

А. Ю. Михайлов, Ж. Г. Концедаева

МЕХАНИКА ГРУНТОВ. КУРС ЛЕКЦИЙ

Учебное пособие

Рекомендовано для студентов вузов, изучающих
курсы дисциплин «Основы геотехнологии»,
«Основания и фундаменты» в рамках направления подготовки
08.03.01 «Строительство»

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2021

УДК 624.131
ББК 38.58
М69

Рецензент:

доктор физико-математических наук, профессор, заведующая кафедрой градостроительства, землеустройства и дизайна Института природопользования, территориального развития и градостроительства Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта *Дмитриева М. А.*

Михайлов, А. Ю.

М69 Механика грунтов. Курс лекций : учебное пособие / А. Ю. Михайлов, Ж. Г. Концедаева. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 364 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0507-2

Изложен курс лекций, приведены примеры решения задач, даны контрольные вопросы для проверки знаний с ответами. Учтены требования актуальных нормативных документов, учебных планов и рабочих программ для студентов.

Для студентов всех форм обучения строительных направлений. Пособие также может быть полезно преподавателям.

УДК 624.131
ББК 38.58

ISBN 978-5-9729-0507-2 © Михайлов А. Ю., Концедаева Ж. Г., 2021
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

Оглавление

От авторов	6
Основные условные обозначения	7
Глава 1. Курс лекций	8
Л.1 Основные свойства грунтов. Закон уплотнения Терцаги	8
1.1 Содержание курса и краткий исторический обзор	8
1.2 Классификация грунтов	13
1.3 Основные характеристики и свойства грунтов	19
1.4 Закон уплотнения Терцаги	27
Л.2 Фазы напряженно-деформированного состояния грунта. Законы механики грунтов	32
2.1 Фазы напряженно-деформированного состояния грунта	32
2.2 Закон прочности Кулона – Мора (сопротивление сдвигу)	36
2.3 Закон ламинарной фильтрации Дарси	46
Л.3 Распределение напряжений в грунтовом массиве от действия внешних нагрузок	50
3.1 Распределение напряжений в грунтовом массиве	50
3.2 Напряжения в грунте от вертикальной сосредоточенной силы (задача Ж. Буссинеска)	51
3.3 Напряжения в грунтовом массиве от действия группы сосредоточенных сил (принцип Сен-Венана)	54
3.4 Напряжения в грунтовом массиве от действия нагрузки, распределенной по прямоугольнику	55
Л.4 Закономерности распределения напряжений в грунтах	60
4.1 Напряжения в грунте от равномерно-распределенной нагрузки. Задача Фламана	60
4.2 Изобары, распоры, сдвиги. Закономерности распределения нпряжений	62
4.3 Контактные напряжения	64
4.4 Напряжения от собственного веса грунта	68
Л.5 Теория предельного напряженного состояния грунта. Подпорные стены	70
5.1 Начальное критическое краевое давление. Задача Пузыревского	70

5.2	Предельное критическое давление. Огибающие зон предельного равновесия	73
5.3	Давление грунта на подпорные стены	76
5.4	Устойчивость подпорных стен	83
5.5	Шпунтовые ограждения	84
Л.6	Устойчивость грунтовых откосов. Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения	87
6.1	Устойчивость откоса из идеально сыпучего грунта	87
6.2	Графо-аналитический метод расчета устойчивости откоса (метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения)	93
6.3	Расчет устойчивости пристенного оползня	97
6.4	Оценка устойчивости основания насыпи	98
Л.7	Модели грунтового основания.	
	Методы расчета осадок оснований фундаментов	105
7.1	Виды и причины вертикальных деформаций	105
7.2	Модели грунтового основания	112
7.3	Определение осадки основания фундаментов методом последнего суммирования	113
7.4	Проверка прочности подстилающего слоя	116
7.5	Определение осадки основания фундаментов методом эквивалентного слоя (метод Н. А. Цытовича)	118
7.6	Определение конечной осадки поверхности слоя грунта при сплошной нагрузке	120
7.7	Определение осадки основания фундаментов методом линейно-деформируемого слоя конечной толщины (метод К. Е. Егорова)	121
7.8	Определение осадки основания фундаментов другими известными методами	122
Л.8	Фильтрационная консолидация и ползучесть грунта.	
	Нелинейные модели грунтового основания	125
8.1	Одномерная задача фильтрационной консолидации	125
8.2	Влияние начального градиента на процесс уплотнения водонасыщенного грунта	130
8.3	Ползучесть грунтов	131
8.4	Нелинейные модели грунтового основания	134
	Глава 2. Задачи с решениями	136
П.1	Физико-механические характеристики грунтов	136
П.2	Прочностные характеристики грунтов	159

П.3	Распределение напряжений в грунтовом массиве от действия внешней нагрузки	174
П.4	Контактные напряжения. Напряжения от собственного веса грунта	185
П.5	Теория предельного напряженного состояния грунта. Устойчивость подпорных стен	197
П.6	Устойчивость грунтовых откосов	212
П.7	Расчет осадок оснований фундаментов	220
П.8	Фильтрационная консолидация и ползучесть грунта	247
	Глава 3. Контрольные вопросы с ответами	259
В.1	Грунты и их физико-механические свойства	259
В.2	Деформационные и фильтрационные свойства грунтов ...	272
В.3	Напряженно-деформированное состояние грунтов	287
В.4	Закономерности распределения напряжений в грунтах ...	305
В.5	Теория предельного напряженного состояния грунта	311
В.6	Устойчивость грунтовых откосов и склонов	322
В.7	Подпорные стены	338
В.8	Реологические свойства грунтов	344
В.9	Динамические свойства грунтов	347
	Приложение. Справочные таблицы	352
	Список использованной литературы	359

От авторов

Механика грунтов, или как сейчас модно говорить «Геотехнология», это все-таки, не одно и то же. В понятии геотехнологии по современным представлениям обобщаются направления добычи полезных ископаемых открытым и подземным способом, а также подземное строительство.

Механика же грунтов является составной частью общей, классической механики, теоретической базой для дисциплины «Основания и фундаменты», и объектом ее изучения являются грунты, используемые в качестве естественных или искусственных оснований.

Объем сведений, изложенных в настоящем учебном пособии, призван обеспечить минимально необходимый уровень подготовки студентов-бакалавров, и не заменяет общепризнанные учебники Н. А. Цытовича, Н. Н. Маслова, Б. И. Далматова, и других авторов.

Знания о прочностных и деформационных свойствах грунтов, их устойчивости, а также о применяемых методах расчетов, позволит будущим специалистам в дальнейшем вполне успешно решать практические задачи по проектированию и возведению фундаментов зданий и сооружений.

Очень важно при изучении механики грунтов не просто научиться применять те или иные формулы, табличные значения, а понять физический смысл процессов и явлений, особенности распределения напряжений, причины развития деформаций, границы применимости расчетных моделей.

К сожалению, приходится констатировать, что число часов, выделяемых на изучение механики грунтов учебными планами вузов, постоянно сокращаются, либо предпринимаются попытки объединить с другими дисциплинами, а то и вовсе исключить. В таких условиях добиться качественной подготовки можно только за счет активизации самостоятельной работы студентов.

Настоящее пособие содержит курс лекций, практические задания с решениями и контрольные вопросы с ответами. Представленный материал может быть полезным как для студентов, слушателей курсов повышения квалификации, так и для преподавателей. Безусловно, настоящее учебное пособие в представленном формате далеко не идеально, поэтому авторы с благодарностью примут все замечания и пожелания.

