800
	Мелкие	200...400
Галька (щебень)	Крупные	100...200
	Средние	60...100
	Мелкие	10...60
Гравий (дресва)	Крупные	5...10
	Мелкие	2...5
Песчаные частицы	Грубые	1...2
	Крупные	0,5...1
	Средние	0,25...0,5
	Мелкие	0,10...0,25
	Тонкие	0,05...0,10
Пылеватые частицы	Крупные	0,01...0,05
	Мелкие	0,002...0,01
Глинистые частицы	—	< 0,002

Определение гранулометрического состава проводят для классификации грунтов и последующего прогнозирования их свойств. В соответствии с действующим ГОСТ 25100-2011 по гранулометрическому составу классифицируют лишь крупнообломочные и песчаные грунты (см. табл. 1).

Методы, применяемые для определения гранулометрического состава, подразделяют на прямые (ситовой, пипеточный и т.д.) и косвенные (визуальный и ареометрический) (ГОСТ 12536-2014 [5]).

Прямые методы позволяют непосредственно выделять необходимые фракции, определять их вес и процентное содержание в грунте.

Косвенные методы основаны на изучении некоторых свойств исследуемых грунтов, по изменению которых можно судить о содержании в породе тех или иных фракций.

Ситовой метод используют для определения гранулометрического состава песчано-гравелистых (сыпучих) грунтов (с размером частиц более 0,1 мм). Суть ситового метода состоит в разделении средней пробы на фракции с помощью набора сит с различным диаметром ячеек – от 10 до 0,1 мм (рис. 1).



Рис. 1. Набор сит для определения гранулометрического состава сыпучих грунтов

Пипеточный метод используют главным образом для определения гранулометрического состава глинистых (связных) грунтов. Этим методом с достаточной точностью определяют содержание в грунтах фракций диаметром менее 0,1 мм.

При наличии в грунте более крупных частиц пипеточный метод применяется в комбинации с ситовым методом.

Разделение грунта на фракции в этом методе основано на различной скорости выпадения частиц различного размера в осадок. Скорость выпадения частиц в осадок может быть рассчитана по формуле Стокса

$$V = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_s - \rho_w}{\eta},$$

где r – радиус частиц грунта, см; ρ_s – плотность частиц равная 2,65 г/см³; ρ_w – плотность жидкости равная 1,0 г/см³; g – ускорение силы тяжести равное 981 см/с²; η – коэффициент вязкости воды равный 0,0114 пуаз.

Посредством отбора пробы из суспензии, приготовленной в мерном цилиндре объемом $V = 1000 \text{ см}^3$, через определенные проме-

жутки времени и определенной глубины устанавливают содержание в грунте частиц определенного размера, а затем и фракций.

Ареометрический метод используется для определения гранулометрического состава грунтов, содержащих фракции диаметром менее 0,25 мм, и основан на измерении плотности суспензии в процессе ее отстаивания. Так, если во взмученную суспензию опустить ареометр, то в процессе отстаивания плотность ее будет изменяться в связи с выпадением из нее частиц грунта (в соответствие с формулой Стокса) и ареометр будет погружаться в суспензию. Ареометр – прибор для измерения плотности жидкостей, принцип работы которого основан на законе Архимеда. Обычно представляет собой стеклянную трубку, нижняя часть которой при калибровке заполняется дробью или ртутью. В верхней, узкой части находится шкала, которая проградуирована в значениях плотности раствора или концентрации растворенного вещества.

Через определенные отрезки времени снимаем отсчеты по глубине погружения ареометра и далее рассчитываем содержание каждой фракции меньшей 0,25 мм.

Метод Рутковского дает приближенное представление о гранулометрическом составе и часто используется в полевых условиях.

В основе метода лежат:

- способность глинистых частиц набухать в воде;
- различная скорость падения частиц в воде в зависимости от их размера (на основе формулы Стокса).

При производстве массовых определений гранулометрического состава грунтов в полевых условиях часто выделяют только три основных группы фракций: *глинистую* $< 0,005$ мм (по набуханию), *песчаную* $2 \dots 0,05$ мм (по скорости падения частиц в воде в соответствие с формулой Стокса) и *пылеватую* $0,05 \dots 0,005$ мм (вычитая из 100% суммарное содержание глинистых и песчаных частиц в процентах).

Результаты гранулометрического анализа грунтов обычно изображают в виде кумулятивных кривых. В этом случае ординаты кривой соответствуют содержанию суммы фракций частиц менее данного диаметра, а по оси абсцисс откладывают логарифмы диаметров частиц (рис. 2).

По гранулометрическому составу крупнообломочные грунты и пески подразделяют на разновидности в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Разновидность крупнообломочных грунтов и песков	Размер частиц d , мм	Содержание частиц, % по массе
Крупнообломочные:		
– валунный (при преобладании неокатанных частиц – глыбовый)	>200	>50
– галечниковый (при неокатанных гранях – щебенистый)	>10	>50
– гравийный (при неокатанных гранях – дресвяный)	>2	>50
Пески:		
– гравелистый	>2	>25
– крупный	>0,50	>50
– средней крупности	>0,25	>50
– мелкий	>0,10	≥75
– пылеватый	>0,10	<75

Примечание. При наличии в крупнообломочных грунтах песчаного заполнителя более 40% или глинистого заполнителя более 30% от общей массы воздушно-сухого грунта в наименование крупнообломочного грунта включают наименование вида заполнителя и указывают характеристики его состояния (влажность, плотность, показатель текучести). Вид заполнителя устанавливают после удаления из крупнообломочного грунта частиц крупнее 2 мм. Если обломочный материал представлен ракушкой в количестве 50% и более, грунт называют ракушечным, если от 25% до 50%, то к наименованию грунта добавляют слова «с ракушкой».

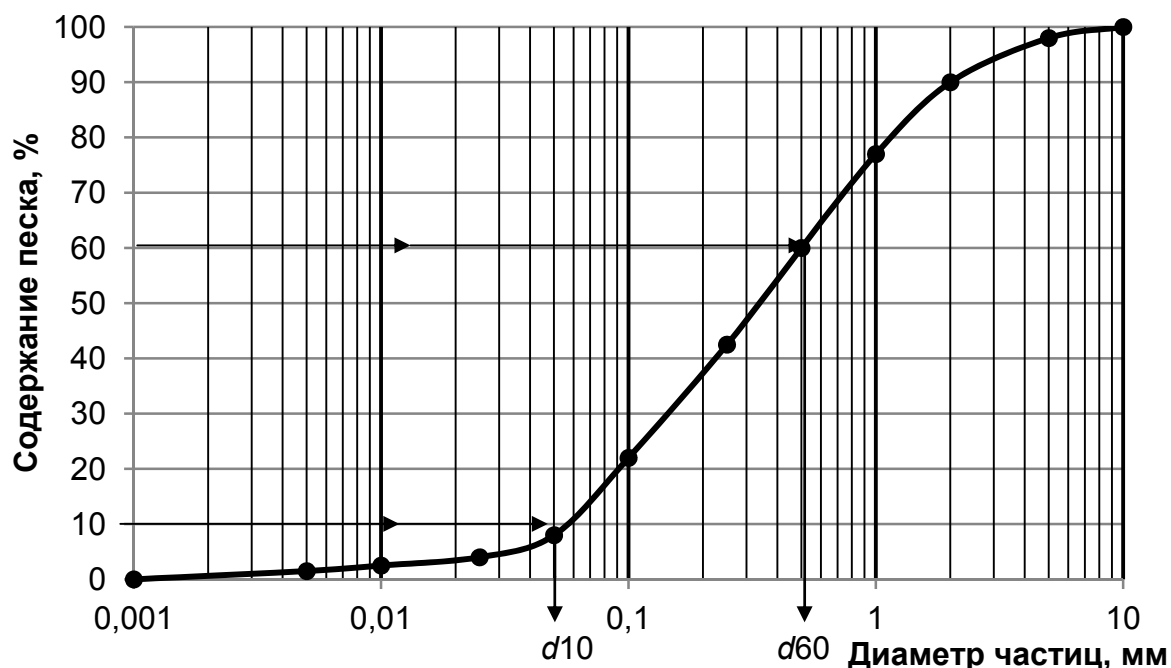


Рис. 2. Кривая гранулометрического состава песка

Кривая гранулометрического состава используется для определения действующего (эффективного) диаметра частиц песчаного грунта d_{10} и коэффициента неоднородности грунта C_u

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}},$$

где d_{10} и d_{60} – диаметры частиц, которых содержится в грунте менее 10 и 60%, соответственно (см. рис. 2).

По степени неоднородности гранулометрического состава C_u крупнообломочные грунты и пески подразделяют на разновидности в соответствии с табл. 3.

Таблица 3

Разновидность крупнообломочных грунтов и песков	Степень неоднородности гранулометрического состава C_u , д.е.
Однородные	$C_u \leq 3$
Неоднородные	$C_u > 3$

В ряде случаев на практике оказывается полезной табл. 4, в которой приводится разделение грунтов по содержанию в них глинистых частиц.

Таблица 4

Классификация грунтов по процентному содержанию глинистых частиц

Грунты	Содержание глинистых частиц, %
Песчаные	до 3
Супесчаные	от 3 до 12
Суглинистые	от 12 до 18
Тяжелые суглинистые	от 18 до 25
Глинистые	от 25 и выше

Показатели свойств грунтов рассмотрим на примере их трехфазной модели (рис. 3).

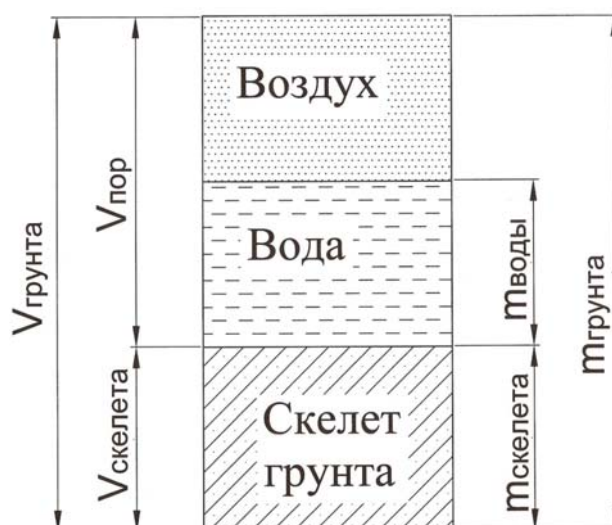


Рис. 3. Трехфазная модель грунта

1.2. Плотность частиц грунта ρ_s

Под плотностью частиц грунта понимают массу единицы объема твердых (скелетных) частиц грунта. Она может быть определена как отношение массы твердой фазы (скелета или сухого) грунта $m_{\text{ск}}$ к ее объему $V_{\text{ск}}$ (см. рис. 3)

$$\rho_s = \frac{m_{\text{ск}}}{V_{\text{ск}}}, [\text{г/см}^3, \text{т/м}^3].$$

Плотность частиц грунта зависит от минералогического состава и возрастает с увеличением содержания в них тяжелых минералов.

Плотность частиц различных грунтов колеблется в пределах от 2,60 до 2,85 г/см³, но чаще всего – от 2,65 до 2,75 г/см³.

Плотность частиц ρ_s , слагающих кварцевый песок, равна 2,65...2,66 г/см³, супесчаных и суглинистых грунтов – соответственно 2,70...2,71 г/см³ и глинистых – 2,71...2,75 г/см³.

Определение плотности частиц грунта осуществляется пикнометрическим методом в соответствии с ГОСТ 5180-84 [6] (Пикнометр – стеклянный сосуд специальной формы и определённой вместимости, применяемый для измерения плотности веществ.)

1.3. Плотность грунта ρ

Плотностью грунта называют массу единицы объема грунта в его природном состоянии, т.е. ненарушенной структуры с естественной пористостью и влажностью. Она численно равна отношению массы грунта $m_{\text{гр}}$ к его объему $V_{\text{гр}}$ (см. рис. 3)

$$\rho = \frac{m_{\text{гр}}}{V_{\text{гр}}}, [\text{г/см}^3, \text{т/м}^3].$$

Плотность грунта зависит от пористости, влажности и минералогического состава грунта. Величина ρ чаще всего колеблется в пределах от 1,5 до 2,1 т/м³.

Плотность грунта является очень важным показателем физических свойств грунта, так как используется при расчетах давления земли на подпорные стенки, устойчивости оползневых откосов и склонов, природного давления грунта, несущей способности грунта и т.п.

Для определения плотности грунтов в лабораторных условиях в зависимости от их гранулометрического состава и консистенции используют различные методы.

Для связного (глинистого) грунта применяют методы режущего кольца (рис. 4) и гидростатического взвешивания, использующий закон Архимеда. Последний метод используется в тех случаях, когда нельзя изготовить образцы правильной геометрической формы, а образцы глинистого грунта перед взвешиванием в воде парафинируют.



Рис. 4. Режущие кольца

В полевых условиях плотность грунтов определяют с помощью плотномера-влажмера Н.П. Ковалева (рис. 5), радиоизотопными и сейсмоакустическими методами, а также методами пенетрации и засыпки (для сыпучих грунтов).



Рис. 5. Плотномер-влажмер Н.П. Ковалева

Плотность сыпучих грунтов нарушенной структуры определяется в двух состояниях: рыхлом и плотном, что необходимо для оценки их строительных свойств и состояния.

Примечание. В расчетах применяют значение удельного веса грунта γ , которое определяют умножением значения плотности грунта ρ на ускорение свободного падения g , т.е. $\gamma = \rho \cdot g \approx 10 \cdot \rho$ [кН/м³]. Аналогично определяются удельный вес частиц грунта γ_s и удельный вес сухого грунта γ_d .

1.4. Плотность сухого грунта ρ_d

Плотность сухого грунта – это масса единицы объема абсолютно сухого грунта или масса твердой фазы (скелета) грунта $m_{ск}$ в единице объема грунта природного сложения $V_{гр}$ (см. рис. 2). Она находится как отношение массы грунта за вычетом массы воды и льда в его порах к его первоначальному объему

$$\rho_d = \frac{m_{ск}}{V_{гр}}, \text{ [г/см}^3\text{, т/м}^3\text{]}.$$

Плотность сухого грунта обычно определяется расчетом по формуле

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + W},$$

где W – влажность грунта, д.е. (доли единицы); ρ – плотность грунта, г/см³.

Плотность сухого грунта зависит только от пористости грунта и его минералогического состава.

