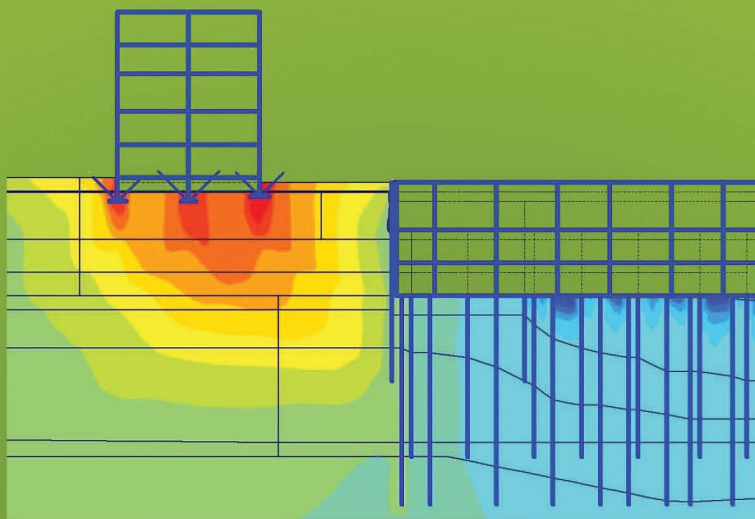


Р.А. Мангушев В.Д. Карлов И.И.Сахаров

МЕХАНИКА ГРУНТОВ



Р.А. Мангушев, В.Д. Карлов, И.И. Сахаров

МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Рекомендовано научно-методической комиссией
по специальности 270102 «Промышленное и гражданское
строительство» в качестве учебника для подготовки бакалавров
по направлению подготовки 550100 «Строительство»



Издательство АСВ
Москва
2015

УДК 624.04

Рецензент: кафедра подземных сооружений, оснований и фундаментов Санкт-Петербургского государственного технического университета (зав. кафедрой, членкор Петровской академии наук и искусств, доктор технических наук, профессор *А.К. Бугров*); генеральный директор ЗАО «ГЕОСТРОЙ», Почётный строитель РФ, кандидат технических наук, доцент *А.И. Осокин*.

Мангушев Р.А. (ответственный за издание), Карлов В.Д., Сахаров И.И.
Механика грунтов: Учебник. – М.: Издательство АСВ, 2015. – 256 с.

ISBN 978-5-93093-070-2

Учебное издание соответствует государственному образовательному стандарту дисциплины «Механика грунтов» по направлению 270100 – «Строительство» по квалификации «бакалавр строительства».

Приведены сведения о физических и механических свойствах грунтов, основные законы механики грунтов и их приложение к расчету напряженно-деформированного состояния оснований. Рассмотрены основные методы определения осадок фундаментов, устойчивости откосов и подпорных стен. Даны общие положения по расчетам оснований и подземных конструкций с использованием численных методов.

Предназначен для студентов вузов, обучающихся по специальности «Строительство» по квалификации «бакалавр строительства».

ISBN 978-5-93093-070-2

© Издательство АСВ, 2015

© Р.А. Мангушев, В.Д. Карлов,
И.И. Сахаров, 2015

Учебное издание

Мангушев Рашид Александрович
Карлов Владислав Дмитриевич
Сахаров Игорь Игоревич

МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Корректор *В.Ш. Мерзлякова*
Компьютерная верстка *Е.М. Лютова*
Компьютерный дизайн обложки *Н.С. Романова, Т. Негрозова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Формат 60×90/16.
Бумага офс. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. 16 п.л. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511
тел., факс: (499) 183-56-83, e-mail: iasv@iasv.ru, <http://www.iasv.ru>

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вхождение России в Болонское соглашение подразумевает во многом идентичность российской высшей школы с общеевропейской, в том числе методов подготовки специалистов по системе бакалавриата и магистратуры.

В настоящее время подготовка специалистов по направлению 270100 – «Строительство» по квалификации «бакалавр строительства» предполагает обучение в течение 4 лет, что на год меньше нынешней системы «инженер-строитель». В свою очередь, это потребовало произвести переработку существовавших учебных планов, рабочих программ, изменить систему производственных практик. Потребовались и новые учебники.

Изучение курса «Основания и фундаменты», одного из важнейших для подготовки специалистов в области строительства, требует предварительного систематического изложения материала по методам расчета грунтов. В месте с тем известно, что расчет грунтовых оснований невозможен методами классической строительной механики, в связи с чем получил развитие ее раздел – «Механика грунтов», в котором рассматриваются деформации, прочность и устойчивость дисперсных грунтов.

В учебных планах курс «Механика грунтов» выделен в самостоятельную дисциплину, что и послужило основанием для написания настоящего учебника – первого по данной дисциплине для бакалавров строительства.

В составлении учебника приняли участие ведущие ученые кафедры геотехники Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, много лет читающие курс «Механика грунтов» для студентов различных специальностей в СПбГАСУ (бывшем ЛИСИ) и являющиеся авторами предыдущего учебника по этой дисциплине, изданного в 2000 г. в издательстве АСВ.