Авторы

Основные условные обозначения

Символ	Наименование	Символ	Наименование
A	площадь штампа, фундамента	q	равномерно-распределенная нагрузка
a	заложение откоса	R	расчетное сопротивление грунта основания
b	ширина фундамента	s	осадка грунта
c	удельное сцепление грунта	V	объем образца (тела)
c_c	коэффициент компрессии	V_a	объем газа
D	диаметр штампа	V_s	объем частиц грунта
d	глубина заложения фундамента	V_w	объем воды
E	модуль деформации	z	глубина
e	коэффициент пористости	α	угол естественного откоса
e_0	начальный коэффициент пористости	ε	относительная деформация
f	коэффициент трения	γ	удельный вес
G	вес	γ_d	удельный вес грунта в сухом состоянии
g	ускорение свободного падения	γ_s	удельный вес частиц грунта
H_c	мощность сжимаемого слоя	γ_{sb}	удельный вес грунта с учетом взвешивающего действия воды
h	мощность (толщина) слоя	γ_w	удельный вес воды
h_s	толщина эквивалентного слоя	β	коэффициент, учитывающий отсутствие поперечных деформаций в компрессионном приборе
I	градиент напора	ν	коэффициент Пуассона
I_0	начальный градиент напора	ρ	плотность
I_L	показатель текучести	ρ_d	плотность сухого грунта
I_P	показатель пластичности	ρ_s	плотность частиц грунта
k_f	коэффициент фильтрации	ρ_w	плотность воды
M	момент	ξ	коэффициент бокового давления в состоянии покоя
m	масса	σ	нормальное напряжение
m_s	масса твердых частиц	σ_z	вертикальное нормальное напряжение
m_w	масса воды	σ_{zp}	нормальное сжимающее напряжение от равномерно распределенной нагрузки
m_v	коэффициент относительной сжимаемости	σ_{zg}	вертикальное нормальное сжимающее напряжение от собственного веса грунта
p	среднее давление под подошвой фундамента		

Глава 1. Курс лекций

Л.1. Основные свойства грунтов. Закон уплотнения Терцаги

Время: 2 часа

1.1. Содержание курса и краткий исторический обзор

Дисциплина «Механика грунтов» изучает вопросы прочности и устойчивости грунтовых массивов, определяет возможность их использования в качестве оснований, наблюдение за состоянием грунтов в процессе эксплуатации зданий и сооружений. Настоящий курс являются естественным продолжением таких дисциплин, как «Инженерная геология» и «Инженерные изыскания в строительстве». *Основной целью* курса является изучение основ теории расчета оснований по предельным состояниям I и II группы предельных состояний в соответствии с действующими строительными нормами.

Основными задачами, решаемыми в процессе изучения курса, являются: установление основных закономерностей грунтов и обобщение их в виде законов; изучение распределения напряжений в грунтовом массиве; исследование прочности оснований и грунтовых массивов с использованием теории предельного равновесия; изучение методов расчета осадок оснований фундаментов, в том числе в условиях незавершенной консолидации грунтов.

Первой фундаментальной работой по механике грунтов принято считать исследование Кулона (Франция, 1773) по теории прочности сыпучих тел, известное в современной механике как закон Кулона – Мора.

Академик Н. И. Фусс (Россия, 1801) и инженер Э. Винклер (Франция, 1867) предложили механические модели грунтового основания для расчета конструкций, взаимодействующих с грунтовой средой. Фусс Н. И. исследовал процесс движения колеса конной повозки с образованием колеи, т. е. рассматривал образование и развитие локальных деформаций под нагруженной площадкой, которые были полностью необратимыми. По такой схеме ведут себя рыхлые и слабо уплотнённые насыпные грунты.



Николай Иванович Фусс (1755–1825), Базель – Санкт-Петербург) – русский математик швейцарского происхождения, академик Санкт-Петербургской Академии наук, почётный член и член-корреспондент множества научных обществ; действительный статский советник. Основные научные исследования относятся к областям алгебры, анализа, геометрии, механики.

Винклер Э. предложил модель грунта в виде системы ничем не связанных между собой упругих пружин, которые под локальной нагрузкой будут сжиматься, а после снятия нагрузки – полностью распрямляться.

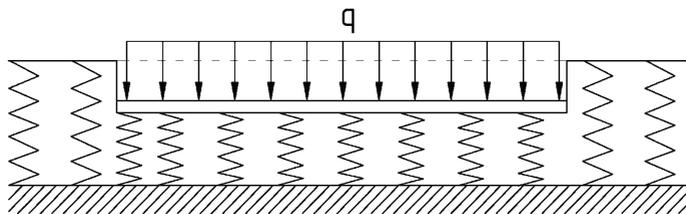


Рис. 1.1. Модель Винклера

Т. е., возникло предположение, что между осадкой и давлением грунта под подошвой существует некоторая прямая зависимость:

$$p = Y \cdot k ,$$

где p – давление под подошвой;

Y – осадка;

k – коэффициент пропорциональности («коэффициент постели»), зависящий только от физических свойств грунта, определяется экспериментально и имеет размерность силы отнесенной к объему.

При такой модели упругая среда не обладает распределительной способностью. Её рассматривают как гидростатическое упругое основание. Т. е. под влиянием нагрузки балка прогибается и опускается в воду на величину прогиба y . При этом по закону Архимеда создаётся направленная вверх погонная сила

$$p = -\gamma by ,$$

где γ – удельный вес жидкости;
 b – ширина балки.

Реакция со стороны жидкости пропорциональна прогибу. Эту схему используют для расчёта фундаментов. В место γ вводится коэффициент жёсткости c (Н/см³) или постели k . Окончательно

$$p = kby .$$

К основным недостаткам модели Винклера можно отнести:

1) деформация основания происходит только в области, приложенной к нему нагрузки. Данная модель достаточно хорошо отражает реальные свойства рыхлых и несвязных оснований, но совершенно не подходит для плотных и, тем более, скальных оснований из-за не учета деформаций основания, которые происходят за пределами области приложения нагрузки. Согласно наблюдениям грунт оседает а, следовательно, напряжен и за пределами фундамента;

2) на практике равномерно нагруженные балки и плиты проседают не равномерно, а, как правило, выпуклостью вниз;

3) значение коэффициента постели k зависит от размеров штампа, которым производится испытание для определения этой величины. Коэффициент постели k получается тем больше, чем меньше площадь штампа. Табличные значения не имеют определенных значений, а представлены диапазонами значений.

Недостатки модели Винклера привели к разработке модели линейно деформируемого полупространства. В основу модели положен закон Гука – линейная зависимость между напряжениями и деформациями и, что весьма существенно, представления об идеальной упругости материала – полное восстановление деформаций при снятии нагрузки, т. е. в условиях одноосного простого сжатия или растяжения.

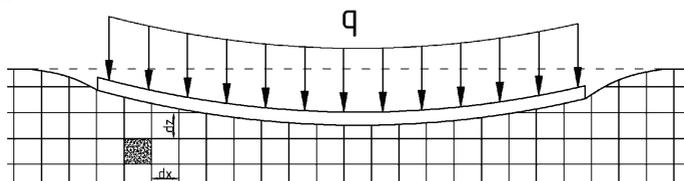


Рис. 1.2. Модель линейно-деформируемого полупространства

Эта модель была предложена и развита в трудах советских ученых и в отличие от предыдущей модели считается, что поверхность грунта оседает как в пределах площади загрузки, так и за ее

пределами. Грунт рассматривается как линейно-деформируемая среда, модуль упругости заменяется понятием «модуль общей деформации».

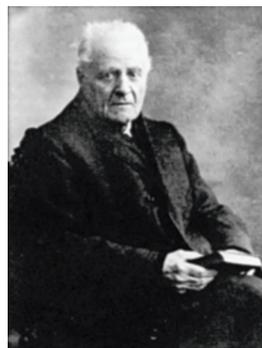
Закономерности фильтрационных процессов в песчаных грунтах были впервые установлены А.Дарси (Франция, 1856) и обобщены в современной механике как закон ламинарной фильтрации Дарси.