1.5. Влажность грунта W

Влажность грунта – отношение массы воды $m_{в}$ в объеме грунта к массе этого грунта, высушенного до постоянной массы, т.е. массе скелета или сухого грунта $m_{ск}$ (см. рис. 3)

$$W = \frac{m_{в}}{m_{ск}}, \text{ [д.е.]},$$

иногда ее выражают в процентах.

Влажность грунтов в лаборатории принято определять высушиванием образцов до постоянного веса при температуре 105...107°C. При большей температуре возможно выгорание органики. Влажность грунтов может изменяться от нескольких процентов для скальных грунтов до сотен процентов для илов или торфов.

В полевых условиях природную влажность (без отбора образцов) можно определить с помощью нейтронного влагомера.

Влажность является очень важной характеристикой грунтов, особенно глинистых, прочностные свойства которых зависят от степени их увлажнения.

1.6. Коэффициент водонасыщения грунта S_r

Для характеристики физического состояния породы знания одной природной влажности недостаточно, необходимо еще установить степень заполнения пор грунта водой, т.е. его коэффициент водонасыщения.

Коэффициент водонасыщения обычно определяют по выражению

$$S_r = \frac{W}{W_{sat}},$$

где W – природная влажность грунта, д.е.; W_{sat} – предельная влажность грунта, д.е., возможная при данной его пористости (т.е. полная влагоемкость грунта).

Коэффициент водонасыщения чаще всего вычисляют по формуле

$$S_r = \frac{\rho_s W}{e \rho_w}, \text{ [д.е.]},$$

где W – влажность грунта, д.е.; ρ_s – плотность частиц грунта, г/см³; n – пористость грунта, д.е.; e – коэффициент пористости грунта, д.е.; ρ_w – плотность воды, г/см³.

Величина S_r может изменяться от 0 (при $W = 0$) до 1 (при $W = W_{sat}$). По коэффициенту водонасыщения S_r крупнообломочные грунты и пески подразделяют на разновидности в соответствии с табл. 5.

Таблица 5

Разновидность крупнообломочных грунтов и песков	Коэффициент водонасыщения S_r , д.е.
Малой степени водонасыщения (маловлажные)	$0 < S_r < 0,5$
Средней степени водонасыщения (влажные)	$0,5 < S_r < 0,8$
Водонасыщенные	$0,8 < S_r \leq 1,0$

1.7. Пористость n

Между твердыми частицами грунта в результате их неплотного прилегания друг к другу образуются промежутки различной величины,

которые называются порами. Поры могут быть заполнены воздухом или водой.

Пористостью грунта n называют отношение объема пор $V_{\text{пор}}$ в грунте ко всему объему грунта $V_{\text{гр}}$, выраженное в процентах или в долях единицы (см. рис. 3)

$$n = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{гр}}}.$$

Вычисление пористости грунта производится по результатам определения плотности частиц грунта ρ_s и сухого грунта ρ_d

$$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}.$$

Наибольшая величина пористости всегда у глинистых тонкодисперсных грунтов, а наименьшая – у крупнообломочных, а величина пор наоборот. (Дисперсный грунт – грунт, состоящий из совокупности мелких твердых частиц, зерен, обломков и др. элементов, между которыми есть физические, физико-химические или механические структурные связи (т.н. сыпучие и связные грунты).

Свойства грунтов, в том числе и их водопроницаемость, зависят как от размера пор, так и от общей величины пористости, которая в зависимости от различного генетического типа грунтов может изменяться в пределах от 19 до 90%.

Пористость является важной характеристикой грунтов. По ее величине судят о степени уплотнения пород и их сжимаемости в различных условиях.

1.8. Коэффициент пористости грунта e

Часто пористость грунта характеризуют отношением объема пор $V_{\text{пор}}$ к объему, занимаемому твердой фазой $V_{\text{ск}}$ (скелетом) грунта (см. рис. 3). Эта величина называется коэффициентом пористости, или приведенной пористостью

$$e = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{ск}}}, [\text{д.е.}].$$

Коэффициент пористости может быть вычислен по плотности частиц грунта ρ_s и плотности сухого ρ_d грунта

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}.$$

Показатели n и e служат классификационными характеристиками и входят в формулы для расчета водопроницаемости и сжимаемости грунтов.

В зависимости от величины коэффициента пористости e песчаные грунты согласно строительным нормам и правилам подразделяют на ряд групп по плотности их сложения (табл. 6).

Таблица 6

Разновидность песков	Коэффициент пористости e , д.е.		
	Пески гравелистые, крупные и средней крупности	Пески мелкие	Пески пылеватые
Плотный	<0,55	<0,60	<0,60
Средней плотности	0,55...0,70	0,60...0,75	0,60...0,80
Рыхлый	>0,70	>0,75	>0,80

1.9. Относительная плотность сыпучих грунтов I_d

Часто при инженерно-геологической оценке сыпучих грунтов используют показатель относительной плотности I_d , вычисляемый по формуле

$$I_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}, \text{ [д.е.]},$$

где e – коэффициент пористости грунта в естественном состоянии или в теле насыпи; $e_{\max}$, $e_{\min}$ – коэффициенты пористости грунта соответственно в предельно рыхлом и предельно плотном его сложении.

По степени плотности I_d пески искусственного сложения подразделяют на разновидности в соответствии с табл. 7.

Таблица 7

Разновидность песков	Степень плотности I_d , д.е.
Слабоуплотненный	0...0,33
Среднеуплотненный	0,33...0,66
Сильноуплотненный	0,66...1,00

1.10. Показатели пластичности грунта

Пластичность – это способность грунта под внешним воздействием изменять форму без разрушения или разрыва сплошности и со-

хранять приданную ему форму после устранения действия внешней силы. Пластичность наблюдается в определенном для каждого конкретного грунта интервале значений его влажности.

Влажности, ограничивающие интервал проявления пластических свойств грунтов, называют *пределами пластичности* или *характерными влажностями*.

Влажность, при которой грунт переходит из пластичного состояния в текучее, называют *верхним пределом пластичности* или *границей текучести*. В текучем состоянии грунт может рассматриваться как тяжелая вязкая жидкость.

Влажность, при которой грунт переходит из пластичного состояния в твердое, называют *нижним пределом пластичности* или *границей раскатывания*. В твердом состоянии изменение формы грунта сопровождается появлением в нем разрывов.

Определение границы текучести W_L производится методом балансного конуса (рис. 6), а границы раскатывания W_P – путем раскатывания грунтового теста в жгут (ГОСТ 5180-2015 [6]).

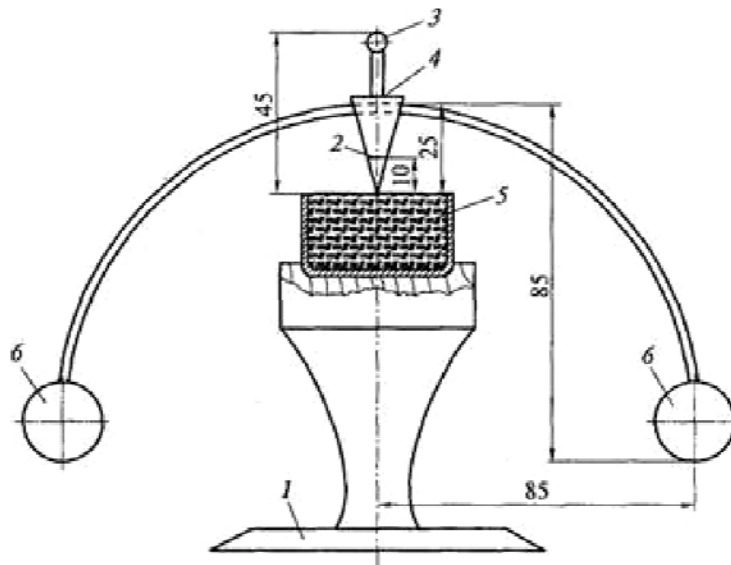


Рис. 6. Балансный конус А.М. Васильева для определения границы текучести грунта: 1 – подставка; 2 – метка на конусе; 3 – ручка; 4 – конус; 5 – стаканчик с образцом грунта; 6 – балансные шарики

Интервал влажности между пределами пластичности характеризуется *числом пластичности* I_p и используется как классификационный показатель глинистого грунта

$$I_p = W_L - W_P.$$

Пределы и число пластичности зависят от минералогического состава и дисперсности грунта (показатели состава). (Дисперсность грунтов – степень раздробленности грунтов.)

По числу пластичности I_p глинистые грунты подразделяют на разновидности в соответствии с табл. 8.

Таблица 8

Разновидность глинистых грунтов	Число пластичности I_p , %
Супесь	1...7
Суглинок	7...17
Глина	>17

Примечание. Илы подразделяют по значениям числа пластичности, указанным в таблице, на супесчаные, суглинистые и глинистые.

По числу пластичности I_p и содержанию песчаных частиц глинистые грунты подразделяют на разновидности в соответствии с табл. 9.

Таблица 9

Разновидность глинистых грунтов	Число пластичности I_p , %	Содержание песчаных частиц (2...0,05 мм), % по массе
Супесь:		
– песчанистая	1...7	≥50
– пылеватая	1...7	<50
Суглинок:		
– легкий песчанистый	7...12	≥40
– легкий пылеватый	7...12	<40
– тяжелый песчанистый	12...17	≥40
– тяжелый пылеватый	12...17	<40
Глина:		
– легкая песчанистая	17...27	≥40
– легкая пылеватая	17...27	<40
– тяжелая	>27	Не регламентируется

Строительные свойства глинистых (связных) грунтов определяются их влажностью. В зависимости от влажности грунт может находиться в твердом, пластичном и текучем состояниях.

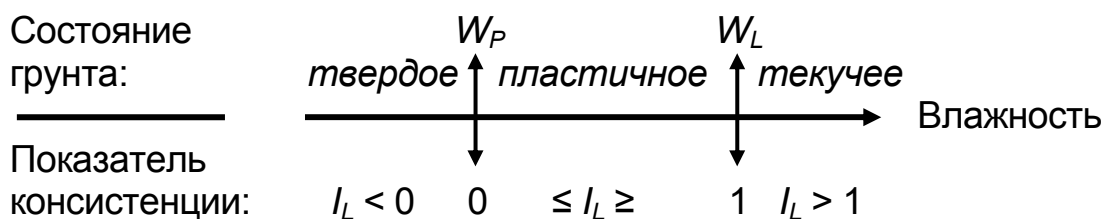
Для определения состояния глинистых грунтов вычисляют *показатель текучести (консистенции)* I_L по формуле

$$I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p}, \text{ [д.е.]},$$

где W – природная влажность грунта, [д.е.].

Показатель текучести (консистенции) зависит от минералогического состава, дисперсности грунта и его влажности.

Пределы изменения показателя консистенции можно наглядно представить в виде следующего графика



По показателю текучести (консистенции) I_L глинистые грунты (непросадочные) подразделяют на разновидности в соответствии с табл. 10.

Таблица 10

Разновидность глинистых грунтов	Показатель текучести I_L , д.е.
<i>Супесь:</i> – твердая – пластичная – текучая	$I_L < 0$ $0 \leq I_L \leq 1,0$ $I_L > 1,0$
<i>Суглинки и глины:</i> – твердые – полутвердые – тугопластичные – мягкопластичные – текучепластичные – текучие	$I_L < 0$ $0 \leq I_L \leq 0,25$ $0,25 < I_L \leq 0,50$ $0,50 < I_L \leq 0,75$ $0,75 < I_L \leq 1,0$ $I_L > 1,0$

При влажности, приблизительно равной или немного меньшей границы раскатывания, грунт пригоден для производства земляных работ при отсыпке и уплотнении грунтов земляного полотна. С переходом в пластичное состояние грунт начинает налипать на рабочие органы землеройных машин и производство земляных работ становится затруднительным и даже невозможным. В текучем состоянии грунт почти полностью теряет устойчивость.

Простота и доступность методов определения пределов пластичности дают возможность широко использовать их для предварительной характеристики пород на разных стадиях инженерных изысканий.

В частности, в строительных правилах СП целый ряд весьма важных показателей (расчетные давления на грунт, нормативные значения удельных сцеплений C^H и углов внутреннего трения φ^H) определяются по величине показателя консистенции I_L .

1.11. Оптимальная влажность $W_{\text{опт}}$ и максимальная плотность грунта $\rho_{d\text{max}}$

В дорожных сооружениях – земляном полотне, покрытиях и основаниях дорожных покрытий – устойчивость грунта тем выше, чем больше его плотность. Наибольшая устойчивость грунта может быть обеспечена лишь при условии уплотнения его до наибольшей максимальной плотности при оптимальной влажности, соответствующей данному грунту.

Влажность, при которой достигается наибольшая плотность сухого грунта $\rho_{d\text{max}}$ при одинаковой (стандартной) затрате работы на уплотнение, называют *оптимальной*, а плотность – максимальной.

Для связных (глинистых) грунтов $W_{\text{опт}}$ связана с характерными влажностями грунтов и составляет в среднем $(0,65...0,70) \cdot W_L$.

В лабораторных условиях определение $W_{\text{опт}}$ и соответствующей ей $\rho_{d\text{max}}$ производят на приборе стандартного уплотнения СоюздорНИИ (рис. 7).

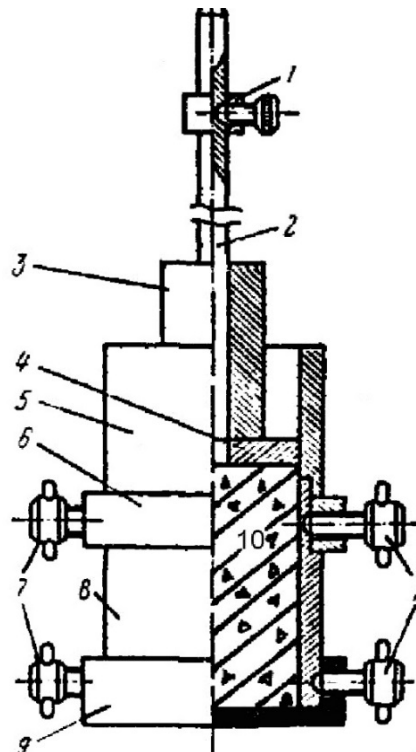


Рис. 7. Прибор СоюздорНИИ для стандартного уплотнения грунтов:

- 1 – ограничительное кольцо; 2 – стержень; 3 – груз-уплотнитель;
- 4 – наковальня; 5 – насадный цилиндр; 6 – элемент крепления
- разъемного цилиндра; 7 – зажимные винты;
- 8 – разъемный цилиндр; 9 – днище; 10 – образец грунта

Метод заключается в последовательном уплотнении в приборе стандартного уплотнения при одинаковых условиях пробы грунта с постоянным увеличением его влажности (ГОСТ 22733-2002 [7]).