Особенностью настоящего издания является максимальный упор на объяснение физической сути процессов, описываемых в дисциплине «Механика грунтов», и их увязку с реальными процессами, происходящими в реальных грунтовых средах при природных и техногенных процессах.

Авторы учебника постарались максимально уменьшить количество формульного аппарата и полнее использовать рисунки и графический материал, раскрывающий суть явлений, описываемых в дисциплине.

Предисловие, введение, заключение, гл. 1, 4, 6 написаны д.т.н., проф. Р.А. Мангушевым; гл. 2 и 3 – д.т.н., проф. В.Д. Карловым; гл. 5 и 7 – д.т.н., проф. И.И. Сахаровым.

Авторы с благодарностью отнесутся к любым замечаниям по книге, которые просят присылать по адресу: 198005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, 4, СПбГАСУ, кафедра «Геотехника». E-mail: geotechnica@spbgasu.ru

ВВЕДЕНИЕ

Грунты, являющиеся основанием фундаментов сооружений, за исключением скальных пород, обычно представляют из себя дисперсные многофазные тела, состоящие из твердых частиц и пор между ними. Поры частично или полностью заполнены чаще всего водой. Поэтому механические свойства грунтов не может характеризовать механика твердого тела и тем более гидромеханика. Это и привело в период начиная с конца XIX столетия к развитию особого раздела механики – «Механика грунтов».

Состав курса и его связь с другими дисциплинами. В курсе «Механика грунтов» рассматриваются преимущественно вопросы напряженного состояния, деформируемости, прочности и устойчивости грунтов. Кроме того, оцениваются некоторые свойства структурно-неустойчивых грунтов.

Для освоения курса необходимо изучить следующие дисциплины: математику, инженерную геологию, сопротивление материалов, теорию упругости, строительную механику и гидравлику.

Основные задачи курса. Грунты, как правило, обладают во много раз меньшей прочностью, а главное, в тысячи раз большей деформируемостью, чем материалы, из которых возводятся сооружения. Поэтому надежное существование сооружений часто в значительной степени зависит от величины неравномерной деформации грунтов основания, приводящей к недопустимым неравномерностям осадок сооружений. Из-за неправильной оценки характера напластований и строительных свойств грунтов в ряде случаев развиваются большие деформации несущих конструкций сооружений, иногда приводящие даже к их разрушению.

Деформации грунтов основания в значительной степени зависят от давления, передаваемого фундаментом на основание, поэтому при проектировании фундаментов, выборе конструкций и их размеров требуется учитывать, как возможные неравномерности осадок отразятся на несущих конструкциях сооружений.

Отсюда задачей курса является научить студентов:

- * правильно оценивать строительные свойства грунтов, в том числе структурно-неустойчивых;
- * определять напряжения в массиве грунта и деформации основания под действием внешних нагрузок;
- * оценивать устойчивость грунтов в основании сооружений и откосах, а также давление на ограждающие конструкции;

* использовать современные численные методы расчета напряжений и деформаций оснований и подземных конструкций.

Стоимость работ по подготовке оснований по устройству фундаментов обычно составляет 5–10% стоимости здания. При сложных грунтовых условиях она может превышать 20%. Правильное проектирование фундаментов позволяет снизить стоимость работ по устройству фундаментов и тем самым возводимого сооружения.

История развитие науки «Механика грунтов». Первой капитальной теоретической работой по механике грунтов является теория Ш. Кулона (1773), который разработал метод решения задач о давлении грунта на подпорные стенки и сформулировал закон сопротивления грунта сдвигу.

Бурный рост промышленности, транспорта, горного дела и других областей хозяйства вызвал быстрый рост строительства, который требовал развития инженерной геологии и механики грунтов. В это время появились работы Г. Дарси (1856) о движении воды в грунтах, Е. Винклера (1867) о связи осадки гибкого фундамента с сопротивлением грунта внешней нагрузке.

В 1869 г. В.М. Карлович опубликовал первый учебник по основаниям и фундаментам на русском языке, в котором изложены и элементы механики грунтов. Интересны классические опыты В.И. Курдюмова «О сопротивлении естественных оснований» (1869) и работы П.А. Минаева (1912–1916), показавшего применимость к грунтам теории упругости. Следует отметить работы по теории фундаментных балок и плит на упругом грунтовом основании Н.П. Пузыревского (1923) и Г.Э. Проктора (1922).

В 1885 г. французский математик Ж. Буассинес решал задачу о распределении напряжений от действия сосредоточенной силы в полупространстве, применимую к грунтам, которая используется в механике грунтов и сейчас. К. Терцаги в 1925 г. опубликовал на немецком языке работу «Строительная механика грунтов». В 1931–1933 гг. Н.М. Герсеванов публикует классический труд «Основы динамики грунтовой массы», а в 1934 г. появился учебник Н.А. Цыговича «Основы механики грунтов». Параллельно с этим Н.Н. Иванов и В.В. Охотин опубликовали учебник «Дорожное почвоведение и механика грунтов» (1934). В период 1934–1940 гг. Н.Н. Масловым и В.А. Флориным были опубликованы фундаментальные работы по механике грунтов. В 1942 г. была напечатана известная работа В.В. Соколовского «Статика сыпучей среды». Мно-

гие задачи теории предельного равновесия грунтов получили развитие в трудах В.Г. Березанцева (1952).