Анри Филибер Гаспар Дарси (1803–1858, Париж) – французский инженер-гидравлик, обобщивший закон (1856), связывающий скорость фильтрации жидкости в пористой среде с градиентом давления. Под руководством Дарси в г. Дижоне была создана первая в Европе система городских очистных сооружений с различными фильтрационными засыпками.

Труд профессора Ж.В.Буссинеска (Франция, 1885) «О распределении напряжений в упругой почве от сосредоточенной силы» изучается до настоящего времени и является основополагающим в теории распределения напряжений в грунте.

Буссинеск Жозеф Валантен (1842–1929) французский математик, физик, механик. Член Парижской Академии наук (1886), доктор (1867) и профессор (1886) Парижского университета. Автор ряда работ по гидродинамике, оптике, термодинамике, теории упругости. Развил теорию упругости С. Пуассона, предложил метод определения напряжений и деформаций в полубесконечной среде, находящейся под действием заданных сил, приложенных к ее граничной плоскости.



Механика грунтов как самостоятельная дисциплина возникла с момента опубликования монографии профессора К. Терцаги (Германия, 1925) «Строительная механика грунтов». Именно ему принадлежит установление в теории расчета осадок зависимости, известной как закон уплотнения Карла Терцаги.



Карл Терцаги (1883–1963) – австрийский и американский геолог и инженер-строитель, один из основоположников механики грунтов. Его монография «Строительная механика грунтов» изданная в 1925 г. считается первым монументальным трудом посвященным данной тематике.

Существенное развитие механика грунтов получила в работах ученых советской школы: Н. П. Пузыревский (1923), Н. М. Герсеванов (1931), В. А. Флорин (1936), Д. Л. Соколовский (1942), А. С. Егоров (1948), В. Г. Березанцев (1948). Первый курс лекций по механике грунтов в нашей стране был подготовлен профессором Н. А. Цытовичем (1934).

Николай Александрович Цытович (1900–1984) советский учёный и педагог, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии Наук СССР. Герой Социалистического Труда. Заслуженный деятель науки и техники РСФСР.

Основоположник мерзлотоведения, учёный с мировым именем, возглавлявший долгое время отечественную школу механики грунтов.



Николай Николаевич Маслов (1898–1986) советский учёный и педагог, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Государственной премии СССР, автор неповторимого по своей оригинальности курса «Основы инженерной геологии и механики грунтов».

Основоположник методов оценки сопротивляемости сдвигу глинистых грунтов, степени устойчивости склонов и откосов, теории оценки ползучести, фильтрационной теории устойчивости водонасыщенных песков.

1.2. Классификация грунтов

Поверхность Земли называется земной корой или *литосферой* (по греч. «литос» – камень), является твёрдой оболочкой, состоит из осадочного, гранитного и базальтового слоёв. По своему происхождению они подразделяются на:

– магматические или изверженные, образовавшиеся в результате застывания магмы, имеют кристаллическую структуру и классифицируются как скальные грунты;

– метаморфические, образовались в результате воздействия на осадочные породы высоких температур и больших давлений, классифицируются как скальные грунты.

– осадочные, образовались в результате разрушения и выветривания горных пород под воздействием воды и воздуха, классифицируются как скальные и нескальные грунты.

Гранитный слой располагается ниже слоя осадочных пород, сложен метаморфическими и магматическими горными породами. В тех случаях, когда гранитный слой выходит на поверхность Земли, его называют щитом, например: Балтийский, Канадский и т. д. Иногда гранитный слой полностью отсутствует.

Базальтовый слой, подстилающим слоем является гранитный слой и присутствующий повсеместно, сложен породами, близкими по составу и физическим свойствам к базальтам.

Осадочный слой слагает внешнюю часть земной коры, имеет небольшую мощность, от нескольких метров, до нескольких десятков метров в виде слоёв или пластов рыхлой или цементированной структуры, в некоторых местах земной коры этот слой полностью отсутствует. Осадочные породы покрывают около 75 % поверхности континентов, и поэтому будут рассматриваться нами в первую очередь в качестве оснований зданий и сооружений.

Осадочные слои могут быть сложены из *механических* (гравий, пески, глины), *химических* (руды железа, марганца, бокситы, ископаемые соли) и *биохимических пород* (нефть, газ, уголь).

По способу образования *континентальные осадочные породы* имеют характерные признаки, приведенные в табл. 1.1.

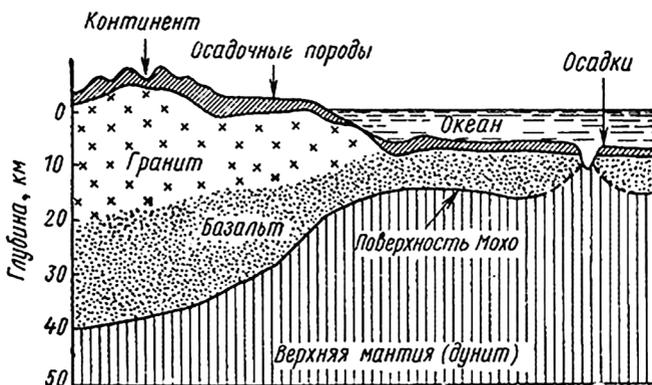


Рис. 1.3. Строение земной коры

Таблица 1.1

Некоторые виды осадочных отложений,
различающихся по генезису

Условное обозначение	Происхождение (генезис)	Характерные признаки
<i>A</i>	Аллювиальные – отложения, перенесенные водными потоками на значительные расстояния, подразделяются на: – русловые (пески, галечники); – пойменные (суглинки); – старичные (илы, торф)	окатанная форма от крупных до мельчайших частиц
<i>E</i>	Элювиальные – продукты выветривания скальных горных пород, оставшиеся на месте образования, сохранившие в той или иной степени структуру и текстуру исходных пород (супеси, пески пылеватые, суглинки с примесями)	имеют угловатую форму зерен
<i>D</i>	Делювиальные – отложения, перенесенные к основанию склона дождевыми и тальными водами	имеют неоднородные напластования
<i>V</i>	Эоловые – продукты осаждения частиц, перенесенные ветром (пески, лессы)	пески дюн, барханов

Условное обозначение	Происхождение (генезис)	Характерные признаки
<i>M</i>	Морские – отложения морей, подразделяются на: – прибрежные (песок, гравий, галька); – шельфовые (ил, известняк); – осадки ложа океана (ил)	обладают низкой несущей способностью
<i>L</i>	Озерные – образуются отложениями частиц на дне озера (сапропели, илы)	то же
<i>G</i>	Ледниковые – отложения рыхлых пород, образовавшиеся в результате действия ледников с прослойками и включениями разного состава	неоднородные по своему составу

Горные породы, являющиеся объектом инженерно-строительной деятельности человека, принято называть *грунтами*. Скальные породы и почвы также именуется грунтами. Есть несколько определений термина «грунт», например, такое:

Грунтами называют любые горные породы коры выветривания земли – сыпучие или связные, прочность связей у которых между частицами во много раз меньше, чем прочность самих минеральных частиц, или эти связи между частицами отсутствуют вовсе.

В дальнейшем грунт мы будем рассматривать с позиций общей механики, который представляет собой сложную многофазную и неоднородную систему.

В составе объема грунта присутствуют вещества в трех фазовых состояниях: минеральные частицы (твердая фаза); грунтовая вода (жидкая фаза); газ и пар (газообразная фаза). Систему минеральных частиц, составляющих грунт, называют его *скелетом*.

