

**Тема 1. Введение** **Задача курса механики грунтов. Основные понятия и определения. Значение механики грунтов при возведении зданий и сооружений. Основные компоненты грунтов и их соотношение в зависимости от генезиса.**

- 1. Далматов Б.И и др. Механика грунтов. Часть 1. Основы геотехники. 2002г.**
- 2. Далматов Б.И и др. Основания и фундаменты. Часть 2. Основы геотехники. 2002г.**
- 3. Цытович Н.А. Краткий курс механики грунтов. М. 1979г., 1983г.**
- 4. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. М. 1981г.**

### **Введение** **Задача курса механики грунтов.**

До XVI века «теории» строительства не существовало, строили полагаясь на опыт. Размеры фундамента выбирали в зависимости от прочности грунтов оснований. В конце XVIII века появилась первая теория, рассматривающая сопротивление грунта сдвигу.

В 1773 г. француз **Ш. Кулон** – разработал способ расчета давления сползающего грунта на подпорную стенку (строительство фортификационных сооружений на юге Франции).

На базе этих и последующих исследований в 30<sup>х</sup> годах XX века была создана наука **механика грунтов**. Одновременно стала развиваться и вторая часть (прикладная) – **основания и фундаменты**. К становлению Российской школы фундаментостроения относятся труды:

**Герсегова Н.М.** – (его именем назван институт НИИОСП)

**Пузыревского Н.П.** – (труды ПГУПС)

**Маслова Н.Н.** – развитие инженерной геологии, механика грунтов в приложении к строительству гидротехнических сооружений.

**Сумгина М.И.** – инженерное мерзлотоведение

**Цытовича Н.А.** (герой социалистического труда, член - корреспондент АН СССР) – развитие механики грунтов, оснований и фундаментов на вечной мерзлоте.

**Далматова Б.И.** – строительство фундаментов на больших толщах слабых грунтов.

Первый в мире учебник по “Механике грунтов” был издан в СССР в 1934 г. Н. А. Цытовичем. Современная теория развивалась Березовским, Соколовским.

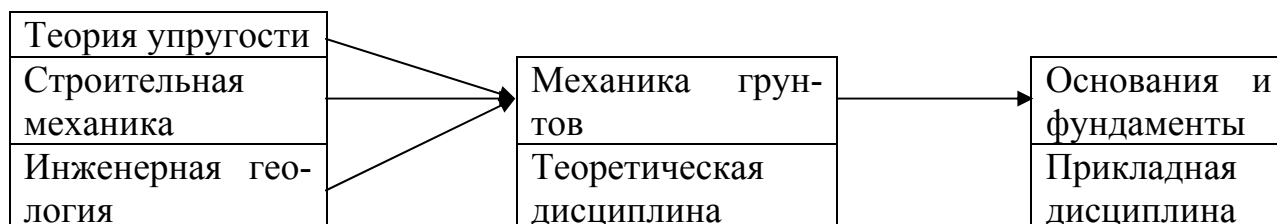
Механика грунтов – научная дисциплина, в которой изучаются напряженно-деформированные состояния грунтов и грунтовых массивов, условия прочности грунтов, давление грунтов на ограждения, устойчивость грунтовых массивов против сползания и разрушения, взаимодействия грунтовых массивов с сооружениями и ряд других вопросов. В ней рассматриваются физические и механические свойства дисперсных сред механические процессы взаимодействия твердой, жидкой и газообразной фаз грунта. При опреде-

лении характеристик и закономерностей этих процессов применяется статистический подход.

В общем случае “Механика грунтов” является составной частью геомеханики.

“Механика грунтов” опирается на результаты научных исследований в области механики сплошных тел: сопротивление материалов, теория упругости, теория пластичности; в инженерной геологии, гидрогеологии, гидравлике, гидротехнике и др.

Связь рассматриваемого курса с другими дисциплинами



В “Механике грунтов” ставятся задачи прогноза механического поведения и грунтовых массивов. Для этого производятся:

- ✓ Установление физических и механических свойств грунтов и возможности их использования в нужных целях, а в случае необходимости и улучшения строительных свойств грунта.

- ✓ Определение напряженно-деформируемого состояния грунтовых массивов, возможно, его изменение в последующем.

- ✓ Определение общей устойчивости этих массивов, взаимодействующих с инженерными сооружениями или непосредственно устойчивость их самих, если они сами являются сооружениями.

Таким образом, основная задача – это оценка состояния в настоящий момент и прогноз дальнейшего поведения грунтов и массивов из них, прогноз происходящих в них процессов.

Глубокое изучение курса позволит будущим инженерам-строителям:

- ✓ Правильно оценивать свойства различных грунтов, возможность их деформации под действием нагрузок и степень устойчивости грунтов под действием нагрузок.

- ✓ Улучшить в случае необходимости качество грунтов для возможности использования их в основании.

Результаты “Механики грунтов” используют во всех видах строительства.

### Основные понятия и определения.

Определение по СТБ 943-93 “Грунты. Классификация”:

**Грунт** – горная порода, почва или искусственное образование (твёрдые или бытовые отходы), представляющие собой многокомпонентные системы, изменяющиеся во времени, используемые как основание, среда или материал при строительстве.

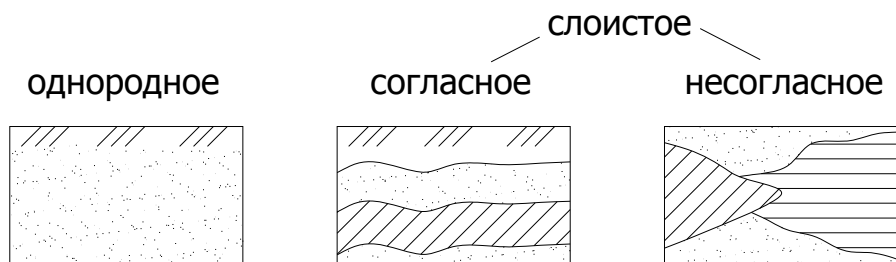
Они могут служить:

1. основанием здания или сооружения
2. средой для размещения в них сооружения
3. материалом для сооружений (плотины, насыпи)

**Основание** – толща или массив грунтов со всеми особенностями их напластования, воспринимающего нагрузку от веса зданий или сооружений.

Если строительные свойства грунтов основания специально не улучшаются и не изменяются, то такое основание называется естественным.

Естественное основание подразделяют на однородное или слоистое:

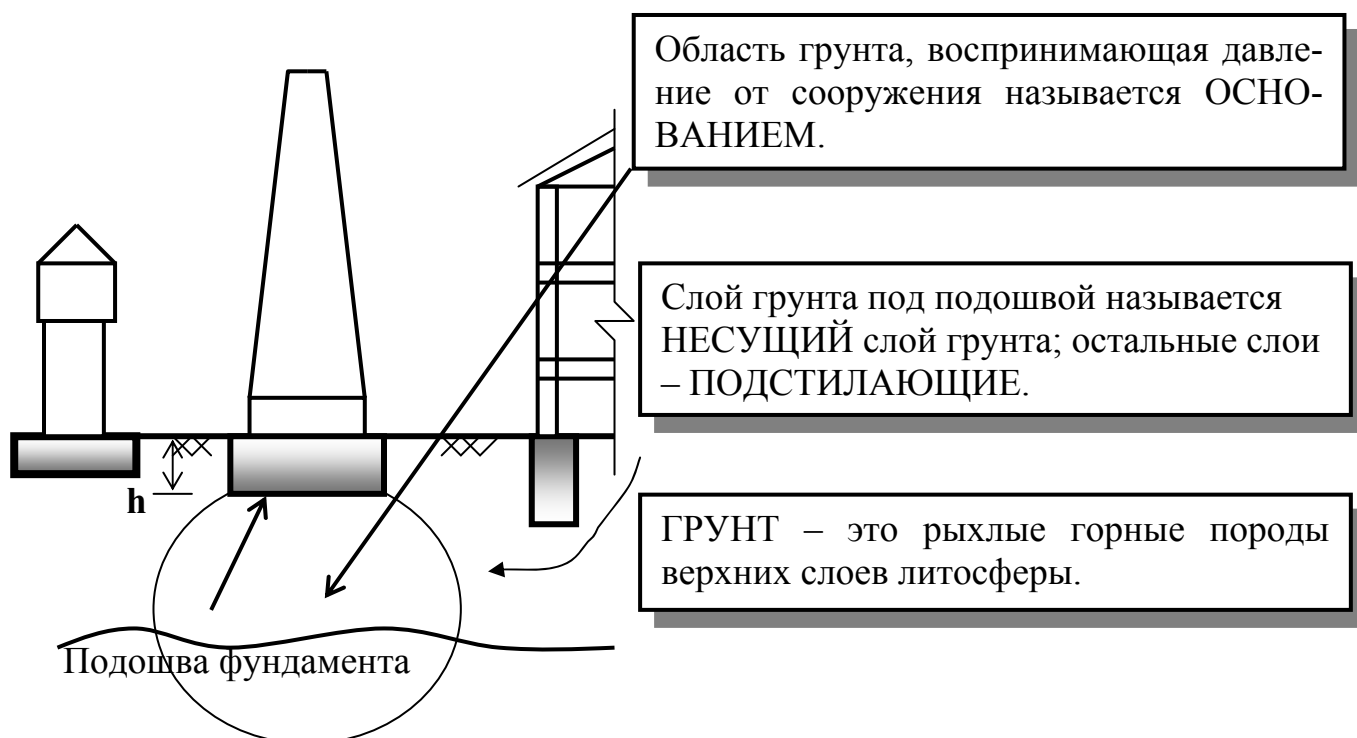


Залегание считается согласным, если уклон отдельных слоёв не превышает 1-2% и несогласным, если пласты залегают невыдержанно, т.е. имеют большой уклон и выклинивание.

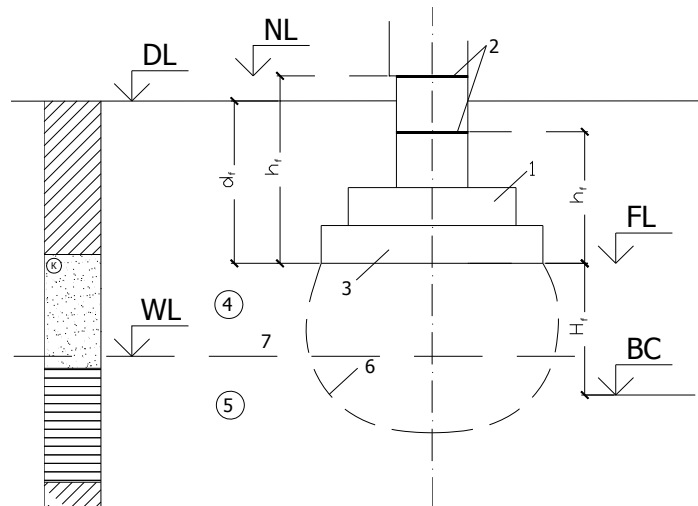
**Скальным** основанием называют массивные породы с жёсткими связями между частицами грунта, залегающие в виде сплошного или трещиноватого массива и имеющие значительную прочность при сжатии  $R_c \geq 5$  МПа.

**Нескальные** грунты представляют собой толщу несвязных или связных горных пород, имеющие связи между отдельными частицами грунта, которые во много раз меньше прочности самих минеральных частиц. К этому типу относятся основания из крупнообломочных, песчаных и пылевато-глинистых грунтов.

Подземная часть сооружения, предназначенная для передачи нагрузки от сооружения грунту, называется **фундаментом**



Располагать сооружения непосредственно на поверхности земли можно в редких случаях, так как этому препятствуют такие особенности верхних слоев грунта как малая несущая способность, возможность вертикальных перемещений под воздействием метеорологических факторов, возможность разрушения землероем, выветриванием и корнями растений. Поэтому необходимо устройство фундамента (1), подземной или подводной конструкции, предназначенной для передачи давления на грунты, лежащие на некоторой глубине.