Из авторов учебников по механике грунтов необходимо отметить Н.А. Цытовича который, начиная с 1940 по 1983 гг., переиздавал учебник «Механика грунтов» с редакцией и дополнениями 7 раз. Этот учебник неоднократно издавался на иностранных языках. В это же время издавались учебники «Основания и фундаменты», в которых рассматривались и вопросы механики грунтов. К ним относятся учебники Б.Д. Васильева (1937, 1945, 1955), Н.А. Цытовича с соавторами (1970), Б.И. Далматова (1981, 1988), П.Л. Иванова (1985, 1991) и С.Б. Ухова с соавторами (1994), Б.И. Далматова и др. (2000) и др.

За последнее время большое внимание уделяется развитию нелинейной механики грунтов, в которой рассматриваются вопросы пластических деформаций и ползучести. Этому вопросам, которые были изложены, в то числе, в различных учебных пособиях, большое внимание уделили С.С. Вялов, М.Н. Гольдштейн, З.Г. Тер-Мартirosян, А.К. Бугров, Ю.К. Зарецкий, М.В. Малышев и др.

Развитие механики грунтов в современных условиях. В настоящее время возводятся все более высокие и тяжелые сооружения, в том числе, с развитым подземным пространством. В промышленных зданиях часто устанавливается уникальное оборудование, работа которого не допускает неравномерных осадок фундаментов. Это заставляет предъявлять особые требования к основаниям.

За последнее время появились новые технологии изготовления и устройства оснований и фундаментов, позволяющие передавать нагрузку на более плотные грунты, которые, как правило, залегают на большой глубине. В таких случаях точность расчетов, а в конечном итоге и экономия средств существенно повышается, если расчеты деформаций грунтов производят по разработкам нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями.

Другой важной особенностью развития механики грунтов на современном этапе является использование численных методов расчетов и представление их в виде программного продукта для компьютеров. С применением численных методов, появилась возможность решать задачи совместной работы грунтового основания и сооружения, как в плоской, так и в пространственной постановке. Однако, успех правильного решения таких задач во многом зависит от постановки граничных условий, выбора схемы расчета и назначения достоверных характеристик грунтов основания и материала конструкций, что невозможно без знаний классической механики грунтов.

Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

1.1. ПРОИСХОЖДЕНИЕ, СОСТАВ ГРУНТОВ, ИХ СТРУКТУРА И ТЕКСТУРА

В большинстве случаев верхние слои земной коры сложены крупнообломочными, песчаными, пылевато-глинистыми, а также органогенными и техногенными грунтами. В строительной практике массивы грунтов используются как основание под фундаменты промышленных и гражданских зданий и сооружений, среды для устройства подземных сооружений (тоннели, убежища, хранилища и т.п.), материал для постройки земляных сооружений (дамбы, насыпи автомобильных и железных дорог и др.).

В соответствии с ГОСТ 25100-95 (Грунты. Классификация) все горные породы, слагающие земную кору, подразделяются на два основных класса: 1) с жесткими структурными связями – **скальные грунты**; 2) без жестких структурных связей – **рыхлые или дисперсные¹ грунты**.

Скальные грунты изучаются научным разделом «Механика скальных грунтов» и в данном учебнике не рассматриваются. **Механика грунтов** изучает вопросы напряженного состояния, деформируемости, прочности и устойчивости дисперсных грунтов. Для этих целей необходимо располагать данными, характеризующими грунт как основание, материал или среду при решении задач расчета и проектирования сооружений.

1.1.1. Происхождение грунтов

Знание природы грунтов, условий их формирования и изменений в процессе дальнейшего существования, их состава и строения сильно влияет на их физико-механические характеристики и позволяет правильно оценить их прочность и деформируемость в процессе и после строительства сооружений.

Значительная часть дисперсных грунтов образовалась в результате накопления продуктов физического и химического выветривания коренных пород. Некоторые грунты возникли вследствие отложения органических веществ (торф, ил, сапрпель). Грунты также могут создаваться в результате производственной и хозяйственной деятельности человека – отвалов строительного мусора, горных пород как отходов добычи полезных ископаемых, отвалов золы и шла-

¹ Дисперсия – от латинского слова, обозначающего рассеивание.

ка и т.д. (техногенные отложения), а также в результате искусственной отсыпки или намыва различных отложений.

В зависимости от условий образования различают грунты континентальные и морские. К континентальным относятся элювиальные, делювиальные, пролювиальные, аллювиальные, дельтовые, лагунные, эоловые и все виды ледниковых отложений.