Минеральные частицы могут иметь размеры от десятков миллиметров до долей микрона. Это порождает большое разнообразие видов грунта, существенно отличающихся своими свойствами. Пространство между минеральными частицами, заполненное водой, газом или паром, называют порами. Давление в порах называют поровым давлением. Оно может относиться исключительно к воде, если все поры заполнены водой, исключительно к газу при отсутствии

воды в порах или к поверхности раздела фаз «вода – газ (пар)». Газ и пар могут также содержаться в пузырьках или в растворенном (газ) в воде виде.

Т. о. грунт по своему составу может быть одно, двух или трехкомпонентным (рис. 1.4), где V – объем грунта в образце, V_n – объем пор, V_w – объем воды в порах, V_s – объем минеральных частиц грунта, m – масса образца грунта, m_s – масса минеральных частиц грунта, m_w – масса воды в порах грунта.

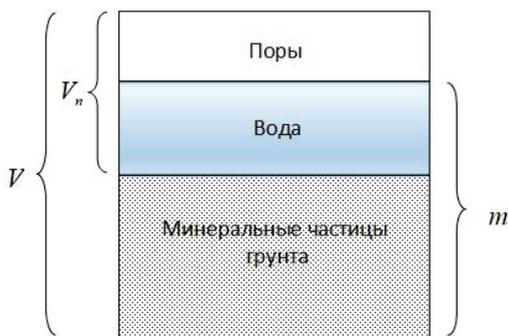


Рис. 1.4. Трехкомпонентная модель грунта

Под *структурой* грунта понимается размер, форма и количественное (процентное) соотношение слагающих грунт частиц.

Между минеральными частицами грунта могут существовать цементационные или коллоидные связи, прочность которых определяет степень связности грунта. Природа этих связей, называемых структурными, как и любых связей в твердом теле, электрическая.

Под *текстурой* грунта понимается пространственное расположение элементов грунта с разным составом и свойствами. Текстура характеризует неоднородность строения грунта в пласте залегания. Текстура бывает массивной, слоистой и сетчатой.

Если напряжения в скелете грунта не превышают прочности связей между минеральными частицами, скелет деформируется упруго. Напряжения в скелете в общем случае не совпадают с поровым давлением. Сопротивление грунта нагружению определяется суммой напряжений в скелете и порового давления.

В зависимости от температуры и давления компоненты, составляющие грунт, могут претерпевать процессы фазовых переходов.

Например, при низких температурах грунтовая вода может частично переходить в лед (твердая фаза). При извлечении образца грунта с большой глубины происходит его упругое расширение в связи с уменьшением напряжений на поверхности выделенного объема до нуля. Расширение грунта может привести к отрицательному (по сравнению с атмосферным давлением) значению порового давления. В результате этого могут протекать процессы газовой выделенности из поровой воды и превращения части поровой воды в пар (парообразование). При повышении порового давления могут наблюдаться процессы растворения газов и конденсации пара.

Минеральные частицы некоторых грунтов, а также связи между ними могут состоять из растворимых солей. В этом случае перемещение поровой воды может приводить к растворению и переносу вещества. Присутствие в поровой воде растворов солей, кислот и щелочей делает ее агрессивной по отношению к конструкциям фундаментов.

Указанные особенности поведения грунтов при изменении давления и температуры изучаются в специальных разделах механики.

В строительной практике грунты подразделяются в зависимости от характера связей (рис. 1.5) и по физико-механическим характеристикам.

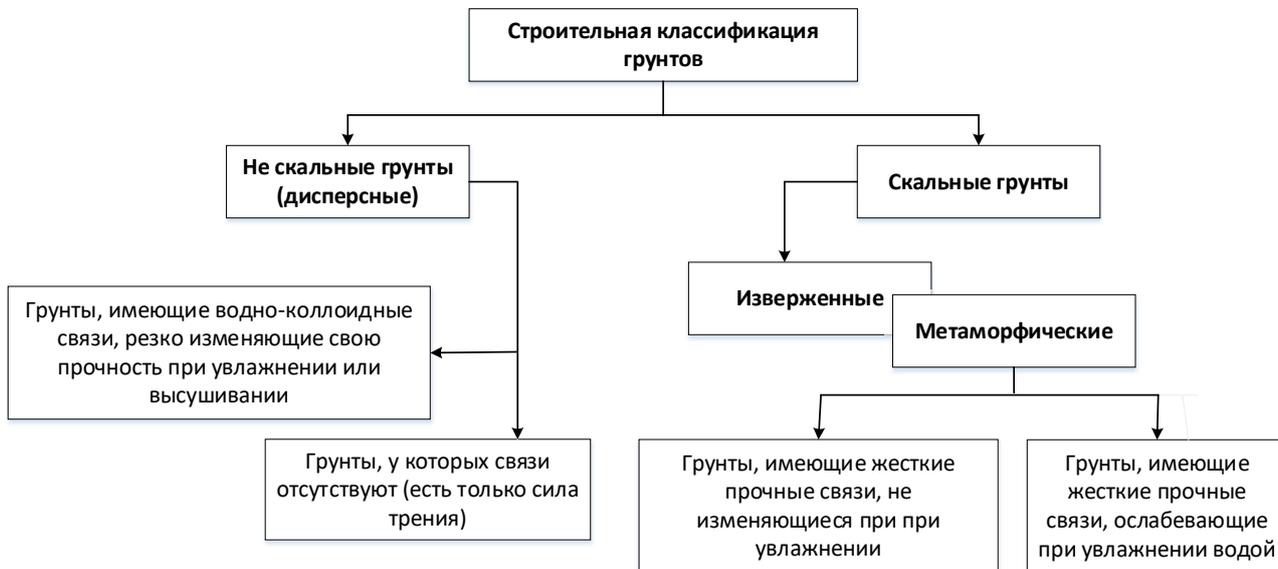


Рис. 1.5. Строительная классификация грунтов

Примечание. Скальные грунты в нашем курсе не рассматриваются, т.к. они являются предметом для подробного изучения в дисциплинах, не связанных со специализацией «Промышленное и гражданское строительство».

1.3. Основные характеристики и свойства грунтов

Итак, как уже отмечалось, грунт состоит из минеральных частиц + воды + воздуха. От соотношения этих трех фаз зависят характеристики грунтов. Для определения физических свойств грунтов необходимо знать, как минимум, пять простейших показателей, входящих в уравнения механики грунтов, определяемые в лабораторных условиях:

- плотность грунта;
- плотность сухого грунта;
- природную влажность грунта;
- влажность на границе пластичности (глинистые грунты);
- влажность на границе текучести (глинистые грунты).

Эти характеристики являются важнейшими для определения целого ряда показателей. Следует различать характеристики грунтов, определяемых опытным путем и расчетом.

Таблица 1.2

Группа характеристик, определяемая опытным путем

Наименование	Обозначение	Формула	Размерность
Плотность грунта	ρ	$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_n}$	кг/м ³
Плотность сухого грунта	ρ_s	$\rho_s = \frac{m_s}{V_s + V_n}$	кг/м ³
Влажность грунта	W	$W = \frac{m_w}{m_s} 100\%$	%
Влажность грунта на границе пластичности	W_p	$W_p = \frac{m_{wp}}{m_s}$	безразмерна
Влажность грунта на границе текучести	W_L	$W_L = \frac{m_{wL}}{m_s}$	безразмерна

Плотностью грунта ненарушенной (естественной) структуры называют отношение массы всего грунта (со всеми включениями) к его объёму. Могут применяться методы режущего кольца, взятия пробы из лунки и парафинирования.

Плотностью сухого грунта называют отношение массы минеральных частиц к его объёму, определяется с помощью пикнометра.

Влажностью грунта (весовой) называют отношение массы воды к массе сухого грунта.

Влажность грунта на границе раскатывания – влажность, при которой грунт переходит в полутвёрдое состояние. Определяется раскатыванием жгута толщиной 3 мм и шириной 10 мм.