Поверхность фундамента (2), на которую опирается наземная конструкция, а также граница между соседними уступами называется обреза фундамента.

Плоскость фундамента (3), опирающуюся на основание называют подушкой. Слой грунта (4), на котором располагается подошва, называется несущим слоем. Другие слои ниже несущего называются подстилающие.

Линия DL – планировочная отметка, NL – отметка естественного рельефа грунта. NL может быть на одном уровне с DL, выше её или ниже.

Расстояние от планировочной отметки до подошвы называют глубиной заложения  $df$ . Высота самого фундамента  $hf$ .

В результате воздействия нагрузки от веса сооружений в основании фундамента формируется деформируемый массив грунта (6), который называют сжимаемой толщей или рабочей зоной основания. Уровень подземных вод (7), находящихся в основании обозначается WL. Нижняя граница сжимаемой толщи BC, глубина сжимаемой толщи  $H_c$ .

**Механика грунтов** изучает, преимущественно, рыхлые породы, состоящие из отдельных минеральных частиц, связанных тем или иным способом друг с другом, образование грунтов (генезис).

### Значение механики грунтов при возведении зданий и сооружений.

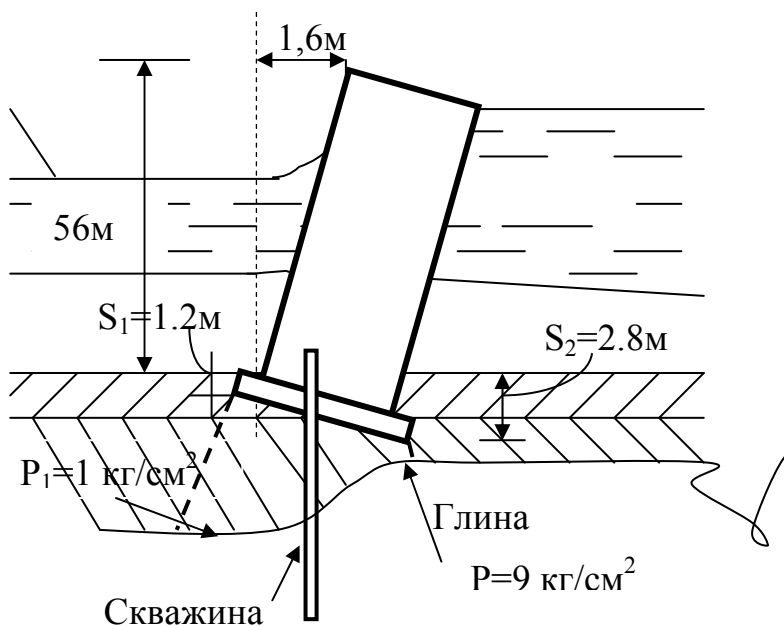
Проектирование зданий в проектных институтах обычно осуществляется по типовым проектам, а фундаменты всегда проектируются, исходя из индивидуальных условий – это обуславливается природным залеганием грунтов.

Гражданское строительство должно гармонично вписываться в окружающую среду не только в эстетическом, но и в физическом плане; при этом окружающая среда в большей мере определяется геологическими факторами.

Пизанская башня (построенная более 800 лет назад)

В 1932г. под основание башни было произведено нагнетание через 351 скважину  $\varnothing 50$  мм около 1000т цементного раствора. Приращение наклона за последнее время  $\approx 3,3$  мм в год (1мм в год). Только в 2002 г. отклонение башни было стабилизировано за счет выемки грунта из основания.

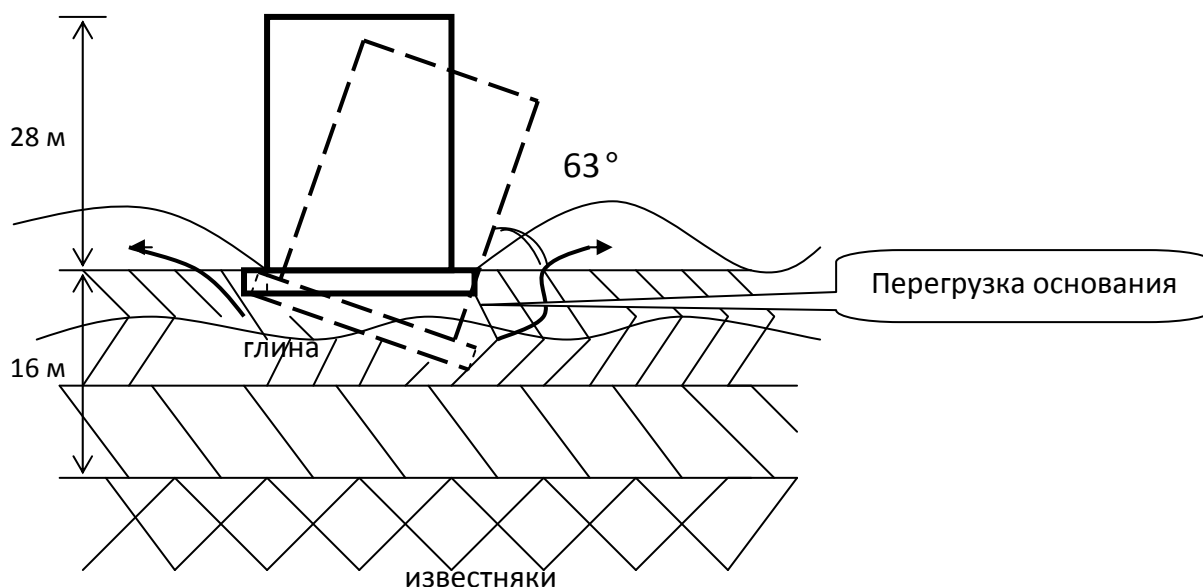
$$P_{\text{ср}} = 5 \text{ кг/см}^2 = 50 \text{ т/м}^2 = 500 \text{ кН/м}^2 = 0,5 \text{ Мпа}$$



Трансконский элеватор (г. Виннипег, Канада 1913 г.)

После катастрофы незначительно деформируемое сооружение осталось стоять под углом около  $63^\circ$  к горизонту.

Впоследствии элеватор вернули в прежнее положение с помощью домкратов.



Погружение Венеции:

1900 – 1935гг. – 1 мм в год;

1935 – 1952гг. – 4 мм в год;

с 1952г. до 6 мм в год;

Регулярная откачка воды приводит к понижению поверхности всего города.

Национальный театр в Мехико – осадка за 11 лет достигла 1,8 м.

Вопросам механики грунтов уделяется сейчас всё больше и больше внимания!

### **Основные компоненты грунтов и их соотношение в зависимости от генезиса.**

По происхождению и условиям образования грунты подразделяют на:  
магматические;

метаморфические (образовались под действием на метаморфические осадочные породы больших температур и давления);

осадочные (образовались в результате разрушения и выветривания горных пород с помощью воды и воздуха и образуют скальные и нескальные грунты).

Образование грунтов (генезис).

*Континентальные отложения:*

элювиальные (  - форма зерен угловатая);

делювиальные (перемещенные атмосферными водами и силами тяжести, напластования не однородны.);

аллювиальные (перенесенными водными потоками на значительные расстояния – окатанные частицы);

ледниковые (результат действия ледников, неоднородные грунты);

эоловые (продукты выветривания, пески дюн, барханов, наличие пылеватых и илистых фракций).

*Морские отложения:* илы, заторфованные грунты, пески, галечники – низкая несущая способность.

Группа осадочных грунтов включает следующие подгруппы:

- крупнообломочные – несцементированные грунты, содержащие более 50% массы обломков кристаллических или осадочных горных пород с размером частиц более 2 мм.

- песчаные – сыпучие в сухом состоянии грунты, содержащие менее 50% массы частиц крупнее 2 мм и не обладающие свойством пластичности.

- пылевато-глинистые – связанные грунты, для которых число пластичности  $J_p > 0,01$

- биогенные – грунты с относительным содержанием органического вещества  $J_{om} > 0,01$

- почвы – природные образования, слагающие поверхностный слой земной коры и обладающие плодородием.

## **Тема 2. Виды нескальных грунтов. Фазовый состав нескальных грунтов (минеральный скелет, вода, газы). Вода в порах грунтов. Виды паровой воды. Свободная и связанная вода.**

### **Виды нескальных грунтов.**

Грунт – это горные породы различного состава, слагающие верхнюю часть земли и затронутые строительной деятельностью человека.

Все нескальные грунты состоят из твердых минеральных частиц, образующих скелет грунта, пронизанный сообщающимися порами, в которых содержится поровая жидкость (обычно вода) и поровый газ (обычно воздух и водяной пар). Частицы скелета, поровую воду и поровый газ называют соответственно твёрдой, жидкой и газообразной фазами грунта.

При полном заполнении пор водой систему превращается в двухфазовую.

Твердые частицы представляют собой систему минеральных зерен различных по форме, составу, размер которых измеряется от нескольких см до мельчайших частиц коллоидного порядка, т.е. менее одного микрона. Важнейшей характеристикой твердых частиц является минералогический состав, который во многом и определяет физико-механические свойства грунтов. Чем меньше размер минеральных частиц, тем больше их удельная поверхность. С уменьшением размера частиц возрастает число центров взаимодействия в контакте между зернами и окружающей их водой.

### **Фазовый состав нескальных грунтов (минеральный скелет, вода, газы).**

Грунт это 3х фазная система.

$$\text{Грунт} = \text{твердые частицы} + \text{вода} + \text{газ}$$

От соотношения этих фаз и зависят характеристики грунтов.

Грунт – это горные породы различного состава, слагающие верхнюю часть земли и затронутые строительной деятельностью человека.

Грунт может выступать в качестве строительных материалов и в качестве оснований зданий и сооружений. В процессе выветривания в грунтах происходит накопление всё более мелких частиц, и они начинают приобретать свойства дисперсных систем. Дисперсная система состоит из двух или более веществ распределённых в одно в другое.

Дисперсность – степень раздробленности, чем мельче частицы грунта, тем больше дисперсность этого грунта.

По степени дисперсности:

- Грубодисперсные
- Тонкодисперсные
- Коллоидные грунты

Коллоиды – тела, размер которых превышает размер молекул, но не меньше частиц способных осаждаться в воде под действием силы тяжести. Обычно размеры коллоидов меньше 0,2 мкм.

Грунт представляет собой многофазную дисперсную систему. Основные элементы грунта – твёрдые частицы, газ, вода.

Твёрдые частицы обычно представлены минеральными зёрнами, различными по составу и размеру, реже – разложившимися горными остатками. Размер твёрдых частиц колеблется от нескольких (см) до частиц коллоидного порядка.

Основной характеристикой твёрдых частиц является минеральный состав. Основные минералы в грунтах – полевые шпаты, слюда, кварц, глинистые минералы:

1. Встречаются в виде очень мелких кристаллов.
2. Обладают поглотительной или обменной способностью.
3. Кристаллы имеют пластинчатую форму.
4. В составе минералов есть связная вода.

Основные глинистые минералы – коалинит. Относительно стойкий, небольшая набухаемость, малая обменная способность.

Монтмориллонит – высокая дисперсность, размеры не превышают 1 мкм, большая пластичность, способность в 10-20 раз увеличиваться в объёме в результате увлажнения.

Наличие в грунтах монтмориллонита в больших количествах отрицательно сказывается на несущих характеристиках грунта при увлажнении.

Гидрослюды – отличаются изменчивостью химического состава, занимают промежуточное значение между каолинитом и монтмориллонитом.

Состав органической части грунтов представлен торфом и гумусом. Торф представляет собой грубую полуразложившуюся массу растительных остатков, в которых можно различить исходный материал.

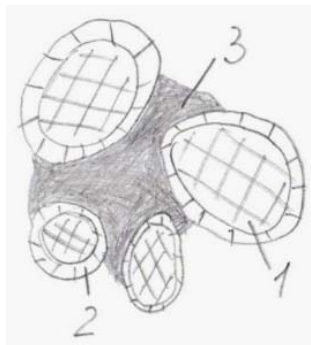
Наличие органических веществ придаёт грунту чрезмерную влагоёмкость и пластичность.