К морским отложениям – все накопления из материала, приносимого в море поверхностными водными потоками и образующиеся при переработке морских берегов волновым прибоем.

В табл. 1.1 представлены виды основных осадочных отложений по их генезису.

Таблица 1.1

Виды осадочных отложений по генезису

Условное обозначение	Происхождение (генезис)
<i>e</i>	Элювиальные – продукты выветривания скальных горных пород (супеси, пылеватые пески, суглинки с примесями дресвы и щебня)
<i>d</i>	Делювиальные – отложения, перенесенные к основанию склона дождевыми и тальми водами (песчаные и глинистые грунты с включением дресвы и щебня)
<i>p</i>	Пролувиальные – отложения в зоне выноса временных или постоянных водотоков (крупнообломочные породы с примесью песка и глины)
<i>a</i>	Аллювиальные – отложения постоянно действующих водотоков (рек, крупных ручьев). Подразделяются на русловые (преимущественно пески и галечниковые грунты), пойменные (как правило, суглинки, старичные (торф, ил))
<i>v</i>	Эоловые – продукты осаждения частиц, переносимых ветром (пески, лессы)
<i>m</i>	Морские – отложения морей – литоральные (песок, гравий); шельфовые (ил, известняк)
<i>l</i>	Озерные – отложения на дне озер (сапропели, илы)
<i>g</i>	Ледниковые – отложения рыхлых пород, перенесенные ледником (пески, суглинки с прослойками и включениями гравия гальки и валунов)
<i>f</i>	Флювиогляциальные – отложения, сформированные потоками воды, образующимися при таянии ледников (пески, реже супеси, суглинки, гравий, галька)
<i>lg</i>	Лимногляциальные (озерно-ледниковые) – отложения, образовавшиеся на дне ледниковых озер (ленточные глины и суглинки, илы)

Из-за различий в условиях образования и последующих процессов диагенеза свойства грунтов весьма разнообразны. Часто наблюдается разнообразие свойств и у грунтов одного и того же происхождения. В связи с этим грунты являются телами неоднородными как по глубине, так и по простиранию слоя.

1.1.2. Состав грунтов

Основными компонентами грунтов являются **твердые частицы** минерального и органического происхождения, **жидкость** (преимущественно вода) и **газ**, т.е. составные части грунта находятся в трех состояниях: твердом, жидком и газообразном. Соотношение этих компонентов определяет многие свойства грунтов.

Грунт является **дисперсной системой**, состоящей из дисперсной фазы – твердые частицы и дисперсионной среды – жидкости и газа.

В механике грунтов различают **однофазный** (сухой) грунт, в порах которого отсутствует жидкость (вода); **двухфазный** (водонасыщенный) грунт, у которого все поры заполнены водой; **трехфазный** (неводонасыщенный) грунт, у которого поры частично заполнены водой, частично газом. Иногда выделяют **четырефазный** (неводонасыщенный мерзлый) грунт, у которого четвертой компонентой является лед. Мерзлые грунты изучаются предметом «Механика мерзлых грунтов».

1.1.3. Свойства и классификация твердых частиц грунта

Поскольку свойства грунтов в значительной мере зависят от размеров и минералогического состава слагающих их твердых частиц, последние (по ГОСТ 251000-95) принято классифицировать по их размерам, мм.

Таблица 1.2

Основные гранулометрические фракции (по ГОСТ 251000-95)

Название фракций размерами, мм			
Крупнообломочная	Песчаная	Пылеватая	Глинистая
Более 2	2...0,05	0,05...0,005	Менее 0,005

Изменение размеров частиц приводит к изменениям свойств грунтов. Поэтому гранулометрический состав во многом определяет свойства грунта, является показателем степени его дисперсности и главным классификационным признаком. Твердые частицы грунта обычно состоят из минеральных зерен и имеют чаще всего сложный состав. В крупнообломочных и песчаных грунтах преобладают кри-

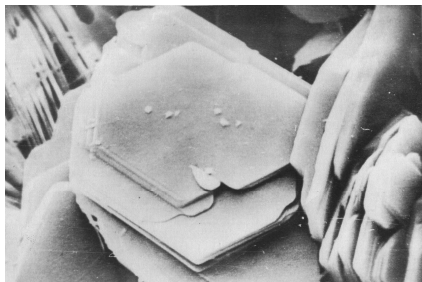
сталлические зерна первичных минералов (кварца, полевого шпата и др.). В глинистых и пылеватых фракциях – вторичные минералы: каолинит, гидрослюда, оксиды железа, опал и др., имеющие некристаллическое (аморфное) строение, обладающие свойствами коллоидов. Кроме этого в твердой фазе грунтов могут содержаться кристаллы растворимых в воде минералов: гипса, кальцита, галита и др.

Химический состав твердой фазы грунтов определяется редко, чаще ограничиваются анализом состава поровой воды, которая содержит соли, находящиеся в ионной форме. Грунтовый раствор может быть кислым, нейтральным и щелочным. Засоленными считаются грунты, в которых содержание легко растворимых солей превышает 2% по массе. Соли могут переходить попеременно в твердую и жидкую фазу.