Влажность грунта на границе текучести – влажность, при которой грунт переходит в текучее состояние.

Величина условная, определяется при помощи погружения стандартного конуса в исследуемый грунт при изменении влажности. При погружении конуса на определённую глубину, считается, что он достиг границы текучести и при этом определяют его влажность.

Таблица 1.3

Группа характеристик, определяемая по расчету

Наименование	Обозначение	Формула	Размерность
Удельный вес грунта	γ	$\gamma = g \cdot \rho = g \cdot \frac{m_s + m_w}{V_s + V_n}$	кН/м ³
Удельный вес частиц грунта	γ_s	$\gamma_s = g \cdot \rho_s = g \cdot \frac{m_s}{V_s + V_n}$	кН/м ³
Удельный вес сухого грунта	γ_d	$\gamma_d = g \cdot \rho_d = \frac{\gamma}{1 + W_n}$	кН/м ³
Коэффициент пористости	e	$e = \frac{V_n}{V_s}$	безразмерна
Пористость	n	$n = \frac{V_n}{V} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}$	безразмерна

Удельным весом грунта называют отношение веса всего грунта (со всеми включениями) к его объёму, является показателем главным образом, минералогического состава и для большинства грунтов он меняется в незначительных пределах.

Удельным весом частиц грунта называют отношение только веса твёрдых частиц грунта к их объёму.

Удельным весом сухого грунта называют отношение только веса сухого грунта к его объёму.

Коэффициентом пористости грунта называют отношение объёма пор к объёму твердых частиц:

Величина коэффициента пористости для грунтов меняется в довольно широком диапазоне, примерно от 0,2 до 1,5 (для органоминеральных грунтов может составлять от 2 до 12).

Для грунтов достаточно уплотнённых коэффициент пористости $e \leq 1$, если же $e > 1$, то это показывает, что грунт имеет рыхлую структуру и строительство на таких грунтах требует проведению специальных мероприятий по их искусственному упрочнению. Отметим важное соотношение, вытекающее из определения коэффициента пористости:

$$V_n = \frac{e}{1+e} \quad \text{и} \quad V_s = \frac{1}{1+e}.$$

При полном заполнении пор грунта водой влажность будет равна отношению веса воды в объёме пор к весу твердых частиц.

Таблица 1.4

Группа характеристик, определяющих физическое состояние грунтов

Наименование	Обозначение	Формула	Размерность
Число пластичности	I_p	$I_p = W_L - W_p$	безразмерна
Показатель текучести	I_L	$I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p} = \frac{W_L - W_p}{I_p}$	безразмерна
Степень влажности	S_r	$S_r = \frac{V_w}{V_n} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \frac{W}{e}$	безразмерна
Полная влагоемкость	W_{sat}	$W_{sat} = \frac{e \cdot \rho_w}{\rho_s}$	безразмерна

Число пластичности характеризует способность грунтов удерживать воду в промежутке от полутвёрдого до текучего состояния. Чем больше в грунте глинистых частиц, тем больше число пластичности. По числу пластичности глинистые грунты подразделяются: супеси, суглинки и глины.

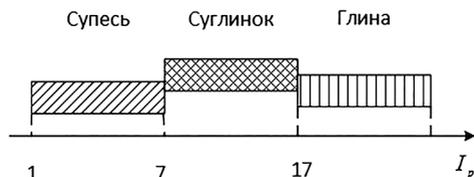


Рис. 1.6. Виды глинистых грунтов по I_p

Показатель текучести показывает состояние пластичности грунта при природной влажности (грунт находится в текучем, твёрдом или в каком-то промежуточном состоянии). Наименование глинистых грунтов складывается из наименования разновидности по числу пластичности и показателя текучести.

Таблица 1.5

Разновидность глинистых грунтов по показателю текучести

Разновидность глинистых грунтов	Показатель текучести I_L
Супесь	
Твёрдая	< 0
Пластичная	$0 - 1,0$
Текучая	$> 1,0$
Суглинки и глины	
Твёрдые	< 0
Полутвёрдые	$0 - 0,25$
Тугопластичные	$0,25 - 0,5$
Мягкопластичные	$0,5 - 0,75$
Текучепластичные	$0,75 - 1,0$
Текучие	$> 1,0$

Примечание. *Текущее и текучепластичное состояние грунтов делает его непригодным в качестве естественных оснований под фундаменты зданий и сооружений.*

Степень влажности грунтов (коэфф. водонасыщенности) – отношение природной влажности грунта к его полной влагоёмкости, соответствующего заполнению водой пор грунта.

Коэффициент пористости полностью водонасыщенного грунта равен произведению влажности на удельный вес:

$$e = W_{sat} \cdot \rho_s = W_{sat} \cdot \gamma_s.$$

Если полная влагоёмкость грунта W_{sat} превышает его влажность на границе текучести W_L , то это свидетельствует о непригодности грунта для целей строительства при потенциальной подтопляемости территории.

Коэффициент водонасыщенности природных глинистых грунтов близок к единице, но при наличии в грунтовой воде газов, он все-

гда меньше единицы, что, в конечном счёте, и сказывается на высокой сжимаемости поровой воды.

В табл.1.6 представлены характерные значения e , ρ , ρ_s для некоторых грунтов.

Таблица 1.6

Значения e , ρ , ρ_s для некоторых грунтов

Вид грунта	e	ρ , г/см ³	ρ_s , г/см ³
Песок	0,6...0,8	1,65	2,66±0,05
Супесь	0,7...0,9	1,80...2,1	2,70±0,05
Суглинок			2,71±0,05
Глина			2,74±0,05
Торф	4,0...18,0	0,9...1,1	1,50±0,05
Ил	1,0...1,8	1,3...1,55	2,20±0,10
Лесс	0,9...1,2	1,33...2,03	2,67±0,05
Сапропель	> 3,0	> 0,95	1,5...2,0

Несвязные (сыпучие) грунты подразделяются по степени влажности и плотности сложения (СНиП 2.02.01-83).

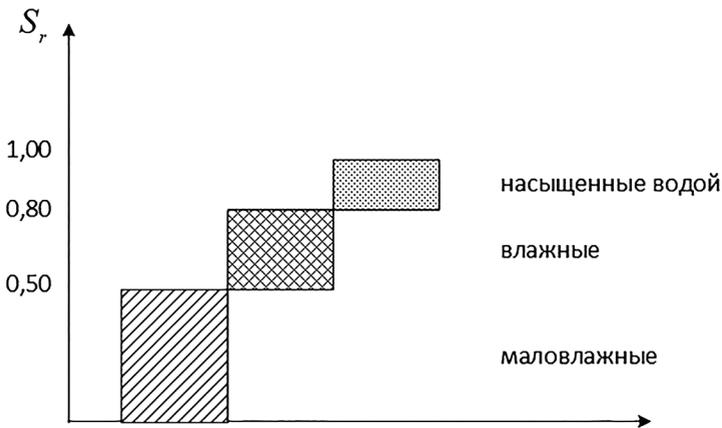


Рис. 1.7. Классификация песков и крупнообломочных грунтов по степени влажности

При $S_r = 0$ или $S_r = 1,0$ грунт находится в 2-х фазной системе, при $0 \leq S_r \leq 1$ т. е. при неполном водонасыщении грунт будет пред-

ставлять собой трёхфазную систему частиц – твёрдые минеральные частицы, вода и газы.

При полном водонасыщении, в большинстве своём залегающие ниже уровня грунтовых вод, уплотнённые пески, супеси, илы, слабые суглинки и глины представляют собой особый класс двухфазных грунтов, так называемую грунтовую массу.