Жидкая фаза представлена различными формами воды (жидкая, пар, лёд) с растворимыми в ней веществами.

Газообразные части – воздух, заполняющий поры грунта и отличающийся по составу от атмосферного.

Системы фазового состояния грунтов:

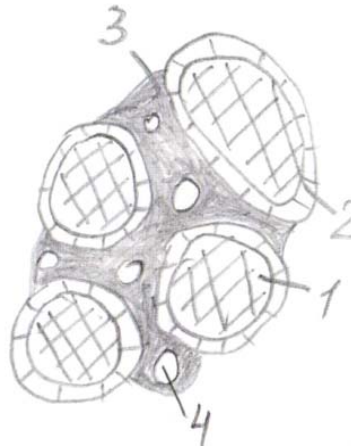
1. *Водонасыщенный грунт (поры целиком заполнены водой)*



- 1) Частицы грунта
- 2) Плёнки связанной воды
- 3) Свободная вода

В водонасыщенном состоянии находятся грунты расположенные ниже уровня грунтовых вод (это двухфазная система)

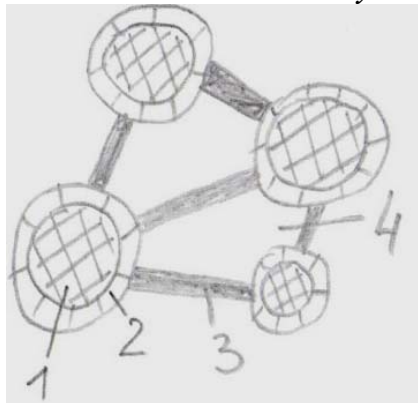
*2. Водонасыщенный грунт включающий пузырьки газа.*



- 4) Пузырьки газа

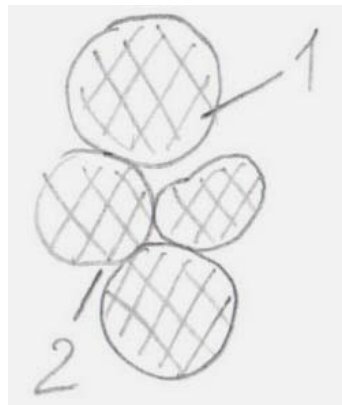
Поведение этих грунтов мало отличается от водонасыщенных, однако из-за содержания газа сжимаемость выше, чем водонасыщенность.

*3. Твёрдая фаза, распределённая в водно-воздушной среде.*



*4. Твёрдая фаза, распределённая в газообразной среде*

Вода отсутствует. В виду того что газ в таких грунтах не влияет на поведение грунта под нагрузкой, грунт рассматривается как однофазная система



**Вода в порах грунтов.**

Свойства грунта, которые определяются наличием в их составе воды:

- просадка лессовых грунтов при замачивании под нагрузкой;
- развитие сил морозного пучения в грунтах при замерзании;
- миграция влаги, переувлажнение и просадка мёрзлых грунтов при оттаивании под нагрузкой;
- тиксотропность глинистых грунтов – разжижение под действием динамической нагрузки;
- изменение плотности водонасыщенного грунта в результате взвешивающего действия воды;
- электроосмос или снижение количества связанной воды в результате воздействия электрического поля;
- снижение механических характеристик грунтов в результате повышения консистенции;
- набухание и усадка.

### **Виды поровой воды.**

#### *Вода в форме пара.*

Водяной пар является одной из составных частей грунтовой атмосферы. Количество водяного пара в приземном слое воздуха весьма изменчиво и обычно колеблется от десятых долей до нескольких процентов. Содержание пара в грунтовой атмосфере несколько выше. Однако общее количество водяного пара в грунте не превышает 0,001% от всего веса грунта. Несмотря на это, вода в форме пара играет большую роль в процессах, протекающих в грунтах, так как она, во-первых, является единственной формой воды, которая способна передвигаться в грунте при незначительной его влажности, и, во-вторых, потому, что путем конденсации пара на поверхности грунтовых частиц образуются другие виды воды.

Передвижение водяного пара возможно как со всей массой газообразной компоненты, так и независимо от ее движения под влиянием разности упругости паров в различных слоях грунта. В последнем случае движение будет проходить от слоя с большей упругостью к слою с меньшей упругостью. В большинстве случаев газообразная компонента в грунте полностью насыщена водяными парами; относительная влажность ее тогда равна 100%. Если пары воды находятся в состоянии насыщения, т. е. имеют максимальную упругость при данной температуре, то передвижение их определяется только величиной температуры и будет направлено от слоя с более высокой к слою с более низкой температурой.

Парообразная вода в грунте находится в постоянном динамическом равновесии с другими видами воды (в частности, с гигроскопической водой) и с парами воды в атмосфере. При определенных условиях парообразная вода конденсируется.

Конденсация паров воды может происходить под влиянием падения температуры — термическая конденсация, и в силу молекулярного взаимодействия паров воды с грунтовыми частицами — молекулярная конденсация. В том случае, когда молекулы парообразной воды адсорбируются на поверхности грунтовых частиц, образуется гигроскопическая вода.

### *Вода в твердом состоянии.*

Гравитационная вода является источником других видов воды в грунте; ее химический состав сказывается на составе этих видов. При температуре грунта ниже  $0^{\circ}\text{C}$  гравитационная вода замерзает и содержится в грунте в виде льда. Лед может содержаться в грунте в виде отдельных кристаллов или в виде прослоев чистого льда, достигающих местами значительной мощности. Кристаллы льда в большинстве случаев играют роль цемента, скрепляющего минеральные частицы друг с другом. Благодаря присутствию льда резко изменяются свойства грунта.

Свойства мерзлых рыхлых пород очень чувствительны к изменению температуры, особенно при переходе ее через нуль градусов, так как при этом резко изменяется содержание незамерзшей воды. Изменение количества незамерзшей воды влияет на большую часть физических и химических свойств дисперсных мерзлых грунтов.

При промерзании дисперсных и особенно глинистых пород происходит миграция влаги и льдовыделение, которые резко изменяют строение грунтов, что также влияет на их физические и механические свойства. Следует иметь в виду, что повторные замерзания и оттаивания дисперсных пород могут приводить к необратимым изменениям структуры (и в том числе дисперсности) и их свойств (увеличивается количество свободной воды, возрастает фильтрационная способность, изменяется прочность, электрические свойства и т. д.).

Влажные песчаные грунты при промерзании резко изменяют свои свойства даже при близких к нулю отрицательных температурах; глинистые же грунты при замерзании изменяют свои свойства более монотонно и плавно и в более значительном диапазоне отрицательных температур. Неразрушенные скальные породы при промерзании изменяют свои физические и механические свойства в наименьшей мере. Изучением свойств мерзлых грунтов занимается мерзлотоведение.

### *Кристаллизационная вода и химически связанная вода.*

Кристаллизационная вода и химически связанная (конституционная) вода принимают участие в строении кристаллических решеток различных минералов. *Кристаллизационная вода* входит в состав минералов типа  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (гипс). Кристаллизационная вода, участвуя в построении кристаллической решетки минералов, сохраняет свою молекулярную форму. Химически связанная вода входит в гидраты типа гидроокисей  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Молекулы ее в результате химической реакции распадаются на ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ . Химически связанная вода не сохраняет своего молекулярного единства.

*Химически связанная вода* по сравнению с кристаллизационной водой более прочно связана с другими молекулами кристаллических решеток. Удаление из минералов химически связанной воды возможно только путем их нагревания при высокой температуре, превышающей  $200^{\circ}\text{C}$ . Кристаллизационная вода может быть выделена из минералов при более низких температурах. Значительное количество кристаллизационной воды, содержащейся в гипсе (16% из общего содержания ее в гипсе — 20,93%), выделяется уже по-

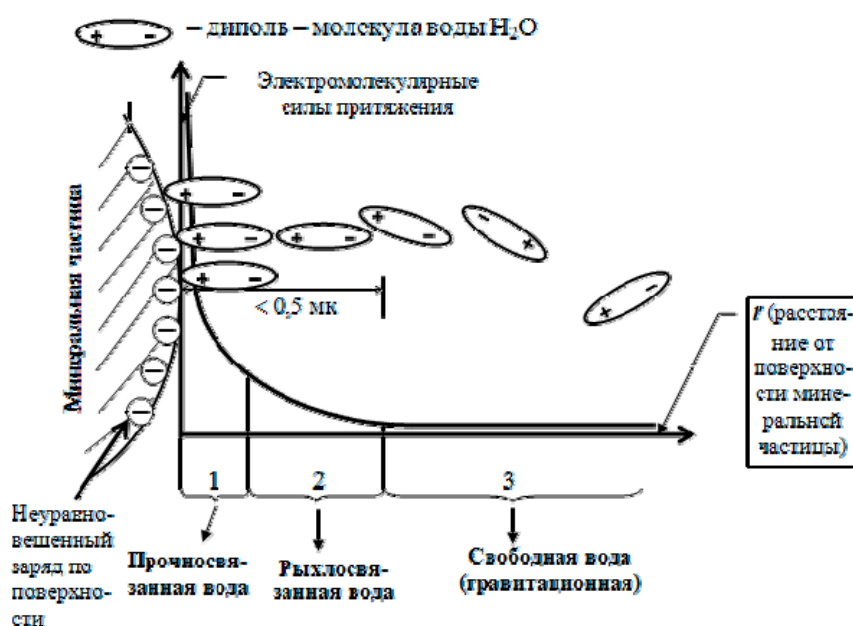
сле 32-часового нагревания при температуре 82°C. Удаление кристаллизационной воды из минералов заметно отражается на многих их химических и физических свойствах. Выделение химически связанной воды из минералов приводит к их распаду.

### **Свободная и связанная вода.**

*Связанная вода:*

- 1 прочносвязанная (гигроскопическая) вода;
- 2 рыхлосвязанная вода.

Вода в глинистых грунтах в значительной степени предопределяет свойства грунта, которые зависят в первую очередь от ее относительного содержания. Это объясняется взаимодействием молекул воды вследствие наличия электромолекулярных сил с поверхностями коллоидных и глинистых частиц грунта. Твердые частицы грунта, состоящие из тех или иных обычно кристаллических минералов, имеют на поверхности заряд статического электричества, чаще всего отрицательный. Молекулы же воды, являясь диполями, и ионы различных веществ противоположного заряда, растворенных в грунтовой воде, попадая в поле заряда частицы грунта, ориентируются определенным образом и притягиваются к поверхности этой частицы. В результате поверхность твердой частицы покрывается монослоем молекул воды.



Вода, адсорбированная на поверхности твердых частиц, называется *связанной* (она связана с твердыми частицами). Эта вода создает гидратные пленки вокруг твердых частиц и ее часто называют пленочной. Поскольку в пределах слоя адсорбированной воды удельные силы взаимодействия изменяются от очень больших величин до нуля, такой слой принято условно делить на слои прочносвязанной и рыхлосвязанной воды.

*Прочносвязанная вода*, слой которой состоит из одного или нескольких слоев молекул, обладает свойствами, существенно отличающимися от свойств свободной воды. По свойствам прочносвязанная вода скорее соответствует твердому, а не жидкому телу. Она не отделяется от твердых частиц

при воздействии сил, в тысячи раз превышающих силы земного притяжения, замерзает при температуре значительно ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , имеет большую, чем свободная вода, плотность, обладает ползучестью; такую воду можно отделять от твердых частиц лишь выпариванием при температуре выше  $100^{\circ}\text{C}$ .

*Рыхлосвязанная вода* представляет собой диффузный переходный слой от прочносвязанной воды к свободной. Она обладает свойствами прочносвязанной воды, однако они выражены слабее. Это обусловлено резким уменьшением в слое рыхлосвязанной воды удельных сил взаимодействия между поверхностью твердой частицы и молекулами воды.