Содержание солей в твердой и жидкой фазе влияет на состояние и свойства грунтовых коллоидов, поглотительную способность грунтов, их способность к набуханию, усадке и т.д.

Частицы крупнее 0,05 мм обычно имеют остроугольную или округлую форму, а более мелкие глинистые – пластинчатую или игольчатую (рис. 1.1).

а)



б)

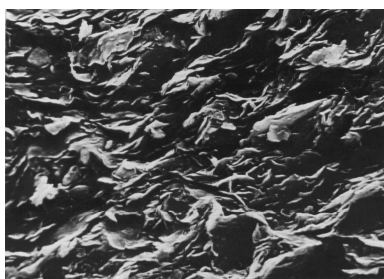


Рис. 1.1. Форма глинистых частиц каолинита (а) и иллитовой глины (б) при рассмотрении под электронным микроскопом

Крупные частицы грунта разделяются просеиванием через стандартные сита. Глинистые частицы определяют одним из методов седиментационного анализа: пипеточным или ареометрическим с использованием метода Стокса (рис. 1.2).

Разделение частиц по фракциям обуславливается тем, что грунты, состоящие из частиц преимущественно одной категории, обладают специфическими свойствами.

Так, грунт, состоящий из **галечниковых частиц** (щебня) с диаметром свыше 20 мм, имеет жесткий скелет, высокую несущую способность и водопроницаемость. Грунт, состоящий только из **гравелистых частиц**, также обладает большой водопроницаемостью, сравнительно жестким скелетом и достаточно высокой несущей способностью. При динамических воздействиях он может уплотняться.

Песчаные частицы слагают различные по крупности пески, которые обладают водопроницаемостью, непластичны, имеют сравнительно жесткий, малосжимаемый при действии статической нагрузки скелет. В зависимости от плотности сложения пески способны существенно уплотняться при динамических воздействиях. Они характеризуются небольшой (до 0,5 м) высотой капиллярного поднятия воды и в сухом состоянии являются сыпучими телами.

Пески в зависимости от процентного содержания частиц преобладающих фракций подразделяются на гравелистые, крупные, средние, мелкие и пылеватые (табл. 1.3).

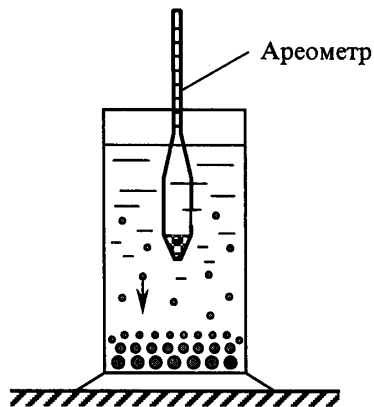


Рис. 1.2. Схема проведения ареометрического анализа для определения количества глинистых частиц в грунте

Таблица 1.3

Типы песчаных грунтов в зависимости от процентного содержания частиц преобладающих фракций

Типы песчаных грунтов в зависимости от процентного содержания по массе крупности частиц преобладающих фракций				
Гравелистый	Крупный	Средний	Мелкий	Пылеватый
	> 0,5 мм, > 50%	> 0,25 мм, > 50%	> 0,1 мм, 75% и более	> 0,1 мм, < 75%

Содержание частиц различных фракций оказывает существенное влияние на свойства грунтов. Поэтому для количественной

оценки его гранулометрического состава строят интегральную кривую распределения различных по размеру частиц грунта, называемую *кривой гранулометрического состава* (рис. 1.3).

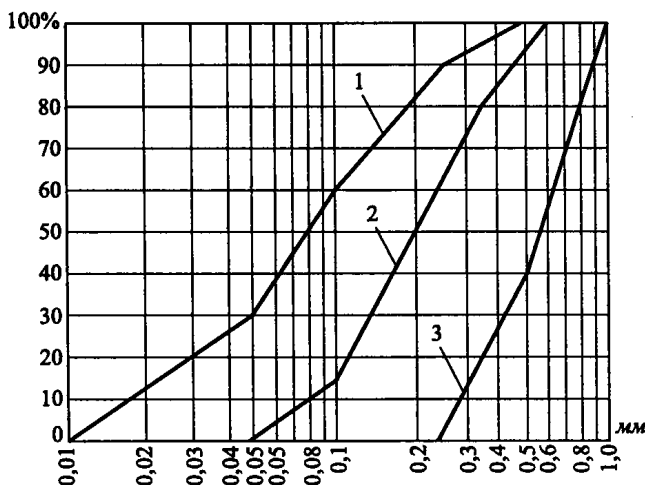


Рис. 1.3. Интегральная кривая зернового состава песка:

1 — пылеватого; 2 — мелкого; 3 — крупного

С ростом неоднородности наклон графика гранулометрического состава становится меньше и наоборот. Для численного показателя неоднородности крупнообломочных и песчаных грунтов используется показатель неоднородности:

$$C_u = d_{60} / d_{10},$$

где d_{60} и d_{10} — диаметры частиц, меньше которых в данном грунте содержится соответственно 60 и 10% частиц.