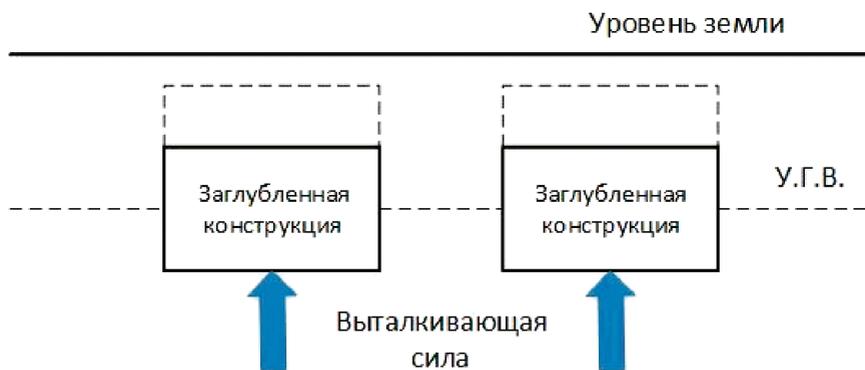


Рис. 1.8. Схема действия выталкивающей силы на конструкции, заглубленные в грунт ниже уровня грунтовых вод

В случае, если грунт находится в природном состоянии ниже уровня грунтовых вод, то на него тогда действует взвешивающее действие воды.

Выталкивающая сила по закону Архимеда будет определяться как

$$\gamma_0^{взв} = \frac{\gamma_S - \gamma_W}{1 + e}$$

данное обстоятельство имеет весьма важное практическое значение при проектировании фундаментов, а также любых других сооружений и конструкций, располагаемых ниже уровня залегания грунтовых вод.

Для песчаных грунтов при оценке их свойств как оснований для зданий и сооружений первостепенное значение имеет *плотность*.

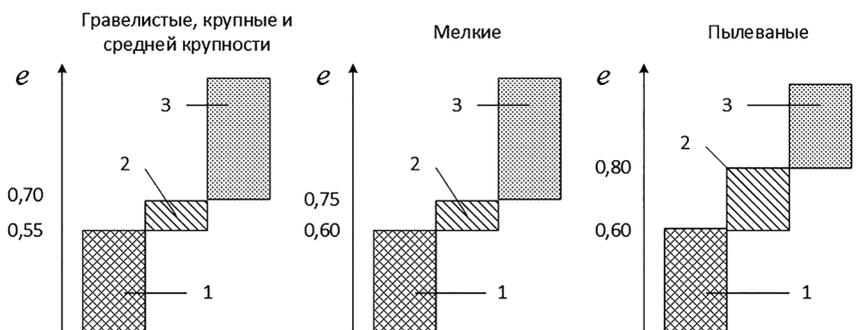


Рис. 1.9. Классификация песков и крупнообломочных грунтов по коэффициенту пористости:
1 – плотные, 2 – средней плотности, 3 – рыхлые

Нормативными документами запрещается строить здания и сооружения на *рыхлом грунте*. Такие грунты способны воспринимать достаточно большую статическую нагрузку, но при динамических нагрузках они теряют свою структуру (в водонасыщенном состоянии) и грунт переходит в *суспензию* (плывунное состояние).

Наименование несвязных грунтов складывается из разновидности по плотности сложения, гранулометрического состава (табл. 1.7) и степени однородности.

Таблица 1.7

Разновидность крупнообломочных грунтов и песков

Разновидность грунтов	Размер зёрен, частиц, мм	Содержание зёрен, частиц в % по массе
Крупнообломочные		
Валунный (при преобладании неокатанных частиц – глыбовый)	> 200	> 50
Галечниковый (при неокатанных гранях – щебенистый)	> 10	> 50
Гравийный (дресвяный)	> 2	> 50
Пески		
Гравелистый	> 2	> 25
Крупный	> 0,50	> 50
Средней крупности	> 0,25	> 50
Мелкий	> 0,10	> 75
Пылеватый	> 0,10	≤ 75

Состояние грунта можно определить по коэффициенту относительной плотности (индекс плотности)

$$D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}},$$

где e – коэффициент пористости грунтов в естественном состоянии,
 e_{\max} – коэффициент пористости грунта в *max* рыхлом состоянии,
 e_{\min} – коэффициент пористости в *min* рыхлом состоянии.

$0 \leq D \leq 1/3$ – рыхлое состояние, $R \approx 0$ – строить нельзя;
 $1/3 \leq D \leq 2/3$ – средняя плотность,
 $2/3 \leq D \leq 1$ – плотное состояние, $R \approx 0,5$ МПа .

В полевых условиях плотность грунтов достаточно часто определяют методом зондирования (пенетрации).

Среди глинистых грунтов выделяется особая группа: *илы, просадочные и набухающие*.

К *илам* относят глинистые грунты, образовавшиеся в виде осадка с большим содержанием остатков органического происхождения, обладающие в природном сложении влажностью, превышающей влажность на границе текучести W_L и коэффициентом пористости для супесей $e \geq 0,9$; для суглинков $e \geq 1$ и для глин $e \geq 1,5$.

Просадочными называют глинистые грунты, которые под действием внешней нагрузки или собственной массы при замачивании водой дают дополнительную осадку (просадку).

По предварительной оценке к просадочным грунтам относят лёссы и лёссовидные грунты.

К *набухающим* относятся глинистые грунты, которые при замачивании водой или химическими растворами увеличиваются в объёме. Набухающие грунты характеризуются величинами давления при набухании, влажности набухания и относительной усадкой при высыхании.

Среди полускальных (гипсовый камень, известняк, меловые отложения) и нескальных грунтов следует различать *засоленные* грунты, содержащие легкорастворимые соли от 0,5 до 5 % по массе от воздушно-сухого грунта.

Грунты с отрицательной температурой, содержащие в своём составе лёд, называются *мёрзлыми*, а если они находятся в таком состоянии более 3 лет – *вечномёрзлыми*.

К нескальным грунтам относятся также грунты искусственного происхождения или сложения: насыпные, закреплённые и уплотнённые различными способами.

Насыпные грунты в зависимости от способа укладки подразделяются на отсыпанные в сухом состоянии или намытые. По однородности состава и сложения подразделяются на планомерно возведённые насыпи, отвалы грунтов и отходов производства, свалки грунтов и бытовых отходов, по степени уплотнения от собственной массы они могут быть слежавшимися и не слежавшимися.

Закреплённые грунты подразделяются по методам закрепления, предназначенных для повышения прочности, снижения сжимаемости (усадки) и фильтрационной способности грунтов.

1.4. Закон уплотнения Терцаги

Свойства грунтов, которые характеризуют их поведение под нагрузкой, называют механическими и они подразделяются на три вида: деформативные, фильтрационные и прочностные.

Закон уплотнения является одним из основных законов механики грунтов, основанным на допущении о том, что деформации грунта происходят, в основном, за счет изменения его пористости.

Сжимаемость (уплотняемость) грунтов – способность уменьшаться в объеме под действием нагрузки, является важнейшей характеристикой, отличающей дисперсные грунты от массивных горных пород.



Фото 1.1. Внешний вид одометра

Сжимаемость грунтов характеризуется *коэффициентом относительной сжимаемости* – относительной деформации или модулем общей деформации. Величина сжимаемости грунта в значительной степени зависит от *пористости, влажности* и других факторов.

Исследование грунта ненарушенной структуры в лабораторных условиях производят в специальном компрессионном приборе – *одометре*.

Примечание: для предварительной оценки и при скоростных методах строительства исследование грунта может производиться в полевых условиях:

- *штамповые испытания в шурфе или в скважине;*
- *прессиометрические испытания (радиальный, лопастной);*
- *зондирование (статическое или динамическое).*

Компрессия – это сжатие грунта без возможного бокового расширения. Схематично это может быть выполнено так (рис. 1.10). Приложив сосредоточенную нагрузку N через поршень площадью $40, 60 \text{ см}^2$ производят сжатие (уплотнение) грунта равномерно распределенной нагрузкой P . При проведении испытаний обычно производят 4–5 ступеней нагружения, по результатам испытаний строятся график – *компрессионная кривая* (рис. 1.11).