Так как в пределах слоя связанной воды удельные силы взаимодействия резко меняются, свойства пылевато-глинистых грунтов в значительной степени будут зависеть от толщины пленок рыхлосвязанной воды. При этом чем больше дисперсность грунта, тем в большей степени будет проявляться эта зависимость, поскольку при большей дисперсности грунта, содержащего глинистые и особенно коллоидные частицы, удельная площадь их поверхности, т. е. суммарная площадь поверхности частиц глин и суглинков, больше, чем у песков, в тысячи раз. Кроме того, она зависит от минералогического состава глинистых частиц. Таким образом, минеральный состав и удельная площадь поверхности частиц пылевато-глинистых грунтов обуславливают их специфические свойства.

Наличие между частицами пылевато-глинистого грунта связанной (пленочной) воды определяет его *пластичность*. При этом чем толще пленки воды, тем меньше прочность грунта, и наоборот. Изменение толщины пленок воды, окружающих частицы пылевато-глинистого грунта, приводит к изменению его состояния от почти жидкого до твердого. При малой толщине пленок воды пылевато-глинистые грунты обладают сцеплением. Поскольку сцепление в значительной степени обусловлено наличием связанной воды, такие грунты обладают присущей этой воде ползучестью.

Увлажнение пылевато-глинистого грунта приводит к увеличению толщины пленок воды между частицами и сопровождается увеличением объема грунта, т. е. грунт набухает. Наоборот, при высыхании пылевато-глинистые грунты уменьшаются в объеме вследствие утончения пленок воды (грунт получает усадку). Когда связность грунта обусловлена наличием пленочной воды или растворимых солей, увлажнение грунта может приводить к полному его размоканию.

Если пылевато-глинистый грунт содержит небольшое количество рыхлосвязанной воды и при этом все его поры заполнены водой, фильтрация ее практически невозможна. В связи с этим строители используют перематую глину в качестве гидроизоляционного материала.

*Связность* (прочность) грунта, зависящая от толщины слоя рыхлосвязанной воды, может резко снижаться при нарушении определенного расположения молекул воды и частиц (например, при динамических воздействиях или перемяти).

*Свободная вода:*  
капиллярная вода;

гравитационная вода.

*Капиллярная вода* передвигается в тонких порах почвы. Это движение происходит в силу поверхностного натяжения и смачивания. Вода по капиллярам поднимается тем выше, чем меньше диаметр капилляра, тем тяжелее механический состав почвы и грунта.

Собственно капиллярная вода поднимается кверху от уровня грунтовых вод. При уменьшении количества капиллярной воды в связи с высыханием грунта наблюдается восстановление ее благодаря подъему по капиллярным порам новой части грунтовой воды, подобно тому, как это происходит в капиллярной трубке, опущенной одним концом в воду.

*Подвешенная вода* чаще всего встречается в песках. Она возникает как в однородной, так и в слоистых толщах при промачивании их сверху. В однородной толще образование подвешенной влаги зависит от гранулометрического состава песка и его исходной влажности. В грубозернистых песках подвешенная вода не образуется.

Подвешенная вода отличается от капиллярной тем, что она не имеет непосредственной связи с уровнем грунтовых вод, вследствие чего не может питаться ими. В таком состоянии воду в грунте можно сравнить с водой в капилляре, нижний конец которого не опущен в воду.

В сухих песках подвешенная вода образуется в верхних горизонтах; мощность ее измеряется сантиметрами, реже дециметрами. В слоистых толщах подвешенная вода образуется на границе двух слоев, различных по гранулометрическому составу.

*Гравитационная вода* подразделяется на просачивающуюся воду и воду грунтового потока. Просачивающаяся вода находится преимущественно в зоне аэрации и передвигается под влиянием силы тяжести сверху вниз. Это движение продолжается до тех пор, пока она не встретит на своем пути слой грунта, обладающий малой водопроницаемостью — фактически водонепроницаемый, водоупорный горизонт. После этого дальнейшее движение воды происходит под влиянием напора в виде грунтового потока. Слой грунта, в котором движется вода грунтового потока, называется водоносным горизонтом.

Просачивающаяся вода оказывает локальное воздействие на толщу пород. В частности, глинистые, лёссовые и другие связные грунты теряют прочность лишь на пути ее движения. В других точках пласта прочность породы сохраняется. Вода грунтового потока оказывает воздействие на весь пласт, по которому она движется.

Содержание гравитационной воды в грунте зависит от характера его пористости. В глинистых грунтах, где количество макропор незначительно, гравитационная вода находится в небольшом количестве и при большом уплотнении грунта может совсем отсутствовать. В крупнообломочных грунтах (гравий, галечник) и в крупнозернистых песках гравитационная вода может преобладать над другими видами воды.

Гравитационная вода обладает всеми свойствами обычной воды. По своему химическому составу она может быть различна, так как содержит в себе

растворенные соли и газы, а также вещества в коллоидальном состоянии. Количество веществ, содержащихся в грунтовой воде, называется общей минерализацией воды и может колебаться в широких пределах: от нескольких сот миллиграммов до нескольких сот граммов на литр, в то время как соленость морской воды составляет примерно 35 г/л. Минерализация подземных вод, как правило, увеличивается с глубиной. Наибольшее количество растворимых солей находится в водах, циркулирующих в районах соляных месторождений и в пустынных и полупустынных областях в условиях засушливого климата.

Растворенные в воде соли находятся в подвижном равновесии с твердой составляющей грунтов и взаимодействуют с ней. В коллоидальном состоянии находятся кремнекислота и полуторные окислы. Среднее значение рН для грунтовых вод колеблется около 7. С повышением общей минерализации значение рН увеличивается. В районах развития известняков, солонцеватых глин и солонцовых почв величина рН природной воды может достигать 9—10.

#### **Газообразные включения в грунтах.**

Обычно это воздух, заполняющий поры грунта. По своему составу он в большей или меньшей степени всегда отличается от атмосферного.

Газы в грунтах по генезису могут быть *природными* и *антропогенными* (техногенными). Среди природных газов выделяется три генетических типа — *геологического*, *атмосферного* и *биологического* происхождения. Газы первой группы образуются за счет собственно геологических процессов (экзогенных и эндогенных); второй — в основном за счет газообмена с атмосферой; третьей — за счет жизнедеятельности организмов в грунтах.

Газы в грунте



Газ в грунтах может находиться в виде пузырьков, окруженных поровой водой, в растворенном (в поровой воде) или в свободном виде (воздух, сообщающийся с атмосферой). Пузырьки газа, содержащиеся в относительно крупных порах грунтов, а также растворенный в поровой воде газ придают грунтам свойство упругости, сказывающееся на их сжимаемости и деформируемости во времени. Газ, сообщающийся с атмосферой, не влияет на распределение давления между твердыми частицами и поровой водой.

Таким образом, свойства грунтов зависят от относительного содержания и свойств, входящих в него фаз, от закономерности взаимодействия частиц скелета дуг с другой и с поровой водой и от особенностей совместной работы фаз под действием внешних нагрузок, приложенных к грунту.

**Тема 3. Основные физико-механические свойства грунтов. Номенклатура грунтов, оснований по СТБ943-2007. Гранулометрический состав**

**грунта. Минералогический состав скелета грунта. Сложение песчаных грунтов.**

### **Основные физико-механические свойства грунтов.**

#### *Плотность грунта.*

Плотность породы есть отношение массы породы, включая массу воды в ее порах, к занимаемому этой породой объему

$$\rho = m/v$$

Для дисперсных грунтов колеблется от 1,2 . . . 2,4 г/см<sup>3</sup>

#### *Плотность сухого грунта.*

$$\rho_d = \rho / (1 + 0,01 W)$$

W – влажность

Максимальное значение  $\rho_d$ :

Для песков: 1,8 г/см<sup>3</sup>

Для супесей: 1,7 . . . 2,0 г/см<sup>3</sup>

Для суглинков: 1,5 . . . 1,8 г/см<sup>3</sup>

Для глин: 1,5 г/см<sup>3</sup>

#### *Плотность частиц грунта.*

Плотностью частиц грунта называют отношение массы сухого грунта к объему твердой части этого грунта. Плотность частиц грунта у горных пород изменяется в пределах от 2,6 до 2,75 г/см<sup>3</sup> и для каждой группы пород определяется только ее минералогическим составом.

$$\rho_s = (m - m_v) / v_T$$

$v_T$  - объем твердой части

#### *Пористость*

Пористость – это отношение объема пор в грунте к общему объему занимаемым грунтом.

$$n = (1 - \rho_d / \rho_s) \cdot 100\%$$

Значение пористости:

Для гравелистых 22 – 38%

Для песчаных 26 – 48%

Для глин 32 – 60%

#### *Коэффициент пористости*

$$e = v_{\text{пор}} / v_T$$

$$e = (\rho_s - \rho_d) / \rho_d$$

*Коэффициентом (индексом) водонасыщенности, или степенью влажности грунта*, называется отношение природной влажности грунта  $w$  к влажности, соответствующей полному заполнению пор водой,  $w_{\text{sat}}$ . Коэффициент водонасыщенности  $S_r$  изменяется от нуля (для абсолютно сухого грунта) до единицы (для полностью водонасыщенного грунта). Он вычисляется по формуле

$$S_r = \frac{w}{w_{\text{sat}}} = \frac{w \gamma_s}{e \gamma_w}.$$

где  $g_w$  удельный вес воды.

Грунты называются маловлажными при  $S_r < 0,5$ , влажными при  $0,5 < S_r < 0,8$  и насыщенными водой при  $S_r > 0,8$ .

*Зерновой (гранулометрический) состав.* Под зерновым составом содержание по массе групп частиц грунта различной крупности по отношению к общей массе абсолютно сухого грунта. По данным зернового состава породы может быть получена приблизительная характеристика водопроницаемости песчаных пород; по тем же данным могут быть даны оценка возможности вымывания мелких песчаных частиц породы из-под основания сооружений и другие приблизительные показатели. На основании данных анализа зернового состава может быть дана оценка пород в качестве материала для бетона, земляных плотин, дамб и др.

### ***Характеристики влажности и число пластичности***

*Влажностью породы* называют отношение массы воды, содержащейся в порах, к массе сухой породы. Влажность породы является очень важной характеристикой физического состояния породы, определяющей ее прочность и другие свойства при использовании в инженерных целях.

$$W = ((m - m_1) / m_1) \cdot 100\%$$

$m_1$  – масса высушенного грунта

Влажность, которую имеют грунты в естественном залегании называются естественной влажностью.

*Пластичностью* называют способность породы изменять под действием внешних сил свою форму, т. е. деформироваться без разрыва сплошности и сохранять полученную форму, когда действие внешней силы прекратилось.

*Деформируемость* глинистых пород под действием давления зависит от их консистенции (относительной влажности). Для того, чтобы выразить в числовых показателях пределы влажности породы, при которой она обладает пластичностью, введены понятия о верхнем и нижнем пределах пластичности.

*Нижним пределом пластичности* (граница раскатывания) называется такая степень влажности глинистой породы, при которой глинистое тесто, замешанное на дистиллированной воде, при раскатывании его в жгутик диаметром в 3 мм начинает крошиться вследствие потери пластических свойств.

*Верхним пределом пластичности* (граница текучести) называется такая степень влажности глинистой породы, при которой глинистое тесто, положенное в чашку и разрезанное глубокой бороздой, сливается после трех легких толчков чашки ладонью. При большей степени влажности тесто течет без встряхивания или при одном или двух толчках.

*Число пластичности* и его применение для классификации глинистых грунтов.

$$J_p = W_L - W_p$$

По СТБ 943-2007 глинистые грунты по числу пластичности на:

супеси  $1 \leq J_p \leq 7$

суглинки  $7 < J_p \leq 17$

глина  $J_p > 17$

Грунты наиболее устойчивы в основании обладают числом пластичности до 7.