Однородный грунт имеет показатель $C_u \leq 3$. При $C_u > 3$ грунт является неоднородным, что существенно влияет на его физико-механические свойства.

Пылеватые частицы составляют пылеватый грунт, который слабо водопроницаем, плохо отдает воду и обладает свойствами пльвинности — перемещается с водой даже при малой скорости ее движения. Капиллярное поднятие в нем достигает 2...3,5 м.

Грунт, состоящий преимущественно из **глинистых частиц**, практически водонепроницаем, во влажном состоянии обладает высокой пластичностью и большой сжимаемостью при действии ста-

тических нагрузок. При динамических нагрузках не уплотняется, но может снижать прочность. После прекращения динамических воздействий прочность грунта частично или полностью восстанавливается, т.е. он может обладать специфическими тиксотропными свойствами. Такой грунт в зависимости от материала слагающих его частиц при изменении содержания в нем воды меняет объем, набухает при увлажнении и получает усадку при высыхании.

В природных условиях редко встречаются грунты, содержащие только одну гранулометрическую фракцию. Такие грунты называют монодисперсными, например жирные глины. Наиболее часто встречаются грунты, состоящие их смеси песчаных, пылеватых и глинистых частиц, находящихся в разных пропорциях.

На свойства дисперсных грунтов наибольшее влияние оказывают глинистые частицы, и именно по их количественному содержанию по массе дается краткая классификация грунтов, используемая в строительстве (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Краткая классификация грунтов

Наименование грунта	Содержание глинистых частиц по массе, %
Глина	> 30
Суглинок	30...10
Супесь	10...3
Песок	< 3

Примечание. Наличие в грунтах гальки, гравия, органических веществ, растворимых солей и других включений, отражающееся на свойствах этих грунтов, также отмечается в их наименовании, например «супесь пылеватая заиленная».

Глинистые частицы занимают особое место из-за особенных свойств, которые проявляются при взаимодействии минералов с водой. Наиболее распространенные глинистые минералы – гидрослюда, монтмориллонит, каолинит.

Исследования показали, что большинство твердых глинистых частиц в естественном состоянии заряжено отрицательно. Сила заряда частиц зависит от их минерального состава и удельной площади поверхности. Чем больше удельная площадь поверхности, тем больше сила заряда.

Глинистые частицы в большинстве случаев *гидрофильны*, что обусловлено их поверхностной активностью по отношению к воде. Как правило, они имеют пластинчатую или игольчатую форму

(см. рис. 1.1), а размеры кристаллов не превышают 1–2 мкм. При этом соотношение длины к толщине кристаллов может превышать десятки раз, что, в свою очередь, объясняет их огромную удельную поверхность, измеряемую в $\text{м}^2/\text{г}$.

Так, в 1 г глины (монтмориллонит) суммарная поверхность частиц составляет 800 м^2 , в 1 г глины каолинита – 10 м^2 . Для сравнения: в 1 г песка это всего $0,8 \text{ м}^2$.

Поэтому содержание глинистых частиц в грунте оказывает существенное влияние на свойства грунтов, и в первую очередь на характер их связности. Поэтому грунты, содержащие глинистые фракции в объеме более 3% по массе (глины, суглинки, супеси), называются *связными грунтами* в отличие от *сыпучих грунтов* (гравий, щебень, песок).

Взаимодействие глинистых частиц с водой, обусловленное электромолекулярными силами поверхности минералов с молекулами воды, играет определяющую роль в формировании многих свойств глинистых грунтов, и это необходимо учитывать при решении прикладных задач механики грунтов, оснований и фундаментов.

1.1.4. Виды воды в грунте и их свойства

Вода в грунте играет большую роль при формировании их физико-механических свойств, которые зависят в первую очередь от ее относительного содержания. Особенно это проявляется в глинистых грунтах, что объясняется взаимодействием молекул воды (диполей воды) с поверхностями коллоидных и глинистых частиц грунта вследствие наличия электромолекулярных сил. Чем больше в грунте глинистых частиц, тем больше связанной воды в этом грунте.

Однако вода в грунте может быть в различных видах и состояниях. Принято считать, что вода в грунте находится в кристаллизационном (химически связанном), физически связанном и свободном состояниях.

Кристаллизационная вода находится в строении кристаллических решеток минералов, т.е. внутри частиц грунта. Ее можно удалить только путем длительного нагревания, что часто приводит к разложению самих минералов и к изменению свойств грунта.

Взаимодействие воды с ионами поверхностного слоя глинистых частиц, заряженных отрицательно, приводит к ориентации и притягиванию молекул воды, являющихся диполями, к поверхности частиц. В результате поверхность твердой частицы покрывается монослоем молекул воды. Этот первый слой молекул воды, адсорбиро-

ванных на поверхности твердой частицы, станет воздействовать на другие близко расположенные молекулы воды. Таким образом, возникают устойчивые стройные пленки молекул воды, окружающие твердую глинистую частицу.