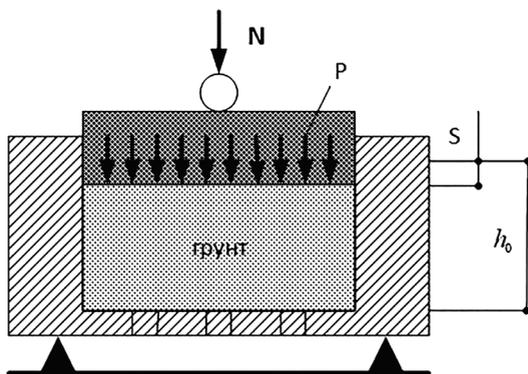


Рис. 1.10. Схема компрессионного сжатия грунта:
 N – сосредоточенная нагрузка, P – равномерно распределенная нагрузка, h_0 – 20,25 мм высота хода поршня, s – осадка грунта (уплотнение) под нагрузкой

При P_1 – уплотнение грунта с коэффициентом пористости e_1 . При нагрузке $P_2 - e_2$, и т. д.

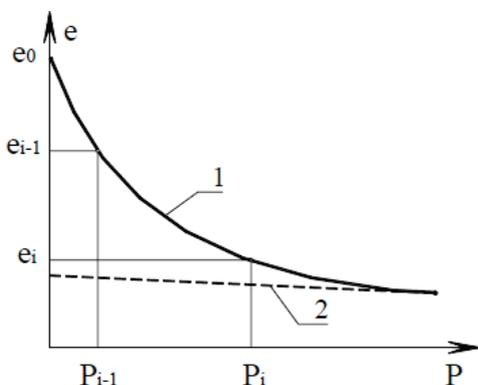


Рис. 1.11. Компрессионная кривая:
 1 – нагрузка, 2 – разгрузка, e – коэффициент пористости,
 P – давление

Начало графика обычно изображают горизонтальной линией, параллельной оси давлений. Искривление графика начинается с момента разрушения структурных связей или с момента исчерпания структурной прочности грунта, что одно и то же. После этого деформации грунта происходят исключительно за счет его уплотнения, т. е. изменения пористости.

В опыте на компрессионное сжатие должно, как правило, отсутствовать поровое давление, что достигается применением открытой, по отношению к фильтрации поровой воды, схемы испытания (испытание по дренированно-консолидированной схеме). Присутствие порового давления в опыте может существенно исказить результаты испытаний (занизить значение коэффициента сжимаемости и завысить значение модуля деформации).

Закон уплотнения грунта может быть сформулирован как:

Изменение коэффициента пористости грунта прямо пропорционально приложенному давлению

$$\Delta e = \frac{1}{F} p(1 + e_0)$$

или

Относительные деформации грунта прямо пропорциональны приложенному давлению

$$\varepsilon = \frac{1}{E} p$$

Применительно к графику компрессионной кривой закон уплотнения выражается такой зависимостью:

$$e_{i-1} - e_i = m_0 (p_i - p_{i-1}).$$

В дифференциальной форме закон уплотнения записывается как:

$$de = -m_0 dp,$$

где m_0 – коэффициент сжимаемости грунта ($\text{м}^2/\text{кН}$), знак «минус указывает на то, что увеличению давления соответствует уменьшение коэффициента пористости.

Для того, чтобы определить значение m_0 , на компрессионной кривой необходимо выделить определенный интервал, тогда:

$$m_0 = \frac{e_{i-1} - e_i}{p}.$$

Коэффициент сжимаемости m_0 является характеристикой, которая определяет возможность использования грунта в качестве естественного основания под фундаменты зданий или сооружений:

$m_0 \leq 0,005$ – грунт малосжимаемый;

$m_0 = 0,005 \div 0,05$ – грунт среднесжимаемый;

$m_0 \geq 0,05$ – грунт сильно сжимаемый.

Закон уплотнения в дифференциальной форме записи может быть использован только при анализе напряженных состояний грунтового массива, близких к компрессионному сжатию.

Для общего случая напряженного состояния грунта закон уплотнения выражают в форме зависимости осевой деформации от давления:

$$m_v = \frac{m_0}{1 + e_0}; \quad E = \frac{\beta}{m_v},$$

где m_v – коэффициент относительной сжимаемости грунта ($\text{м}^2/\text{кН}$);
 E – модуль деформации грунта ($\text{кН}/\text{м}^2$);
 β – коэффициент вида напряженного состояния в опыте по определению модуля деформации грунта:

$$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu},$$

ν – коэффициент поперечной деформации (Пуассона).

Закон уплотнения может быть дан в такой формулировке:

Модуль деформации грунта обратно пропорционален коэффициенту относительной сжимаемости и прямо пропорционален некоторой функции коэффициента Пуассона, учитывающей вид напряженного состояния при компрессионном сжатии

$$E = \frac{(1+e)\beta}{m_v}$$

Расчет модуля деформации может быть выполнен по формулам:

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta e} (1+e_0)\beta, \quad E = \frac{\Delta P}{\Delta \varepsilon} \beta.$$

Таблица 1.8

Значения коэффициентов

Наименование грунта	ν	β
Глина	0,42	0,39
Суглинок	0,35	0,62
Супесь и песок	0,30	0,74
Крупнообломочный	0,27	0,80

Таким образом, деформационными характеристиками грунта являются:

- модуль деформации E ;
- коэффициент поперечной деформации (Пуассона) ν ;
- коэффициент сжимаемости m_0 ;
- коэффициент относительной сжимаемости m_v .

Л. 2. Фазы напряженно-деформированного состояния грунта. Законы механики грунтов

Время: 2 часа

2.1. Фазы напряженно-деформированного состояния грунта

Определение напряжений в грунтах представляется достаточно сложной задачей и имеет определённые отличия, по сравнению, например со сплошными телами (металлами).

При действии внешней нагрузки отдельные компоненты грунтов сопротивляются и деформируются силовым воздействием по разному, данное обстоятельство является важнейшей особенностью напряжённо-деформированного состояния грунтов.

Этот вопрос имеет особое значение для гибких фундаментов, расчет которых производится на изгиб.

Примечание: гибкие фундаменты обладают способностью изгибаться в одном или обоих направлениях подошвы, к ним могут быть отнесены фундаменты, у которых отношение высоты к их длине составляет менее 1/3.

Если известны предварительные размеры фундамента, то приложив к такому фундаменту нагрузку, легко определить $P_{\text{конт}}$ - контактное давление, возникающее на уровне его подошвы, следовательно, легко определить и усилия в его теле.

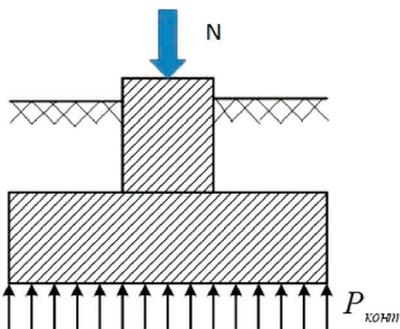


Рис. 2.1. Схема работы фундамента здания под нагрузкой

Величина напряжения для сжато-изгибаемых элементов, как известно, определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{N}{F} \pm \frac{M}{W},$$

но, при этом работа сжимаемого основания не учитывается.

Для инженерных расчетов грунтового основания под фундаменты зданий и сооружений необходимо знать его прочностные характеристики, сжимаемость и угловые перемещения.

С этой целью производят испытания грунтового основания штампом и строят график зависимости его осадки от средних напряжений, действующих по его подошве.