*Показатель консистенции (текучести)* и его применение для оценки физического состояния грунта.

$$J_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p} = \frac{W - W_p}{J_p}$$

По СТБ 943-2007:

супесь:

-твердая  $J_L < 0$

-пластичная  $0 \leq J_L \leq 1$

-текучая  $J_L > 1$ ;

глины и суглинки:

твердые  $J_L < 0$

полутвердые  $0 \leq J_L \leq 0,25$

тугопластичные  $0,25 < J_L \leq 0,50$

мягкопластичные  $0,50 < J_L \leq 0,75$

текучепластичные  $0,75 < J_L \leq 0,1$

текучие  $J_L > 1$

*Липкость грунтов*- способность прилипать к поверхности разных предметов приходящих с ними в соприкосновение при определенном содержании воды в грунте. Характеристика для глинистых грунтов находится в увлажненном состоянии. На липкость влияет зерновой состав, материал предмета и сила, с которой он прикладывается к грунту.

*Набуханием* называется способность глинистых пород при насыщении водой увеличивать свой объем. Возрастание объема породы сопровождается развитием в ней давления набухания. Набухание зависит от содержания в породе глинистых и пылевых частиц и их минералогического состава, а также от химического состава воды.

Набухание учитывают при строительных работах. Явление набухания породы наблюдается в котлованах, выемках, а также при строительстве плотин и водохранилищ, когда изменяются гидрогеологические условия района сооружений и увеличивается влажность пород за счет вновь поступающей воды.

*Усадкой* породы называется уменьшение объема породы под влиянием высыхания, зависящее от ее естественной влажности: чем больше влажность, тем больше усадка.

*Размоканием* называется способность глинистых пород в соприкосновении со стоячей водой терять связность и разрушаться - превращаться в рыхлую массу с частичной или полной потерей несущей способности. Размокание породы имеет большое значение для характеристики ее строительных качеств. Скорость размокания пород определяет степень ее устойчивости под водой.

*Тиксотропность* - некоторые виды сильно увлажненных грунтов под влиянием механических воздействий способны разжижаться и переходить из

вязкопластичного состояния в жидкотекучее, а затем возвращаться в прежнее состояние без уменьшения влажности.

*Морозное пучение* – сложный процесс включающий увеличение грунта за счет потока и замерзания воды, заполненные поры грунта с одновременным набуханием глинистых материалов, приводящих к земельного полотна, которые появляются во взбугривании и потере ровности покрытия.

### ***Нормативные и расчетные характеристики***

Для всех характеристик грунта вычисляют *нормативные*, а для характеристик, используемых в расчетах, и *расчетные* значения.

*Нормативные значения* характеристик определяют как среднестатистические (6), получаемые осреднением их частных значений, или отвечающие осредненным по частным значениям аппроксимирующим зависимостям между измеряемыми в опытах величинами (или функционально с ними связанными величинами), или зависимостям каких-то из этих величин от координат по одному из направлений.

*Расчетное значение* получают делением нормативного значения на коэффициент надежности по грунту.

Коэффициент надежности по грунту должен устанавливаться с учетом изменчивости и числа определений характеристики (числа испытаний) при заданной доверительной вероятности.

Значения доверительной вероятности при вычислении расчетного значения характеристики грунта принимают в соответствии с рекомендациями норм проектирования различных видов сооружений.

Опытные данные, для которых проводится статистическая обработка, должны быть получены единым методом испытания.

### **Номенклатура грунтов, оснований по СТБ943-2007.**

Классификация грунтов включает следующие таксономические единицы, выделяемые по группам признаков:

- класс — по характеру структурных связей;
- группа — по происхождению (генетическое подразделение первого порядка);
- подгруппа — по условиям образования (генетическое подразделение второго порядка);
- тип — по петрографическому и гранулометрическому составу, числу пластичности;
- вид — по структуре, текстуре, составу цемента и примесей, содержанию заполнителя и включений, гранулометрическому составу и степени его неоднородности, пористости, относительному содержанию органического вещества, зольности торфа, по способу преобразования, степени уплотнения от собственного веса, возрасту намывного грунта;
- разновидность — по физическим, механическим, химическим свойствам и состоянию.

К предусмотренным настоящим стандартом признакам грунтов допускается вводить дополнительные, если это необходимо для более детального

подразделения и характеристики свойств грунтов, учета специфики строительства. Дополнительные признаки грунтов могут основываться на частных, отраслевых и региональных классификациях, установленных ТНПА, утвержденными или согласованными Минстройархитектуры Республики Беларусь.

Дополнительные признаки грунтов не должны противоречить классификации настоящего стандарта.

Группы, подгруппы, типы, виды и разновидности грунтов выделяются:

— *в классе грунтов с жесткими структурными связями (класс скальных грунтов)*

Магматические: интрузивные, эффузивные

Метаморфические: региональнометаморфизованные, динамометаморфизованные

Осадочные сцементированные: обломочные, биохимические, химические

Искусственные, преобразованные в природном залегании

— *в классе грунтов без жестких структурных связей (класс нескальных дисперсных грунтов)*

Осадочные несцементированные: обломочные — крупнообломочные, песчаные, глинистые

Биогенные

Почвы

Искусственные: преобразованные в природном залегании, насыпные, намывные

**Крупнообломочный грунт:** по гранулометрическому составу:

***валунный грунт*** (при преобладании неокатанных частиц — глыбовый) — масса частиц крупнее 200 мм более 50 %

***галечниковый грунт*** (при преобладании неокатанных частиц — щебенистый) — масса частиц крупнее 10 мм более 50 %

***гравийный грунт*** (при преобладании неокатанных частиц — дресвянный) — масса частиц крупнее 2 мм более 50 %

**Песок (песчаный грунт)** — в гранулометрическом составе масса частиц крупнее 2 мм менее 50 %, число пластичности  $I_p < 1$

По гранулометрическому составу:

гравелистый — масса частиц крупнее 2 мм более 25 %

крупный — масса частиц крупнее 0,5 мм более 50 %

средний — масса частиц крупнее 0,25 мм более 50 %

мелкий — масса частиц крупнее 0,1 мм 75 % и более

пылеватый — масса частиц крупнее 0,1 мм менее 75 %

**Грунт глинистый:** связный минеральный грунт, обладающий сцеплением между частицами (связностью) и пластичностью и имеющий число пластичности не менее единицы.

По числу пластичности  $I_p$ , %: супесь  $1 \leq I_p \leq 7$ , суглинок  $7 < I_p \leq 17$ , глина  $I_p > 17$

### **Гранулометрический состав грунта.**

Под гранулометрическим или зерновым составом понимают количественное соотношение разных фракций в дисперсных грунтах.

Методы определения гранулометрического состояния грунта могут быть:

#### *Прямые методы*

*Ситовый метод* (применяется для крупнообломочных и песчаных грунтов)

*Пипеточный метод* – основан на учёте скорости падения частиц в жидкой среде. Применяется для пылеватых и глинистых грунтов.

*Метод отмучивания* – основан на учёте скорости падения частиц в жидкости после взмучивания.

#### *Косвенные методы*

*Ареометрический метод* – основан на измерении плотности взмученной жидкости ареометром через определённые промежутки времени. Применяется для глинистых грунтов.

*Метод С.И. Рутковского* позволяет разделить грунт на песчаную, глинистую и пылеватую фракции.

#### *Визуальный метод.*

Результаты гранулометрического анализа сводят в таблицы, строятся суммарные графики, по которым определяют неоднородность грунта и эффективные диаметры частиц для расчёта коэффициента фильтрации.

### **Минералогический состав скелета грунта.**

Весьма существенным фактором в оценке свойств твердых грунтовых частиц является *их минералогический состав*.

Так, одни минералы (кварц, полевой шпат) менее активно взаимодействуют с водой, окружающие минеральные частицы, другие (монтмориллонит) значительно сильнее, причем и характер взаимодействия их будет иным. Чем мельче частицы грунта, тем больше их удельная поверхность (на 1 см<sup>3</sup> или на 1 г) и больше возникает центров взаимодействия как с окружающей твердые частицы водой, так и в контактах самих твердых частиц. Например, частицы глинистого минерала каолина имеют удельную поверхность 10 м<sup>2</sup>/г, а монтмориллонита — 800 м<sup>2</sup>/г, т.е. огромную поверхность, измеряемую сотнями квадратных метров в 1 г грунта, что несомненно сказывается и на свойствах природных грунтов, содержащих частицы монтмориллонита. Наличие в грунте частиц слюды (очень скользких, и массе ничтожно сопротивляющихся сдвигу) также существенно сказывается на физических свойствах такого вида грунтов, что и необходимо учитывать.

*Минеральный состав* является основной характеристикой твердых частиц. Основные минералы в грунтах — *полевые шпаты*, характеризующиеся сравнительной прочностью (6), практически не растворимы в воде, входят в состав таких магматических пород как граниты, гнейсы. При выветривании пылевых шпатов образуются гидрослюды.

*Слюда* характерна для магматических пород, твёрдость 2-3, подвержены выветриванию.

*Кальцит* – твердость-3, входит в состав мрамора, известняка и других пород. Водорастворим, неустойчив к выветриванию.

*Кварц* – наиболее прочный из минералов, твердость-7, очень устойчив физически и химически.

*Лимонит* (бурый железняк) устойчив к выветриванию, твердость - 1-5.

*Гипс* характеризуется заметной растворимостью, неустойчив к выветриванию, твёрдость-2, слагает одноименные породы.

*Глинистые минералы:* — вторичные водные силикаты, алюмосиликаты и ферросиликаты, слагающие основную массу глин, аргиллитов и тонких (< 0,005 мм) фракций некоторых других осадочных пород. Наиболее распространённые представители - *каолинит, монтмориллонит, бейделлит, галлуазит, иллит*.

Глинистые минералы являются продуктом выветривания преимущественно алюмосиликатов и силикатов магматических и метаморфических горных пород на дневной поверхности. В процессе выветривания глинистые материалы испытывают стадийные преобразования структуры и химического состава в зависимости от изменения физико-химических условий среды выветривания и седиментации. Размеры частиц глинистых материалов в глинах большей частью не превышают 0,01 мм. По кристаллической структуре глинистые материалы относятся к слоистым или псевдослоистым силикатам.

Высокая удельная поверхность, изоморфные замещения, обилие сколов кристаллической решётки и нескомпенсированных зарядов придаёт глинистым минералам катионнообменную способность. Также они способны химически связывать воду.

В состав минералов входят слои, состоящие из кремнекислородных тетраэдров и алюмогидроксильных октаэдров, эти слои объединяются в элементарные пакеты, совокупность которых формирует частицу минерала. По набору слоёв в пакете различают несколько групп глинистых минералов:

- *Группа каолинита* (каолинит, галлуазит) с пакетом, состоящим из одного слоя октаэдров и одного слоя тетраэдров. Пакеты прочно связаны между собой и плотно прилегают друг к другу, в результате чего молекулы воды и катионы металлов не могут входить в межпакетное пространство и минерал не набухает в воде, а также обладает низкой ёмкостью катионного обмена (ЕКО).

- *Группа монтмориллонита* или группа смектитов (монтмориллонит, нонтронит, бейделлит и др.) с трёхслойным пакетом вида тетраэдр-октаэдр-тетраэдр. Связь между пакетами слаба, туда проникает вода, из-за чего минерал сильно набухает. Отличается высокой ЕКО (до 80-120 мг-экв на 100 г.).

- *Группа гидрослюд* (гидробиотит, гидромусковит (= иллит), вермикулит, браммалит) также с трёхслойным пакетом, но сильной связью между ними. Практически не поглощают воду и не набухают в ней. Отличаются высоким содержанием калия, поскольку его ионный радиус позволяет ему входить в пустоты структуры минерала.

- *Группа хлорита* с четырёхслойной набухающей структурой.
- *Группа смешаннослойных минералов* с чередованием пакетов различных типов. Носят названия вида иллит-монтмориллонит, вермикулит-хлорит и т.п., свойства сильно варьируют.

Состав органической части грунтов представлен торфом и гумусом. *Торф* представляет собой грубую полуразложившуюся массу растительных остатков, в которых можно различить исходный материал.