Испытания грунта на уплотнение с наращиванием влажности проводят до тех пор, пока плотность сухого грунта ρ_d не станет уменьшаться. По полученным при каждом уплотнении значениям ρ_d и W_i строят график $\rho_d = f(W_i)$ (рис. 8).

За максимальную плотность грунта $\rho_{d_{max}}$ принимают наибольшее значение ρ_d , а за оптимальную влажность $W_{опт}$, влажность, соответствующую максимальной плотности сухого грунта.

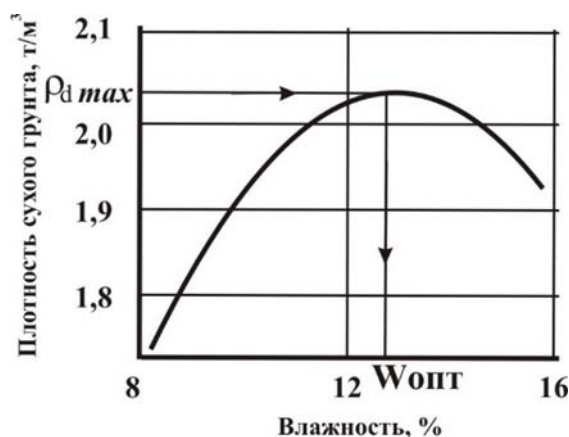


Рис. 8. Определение оптимальной влажности $W_{опт}$ и максимальной плотности $\rho_{d_{max}}$ грунтов при стандартном уплотнении

Чем больше сжимающие напряжения, которые будет испытывать насыпной грунт в сооружении, тем больше должно быть его уплотнение. Максимальная степень уплотнения необходима в верхних слоях насыпи и в слоях, входящих в конструкцию дорожной и аэродромной одежды, так как эти слои испытывают максимальные напряжения от временных нагрузок.

Искусственное уплотнение грунта выполняют специальными машинами (катки, трамбовки, вибраторы). При этом грунтовые частицы укладываются более плотно и уменьшают объем пор, ранее заполненных воздухом. В результате повышается прочность грунта, понижаются его водопроницаемость и высота капиллярного поднятия, а также уменьшается и ускоряется осадка насыпных грунтов.

Эффект уплотнения грунтов оценивают по достигнутой величине коэффициента уплотнения.

Коэффициент уплотнения грунта – отношение фактической плотности сухого грунта ρ_d в конструкции к максимальной плотности $\rho_{d_{\max}}$ того же грунта, определяемой в лаборатории при испытании методом стандартного уплотнения

$$K = \frac{\rho_d}{\rho_{d_{\max}}}.$$

Величину K принимают по соответствующим нормативным документам, например по СП 34.13330.2012 [8] в основании дорожной одежды (рабочий слой) значение K должно быть не менее 0,98...1,0, а в нижних слоях насыпи допускается $K = 0,95...0,98$.

Требуемую плотность грунтов $\rho_{d_{\text{треб}}}$ в основании искусственных покрытий или земляном полотне определяют по максимальной плотности $\rho_{d_{\max}}$ и коэффициенту уплотнения K

$$\rho_{d_{\text{треб}}} = \rho_{d_{\max}} \cdot K.$$

2. ПОКАЗАТЕЛИ ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТА

2.1. Коэффициент фильтрации грунта $K_{\text{ф}}$

Коэффициент фильтрации характеризует водопроницаемость грунта, т.е. его способность пропускать через себя воду. Численно коэффициент фильтрации $K_{\text{ф}}$ равен скорости фильтрации воды через грунт при градиенте напора равном единице и линейном законе фильтрации (ГОСТ 25584-2016 [9]).

Водопроницаемость песчаных и глинистых грунтов, в которых наблюдается ламинарный характер движения воды, подчиняется закону Дарси

$$Q = K_{\text{ф}} \cdot F \cdot I,$$

где Q – расход воды, протекающей через грунт за единицу времени, м³/сут; $K_{\text{ф}}$ – коэффициент фильтрации, м/сут; F – площадь сечения грунта, через которую происходит фильтрация воды, м²; I – гидравлический градиент.

Гидравлический градиент характеризует потерю напора на единицу длины пути фильтрации (рис. 9) и находится по уравнению

$$I = dy/dx = \operatorname{tg} \alpha$$

или

$$I = \frac{\Delta H}{L},$$

где ΔH – разность уровней (или гидравлический напор), $\Delta H = H_2 - H_1$; H_1 и H_2 – уровни воды в наблюдательных скважинах 1 и 2 относительно поверхности земли, L – длина пути фильтрации, м.



Рис. 9. Режим потока подземных вод

В крупнообломочных и трещиноватых грунтах при больших скоростях течения характер потока изменяется от ламинарного (линейного) к турбулентному (вихревому).

Величина K_f зависит от гранулометрического состава, структуры и пористости грунта, формы грунтовых частиц, температуры воды и содержания в ней растворенных веществ, в том числе и воздуха (газов). Коэффициент фильтрации для чистых крупнозернистых песков составляет несколько десятков метров в сутки. Чем больше окатанность частиц, слагающих грунт, тем больше (при прочих равных условиях) его водопроницаемость. С повышением содержания пылеватых и глинистых частиц в грунте величина K_f резко снижается. Для глин K_f составляет всего несколько сантиметров в год.

Коэффициент фильтрации определяется размером пор или раскрытием трещин, а также сильно зависит от извилистости поровых ходов. Размер пор и их форма в значительной степени определяются дисперсностью грунтов. Увеличение дисперсности грунтов уменьшает водопроницаемость грунтов.

Процессы, ведущие к изменению размера пор и их количества, влияют на водопроницаемость грунтов. Так, в результате разрушения

структуры глинистых и лёссовых грунтов при уплотнении происходит значительное уменьшение их водопроницаемости.

Размер пор зависит также от плотности грунта, и с её увеличением он уменьшается, что приводит к снижению коэффициента фильтрации.

С увеличением температуры воды уменьшается её вязкость, а водопроницаемость грунтов увеличивается. Наличие растворенных солей и газов в воде приводит к увеличению её плотности и снижению коэффициента фильтрации.

Водопроницаемость грунта должна учитываться при использовании грунта как материала для возведения насыпей, при устройстве водоотводных и осушительных (дренажных) сооружений, при расчетах скорости уплотнения грунта под нагрузкой и т.д.

Ниже в табл. 11 приведены средние значения K_f для различных грунтов.

Таблица 11

Коэффициент фильтрации различных грунтов
и характеристика их по водопроницаемости
(по Н.Н. Маслову)

Грунты	Коэффициент фильтрации, м/сут	Характеристика грунтов по водопроницаемости
Глины, монолитные скальные грунты	до $5 \cdot 10^{-5}$	Практически водонепроницаемые
Суглинки, тяжелые супеси, не трещиноватые песчаники	до $5 \cdot 10^{-3}$	Весьма слабо водопроницаемые
Супеси, слабо трещиноватые глинистые сланцы, песчаники, известняки и т.д.	до 0,5	Слабо водопроницаемые
Пески тонко- и мелкозернистые, трещиноватые скальные грунты	до 5	Водопроницаемые
Пески среднезернистые, скальные грунты повышенной трещиноватости	до 50	Хорошо водопроницаемые
Галечники, гравелистые пески, сильно трещиноватые скальные грунты	до 500 и более	Сильно водопроницаемые

Коэффициент фильтрации грунтов может быть определен в полевых условиях методами откачек, нагнетания, налива в шурфы и в лабораторных условиях по ГОСТ 25584-2016 [9] (рис. 10).

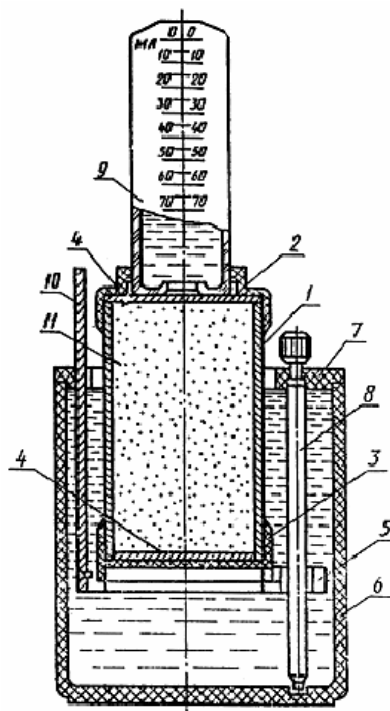


Рис. 10. Схема фильтрационного прибора КФ-00М: 1 – цилиндр; 2 – муфта; 3 – перфорированное дно; 4 – латунная сетка; 5 – подставка; 6 – корпус; 7 – крышка; 8 – подъемный винт; 9 – стеклянный баллон со шкалой объема фильтрующейся жидкости; 10 – планка со шкалой градиентов напора; 11 – испытуемый образец грунта

Примечание. Для определения коэффициента фильтрации допускается применять приборы, конструкция которых подобна КФ-00М (КФ-01, ПКФ-1 Союздорнии и др.).

2.2. Высота капиллярного поднятия воды в грунте H_k

Грунты обладают способностью поднимать воду по капиллярным порам снизу-вверх вследствие воздействия капиллярных сил, которые возникают на границах раздела различных компонентов грунта.

Высота капиллярного поднятия H_k – наибольшая (равновесная) высота подъема воды по порам грунта, отсчитываемая от зеркала грунтовых вод (равная мощности капиллярной каймы).

Высота капиллярного поднятия воды в грунтах служит расчетной характеристикой и учитывается, например, при решении вопросов о глубине заложения фундаментов; необходимом понижении уровня грунтовых вод для предотвращения капиллярного увлажнения, порчи основания и земляного полотна автомобильных дорог.

Поднятие воды в грунте по капиллярам можно представить, как результат действия подъемной силы вогнутых менисков (рис. 11).

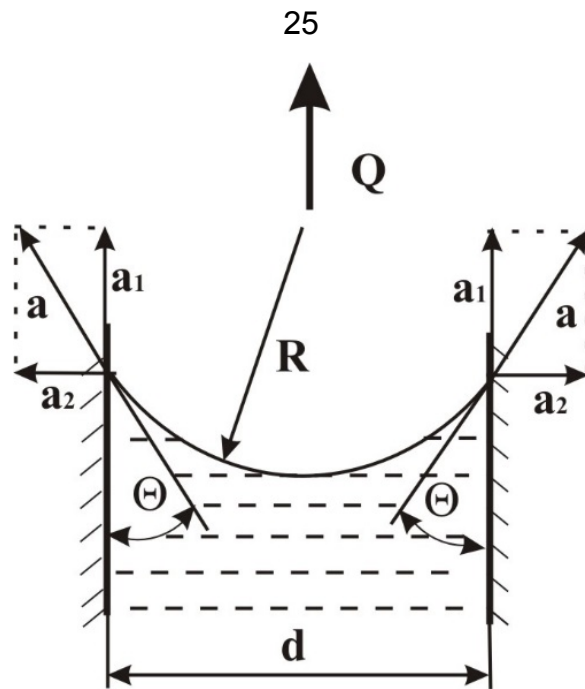


Рис. 11. Схема действия капиллярных сил

Величину подъемной силы можно определить по формуле Лапласа

$$Q = \frac{2a}{R},$$

где a – поверхностное натяжение жидкости; R – радиус кривизны мениска, который связан прямой зависимостью с диаметром капилляра

$$R = \frac{d}{2 \cos \Theta} = \frac{r}{\cos \Theta};$$

где d , r – соответственно диаметр и радиус капилляра; Θ – краевой угол смачивания.

Однако следует отметить, что применение формулы Лапласа для грунтов не совсем верно, так как она выведена для двухкомпонентной среды, а грунт представляет собой трехкомпонентную среду (см. рис. 3).

Капиллярные свойства грунтов обычно характеризуются максимальной величиной капиллярного поднятия и скоростью капиллярного поднятия.

На высоту и скорость капиллярного поднятия влияют гранулометрический и химико-минералогический составы грунтов, их структурно-текстурные особенности, плотность грунта, окатанность частиц, а также состав водного раствора и температура. Чем больше начальная скорость капиллярного движения воды, тем быстрее затухает это движение и, наоборот, чем медленнее происходит поднятие капил-

лярной воды, тем большей высоты оно достигает (рис. 12). Во всех случаях скорость поднятия наибольшая в начальный момент времени.

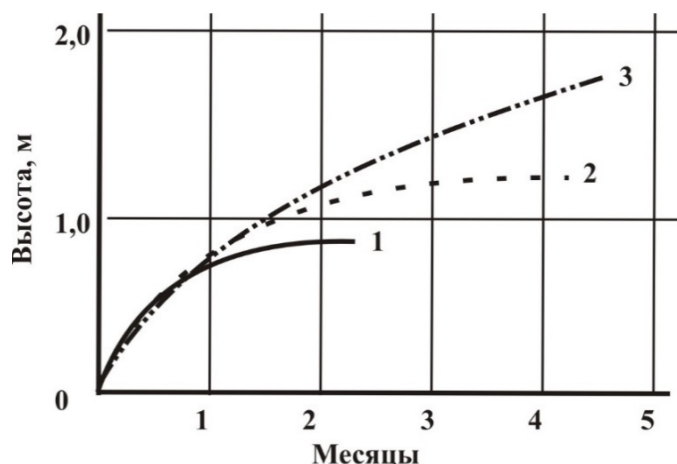


Рис. 12. Зависимость высоты капиллярного поднятия воды в грунтах от времени: 1 – супесь легкая крупная; 2 – суглинок тяжелый пылеватый; 3 – глина покровная пылеватая

Высота и скорость капиллярного поднятия сильно зависят от гранулометрического состава грунтов, поскольку он в первую очередь определяет размер и характер пор. С возрастанием дисперсности грунтов (увеличение дисперсности грунтов – повышение содержания мелких частиц – пылеватых или глинистых в грунте) размер пор в них уменьшается, а в соответствии с этим увеличивается высота капиллярного поднятия и, наоборот, уменьшается скорость подъема воды. Эти капиллярные свойства грунта связаны между собой обратной зависимостью.

Высота капиллярного поднятия в среднезернистых песках равна 0,15...0,35 м, в мелкозернистых – 0,35...1,0 м, в супесях она возрастает до 1...1,5 м, в суглинках – до 3...4 м, в глинах – до 8 м, а в лёссах – до 4 м.