При проведении опыта предполагается, что избыточное поровое давление отсутствует, а получаемые при этом осадки грунта называются стабилизированными (конечными).

Скорость нагружения штампа при проведении опыта достаточно мала, в результате чего деформации ползучести скелета грунта, если они имеют место, в основном успевают проявиться.

При анализе зависимости деформаций от напряжений рассмотрим два типа дисперсных грунтов: *сыпучие и связные*.

Для *сыпучих грунтов* при загрузении внешней нагрузкой всегда возникают смещения частиц относительно друг друга, что и обуславливает наличие остаточных деформаций (осадок).

На характер деформирования *связных грунтов* влияют структурные связи (жесткие и вязкие). При ненарушенных нагрузкой жестких связей, грунт будет деформироваться как квазитвердое тело.

При вязких связях в грунтах некоторые связи начинают разрушаться, одни при небольших, а другие – при достаточно больших усилиях. Именно это обстоятельство и обуславливает наличие у связных грунтов не только обратимых, но и остаточных деформаций. Как, правило, остаточные деформации на порядок выше обратимых деформаций.

Анализ графиков испытания стабилизированных грунтовых оснований штампом позволяет выделить ряд фаз их напряженно-деформированного состояния.

Кратко охарактеризуем напряженно-деформированное состояние грунта в каждой из выделенных фаз (рис. 2.2).

Фаза упругих деформаций характеризуется уровнем напряжений в скелете грунта, не превышающим прочность структурных связей между минеральными частицами грунта, т.е. его структурной прочностью. Деформации грунта в этой фазе обратимы и незначительны, т. к. обусловлены сжимаемостью минеральных частиц. Уровень

напряжений, соответствующий концу этой фазы, называется структурной прочностью грунта $P_{стр}$ и обычно не превышает 5–10 % допустимых на грунт давлений.

Фаза уплотнения соответствует уровням напряжений в грунте, в диапазоне которых процесс его деформирования подчиняется закону уплотнения Терцаги.

При не очень больших изменениях шага внешних давлений (1–3 Па), грунты можно рассматривать как линейно-деформируемые тела, т. е. зависимость между общими деформациями и напряжениями можно принимать линейной. Эта зависимость была установлена профессором Н. Герсевановым (1931).

Линейная зависимость между деформациями и напряжениями в этой фазе не является обратимой. При разгрузке штампа из диапазона давлений, соответствующего фазе уплотнения, грунт деформируется по линейной зависимости, не совпадающей с ветвью нагрузки. При полной разгрузке штампа имеет место необратимая осадка, соответствующая нулевым напряжениям по подошве.

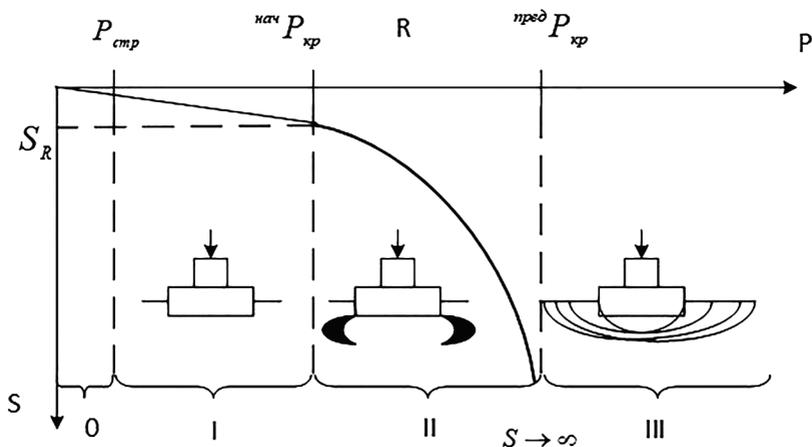


Рис. 2.2. Фазы напряженно-деформированного состояния грунта:
 $P_{стр}$ – структурная прочность, $нач P_{кр}$ – начальное критическое давление, $пред P_{кр}$ – предельное критическое давление, R – расчетное сопротивление грунта, 0 – фаза упругих деформаций, I – фаза уплотнения, II – фаза сдвигов, III – фаза разрушения

Повторное нагружение штампа до уровня напряжений, достигнутых перед разгрузкой, происходит по графику, совпадающему с графиком разгрузки.

Указанная особенность закона уплотнения формулируется как *принцип линейной деформируемости*: при простом нагружении грунта в фазе его уплотнения сумма упругой и пластической деформации линейно зависит от действующего напряжения. Коэффициентом пропорциональности в этой линейной зависимости является модуль деформации грунта E , названный так в отличие от модуля упругости, характеризующего деформацию упругого тела. Модуль упругости грунта E определяется по графику разгрузки и является коэффициентом пропорциональности между упругой деформацией грунта и действующим напряжением.

Модуль деформации используется в статических расчетах, а модуль упругости – в динамических расчетах грунтовых оснований.

В строительном отношении такое состояние грунта оказывается весьма полезным, так как грунт приобретает более плотную структуру. Как уже отмечалось, при уплотнении зависимость между общими деформациями и удельным давлением в практических расчётах может быть принята линейной. При дальнейшей ступенчатой загрузке возникает скольжение (сдвиг) частиц в отдельных местах, что, безусловно, является важнейшей характеристикой механических свойств грунта и соответствует начальной *критической нагрузке*.

Фаза сдвигов характеризует начало образования в грунте зон предельного равновесия. *Зоной предельного равновесия* в грунте называют геометрическое место точек, в которых не удовлетворяются условия прочности Кулона – Мора.

Первоначально эти зоны образуются по краям штампа, где имеет место концентрация напряжений. Разрушение грунта сопровождается большими сдвиговыми деформациями, что нашло отражение в названии рассматриваемой фазы напряженно-деформированного состояния грунта. Уплотнение грунта в этой фазе практически не происходит, он считается несжимаемым, а коэффициент Пуассона близок к 0,5. Давление на грунт, соответствующее началу фазы сдвигов, называют *начальным критическим давлением*.

Зависимость между деформациями и напряжениями в этой фазе нелинейная. В конце фазы уплотнения и начала фазы сдвигов начинается образование жёсткого ядра. Это ядро полностью формиру-

ется при достижении грунтом его максимальной несущей способности и находится в состоянии компрессионного сжатия.

Фаза разрушения является следствием развития фазы сдвигов. Давление, при котором наступает фаза разрушения, называется *предельным критическим давлением*. Осадки штампа происходят уже без увеличения нагрузки и только за счет перемещения грунта основания по плоскостям скольжения с выходом на поверхность грунтового массива.

В зонах пластического течения недоуплотненные грунты получают дополнительное уплотнение, а переуплотненные – разуплотняются, это явление называется *дилатансией*.

В зависимости от фаз напряженно-деформированного состояния грунтов применяются следующие расчетные модели.

Таблица 2.1

Расчетные модели грунта

Уровень напряжений p	Расчетная модель	Характеристика модели	Методы анализа
$p \leq p_{стр}$	Упругая среда	Модуль упругости	Теория упругости
$p_{стр} \leq p \leq p_{кр}^{нач}$	Линейно-деформируемая неупругая среда	Модуль деформации при нагрузке и модуль упругости при разгрузке	Теория упругости анизотропной среды
$p_{кр}^{нач} \leq p \leq p_{кр}^{пред}$	Упругопластическая среда	Функциональная зависимость деформаций от напряжений	Теория пластичности
$p \geq p_{кр}^{пред}$	Дилатирующая среда	Модули дилатансии	Дилатансионная теория

2.2. Закон прочности Кулона – Мора (сопротивление сдвигу)

Как известно, один из основных законов механики грунтов, закон Карла Терцаги, устанавливает – *деформации грунта под действием нагрузки происходят преимущественно за счет изменения его пористости*.