### **Сложение песчаных грунтов.**

Плотность сложения сыпучих грунтов, имеющая первостепенное значение для оценки их как оснований сооружений не может быть оценена визуально, поэтому ее определяют специальными испытаниями: 1) лабораторными — по коэффициенту пористости  $e$  и по так называемой относительной плотности, определяемым по образцам грунта, взятым из буровых скважин или шурфов; 2) полевыми — зондированием (динамическим и статическим) в месте непосредственного залегания грунтов.

Состояние сыпучих грунтов оценивается по плотности сложения

Устанавливаем плотность сложения по коэффициенту пористости  $e$  и таблице 1:

Таблица 1 – Классификация песчаного грунта по плотности

| Вид песка                                      | Плотность сложения по коэффициенту пористости $e$ |                        |            |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------|------------|
|                                                | Плотная                                           | Средняя                | Рыхлая     |
| Пески гравелистые, крупные и средней крупности | $e < 0,55$                                        | $0,55 \leq e \leq 0,7$ | $e > 0,7$  |
| Пески мелкие                                   | $e < 0,6$                                         | $0,6 \leq e \leq 0,75$ | $e > 0,75$ |
| Пески пылеватые                                | $e < 0,6$                                         | $0,6 \leq e \leq 0,8$  | $e > 0,8$  |

**Тема 4. Сложение глинистых грунтов. Взаимодействие частиц скелета. Контактное взаимодействие. Сцепление между глинистыми частицами. Структура грунтов, их происхождение и показатели, структурные связи. Текстура грунтовой толщи**

## Сложение глинистых грунтов.

Состояние глинистого грунта оценивается по показателю текучести  $I_L$ : Глины и суглинки могут иметь в зависимости от значения показателя текучести следующие состояния:

|                  |           |                              |
|------------------|-----------|------------------------------|
| твердое          | . . . . . | $I_L < 0$ (когда $w < w_p$ ) |
| полутвердое      | . . . . . | $0 \leq I_L \leq 0,25$       |
| тугопластичное   | . . . . . | $0,25 < I_L \leq 0,50$       |
| мягкопластичное  | . . . . . | $0,50 < I_L \leq 0,75$       |
| текучепластичное | . . . . . | $0,75 < I_L \leq 1$          |
| текучее          | . . . . . | $I_L > 1$ (когда $w > w_L$ ) |

Для супесей вследствие малой точности определения значений  $W_L$  и  $W_p$  различают только три состояния:

|            |           |                     |
|------------|-----------|---------------------|
| твердое    | . . . . . | $I_L < 0$           |
| пластичное | . . . . . | $0 \leq I_L \leq 1$ |
| текучее    | . . . . . | $I_L > 1$           |

Строительные свойства пылевато-глинистых грунтов во многом зависят от особенностей их происхождения, формирования, влажности, гранулометрического и минералогического состава частиц. Эти грунты кроме песчаных частиц содержат в том или ином количестве частицы глинистых минералов каолиновых, иллитовых (гидрослюдовых), монтмориллонитовых групп, которые по-разному взаимодействуют с водой.

Прочность и строительные свойства глинистых грунтов зависят от прочности, условий происхождения и существования структурных связей.

## Взаимодействие частиц скелета.

В глинистых грунтах наличие связи между частицами обуславливает объединение отдельных глинистых частиц в агрегаты. Такие грунты имеют сложное строение, так как в них обычно содержатся песчаные, пылеватые, а также агрегированные и отдельные глинистые частицы. Таким образом, на свойства глинистых грунтов будет влиять как внутри агрегатная, так и меж агрегатная прочность связей.

Вода, находящаяся в грунте в жидком состоянии, испытывает на себе действие следующих сил:

а) *силы тяжести*, которая обуславливает просачивание влаги в грунт и стремление к дальнейшему передвижению вниз в толщу грунта;

б) *сорбционных сил* - сил взаимного притяжения между молекулами воды и молекулами и ионами поверхности грунтовых частиц;

в) *сил взаимного притяжения*, действующих между молекулами воды; эти силы наглядно проявляются в пределах поверхностных слоев жидкости (капиллярные или менисковые силы);

г) *осмотических сил*, которые вызывают передвижение влаги - диффузию; в грунтах в явлении диффузии могут принимать участие молекулы воды, молекулы и ионы растворимых солей, а также частично и обменные ио-

ны, те-ионы, которые способны отделиться от поверхности грунтовых частиц и диссоциировать в грунтовую воду.

Изменение внешних условий (инфильтрация, испарение, температура и т. и.) обуславливает постоянное движение как нормальное состояние грунтовой влаги.

Сорбционные силы обусловлены взаимным притяжением между молекулами воды и молекулами и ионами поверхностных слоев грунтовых частиц, но поскольку подвижными в основном являются молекулы воды, это взаимное притяжение воспринимается как одностороннее притяжение воды к частицам грунтового скелета.

*Адсорбцией* называется физико-химический процесс поглощения поверхностью твердого тела веществ из раствора или газа.

Адсорбция в грунтах проявляется в том, что на поверхности или на грани кристаллов происходит увеличение концентрации молекул воды, а в результате этого - уплотнение окружающей частицу грунта водной оболочки. Поглотитель, вызывающий притяжение, называется адсорбентом, а поглощенное, или притягиваемое вещество,- адсорбатом. В грунтах адсорбентом являются частицы скелета, а адсорбатом - вода, находящаяся в порах.

Адсорбционные силы являются частным случаем молекулярных сил. Они отличаются от других видов молекулярных взаимодействий, во-первых, тем, что они происходят на поверхностях раздела фаз и, во-вторых, тем, что происходят обычно между молекулами разного рода.

Взаимодействие частиц скелета с водой происходит по поверхности контакта между ними, т. е.- по поверхности частиц.

Характер и интенсивность этих явлений (поверхностных явлений) в грунтах зависит в основном от степени дисперсности грунта и от интенсивности действующих на единице поверхности сил. Чем выше степень дисперсности, тем больше поверхность частиц.

Удельной поверхностью грунта называют суммарную поверхность частиц, содержащихся в  $1 \text{ см}^3$  грунта, т. е. отношение поверхности частиц к их объему.

Удельная поверхность очень быстро увеличивается по мере уменьшения размера частиц. Так, например, для шаров диаметром 0,5 мм удельная поверхность равна  $45 \text{ см}^2$ , при диаметре 0,005 мм -  $4500 \text{ см}^2$ . Для глинистых частиц, имеющих пластинчатую форму и размеры менее 0,005 мм, величина удельной поверхности достигает миллионов кв. сантиметров. У монтмориллонита притяжение воды происходит по наружным и по внутренним поверхностям кристаллической решетки, что еще более увеличивает активную поверхность.

Таким образом, благодаря величине удельной поверхности глинистые частицы обладают в десятки тысяч раз большей адсорбционной способностью, чем пески. Кроме того, у глинистых грунтов значительно большую величину имеет и интенсивность поверхностных явлений.

Такой же характер носит зависимость между деформацией и влажностью и при других видах испытаний, например при изучении глубины погружения в грунт штампа, при расплющивании цилиндров грунта и т. п.

Таким образом, предел пластичности - это такая влажность данного грунта, при которой резко изменяется способность грунта сопротивляться внешним нагрузкам.

При достижении предела текучести содержание воды в грунте настолько велико, что водные и коллоидные связи исчезают почти полностью и сцепление грунта становится близким к нулю. В этом состоянии грунт уже не имеет возможности сопротивляться внешним нагрузкам.

Следовательно, предел текучести - это такая влажность грунта, при которой сцепление между частицами грунта приближается к нулю.

Необходимо иметь в виду, что переход в текучее состояние возможен лишь в том случае, если грунт значительно разбухнет и сможет вместить в себя соответствующее количество влаги.

Увлажнение глинистого грунта вызывает его набухание, а обжимающие грунт давления (вес вышележащей толщи, нагрузка от сооружения) тормозят этот процесс. Поэтому переход в текучее состояние грунтов, расположенных на дне потока, возможен лишь в слое определенной мощности; глинистые грунты, расположенные под сооружением и обжатые значительным для них давлением, увлажняются лишь в определенных пределах. Для оценки состояния глинистых грунтов можно также использовать коэффициент консистенции

Непосредственной характеристикой строительных свойств грунтов является величина их модуля деформации и сопротивление грунтов сдвигу, определяемые экспериментально.

Примерное определение строительных свойств грунтов может быть получено путем косвенной оценки их по основным физическим характеристикам.

### **Контактное взаимодействие. Сцепление между глинистыми частицами.**

Глинистые частицы и микроагрегаты образуют *коагуляционные и переходные контакты*. Пространство между частицами – поры – неоднородно. Размеры пор определяются размерами частиц. Доля наиболее крупных пор относительно невелика и составляет единицы процента. В частности, анализ показал, что поровое пространство глинистых пород с матричной микроструктурой представлено четырьмя категориями пор со средним эквивалентным диаметром 0,06; 0,42; 3,3 и 12,3 мкм. Их распределение по эквивалентным диаметрам и периметрам носит прерывистый характер.

Понятие контакта и его роль в исследовании микроструктуры грунта весьма важны. Они лежат в основе теории контактных взаимодействий. Формирование структурных связей в грунтах происходит не по всей межфазной поверхности, а только в местах их максимального сближения – контак-

тах. В частном случае коагуляционных контактов между частицами существует равновесие сил притяжения и отталкивания. Наличие на контакте равновесной прослойки жидкости обуславливает способность контактов обратимо разрушаться при механических воздействиях, восстанавливаясь затем до первоначальной прочности.

Контакты могут иметь следующие *геометрические разновидности*: базис-базис (при параллельном положении базальных плоскостей), базис-скол (базальные плоскости образуют ненулевой угол), скол-скол (касание краями частиц – наименее устойчивый контакт). С числом контактов должно быть связано понятие структурной неустойчивости и переуплотнения грунтов.

Прочность глинистых грунтов с нарушенными и ненарушенными структурными связями при одинаковой исходной плотности и влажности оказывается различной: в первом случае значительно меньшей, чем во втором. Различают сцепление восстанавливающееся (обратимое) после разрушения и невосстанавливающееся (необратимое). Сцепление бывает *первичным и бывает сцепление упрочнения*. *Первичное сцепление* между глинистыми частицами обусловлено электростатическим, молекулярным и магнитным их взаимодействием. *Сцепление упрочнения* формируется в результате скрепления частиц природным цементом. Наряду с силами сцепления прочность глинистых грунтов определяется и силами внутреннего трения между частицами. Однако точное выделение составляющей трения и сцепления представляет большие трудности.

Максимальная прочность грунтов природного сложения определяется в основном прочностью кристаллизационных связей. После разрушения структурных связей прочность грунтов значительно уменьшается и определяется главным образом сопротивлением трения и механическим взаимодействием частиц.

### **Структура грунтов, их происхождение и показатели, структурные связи.**

Под *структурой грунта* понимают взаимное расположение различных по крупности и форме минеральных частиц и агрегатов и характер связей между ними, обусловленных всей предысторией грунта.

Связи между частицами и отдельными агрегатами грунта часто называют *структурными связями*.

Для удобства решения и изложения некоторых задач в механике грунтов широко используют вспомогательное понятие *скелета грунта*. Под этим наименованием понимается совокупность твердых частиц грунта, наиболее связанной с ними воды и «жестких» связей между частицами, если они имеются.

Прочность структуры грунта, т. е. ее сопротивление изменению взаимного расположения частиц грунта и их агрегатов, зависит от прочности связей между ними.