В зависимости от минералогического состава и степени окатанности частиц грунта высота капиллярного поднятия будет разная даже при одинаковой степени дисперсности.

Минералогический состав и форма частиц обуславливают различную величину пор и самой пористости и оказывают влияние на взаимодействие воды с минеральными частицами, т.е. на их смачиваемость, определяемую краевым углом смачивания, от величины которого зависит высота капиллярного поднятия.

Высота капиллярного поднятия вода в грунтах зависит также от первоначального состояния их увлажнения и во влажных грунтах в 3...4 раза больше, чем в сухих.

Адсорбированный и заземленный в порах грунта воздух уменьшает величину капиллярного поднятия.

Большое влияние на высоту и скорость капиллярного поднятия оказывает структурно-текстурные особенности грунтов. Так, при наличии зернистой и комковатой структуры капиллярное движение воды вскоре прерывается.

С увеличением плотности грунтов высота капиллярного поднятия закономерно уменьшается вследствие того, что при уплотнении образуются ультрапоры, по которым передвижение капиллярной воды не происходит, так как они полностью заполнены прочносвязанной водой.

На высоту и скорость капиллярного поднятия также влияет химический состав воды, который может увеличивать или, наоборот, уменьшать высоту капиллярного поднятия.

По высоте капиллярного поднятия H_k грунты подразделяют согласно ГОСТ 25100-2011 (табл. 12)

Таблица 12

Разновидность грунтов	Высота капиллярного поднятия H_k , м
С малой высотой	$\leq 1,0$
Со средней высотой	1,0...2,5
С большой высотой	$> 2,5$

Высота капиллярного поднятия в глинах больше, чем в пылеватых грунтах, однако последние больше подвержены *морозному пучению*.

Морозное пучение грунтов – процесс увеличения объёма и деформирования дисперсных грунтов при промерзании и образования выпуклых форм на их поверхности, как следствие расширения грунтовой влаги при фазовом переходе вода-лёд и разуплотнения скелета грунта.

Наиболее подвержены морозному пучению пылеватые грунты, в которых больше рыхлосвязанной воды и хорошая водопроницаемость. (Рыхлосвязанная вода покрывает тонкой пленкой поверхности отдельных частиц, пор, трещин и других пустот в горных породах по-

верх слоя гигроскопической (прочносвязанной) воды, перемещается как жидкость в направлении от более толстых пленок к более тонким). При промерзании грунтов имеет место миграция воды из зоны с более высокой температурой к зоне промерзания. Вследствие чего образуются бугры пучения. Мало склонны к пучению песчаные и более грубые дисперсные грунты без мелкозёма, содержащие преимущественно свободную (гравитационную) воду.

Высота капиллярного поднятия определяется методами, которые П.И. Фадеевым подразделяются на:

- методы непосредственного замера капиллярной каймы в обнажениях, шурфах и других горных выработках;
- методы, основанные на изучении распределения влажности по глубине;
- методы определения капиллярного, поднятия на отдельных образцах с ненарушенной или нарушенной структурой (в стеклянных трубках, капилляриметрах, на монолитах и т.п.);
- расчетные методы, основанные на использовании тех или иных формул.

Наиболее точные данные дают методы первых двух групп, однако их применение часто ограничивается положением уровня грунтовых вод, характером и временем инфильтрации атмосферных осадков, и другими факторами.

Методы третьей группы применяются как в полевых, так и в лабораторных условиях. Они более просты и экономичны, но дают менее точные результаты. Ориентировочно высоту капиллярного поднятия (подземных) вод в песчано-глинистых грунтах можно определить по табл. 13.

Таблица 13

Вид грунта	Высота капиллярного поднятия H_k , м
Песок крупный	менее 0,1
Песок средней крупности	0,1...0,4
Песок мелкий	0,4...0,8
Песок пылеватый	0,8...1,2
Супесь	1,2...3,5
Суглинок	3,5...6,5
Глина	6,5...10,0

3. ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЧНОСТИ ГРУНТОВ

Прочность горных пород и грунтов оценивается по величине **сопротивляемости сдвигу** S_{pw} , которая характеризует величину удельного сопротивления грунта воздействию сдвигающих (касательных) напряжений, возникающих при действии на грунт различных инженерных сооружений. Сопротивляемость грунтов сдвигу в общем случае может быть представлена зависимостью

$$S_{pw} = p \operatorname{tg} \varphi_w + \Sigma_w + C_c,$$

где p – нормальное напряжение, действующее в грунте по данной площадке; φ_w – угол внутреннего трения при влажности грунта W ; $\operatorname{tg} \varphi_w$ – коэффициент внутреннего трения грунта; $p \cdot \operatorname{tg} \varphi_w$ – силы внутреннего трения; Σ_w – связность грунта при влажности W ; C_c – структурное сцепление.

Силы трения возникают при прижатии одной частицы грунта к другой под действием сжимающих нормальных p напряжений и проявляются при взаимном смещении этих частиц. Силы трения в грунтах обусловлены главным образом, наличием в них песчаных и пылеватых частиц.

Для сыпучих грунтов (песка, гравия, гальки и т.п.) угол внутреннего трения зависит от плотности сложения грунта, характеризуемого его пористостью n , а силы внутреннего трения в таких грунтах описываются выражением $S_{pn} = p \operatorname{tg} \varphi_n$.

Для глинистых грунтов угол внутреннего трения меняется не только от количества песчаных и пылеватых частиц, но и от степени увлажнения грунта. Поэтому силы внутреннего трения в глинистых грунтах описываются выражением $S_{pw} = p \operatorname{tg} \varphi_w$.

Связность Σ_w присуща глинистым несцементированным породам и в основном определяет их прочность, имеет водно-коллоидную природу, носит обратимый (восстанавливающийся) характер и обуславливает пластичность глинистых грунтов. Связность является следствием склеивающей способности водно-коллоидных оболочек, образующихся вокруг глинистых тонкодисперсных частиц.

При увлажнении глинистого грунта водно-коллоидные оболочки постепенно утолщаются, в результате чего силы связности между

частицами ослабевают. При высокой степени насыщения глинистого грунта водой он практически полностью теряет свою связность.

Структурное сцепление C_c обусловлено наличием в породе жестких цементационных (песчаник) или кристаллизационных (магматические породы) связей. Структурное сцепление особенно характерно для скальных пород, где оно практически полностью определяет прочность породы.

В глинистых породах структурное сцепление обусловлено процессами синерезиса и проявляется значительно слабее.

При разрушении структурные связи не восстанавливаются (носят необратимый характер).

В зависимости от характера грунта в нем могут превалировать внутренние связи той или иной природы.

Все грунты могут быть разбиты на 3 разновидности: *сыпучие, глинистые, скальные*.

3.1. Сыпучие (несвязные) грунты

В сопротивляемости сдвигу сыпучих грунтов наибольшее значение имеют силы внутреннего трения $ptg\varphi_n$, и отчасти силы сцепления, проявляющиеся при большой плотности сыпучего грунта вследствие взаимного зацепления грунтовых зерен.

Выражение сопротивляемости сдвигу для сыпучих грунтов принимает вид

$$S_{pn} = ptg\varphi_n + C_n,$$

где C_n – сцепление-зацепление при данной плотности (по пористости n) грунта.

Угол внутреннего трения φ_n сыпучих грунтов зависит от крупности и степени окатанности грунтовых зерен, а также от однородности и плотности грунта. В зависимости от указанных факторов угол внутреннего трения сыпучих грунтов варьирует в пределах от 25 до 40° и выше. Величина сцепления-зацепления C_n для песков изменяется от 0 (предельно рыхлое состояние) до 0,03...0,05 МПа (0,3...0,5 кгс/см²).

В песчано-гравелисто-галечниковых грунтах сцепление-зацепление в ряде случаев достигает 0,1...0,2 МПа (1...2 кгс/см²).

В графической форме зависимость $S_{pn} = f(p)$ применительно к различной плотности сыпучего грунта имеет вид, представленный на рис. 13.

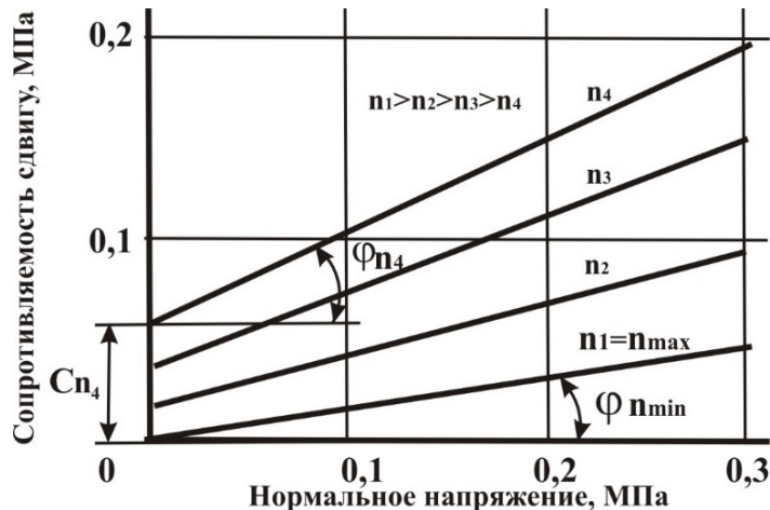


Рис. 13. Зависимость сопротивляемости сдвигу сыпучего грунта от нормальных напряжений для различной его плотности

3.2. Глинистые (связные) грунты

Глинистые грунты подразделяют на 3 группы:

а) скрытопластичные глинистые грунты

К этой группе относятся большинство глинистых грунтов (супеси, суглинки, глины), которые имеют в своем составе достаточное количество песчаных и пылеватых частиц, образующих как бы несущий структурный скелет грунта, заполненный более тонкими глинистыми частицами. Сопротивляемость сдвигу таких грунтов определяется силой трения $p \operatorname{tg} \varphi_w$, связностью Σ_w и структурным сцеплением C_c , которое может иметь различное значение ($C_c \geq 0$).

Выражение сопротивляемости сдвигу скрытопластичных глинистых грунтов имеет вид

$$S_{PW} = p \operatorname{tg} \varphi_w + \Sigma_w + C_c = p \operatorname{tg} \varphi_w + C_w,$$

где C_w – общее сцепление грунта при влажности W .

Графически зависимость $S_{PW} = f(p)$ применительно к различной влажности скрытопластичного глинистого грунта имеет вид, представленный на рис. 14.

Сопротивляемость сдвигу таких грунтов в сильной степени зависит от их консистенции. Так, угол внутреннего трения φ_w может изменяться от 6° при текучей консистенции до 28° при твердой консистенции грунта, а общее сцепление C_w – от 0 до 0,1 МПа соответственно.

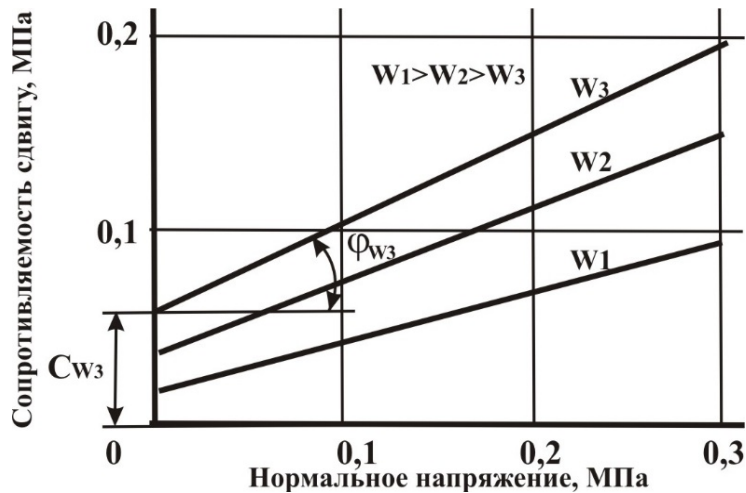


Рис. 14. Зависимость сопротивляемости сдвигу скрытопластичного глинистого грунта от нормальных напряжений для различной его влажности

б) пластичные глинистые грунты (идеальные глины)

К этой группе относятся молодые по возрасту глинистые грунты, состоящие главным образом из глинистых частиц (тяжелые суглинки и жирные глины обычно в мягкопластичной консистенции). В таких грунтах силы внутреннего трения практически отсутствуют ($\phi_w = 0$), а структурное сцепление породы ничтожно ($C_c = 0$). Их прочность целиком определяется связностью Σ_w и выражение сопротивляемости сдвигу имеет вид

$$S_w = \Sigma_w.$$

Графическая зависимость $S_w = f(p)$ для различной влажности пластичного глинистого грунта W представлена на рис. 15.

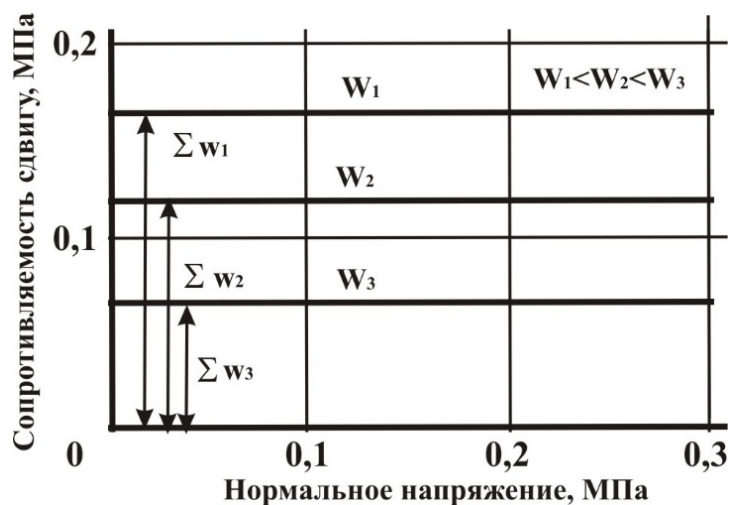


Рис. 15. Зависимость сопротивляемости сдвигу пластичного глинистого грунта от нормальных напряжений для различной его влажности

Следовательно, прочность пластичных глинистых грунтов зависит от их влажности и не зависит от величины нормальной нагрузки.

в) жесткие глинистые грунты

К этой группе относятся почти все коренные (до четвертичного возраста) глинистые породы, характеризующиеся, как правило, повышенной прочностью за счет их высокой плотности и цементации. Силы связности Σ_w за счет процессов старения коллоидов во времени переходят в жесткие структурные связи и оказываются ничтожными по сравнению с силами структурного сцепления C_c . Угол внутреннего трения для коренных пород практически не зависит от влажности.