По мере удаления от поверхности глинистой частицы силы электрмолекулярного взаимодействия падают, концентрация катионов уменьшается, вследствие чего силы притяжения молекул воды поверхностью существенно ослабевают и на некотором расстоянии уменьшаются до нуля (рис. 1.4).

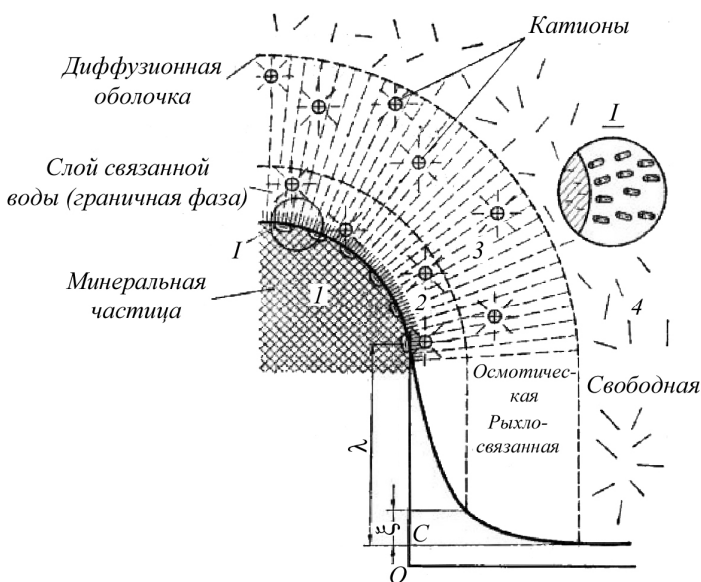


Рис. 1.4. Схема взаимодействия глинистых частиц с водой

Электрмолекулярные удельные силы взаимодействия между поверхностью твердой частицы и молекулами воды у самой поверхности достигают 1000 МПа. Вода, адсорбированная на поверхности твердых частиц, называется *связанной* и разделяется на *прочносвязанную воду* в пределах одного или нескольких (до четырех) слоев молекул воды и *осмотическую, или рыхлосвязанную, воду*.

Прочносвязанная вода обладает специфическими свойствами, резко отличающимися ее от свободной воды. По своим свойствам она скорее соответствует твердому, а не жидкому телу. Прочносвязанная вода не отделяется от твердых частиц при воздействии сил, в тысячи

раз превышающих силы земного притяжения, замерзает при температуре значительно ниже 0°C (до -70°C), имеет большую, чем свободная вода, плотность ($1,2\dots 2,4\text{ г/см}^3$), обладает вязкостью и ползучестью. Такую воду можно отделить от твердых части лишь выпариванием при температуре значительно выше 100°C .

Рыхлосвязанная вода представляет собой диффузный переходной слой от прочносвязанной к свободной воде. Она обладает свойствами прочносвязанной воды, но они проявляются слабее. Это обусловливается резким уменьшением в слое рыхлосвязанной воды удельных сил взаимодействия между поверхностью твердой частицы и молекулами воды (см. рис. 1.4). Свойства пылевато-глинистых грунтов в значительной степени зависят от толщины пленок рыхлосвязанной воды. Причем чем больше дисперсность грунта, содержащего глинистые или коллоидные частицы, т.е. чем больше суммарная площадь поверхности, тем в большей степени будет проявляться воздействие электромолекулярных сил.

Наличие между частицами глинистого грунта связанной (пленочной) воды определяет его *пластичность*. Чем толще пленки воды, тем меньше прочность грунта, и наоборот. Изменение толщины пленок воды, окружающих глинистые частицы, приводит к изменению состояния грунта от почти текучей до твердой *консистенции*. При малой толщине пленок пылевато-глинистые грунты обладают *сцеплением*. Поскольку сцепление обусловлено наличием связанной воды, такие грунты обладают еще и *ползучестью*.

Увлажнение пылевато-глинистого грунта приводит к увеличению толщины пленок воды между частицами и сопровождается увеличением его объема, т.е. такой грунт обладает свойством *набухаемости*. При высыхании глинистые грунты уменьшаются в объеме за счет утончения пленок связанной воды, что приводит к его *усадке*.

Если пылевато-глинистый грунт содержит малое количество рыхлосвязанной воды и при этом его поры полностью заполнены водой, то фильтрация воды в таком грунте практически невозможна (жирная глина) и его можно использовать как гидроизоляционный материал.

Прочность, или связность, грунта может резко снижаться при нарушении расположения молекул воды и твердых частиц, например при динамических воздействиях или перемятии. Со временем возможно восстановление прочности (явление *тиксотропии*).