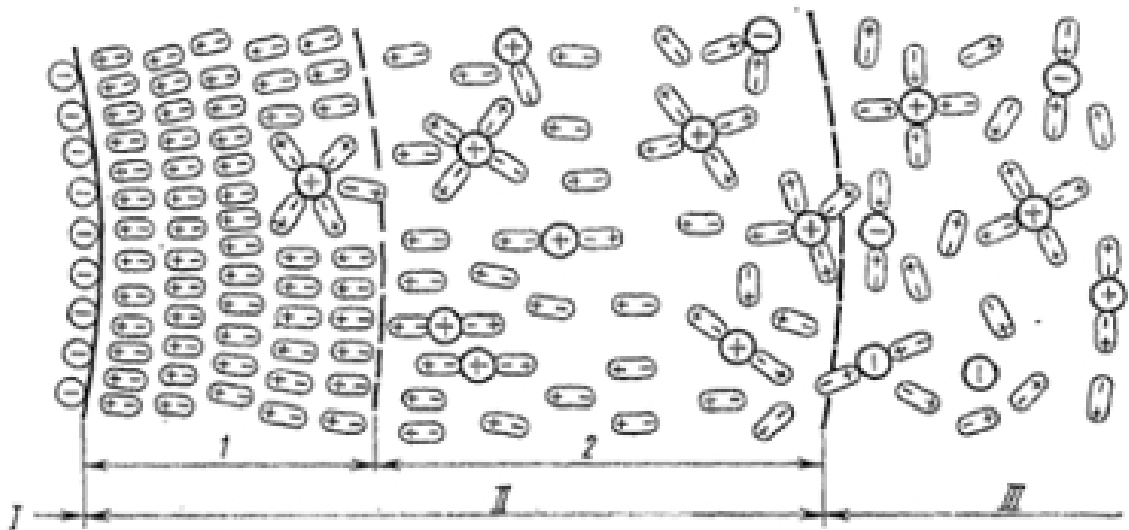


Рис. 1.3. Схема строения слоя связанной воды: I — твердая частица; II — связанная вода; III — свободная вода; 1 — слой прочно связанной воды (гидратный слой); 2 — слой рыхло связанной воды (диффузионный слой)

Все грунты делят на *связные и несвязные*. Связные грунты отличаются от несвязных (сыпучих) грунтов способностью воспринимать хотя бы небольшие растягивающие напряжения и сохранять без обрушения вертикальные откосы.

Связность грунтов объясняется: молекулярными силами взаимодействия между частицами, а также частицами и ионами в поровой воде (водно-коллоидные структурные связи); цементационными и кристаллическими связями, соединяющими частицы грунта; капиллярными силами (давлением) в грунте.

При сближении глинистых частиц, когда расстояние между ними станет равным двойной толщине диффузного слоя (см. рис. 1.3), достаточно ярко проявляется сопротивление дальнейшему их сближению вследствие наличия сил отталкивания между одноименно заряженными диффузными слоями. Однако, если преодолеть это сопротивление, то при дальнейшем сближении этих частиц, когда толщина зазора между ними мала и не превышает 1...2 десятков молекул воды, проявляются силы молекулярного взаимодействия (силы притяжения — *силы Ван-дер-Ваальса*) непосредственно между твердыми частицами.

Таким образом, при сближении мельчайших частиц одновременно действуют силы отталкивания и притяжения, поэтому связность грунта создается в результате преодоления молекулярными силами сил отталкивания диффузных слоев. Естественно, что чем ближе друг к другу частицы и меньше разделяющая их пленка связанной воды, т. е. чем плотнее грунт, тем прочнее молекулярные структурные связи. В результате глинистые коллоидные частицы, обволакивая более крупные частицы и «склеиваясь» между собой и с крупными частицами под действием молекулярных сил, создают сложную структуру глинистых грунтов. Важной особенностью таких водно-коллоидных структурных связей является то, что после их нарушения они

при сближении частиц полностью восстанавливаются. Эти связи иногда называют *первичными или первичным сцеплением*.

Со временем за длительный период образования и существования грунта в контактах между частицами в результате кристаллизационных процессов образуются *цементационные связи*. Ими могут быть менее прочные и водостойкие связи, образуемые, например, гипсом, кальцитом, и более прочные и водостойкие, такие, как оксиды железа, кремния и др. В отличие от первичного сцепления, определяемого плотностью грунта, сцепление, обусловленное цементационными связями, называют *сцеплением упрочнения*.

Важнейшей особенностью цементационных связей является то, что при достаточном взаимном смещении частиц и разрушении цементационных связей они не восстанавливаются, а если частично и восстанавливаются, то в течение очень длительного времени. Поэтому грунты нарушенной структуры (например, уложенные в тело плотины) при одинаковой плотности с природными грунтами ненарушенной структуры (в карьере) обладают меньшей связностью и, как следствие, меньшей прочностью и большей деформируемостью. В заключение следует отметить, что взаимодействие реальных жидкостей, газов, мельчайших твердых частиц и явления, происходящие на границах этих сред, имеют значительно более сложную природу, чем в приводимых выше весьма приближенных представлениях. В этом сложном научном направлении ведутся постоянные исследования в области физической химии.

*Основные виды структурных связей в грунтах:*

1) *кристаллизационные связи* присущи скальным грунтам. Энергия кристаллических связей соизмерима с внутрикристаллической энергией химической связи отдельных атомов.

Кристаллизационные связи, образовавшиеся в результате отложения поликристаллических соединений в точках контактов минеральных частиц грунта, обладают достаточно высокой прочностью. Их прочность зависит от состава минералов цементирующего вещества. Связи, образуемые гипсом и кальцитом, существенно снижают свою прочность при увлажнении; связи же, например, из оксидов железа, кремния — водостойки. Кристаллизационные связи хрупкие и не восстанавливаются после их нарушения.

2) *водно-коллоидные связи* обуславливаются электромолекулярными силами взаимодействия между минеральными частицами, с одной стороны, и пленками воды и коллоидными оболочками — с другой. Величина этих сил зависит от толщины пленок и оболочек. Водно-коллоидные связи пластичны и обратимы; при увеличении влажности они быстро уменьшаются до значений близких к нулю.

Чем тоньше пленки воды (меньше влажность), тем эти силы больше, и наоборот. Обратимость водно-коллоидных связей заключается в том, что при увлажнении они ослабляются, а при повторном подсушивании опять возрастают. Ослабление водно-коллоидных связей в некоторых случаях наблюдается и при перемятии (нарушении природной структуры). Однако после пре-

кращения перемятая (оставления в покое) такого тиксотропного грунта водно-коллоидные связи в нем постепенно восстанавливаются.

### Текстура грунтовой толщи

*Текстурой грунтов* называется их сложение, т. е. пространственное размещение и взаимное расположение частиц грунтов и их агрегатов, зависящее от условий накопления осадка. Например, в озерах ледникового периода образовывались пылевато-глинистые отложения с характерной слоистой текстурой. Они представляют собой чередующиеся тонкие слои из глинистых частиц, выпадавших в зимний период подо льдом, и из пылеватых песчаных частиц, оседавших в теплый период года. Различают слоистую, слитную и сложную текстуру:

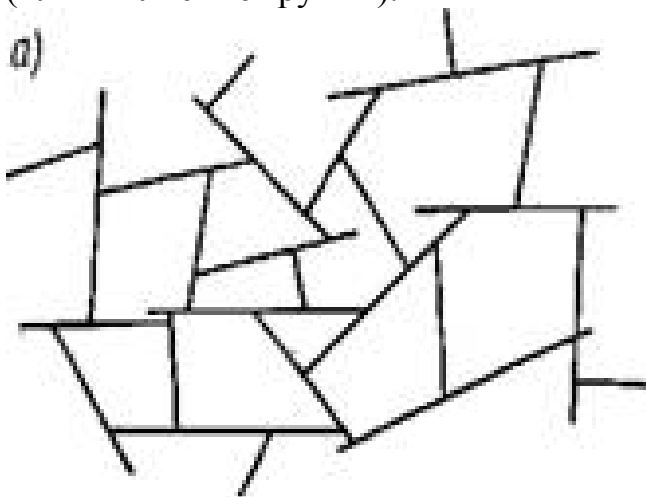
*слоистая* — наиболее распространенный вид сложения грунтов, характерный для морских, озерных и других отложений;

*слитная* присуща морским отложениям, имеющим однородное сложение в различных точках массива;

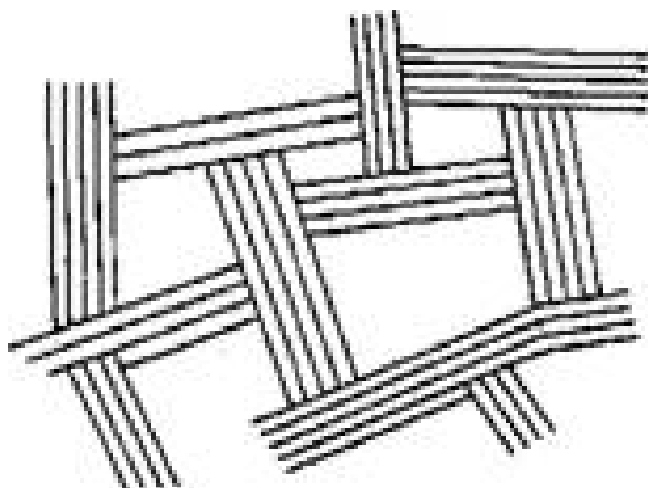
*сложная* — порфировая, ячеистая, макропористая и др. (порфировой текстурой обладают моренные суглинки; ячеистая текстура характерна для вечномёрзлых грунтов, имеющих вертикальные и горизонтальные полости, заполненные льдом, макропористую текстуру имеют лессовые грунты).

Особое значение имеет *текстура глинистых грунтов*.

Например, глинистые плоские по форме частицы могут образовывать текстурные агрегаты, подобные «карточному домику». Между частицами в этом случае имеются открытые ячейки размером от 2...3 до 10..15мкм. Глинистые грунты с *ячеистым сложением* - наиболее рыхлые, сильносжимаемые (илы и илистые грунты).



Те же частицы могут оказаться соединенными в агрегаты, подобные пачкам листов бумаги. Если эти агрегаты стыкуются между собой по типу «торец - плоскость», то они образуют текстуру типа «*книжный домик*».



Если же они ориентируются параллельно и контактируют плоскими поверхностями, то образуется *стопочная текстура*, наиболее плотная и прочная текстура глинистого грунта.



Текстура грунта зависит от условий его формирования и геологической истории, в ходе которой грунт претерпел различные преобразования.

**Тема 5. Понятие об основных закономерностях механики грунтов. Определение в лабораторных и в полевых условиях механических характеристик грунтов, оценка по ним свойств грунтов**

**Понятие об основных закономерностях механики грунтов.**

*Механическими* называют свойства, которые оказывают решающее влияние на деформацию и прочность грунта под нагрузкой. Механические свойства оцениваются прочностными и деформационными характеристиками.

| Свойство                | Закон                                 | Показатели                                                                                                     | Практическое применение                                         |
|-------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1. сжимаемость          | уплотнения                            | $m_0$ – коэффициент сжимаемости,<br>$m_v$ – коэффициент относительной сжимаемости                              | расчет осадок                                                   |
| 2. водопроницаемость    | ламинарной фильтрации или закон Дарси | $k_f$ – коэффициент фильтрации                                                                                 | прогноз скорости осадок                                         |
| 3. сопротивление сдвигу | закон Кулона                          | $c$ – сцепление<br>$\varphi$ – угол внутреннего трения                                                         | расчет прочности и устойчивости грунтов, давление на сооружения |
| 4. деформируемость      | принцип линейной деформируемости      | $E_0$ – модуль общей деформации<br>$\beta$ – коэффициент, учитывающий невозможность бокового расширения грунта | определение деформации                                          |

Деформации грунтов под нагрузкой сопровождаются сложными процессами. Эти процессы приводят к деформациям, которые делят на упругие, т.е. исчезающие после снятия нагрузки, и остаточные.

Деформационное свойство характеризует поведение грунта под нагрузками, не превышающими критические. Эти нагрузки не приводят к разрушению грунтов. При малых изменениях давления зависимость между деформациями и напряжениями может приниматься линейно. Все виды деформации могут быть распределены на 2 группы:

1. Деформация и сжатие, при которых частицы сближаются, укладываясь более плотно.
2. Деформация сдвига сопровождается смещением частиц, изменением их взаиморасположения.