Выражение сопротивляемости сдвигу жестких глинистых грунтов имеет вид

$$S_p = p \operatorname{tg} \varphi + C_c.$$

Угол внутреннего трения для таких грунтов обычно составляет $17...30^\circ$, а структурное сцепление $C_c = 0,06...0,3$ МПа ($0,6...3,0$ кгс/см²).

Графическая зависимость $S_p = f(p)$ для жестких глинистых грунтов имеет вид, представленный на рис. 16.

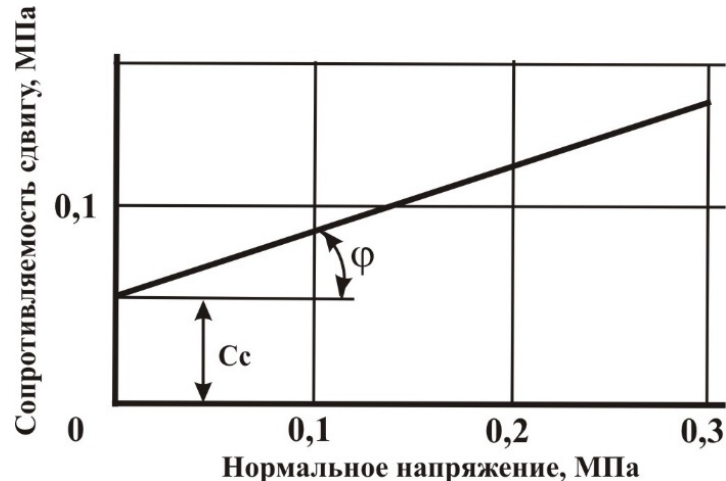


Рис. 16. Зависимость сопротивляемости сдвигу жесткой глины от нормальных напряжений

3.3. Скальные грунты

К скальным грунтам относятся магматические и метаморфические породы, а также сцементированные осадочные породы (например, известняк, песчаник и т.п.). Прочность таких пород определяется структурным сцеплением C_c .

Силы внутреннего трения в монолитных скальных породах имеют подчиненное и крайне малое значение по сравнению со структурным сцеплением, что позволяет принять $\varphi = 0$.

Связность в подобных породах не находит своего проявления ($\Sigma_w = 0$). Поэтому выражение сопротивляемости сдвигу скальных пород имеет вид

$$S = C_c.$$

Сопротивляемость сдвигу скальной породы в куске, лишенном трещин, оказывается очень высокой – 10,0...100,0 МПа (100...1000 кгс/см²) в зависимости от породы.

Графическая зависимость $S = f(p)$ для таких пород представлена на рис. 17.

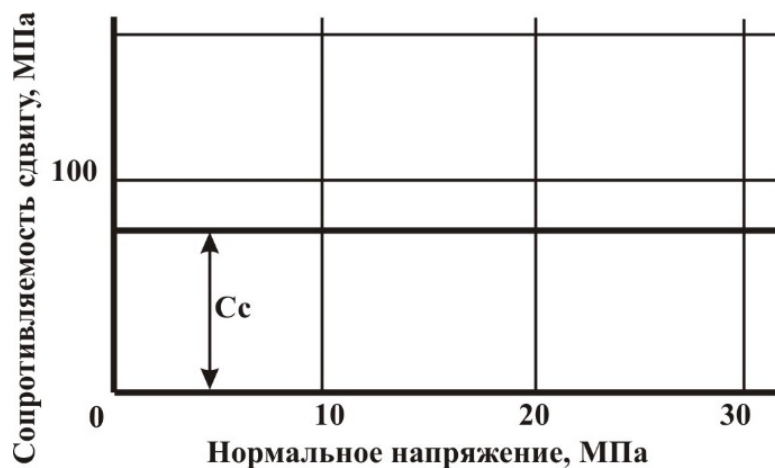


Рис. 17. Зависимость сопротивляемости сдвигу от нормальных напряжений для скального грунта в монолите

В условиях природного залегания скальный массив всегда разбит трещинами, поэтому сопротивляемость сдвигу по трещинам будет определяться зависимостью

$$S_p = p \operatorname{tg} \varphi + C,$$

где φ – угол трения скальной породы вдоль трещин; C – сцепление, обусловленное шероховатостью и зацеплением отдельных блоков породы при их смещении вдоль трещин.

При этом угол трения φ и сцепление C изменяются в очень широких пределах в зависимости от интенсивности трещиноватости массива, размера блоков, шероховатости поверхности трещин, состава и состояния заполнителя трещин и т.п.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ ГРУНТОВ НА СДВИГ

Определение сдвиговых характеристик грунта φ и C осуществляется на основе данных, полученных при испытании в лаборатории образцов грунта. При этом используют приборы различной конструкции с различными схемами испытания: *прямой (одноплоскостной) сдвиг, трехосное сжатие, одноосное сжатие* и т.д. (ГОСТ 12248-2010 [10]).

4.1. Испытания на приборах прямого сдвига

Сдвиговой прибор (схема приведена на рис. 18) состоит из срезователя, включающего в себя две не связанные между собой обоймы разделенные зазором в 1...2 мм (ширина которого зависит от крупности частиц грунта), системы передачи нормального p к плоскости сдвига давления; системы передачи касательной (сдвигающей) Q нагрузки.

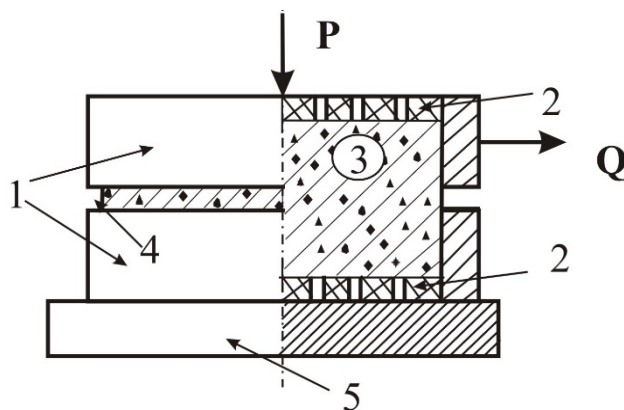


Рис. 18. Схема прибора прямого сдвига: 1 – верхняя и нижняя обоймы прибора; 2 – пористые штампы; 3 – образец грунта; 4 – зазор; 5 – станина прибора

Испытания образцов грунта на срез проводят в одноплоскостных приборах по принудительно заданной плоскости среза путем сдвига одной части образца относительно другой его части повышением горизонтальной нагрузки Q при предварительном нагружении образца нагрузкой P , нормальной к плоскости среза.

При площади сечения образца ω нормальное напряжение $p = \frac{P}{\omega}$

и сдвигающее напряжение $\tau = \frac{Q}{\omega}$.

Критическое значение сдвигающего напряжения τ , приводящего к сдвигу образца, численно равно сопротивляемости грунта сдвигу S_{PW} при данном нормальном напряжении p .

Необходимым условием при определении показателей прочности на сдвиг **сыпучих грунтов** является постоянство плотности грунта при испытаниях под различными вертикальными нагрузками. Однако выполнить его практически невозможно, поэтому П.А. Фонарёв разработал следующую методику проведения сдвиговых испытаний сыпучих грунтов.

Под каждой нормальной нагрузкой производится сдвиг нескольких (не менее четырех) образцов различной пористости. По результатам испытаний строят график $S_{pn} = f(n)$ (рис. 19, а), который затем перестраивают в графики $S_{pn} = f(p)$ (рис. 19, б) для различных значений пористости n с одинаковым масштабом напряжений по оси абсцисс p и по оси ординат S_{pn} .

Пример построения подобного графика приведен на рис. 19.

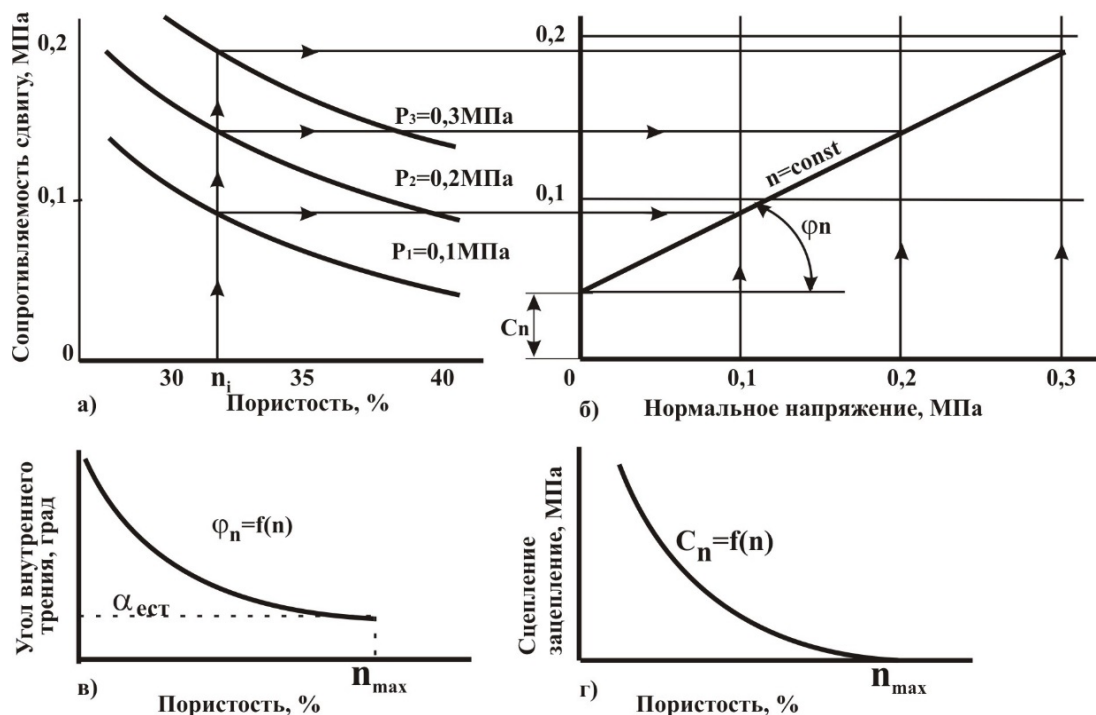


Рис. 19. Определение показателей прочности сыпучих грунтов на сдвиг (а, б) и их зависимости от пористости (в, г)

Угол наклона прямой линии, построенной по опытным значениям S_{p1} , S_{p2} , S_{p3} , к горизонтали отвечает значению угла внутреннего трения

сыпучего грунта φ_n при данной его плотности (пористости n). Отрезок на оси ординат, отсекаемый построенной прямой, определяет собой величину сцепления-зацепления C_n сыпучего грунта. Построив серию зависимостей $S_{pn} = f(p)$, отвечающих различной плотности данного грунта, можно построить зависимость угла внутреннего трения φ_n и сцепления-зацепления C_n сыпучего грунта от его пористости (рис. 19, в, г).

Определение сдвиговых характеристик для **скрытопластичных и пластичных глинистых грунтов** по данным испытаний образцов на приборе прямого сдвига также оказывается сложным, так как сдвиговые характеристики φ_w , C_w подлежат определению применительно к строго фиксированному их состоянию по плотности-влажности грунта. По данным испытаний на приборах прямого сдвига не представляется возможным получить необходимые три точки испытаний при различных нормальных нагрузках, но с одной и той же влажностью грунта, поскольку чем больше величина нормальной нагрузки, тем больше воды отжимается из образца грунта. Для установления φ_w и C_w при данной влажности грунта W_i применяется метод сдвига образцов глинистого грунта в состоянии их незавершенной консолидации от вертикальной и горизонтальной нагрузок с обработкой результатов по методу «**плотности-влажности**» Н.Н. Маслова.

Под каждой из нормальных нагрузок производится сдвиг не менее четырех образцов, имеющих различную влажность. Различие во влажности может быть достигнуто путем выдерживания образцов в течение различного времени под нагрузкой, при которой будет производиться затем сдвиг. Интенсивность сдвигающей нагрузки должна быть такой, чтобы сдвиг произошел за 1...2 мин (т.н. «быстрый сдвиг»).

Влажность грунта определяют после сдвига путем отбора проб из зоны сдвига.

Результаты испытаний наносят в виде точек на график $S_{PW} = f(W)$ при различных $p = \text{const}$ (рис. 20, а) и затем проводят осредняющие кривые. Полученный график перестраивают в зависимость сопротивляемости сдвигу грунта от нормальной нагрузки $S_{PW} = f(p)$ для различных влажностей грунта W_i (рис. 20, б).

Сдвиговые характеристики φ_w и C_w определяются графически применительно к различным влажностям грунта. При этом напоминаем, что наклон каждой из прямых $S_{PW} = f(p)$ ($W_i = \text{const}$) на графиках

(см. рис. 20, б) отвечает углу внутреннего трения грунта при соответствующей этой прямой влажности W_i . Отрезки, отсекаемые прямыми $S_{PW} = f(p)$ на оси ординат, отвечают значениям общего сцепления C_w в грунте при тех же влажностях. По полученным данным строят зависимости угла внутреннего трения φ_w и общего сцепления C_w грунта от влажности W (см. рис. 20, в, г).