Вне пределов воздействия электромолекулярных сил вода обладает свойствами, присущими ей в открытых сосудах, и называется

свободной водой. Такая вода подчиняется законам фильтрации. Свободную воду часто делят на *гравитационную и капиллярную воду.*

В крупнообломочных, крупнозернистых песчаных грунтах преобладает гравитационная вода. Капиллярная вода находится выше уровня грунтовых вод и содержится в мелкозернистых песчаных и глинистых грунтах. Высота столба капиллярной воды существенно зависит от гранулометрического состава грунта и колеблется от нескольких сантиметров до нескольких метров.

Таким образом, в отличие от сыпучих грунтов *пылевато-глинистые грунты благодаря наличию в их составе связанной воды (прочной и рыхлосвязанной) обладают свойствами пластичности, связности, ползучести, набухаемости при увлажнении, усадки при высыхании, размокаемости, водонепроницаемости, тиксотропности и т.д.*

1.1.5. Газ в грунтах

Газы в зависимости от их количества и состояния могут влиять на ряд свойств грунтов: увеличивать или уменьшать упругую часть деформации, фильтрационную способность и т.д.

Газы в грунтах находятся в адсорбированном, защемленном и свободном состоянии.

Адсорбированным газом называют газ, удерживаемый на поверхности сухих твердых частиц силами электростатического притяжения. При увлажнении грунта адсорбированные газы легко вытесняются адсорбированной водой. В естественно влажных (5...10%) грунтах адсорбированный газ отсутствует.

Защемленный газ образуется в грунте в результате выделения из раствора, вытеснения адсорбированного газа пленками воды и образования замкнутых пор (рис. 1.5, а). Кроме того, он образуется в результате разности скоростей передвижения капиллярной воды в сообщающихся порах различного диаметра. По мелким сообщающимся порам вода поднимается выше и быстрее, чем по крупным, поэтому к крупным порам вода может подойти с противоположных сторон и оставить в них газ защемленным (рис. 1.5, б).

В глинистых грунтах защемленные газы занимают до 20...30% общего объема пор. Адсорбированный и защемленный газ, увеличивая сжимаемость грунта, практически не уменьшает его прочности.

Газ в *свободном состоянии* сообщается с атмосферой и практически представляет собой воздух. Свойства грунтов от содержания свободного воздуха, по сути дела, не зависят. При степени влажно-

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ	7
1.1. Происхождение, состав грунтов, их структура и текстура	7
1.2. Характеристики физического состояния грунтов	21
1.3. Классификационные показатели грунтов	25
<i>Контрольные вопросы для самопроверки по главе 1</i>	31
Глава 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ	32
2.1. Общие исходные положения	32
2.2. Водопроницаемость грунтов	37
2.3. Сжимаемость грунтов	47
2.4. Сопротивление грунтов сдвигу	62
2.5. Динамические свойства грунтов	71
2.6. Нормативные и расчетные характеристики грунта	84
<i>Контрольные вопросы для самопроверки по главе 2</i>	86
Глава 3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСОБЫХ ГРУНТОВ	87
3.1. Общие положения	87
3.2. Лессовые макропористые грунты	87
3.3. Мерзлые и вечномерзлые грунты	91
3.4. Рыхлые водонасыщенные пески	105
3.6. Органоминеральные и органические грунты, чувствительные глины	107
3.7. Набухающие грунты	109
3.8. Скальные грунты	111
3.9. Крупнообломочные грунты	112
3.10. Техногенные грунты	113
<i>Контрольные вопросы для самопроверки по главе 3</i>	114
Глава 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ ГРУНТА	115
4.1. Применимость решений теории упругости к дисперсным грунтам	115

4.2. Напряжения в массиве грунта от действия внешних нагрузок.....	118
4.3. Влияние некоторых дополнительных факторов на распределение напряжений в пределах полупространства.....	134
Контрольные вопросы для самопроверки по главе 4.....	140
Глава 5. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОСАДОК ФУНДАМЕНТОВ.....	142
5.1. Определение конечной осадки поверхности слоя грунта при сплошной нагрузке.....	142
5.2. Определение конечных осадок фундаментов.....	144
5.3. Развитие осадок оснований во времени.....	152
5.4. Заключение по главе 5.....	160
Контрольные вопросы для самопроверки по главе 5.....	162
Глава 6. ТЕОРИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ.....	163
6.1. Общие положения.....	163
6.2. Устойчивость грунтов в основании сооружений.....	164
6.3. Устойчивость грунтов в откосах и склонах.....	178
6.4. Определение давления грунта на подпорные стенки.....	189
Контрольные вопросы для самопроверки по главе 6.....	201
Глава 7. ОСНОВЫ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ.....	202
7.1. Общие положения.....	202
7.2. Основные понятия метода конечных элементов.....	203
7.3. Применение МКЭ для реализации нелинейных решений.....	207
7.4. Практическая реализация решения геотехнических задач МКЭ.....	210
7.5. Заключение по главе 7.....	211
7.6. Примеры решения геотехнических задач методом конечных элементов.....	213
Контрольные вопросы для самопроверки по главе 7.....	220
Заключение.....	221
Основные обозначения.....	222
Рекомендуемая литература.....	224
Терминологический словарь.....	227