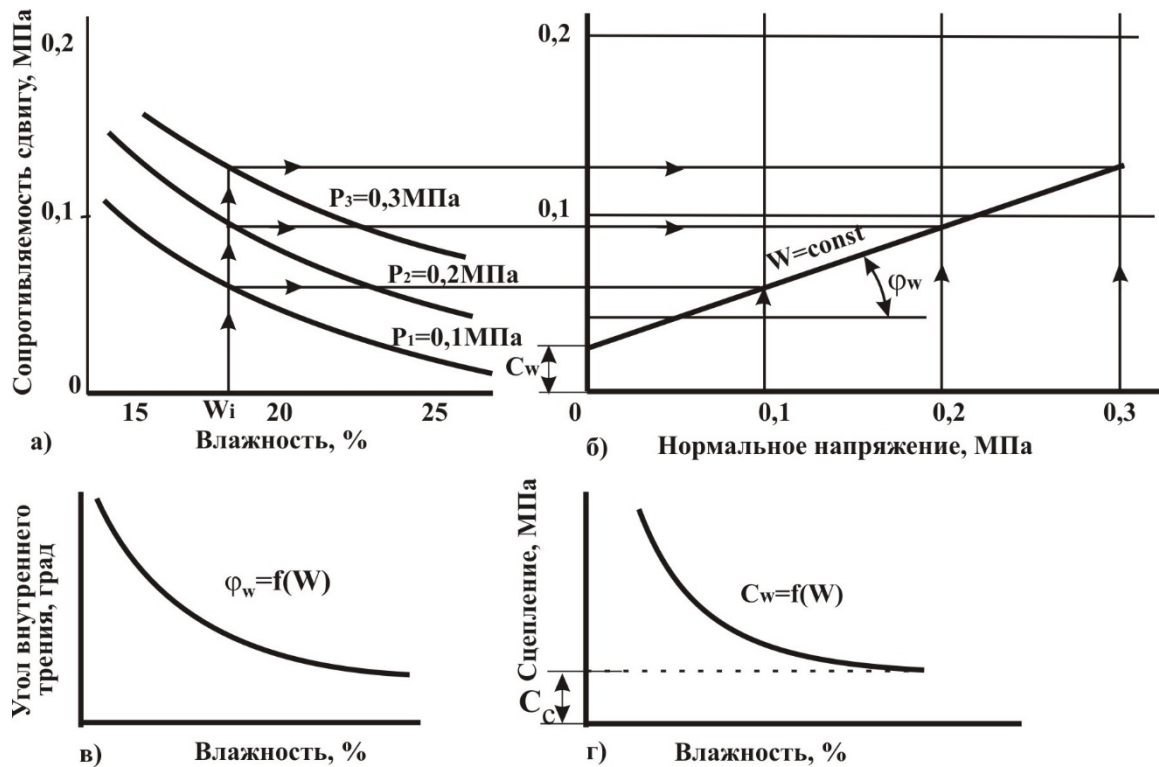


Рис. 20. Определение показателей прочности скрытопластичных глинистых грунтов на сдвиг (а) и их зависимости от влажности (б)

В ряде случаев возникает необходимость выделить из общего сцепления C_w структурное сцепление C_c и связность Σ_w .

Разработаны две методики разделения C_w на C_c и Σ_w .

Первая – графическая – основана, на том, что величина сил связности Σ_w зависит от влажности глинистого грунта, в то время как структурное сцепление от влажности не зависит. Поэтому график зависимости $C_w = f(W)$ по мере увеличения влажности будет стремиться к некоторой асимптоте, отвечающей части общего сцепления C_c , не зависящей от W (рис. 20, г).

Вторая методика – экспериментальная – базируется на том, что силы структурного сцепления C_c носят необратимый характер, а Σ_w – обратимый. Для реализации этой методики, которая получила на-

звание сдвигов «плашек» необходимо после обычного сдвигового испытания монолита провести его повторное сдвиговое испытание по той же поверхности. В результате получим два значения сопротивляемости грунта сдвигу (при одной вертикальной нагрузке): одно при ненарушенной структуре грунта (C_c не нарушено), а второе при C_c , разрушенном предыдущим сдвигом. Проведя испытания грунта при ряде вертикальных нагрузок, строят график $S_{pw} = f(p)$ и объединяют самостоятельными прямыми опыты сдвига монолита и повторных сдвигов (рис. 21). Разница в величинах сцепления, отсекаемого этими прямыми на оси ординат, дает значение C_c .

Необходимо отметить, что для обеспечения лучшего прилегания половинок образца (плашек) друг к другу их зачищают и выдерживают в приборе под вертикальной нагрузкой минут 10...30, только после этого проводят повторный сдвиг.

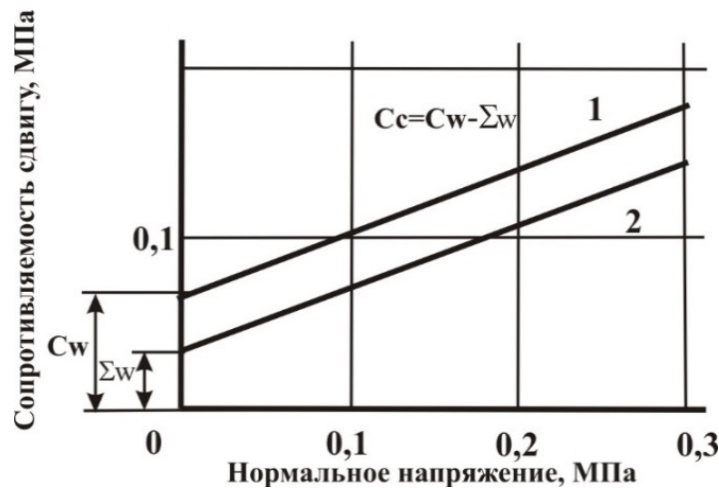


Рис. 21. Зависимость сопротивляемости сдвигу от нормальных напряжений по испытаниям: 1 – сдвиг монолитов; 2 – сдвиг «плашек»

Располагая данными по $\varphi_w = f(W)$ и $C_w = f(W)$ при заданном p , легко можно вычислить значение сопротивляемости грунта сдвигу при любой его влажности.

При испытании образцов пластичных глинистых грунтов точки зависимости $S_{pw} = f(W)$ для различных значений нагрузок p ложатся практически на одну кривую (рис. 22, а). Перестроение этой зависимости в зависимость $S = f(p)$ свидетельствует о независимости сопротивляемости таких грунтов сдвигу от величины нормальной нагрузки p (см. рис. 22, б).



Рис. 22. Сопrotивляемость сдвигу пластичных глинистых грунтов

4.2. Испытания в приборах трехосного сжатия (стабилометрах)

При наличии в природных условиях больших боковых давлений, а также при испытании тонкослоистых грунтов (с ленточной структурой), ослабленная плоскость которых может не совпасть с принудительной плоскостью сдвига при испытании образца на сдвиговом приборе прямого сдвига, производят испытания образцов грунта в условиях трехосного напряженного состояния (ГОСТ 12248-2010 [10]). Существует несколько конструкций стабилометров, каждая из которых требует учета их конструктивных особенностей.

Схема испытаний грунта в условиях трехосного сжатия приведена на рис. 23.

Образец грунта цилиндрической формы с высотой, превышающей его диаметр в 2...3 раза, заключают в резиновую рубашку и помещают в камеру прибора. Всестороннее боковое давление на образец создается жидкостью (вода, глицерин), нагнетаемой в камеру стабилометра под тем или иным давлением $p_2 = p_3$. Вертикальное давление p_1 прикладывается к верхнему штампу прибора.

Опыт можно проводить по 2 различным схемам:

- при $p_2 = p_3 = \text{const}$ и постепенном увеличении напряжения p_1 вплоть до разрушения образца;
- при $p_1 = \text{const}$ и постепенном снижении $p_2 = p_3$, также до разрушения образца грунта.

Количество образцов, испытанных в стабилометре при различных соотношениях p_1 и p_2 , должно быть не менее двух. При этом грун-

ты должны обязательно иметь одинаковую влажность (для глинистых грунтов $W = \text{const}$) или пористость (для сыпучих грунтов $n = \text{const}$).

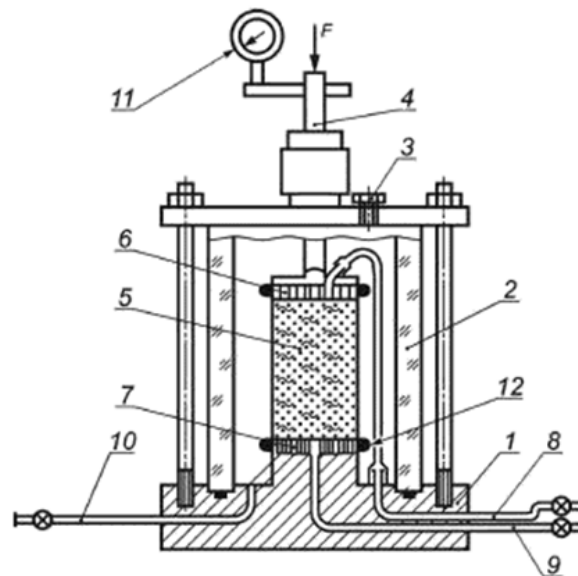


Рис. 23. Схема прибора трехосного сжатия: 1 – основание камеры; 2 – корпус камеры; 3 – вентиль для выпуска воздуха; 4 – шток; 5 – образец грунта в оболочке; 6 – верхний штамп, 7 – нижний штамп, 8 и 9 – магистрали системы дренажа, противодействия и измерения порового давления, 10 – магистраль давления в камере, 11 – индикатор перемещений, 12 – уплотняющее кольцо

По полученным критическим значениям $p_{1кр}$ и $p_{2кр}$, отвечающим разрушению образца, строят круг напряжений Моора (рис. 24).

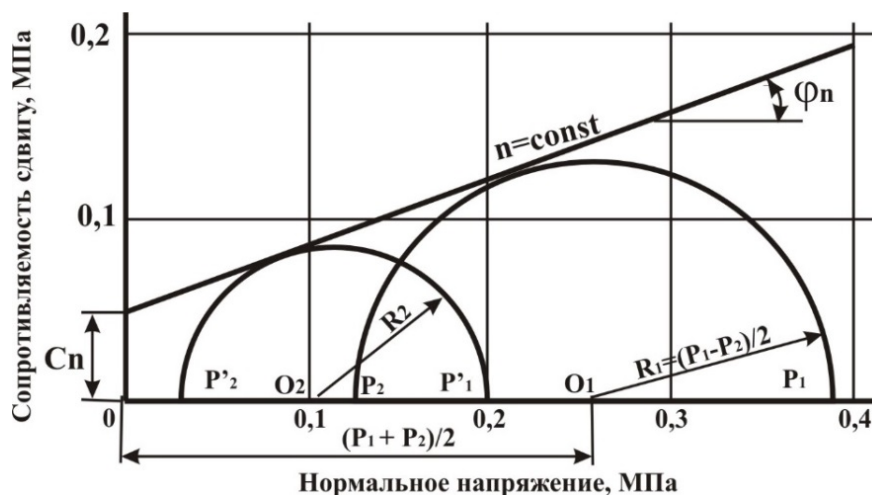


Рис. 24. Зависимость сопротивления сдвигу от нормальной нагрузки по данным испытаний грунтов в приборе трехосного сжатия

Для этого сначала определяют координаты центра круга, а затем величину радиуса окружности.

Касательная к кругам Моора будет представлять собой зависимость $S_p = f(p)$, наклон которой к горизонтальной оси p равен углу внутреннего трения (φ_w или φ_n), а точка пересечения вертикальной оси отсечет отрезок равный величине сцепления (C_w или C_n) (рис. 24).

Для глинистых грунтов с целью получения значений φ_w и C_w , отвечающих определенному (например, природному) состоянию грунта по плотности-влажности, испытания образцов необходимо проводить по «закрытой схеме», т.е. без возможности оттока вода из пор грунта, так называемый не дренированный сдвиг.

4.3. Испытания на одноосное сжатие

Прочность скальных пород и иногда жестких глин определяют методом одноосного сжатия образцов правильной геометрической формы (цилиндр, куб) на прессе (ГОСТ 12248-2010 [10]) (рис. 25).

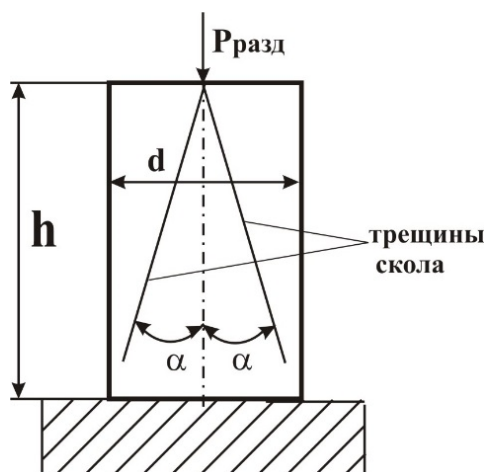


Рис. 25. Схема испытания грунта на одноосное сжатие

Величина напряжения, вызывающего разрушение образца при одноосном сжатии, называется пределом прочности породы на раздавливание $P_{\text{разд}}$.

Сопротивление сдвигу скальной породы определяют как

$$S = C_c = \frac{P_{\text{разд}}}{2}.$$

Определение показателей прочности жестких глин по результатам одноосного сжатия осуществляется следующим образом:

Угол внутреннего трения φ приближенно определяется по формуле

$$\varphi = 90^\circ - 2\alpha,$$

где α – угол, образуемый трещиной скола с вертикальной осью (линией действия P) (см. рис. 25).

Структурное сцепление C_c определяют по уравнению

$$C_c = \frac{1}{2} P_{\text{разд}} \operatorname{tg}\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right).$$

5. ПОКАЗАТЕЛИ СЖИМАЕМОСТИ ГРУНТА

5.1. Компрессионные характеристики грунта

Показатели сжимаемости грунта, которые называются компрессионными характеристиками, используются при расчете величины осадки грунта в основании сооружений.

Для получения компрессионных характеристик грунта проводят испытания в компрессионных приборах (одометрах), где образец грунта, помещенный в жесткое металлическое кольцо, уплотняется под действием приложенной к нему нагрузки без возможности бокового расширения (ГОСТ 12248-2010 [10], ГОСТ Р 54477-2011 [11] (рис. 26).

Компрессионные испытания грунта проводят под действием нескольких ступеней нагрузки, причем под каждой нагрузкой образец выдерживают до момента прекращения осадки, т.е. до момента стабилизации осадки образца под данной нагрузкой. Величину осадки образца Δh под действием уплотняющей нагрузки p определяют по показаниям мессур (индикаторов часового типа).

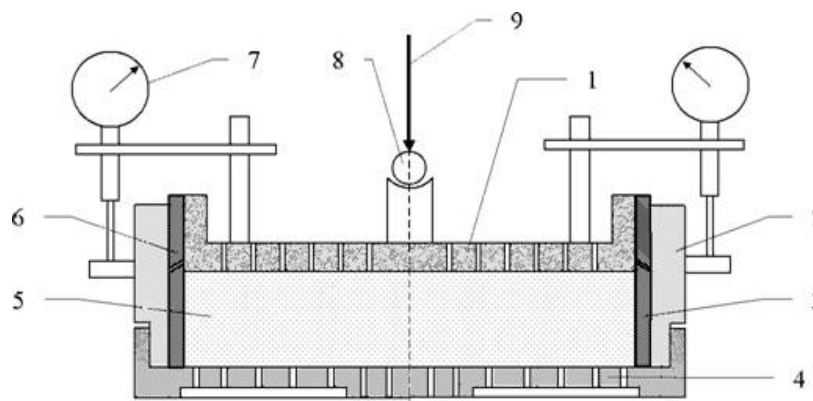


Рис. 26. Схема компрессионного прибора: 1 – перфорированный поршень; 2 – кольцевая толстостенная обойма; 3 – режущее кольцо; 4 – перфорированное днище; 5 – образец грунта; 6 – насадка на режущее кольцо; 7 – индикатор часового типа; 8 – центрирующий шарик; 9 – вертикальная нагрузка

Сжимаемость грунта может характеризоваться следующими показателями:

- коэффициентом пористости e (ε);
- коэффициентом сжимаемости m_0 (a);
- модулем осадки e_p ;
- модулем общей деформации грунта E_0 .

Коэффициент пористости грунта e (ε)

Для определения этого показателя сжимаемости сначала находят начальное значение коэффициента пористости e_0 , которое рассчитывается из условия полного водонасыщения грунта ($S_r = 1$) по уравнению

$$e_0 = \frac{W \rho_s}{S_r \rho_w}, \text{ или же } e_0 = W \rho_s,$$

так как плотность воды можно принять равной единице ($\rho_w = 1 \text{ т/м}^3$).

Затем рассчитывается значение коэффициента пористости грунта e_i , уплотненного под нагрузкой p_i :

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \varepsilon_z,$$

где ε_z – относительная деформация образца, которая равна

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta h_{\text{ср}}}{h_{\text{нач}}},$$

$\Delta h_{\text{ср}}$ – средняя деформация уплотнения грунта; $h_{\text{нач}}$ – начальная высота образца грунта.

В заключение строят компрессионную кривую типа $e_i = f(p_i)$ (рис. 27), которая иногда называется компрессионной кривой типа К. Терцаги, впервые предложившего характеризовать, таким образом, сжимаемость грунта.



Рис. 27. Компрессионная кривая типа $e_i = f(p_i)$

Однако компрессионная кривая типа $e_i = f(p_i)$ имеет ряд существенных недостатков:

а) требует многочисленных расчетов, так как для вычисления значений коэффициента пористости грунта необходимо иметь данные о плотности частиц грунта ρ_s , а также о плотности грунта ρ и влажности грунта W , уплотненного под нагрузкой p_i (в особенности, если $S_r \neq 1$). В этом случае e_i находится по уравнению

$$e_i = \frac{\rho_s(1+W) - \rho}{\rho};$$

б) лишена наглядности и оперирует понятиями e , мало знакомыми инженеру-строителю;

в) не дает количественного представления о деформируемости грунта.

Коэффициент сжимаемости грунта m_0 (а)

Для численного выражения сжимаемости грунта Н.М. Герсевановым был предложен такой показатель, как коэффициент сжимаемости m_0 (а), представляющий собой тангенс угла наклона спрямленной части компрессионной кривой на том или ином ее интервале нагрузок (см. рис. 27).

$$m_0(a) = \operatorname{tg} \alpha = \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} = \frac{\Delta e}{\Delta p}, [\text{МПа}^{-1}, \text{см}^2/\text{кг}].$$

По величине коэффициента сжимаемости можно оценить степень сжимаемости грунта:

- $m_0 < 0,001$ – практически не сжимаем;
- $0,001 \leq m_0 \leq 0,005$ – слабо сжимаем;
- $0,005 < m_0 \leq 0,01$ – обладает средней сжимаемостью;
- $m_0 > 0,1$ – сильно сжимаем.

Следует, однако, отметить, что коэффициент сжимаемости также является мало наглядной характеристикой сжимаемости грунта и имеет те же недостатки, что и предыдущий показатель.

Модуль осадки грунта e_p

Модуль осадки e_p является наиболее наглядным и легко определяемым показателем сжимаемости грунта. Определяется по данным компрессионных испытаний путем вычисления по формуле

$$e_p = 1000 \cdot \varepsilon_z, [\text{мм/м}],$$

где ε_z – относительная деформация образца (см. выше).

Модуль осадки e_p показывает, на сколько миллиметров сожмется слой грунта мощностью 1 м под действием приложенной нагрузки p .

По результатам компрессионных испытаний образца грунта строится компрессионная кривая типа $e_p = f(p)$, предложенная Н.Н. Масловым [3] (рис. 28).

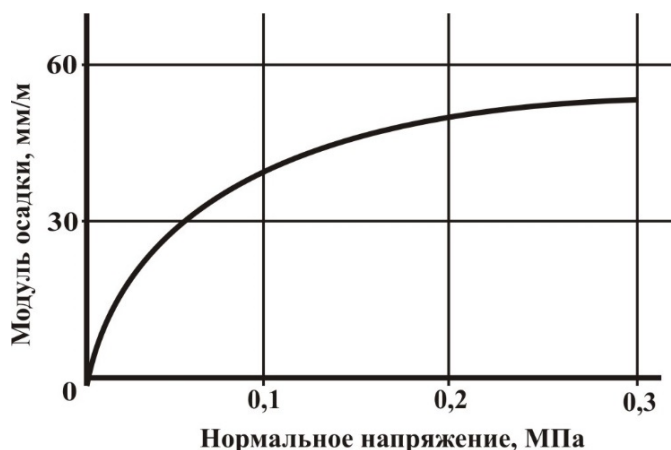


Рис. 28. Компрессионная кривая типа $e_p = f(p)$

Компрессионные кривые типа $e = f(p)$ (К. Терцаги) и $e_p = f(p)$ (Н.Н. Маслова), связаны между собой формулами перехода

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\varepsilon_z}{1000},$$

$$e_p = 1000 \frac{e_0 - e_i}{1 + e_0}.$$

Сжимаемость грунтов по величине модуля осадки e_p можно охарактеризовать при $p_i = 0,3$ МПа следующим образом (табл. 14).

Таблица 14

Категория грунта по сжимаемости	Модуль осадки, мм/м	Сжимаемость
0	менее 1	практически несжимаем
I	1...5	слабая
II	5...20	средняя
III	20...60	повышенная
IV	более 60	сильная

Компрессионный модуль деформации грунта E_0

Модуль деформации, определенный по результатам испытания образца грунта в компрессионном приборе без возможности его бокового расширения, называется компрессионным модулем деформации E_0 .

Модуль деформации грунта представляет собой отношение сжимающего напряжения к относительной деформации образца:

$$E_0 = \frac{p_i}{\varepsilon_z}, [\text{МПа}, \text{кг/см}^2].$$

По величине модуля деформации также можно судить о степени сжимаемости грунта: чем больше его величина, тем менее сжимаем грунт.

5.2. Модуль общей деформации грунта E_p

Модуль общей деформации грунта является обобщенной характеристикой деформируемости грунта и определяется в полевых условиях различными способами так, например, плоским штампом в шурфе, дудке и в забое буровой скважины; а винтовым штампом ниже забоя буровой скважины в массиве; радиальным прессиометром в стенке скважины; лопастным прессиометром в стенке скважины и в массиве; а также прессиометром с секторным приложением нагрузки и плоским дилатометром (ГОСТ 20276-2012 [12]). Схема проведения опыта во всех случаях практически одинакова, т.е. модуль общей деформации определяют по вдавливанию штампа в грунт (рис. 29).

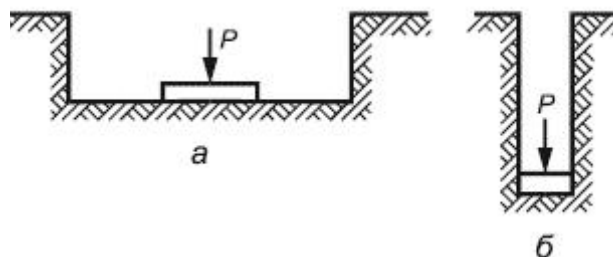


Рис. 29. Схемы испытаний грунта плоским штампом для определения характеристик деформируемости: а – в шурфе; б – в скважине

При определении модуля общей деформации грунт нагружают ступенчатой вертикальной нагрузкой в забое горной выработки с помощью плоского штампа. Нагружение штампа осуществляют домкратом или тарированным грузом.

Результаты испытаний оформляют в виде графика зависимости осадки штампа от давления $S = f(p)$ (рис. 30).

Модуль деформации E_p вычисляют для условно линейного участка графика в диапазоне давлений от p_0 до p_n . За начальное значе-

ние p_0 и S_0 (первая точка на графике) принимают давление, равное природному на этой глубине, и соответствующую осадку; за конечные значения p_n и S_n – значения p_i и S_i , соответствующие четвертой точке графика на прямолинейном участке.

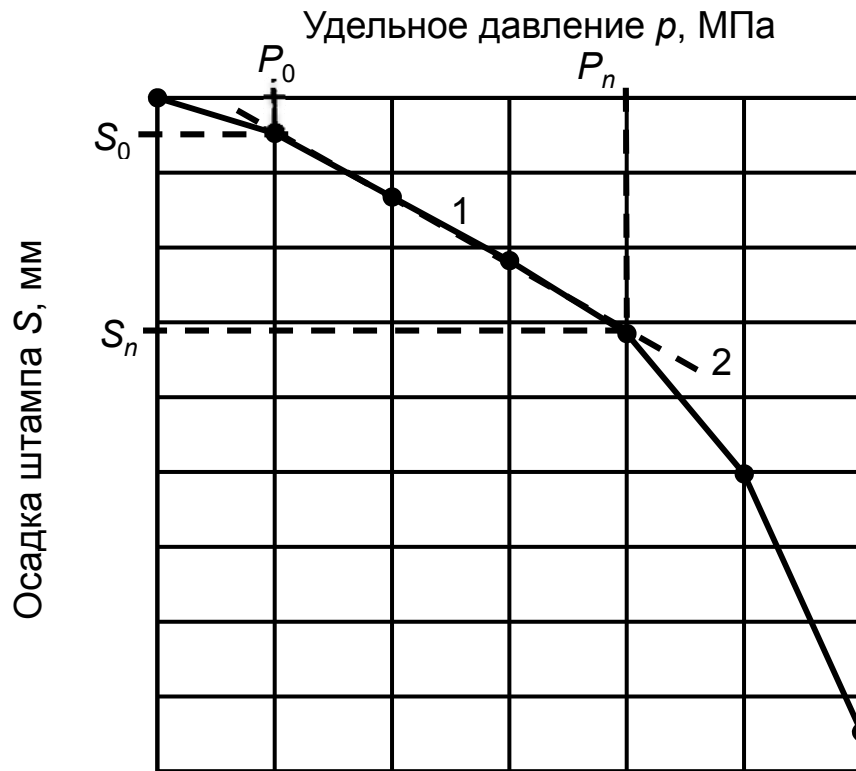


Рис. 30. График зависимости осадки штампа от давления:
1 – линейная часть графика; 2 – осредняющая прямая

Если при давлении p_i приращение осадки будет вдвое больше, чем для предыдущей ступени давления p_{i-1} , а при последующей ступени давления p_{i+1} приращение осадки будет равно или больше приращения осадки при p_i , за конечные значения p_n и S_n следует принимать p_{i-1} и S_{i-1} . При этом число точек в рассматриваемом диапазоне должно быть не менее трех. В противном случае при испытании грунта необходимо применять меньшие ступени давления.

Модуль деформации грунта E_p вычисляют по формуле

$$E = (1 - \mu^2) \cdot K_p \cdot K_1 \cdot d \left(\frac{\Delta p}{\Delta S} \right), \text{ [МПа]},$$

где μ – коэффициент поперечного расширения (Пуассона), принимаемый равным 0,27 для крупнообломочных грунтов; 0,30 – для песков и супесей; 0,35 – для суглинков; 0,42 – для глин; K_p – коэффициент,

принимаемый в зависимости от заглубления штампа h/d (h – глубина расположения штампа относительно дневной поверхности грунта, см; d – диаметр штампа, см); K_1 – коэффициент, принимаемый для жесткого круглого штампа равным 0,79; Δp – приращение давления на штамп, МПа, равное $p_n - p_0$; ΔS – приращение осадки штампа, соответствующее Δp , см.

Коэффициент K_p принимают равным 1,0 при испытаниях грунтов штампами в котлованах, шурфах и дудках. При испытаниях грунта штампом III типа в забое буровых скважин допускается принимать коэффициент K_p равным 1,0 независимо от h/d .

Малым деформациям соответствуют большие значения модуля деформации грунтов. Модуль деформации используется при расчете осадок сооружений, а также при расчете дорожных конструкций.

Модуль деформации грунта определяется в полевых условиях пробными нагрузками при влажностях, характерных для наиболее неблагоприятного периода работы сооружения (устанавливается путем многократных определений, проводимых в течение ряда лет).

Модуль деформации грунта E_p , определенный по вдавливанию штампа в грунт, отличается от компрессионного модуля деформации E_0 тем, что под штампом грунт уплотняется в условиях возможности некоторого его бокового расширения (отдавливания из-под штампа).

Между модулем общей деформации грунта E_p и модулем упругости E сплошных тел (металл, бетон и т.п.) существуют различия:

1. Модуль общей деформации грунта учитывает, как упругие, так и пластические деформации грунта без их разделения.

2. Модуль общей деформации, в связи с преобладанием у грунтов остаточных деформаций, относится только к ветви нагрузки. Измерение упругих (восстанавливающихся) деформаций при разгрузке позволяет определить модуль упругости грунта.

3. Модуль общей деформации зависит от плотности-влажности грунта.

4. Закон Гука применим к грунтам только в малых интервалах изменения нагрузки. Модуль деформации можно принимать постоянным лишь в узком диапазоне напряжений или относительных деформаций.

При многократных воздействиях нагрузок на грунт происходит накопление деформаций с разрушением структурных связей и сниже-

нием прочности, что приводит к снижению модуля деформации. Это следует учитывать при расчете дорожных конструкций.

По деформируемости дисперсные грунты подразделяют согласно ГОСТ 25100-2011 [4] (табл. 15)

Таблица 15

Разновидность грунтов	Модуль деформации E , МПа
Очень сильно деформируемые	≤ 5
Сильнодеформируемые	5...10
Среднедеформируемые	10...50
Слабдеформируемые	> 50

5.3. Консолидация грунтов

При приложении к водонасыщенному грунту сжимающих нагрузок его уплотнение всегда происходит во времени. Основной причиной этого является необходимость оттока (отжатия) воды из пор водонасыщенного грунта, т.е. фильтрации воды. Для фильтрации какого-либо объема воды необходимо время, определяемое водопроницаемостью грунта, т.е. его коэффициентом фильтрации.

Консолидацией называется процесс уплотнение глинистого водонасыщенного грунта во времени под постоянной нагрузкой. Или по ГОСТ Р 54477-2011 – *консолидация*, затухающее во времени деформирование нескальных грунтов под воздействием внешней нагрузки.

Этот процесс, происходящий в основании сооружений под действием их веса, идет у глинистых грунтов достаточно медленно, нередко требует для своего завершения весьма длительных сроков, измеряемых годами и даже десятилетиями. Только у чистых песков осадка сооружения заканчивается одновременно с окончанием строительства.

Для полностью водонасыщенных глинистых грунтов широко применяется теория фильтрационной консолидации при следующих условиях:

- 1) грунты рассматриваются в состоянии полного водонасыщения свободной, несжимаемой и гидравлически непрерывной водой;
- 2) напряжения в скелете грунта мгновенно вызывают его деформацию, которая линейно связана с действующим давлением;
- 3) грунт не обладает структурной прочностью и приложенное к нему внешнее давление первоначально воспринимается водой;

4) водопроницаемость грунтов полностью подчиняется закону Дарси.

Знание процесса консолидации глинистых грунтов необходимо для правильного прогноза скорости осадок сооружений.

Необходимость учета консолидации глинистых грунтов основания при проектировании и строительстве сооружений обусловлена ее определяющим влиянием на ход осадки сооружения во времени и увеличением прочности грунта по мере его уплотнения.

Изучение хода консолидации глинистого грунта проводят обычно на компрессионных приборах (см. рис. 26), при этом фиксируют ход уплотнения грунта во времени при постоянной нагрузке p_n . Опыт ведут до полного завершения процесса уплотнения. По данным опыта строят кривые консолидации. Пример такой кривой приведен на рис. 31, где ход уплотнения грунта представлен в виде зависимости коэффициента консолидации (степени консолидации грунта) от времени, т.е. отношения осадки (деформации) образца грунта в компрессионном приборе в некоторый момент t_i к его полной осадке, наблюдаемой по окончании процесса консолидации под данной нагрузкой

$$K = \frac{\Delta h_{t_i}}{\Delta h_{\text{кон}}} 100\%,$$

где Δh_{t_i} – деформация образца на момент времени t_i , считая от момента приложения давления p_n ; $\Delta h_{\text{кон}}$ – конечная (полная) величина деформации при данной нагрузке на момент времени $t_i = T_{\text{стаб}}$; $T_{\text{стаб}}$ – время, необходимое для полного завершения осадки.

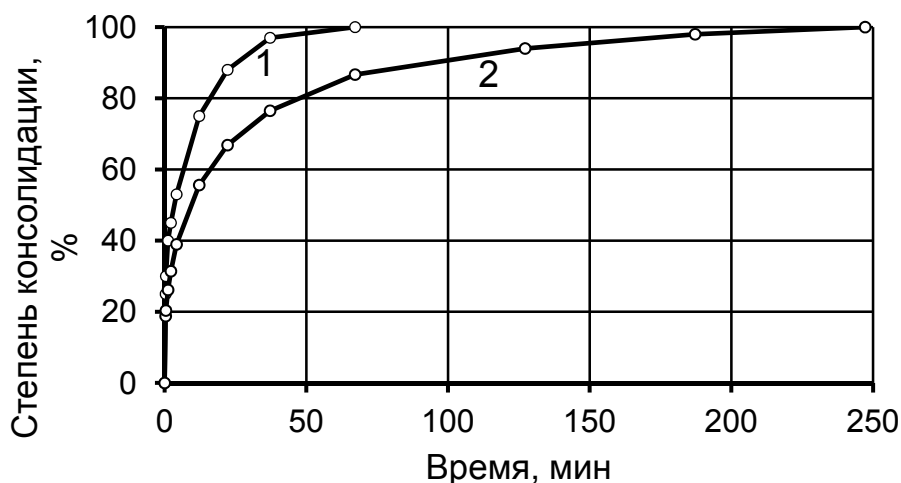


Рис. 31. Примеры кривых консолидации: 1 – супесь; 2 – суглинок

Очень важным показателем является также скорость протекания осадки, которая характеризуется временем, необходимым для полного завершения (стабилизации) осадки сооружения во времени ($T_{\text{стаб}}$).

Эта величина может быть определена по уравнению

$$T_{\text{стаб}} = \frac{1,13 m_0 \rho_w H^2}{K_{\text{ф}} (1 + e_{\text{ср}})},$$

где m_0 – коэффициент сжимаемости грунта; ρ_w – плотность воды; H – мощность уплотняемого слоя грунта в зависимости от условий дренирования (длина пути фильтрации воды); $K_{\text{ф}}$ – коэффициент фильтрации; $e_{\text{ср}}$ – среднее значение коэффициента пористости.

Условия дренирования могут быть односторонними и двухсторонними (рис. 32). В первом случае отжатие воды из уплотняемого глинистого слоя мощностью $H_{\text{сл}}$ возможно только в одном направлении – в сторону дренирующего, как правило, песчаного слоя грунта. В случае двухстороннего дренирования глинистый грунт располагается между двумя дренирующими (песчаными) слоями грунта и вода может отжиматься в обе стороны. В расчетах дренирование учитывается, как правило, величиной $H = H_{\text{сл}}$ при одностороннем дренировании и $H = H_{\text{сл}}/2$ – при двухстороннем.

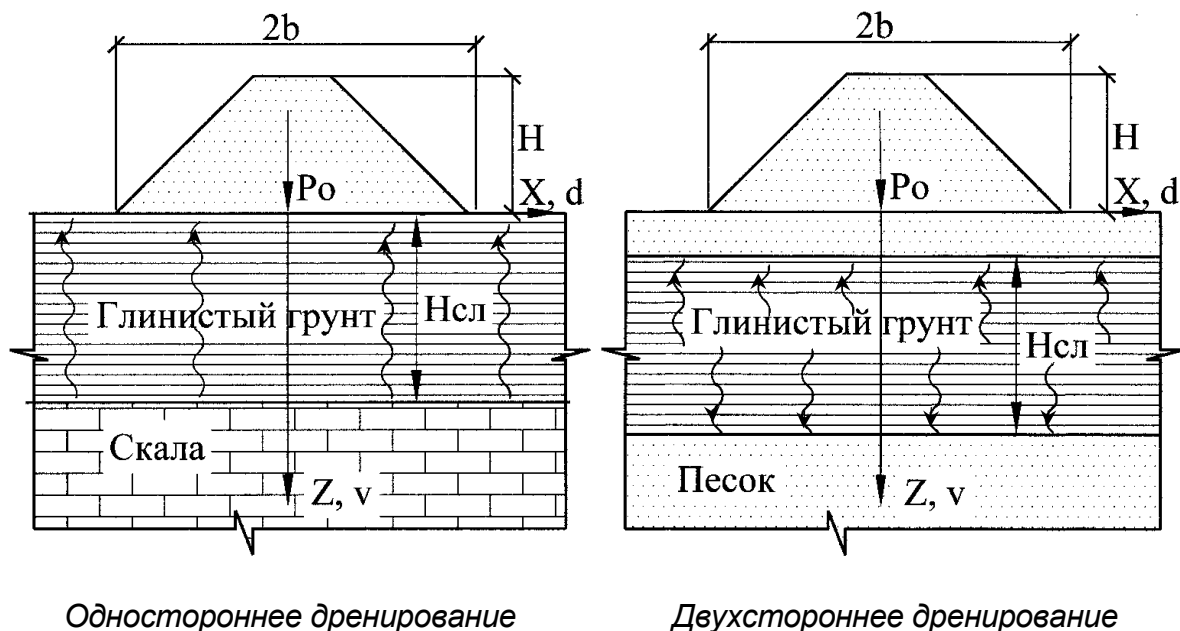


Рис. 32. Схема различных условий дренирования

Скорость консолидации зависит от величины нагрузки от сооружения, сжимаемости грунта, мощности слоя грунта, его водопрони-

цаемости и условий дренирования толщи. При двухстороннем дренировании консолидация идет в 4 раза быстрее (рис. 33).

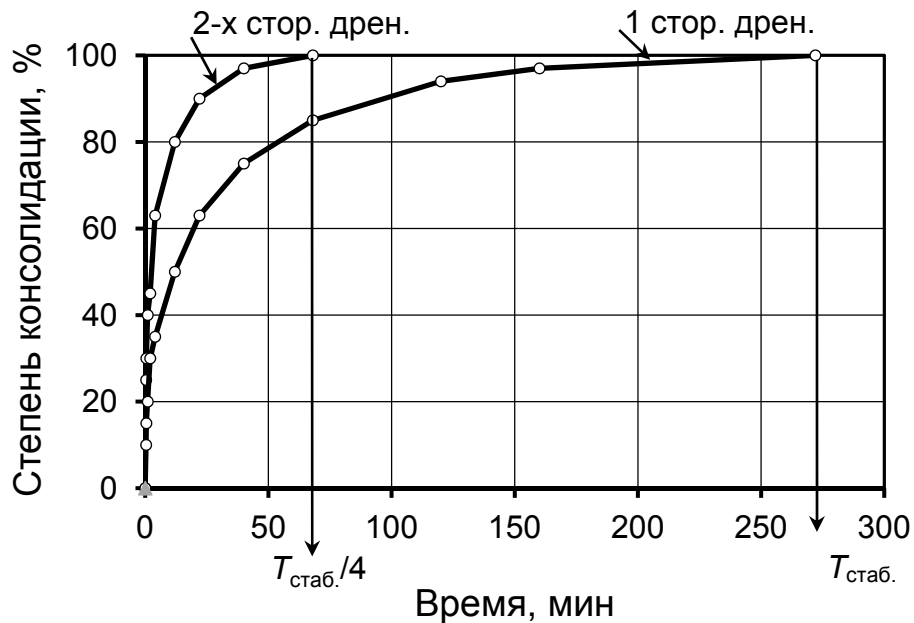


Рис. 33. Влияние условий дренирования на скорость консолидации

Для грунтов, не подчиняющихся закону фильтрационной консолидации, время, необходимое для полного уплотнения грунта под заданной нагрузкой, определяется по эмпирической зависимости Н.Н. Маслова

$$T_{\text{стаб}} = t_{\text{обр}} \left(\frac{H}{h} \right)^n,$$

где $t_{\text{обр}}$ – время, необходимое для консолидации образца грунта высотой h ; $T_{\text{стаб}}$ – время, необходимое для консолидации слоя грунта мощностью H ; n – показатель консолидации, величина которого находится в пределах от 0 до 2.

Величина n зависит от числа пластичности и консистенции грунта. Обычно в расчетах принимают $n = 1,5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебно-методическое пособие «Геотехнические свойства грунтов» не претендует на полноту освещения всех характеристик грунтов. В пособие рассмотрены только основные свойства грунтов, которые определяются при инженерно-геологических и инженерно-геотехнических изысканиях для дорожного строительства. Они используются для классификации грунтов и необходимы инженерам-проектировщикам для геотехнических расчетов дорожных конструкций, таких как: высота насыпей и глубина выемок, заложение откосов и расчет осадок насыпей, оценка устойчивости откосов и склонов, а также контроля качества уплотнения грунтов в теле и основании дорожных сооружений – оптимальная влажность и максимальная плотность грунтов, водопроницаемость и др.

В тоже время учебно-методическое пособие «Геотехнические свойства грунтов» будет весьма полезным для студентов при подготовке как к лабораторным работам по курсам «Инженерной геологии», «Дорожного грунтоведения» и «Механики грунтов», так и при их проведении и последующей защите, а также подготовке к экзамену.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорожное грунтоведение. Методы повышения несущей способности и стабильности грунтов: учебное пособие / Э.М. Добров, Ю.П. Шкицкий. Р.Г. Кочеткова [и др.]; под ред. Э.М. Доброва – М.: Изд. Центр «Академия», 2014. – 208 с.

2. Казарновский, В.Д. Основы инженерной геологии, дорожного грунтоведения и механики грунтов: учебное пособие / В.Д. Казарновский. – М.: ООО «Интрансдорнаука», 2007. – 284 с.

3. Маслов, Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов: учебник / Н.Н. Маслов. – М.: Высш. школа, 1982. – 511 с.

4. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. – Введен 2013-01-01. – М.: Стандартиформ, 2013. – 63 с.

5. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – Введен 2016-04-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 20 с.

6. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Введен 2016-04-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 23 с.

7. ГОСТ 22733-2002. Грунты Метод лабораторного определения максимальной плотности. – Введен 2003-07-01. – М.: ГУП ЦПП, 2003. – 22 с.

8. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. – Введен 2013-07-01. – М.: Минрегион России, 2013. – 112 с.

9. ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. – Введен 2017-05-01 – М.: Стандартиформ, 2016. – 22 с.

10. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Введен 2012-01-01 – М.: Стандартиформ, 2011. – 78 с.

11. ГОСТ Р 54477-2011. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик деформируемости грунтов в дорожном строительстве. – Введен 2012-05-01 – М.: Стандартиформ, 2011. – 24 с.

12. ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. – Введен 2013-07-01 – М.: Стандартиформ, 2013. – 45 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение.....	4
1. Показатели состава и состояния грунтов	5
1.1. Гранулометрический состав грунта	5
1.2. Плотность частиц грунта ρ_s	10
1.3. Плотность грунта ρ	10
1.4. Плотность сухого грунта ρ_d	12
1.5. Влажность грунта W	12
1.6. Коэффициент водонасыщения грунта S_r	13
1.7. Пористость n	13
1.8. Коэффициент пористости e	14
1.9. Относительная плотность сыпучих грунтов I_d	15
1.10. Показатели пластичности грунта	15
1.11. Оптимальная влажность $W_{\text{опт}}$ и максимальная плотность грунта $\rho_{d_{\text{max}}}$	19
2. Показатели водно-физических свойств грунта	21
2.1. Коэффициент фильтрации грунта K_f	21
2.2. Высота капиллярного поднятия воды в грунте H_k	24
3. Показатели прочности грунтов	29
3.1. Сыпучие (несвязных) грунты	30
3.2. Глинистые (связные) грунты	31
3.3. Скальные грунты	33
4. Определение показателей прочности грунтов на сдвиг	35
4.1. Испытания на приборах прямого сдвига	35
4.2. Испытания в приборах трехосного сжатия (стабилометрах)	40
4.3. Испытания на одноосное сжатие	42
5. Показатели сжимаемости грунтов	43
5.1. Компрессионные характеристики грунта	43
5.2. Модуль общей деформации грунта E_p	47
5.3. Консолидация грунтов	50
Заключение	54
Список рекомендуемой литературы	55