В толще деформируемого грунта происходят следующие виды перемещений:

1. Взаимное смещение структурных агрегатов и частиц с разрушением удерживающих их связей.
2. Обжатие и разрушение структурных агрегатов, связанные с уплотнением грунта.

3. Выжимание свободной воды и воздуха из пор грунта с уменьшением пористости.

4. Сжатие и выжимание пленок адсорбируемой воды в точках соприкосновения частиц.

5. Сжатие и частичное растворение в воде пузырьков воздуха, защемленного в порах грунта.

*Полностью пластическими*, т.е. необратимыми деформациями, является взаимный сдвиг грунтовых частиц, разрушение структурных элементов, выталкивание воздуха из грунта. *К упругим*, т.е. обратимым деформациям, относятся сжатие в результате выталкивания воды, сжатие защемленных объемов воздуха, упругие деформации грунтовых частиц и деформация пленок связанной воды.

### **Определение в лабораторных и в полевых условиях механических характеристик грунтов, оценка по ним свойств грунтов**

Грунты определяют устойчивость возводимых на них зданий и сооружений, поэтому необходимо правильно определить характеристики, которые обуславливают прочность и устойчивость грунтов при их взаимодействии со строительными объектами. Химико-минералогический состав структуры и текстура грунтов, содержание органического вещества определяется в геологических лабораториях, оснащенных необходимой аппаратурой (рентген, микроскоп и т.д.). Физико-механические свойства грунтов изучают в грунтоведческих лабораториях и в полевых условиях на будущих строительных площадках.

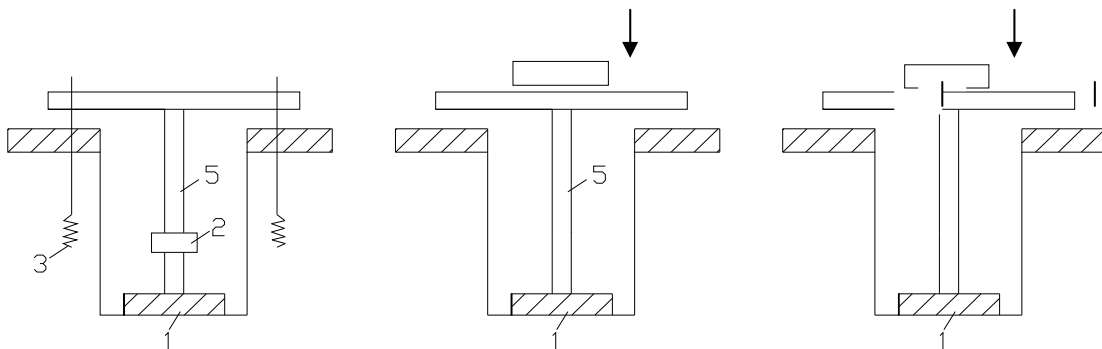
Методика определения физико-механических свойств выбирается в зависимости от состава и состояния грунтов, условий их поведения в основании, как при строительстве, так и в процессе эксплуатации зданий. Особое внимание при этом обращается на достоверность получаемых результатов, так как грунты и грунтовые напластования весьма изменчивы в пространстве и во времени. По каждой физико-химической характеристике выполняется несколько определений и проводится их статический анализ. Количество определений зависит от характера грунтов, назначения сооружения и его конструктивных особенностей (минимальное количество определений – 6). Грунтоведческая лаборатория: образцы грунтов для лабораторных исследований отбираются по слоям грунтов в шурфах в буровых скважинах, расположенных на строительной площадке. В лабораторию образцы грунтов доставляют в виде монолитов.

Монолиты – образцы грунтов с ненарушенной структурой. Они отбираются в скальных и связных пылевато-глинистых грунтах, размеры устанавливаются нормами. В пылевато-глинистых грунтах сохраняется природная влажность путем создания на поверхности парафинной оболочки.

В рыхлых грунтах образцы отбираются в виде проб определенной массы. Так для проведения гранулометрического анализа песка необходимо иметь пробу не менее 0,5 кг.

Полевые работы более точные, чем в лаборатории. В полевых условиях определяют все прочностные и деформационные характеристики и скальных и нескальных грунтов.

Деформационные характеристики (сжимаемость) испытываются методом *полевых штамповых испытаний*. В нескальных грунтах на дне шурфов или в забое буровых скважин устанавливают штампы, на которые передают статические нагрузки. Штампы в шурфе – это стальная или железобетонная плита. Форма штампа зависит от формы фундамента, который он моделирует (в Могилеве обычно плита  $A=5000 \text{ см}^2$ ). Для создания под штампы заданного напряжения применяют домкраты или платформы с грузом.



1 – штампы, 2 – домкрат, 3 – анкерные сваи, 4 – платформы с грузом, 5 – штанга

При проходке шурфа на отметке подошвы штампа и вне его отбирают образцы грунтов для параллельных лабораторных исследований. Загрузку штампа производят ступенями и выдерживают некоторое время. Значение нагрузки устанавливают в зависимости от вида грунта и его состояния. В итоге строят зависимости осадки от давления  $S=f(p)$  и зависимости осадки штампа от времени  $S=f(t)$ . После этого по формулам вычисляют модуль деформации грунта:  $E$  (МПа).

Штампы буровой скважины диаметром более 320 мм испытание проводят специальными установками, работающими на глубине до 20 м. На забой скважины опускают штамп площадью  $600 \text{ см}^2$ . Нагрузка на штамп подается через штангу (5), на которой располагается платформа с грузом (4). Модуль деформации  $E$  определяют по формуле.

*Прессиометрические исследования* Их проводят в глинистых грунтах с помощью разведочных скважин. Прессиометр представляет собой резиновую цилиндрическую камеру, которую опускают в скважину на заданную глубину. Камеру расширяют давлением жидкости или газа. В процессе работы в стенах скважины измеряют радиальное перемещение грунта и давление. Это позволяет определить модуль деформации.

*Зондирование (пенетрация)* Используется для изучения толщ породы до глубины 15-20 м. Определяют сопротивление проникновению в грунт металлического наконечника (зонда). Зондирование дает представление о плотности и прочности грунта на определенной глубине и характеризует изменения в вертикальном разрезе.

Зондирование относится к экспресс-методам и применяется в целях ускоренного получения результатов исследования. Используется при изучении песчаных, глинистых и органогенных грунтов, которые не содержат или мало содержат примесей щебня или гальки.

По способу погружения наконечника различают динамическое и статическое зондирование.

*Статическое зондирование* позволяет: расчленить толщу грунта на отдельные слои, установить приблизительную плотность грунтов, консистенцию глинистых грунтов и определить модуль деформации, оценить качество искусственно уплотненных грунтов в насыпях и намывных образованиях, измерить мощность органогенного грунта на болотах.

*Динамическое зондирование* дает возможность определить: мощность современных четвертичных отложений, границы между слоями, степень уплотнения насыпных и намывных грунтов

Для хорошо фильтрующих грунтов  $k_f$  (*коэффициент фильтрации*) определяют с помощью прибора (рис 1), состоящего из трубы длиной  $L$ , заполненной грунтом, и двух трубок — подводящей и отводящей воду. При разности напоров  $H_2—H_1$  вода будет фильтроваться под действием градиента  $i$ , вычисляемого по формуле. Определив объем воды в колбе  $V$ , профильтровавшейся за время  $t$ , можно найти

$$k_f = V/Ait,$$

где  $A$  — площадь поперечного сечения образца грунта.

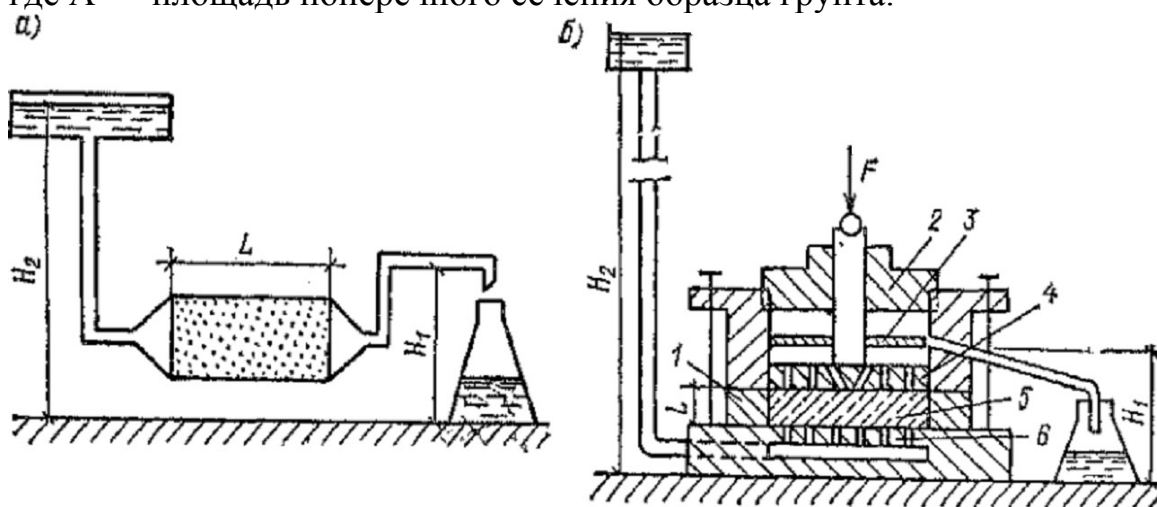


Рис. 1. Схемы установок для определения коэффициента фильтрации а — песка, б — пылевато-глинистого грунта

При пылевато-глинистых грунтах для определения коэффициента фильтрации приходится создавать большой напор. Тогда значение можно определять с помощью прибора конструкции Б. И. Далматова (рис. 1,б).

С помощью такого прибора можно устанавливать коэффициент фильтрации суглинков и глин при  $k_f < 10^{-9}$  см/с.

Коэффициент фильтрации песков и супесей для расчета притока воды в котлованы рекомендуется определять в полевых условиях методом пробных откачек или путем налива воды в скважины.

Для расчета коэффициента фильтрации можно воспользоваться следующей формулой:

$$K_{\phi} = \frac{0,366 \cdot Q \cdot (\lg L_2 - \lg L_1)}{m(S_1 - S_2)},$$

где Q – количество фильтрующейся воды, м<sup>3</sup>/сут;

L<sub>1</sub> и L<sub>2</sub> – расстояния от наблюдательных скважин до центральной,  
м;

m – мощность водоносного горизонта, м;

S<sub>1</sub> и S<sub>2</sub> – понижение уровней в наблюдательных скважинах, м.

**Тема 6. Физические представления об уплотнении грунтов. Компрессионная зависимость и ее анализ. Коэффициент сжимаемости. Общий случай компрессионной зависимости. Коэффициент бокового давления. Модуль деформации.**

**Физические представления об уплотнении грунтов.**

Под действием нагрузок, передаваемых сооружениями, грунты основания могут испытывать большие *объемные и сдвиговые деформации*. Это приводит к развитию значительных вертикальных и горизонтальных перемещений поверхности оснований (осадки и сдвиги) и установленных на них сооружений.

Деформации грунтов имеют *упругий и пластический характер*. *Упругие деформации* возникают при условии сохранения структурного каркаса и связей в грунте, происходят без относительного смещения твердых частиц и обуславливаются лишь упругим сжатием скелета грунта, самих частиц и поровой воды. Они развиваются под действием статических нагрузок, не превышающих структурной прочности грунта, или кратковременных динамических нагрузок. При снятии нагрузок (разгрузка дна котлована при его разработке) восстановление деформаций (подъем дна котлована) происходит по закону упругого деформирования.

При нагрузках, превышающих структурную прочность грунта, связи между частицами, образующими скелет, начинают разрушаться. Возникают пластические деформации, вызванные относительным перемещением частиц. *Пластические деформации*, как правило, развиваются во времени: чем больше в грунте содержится глинистых частиц, тем медленнее в нем протекает процесс развития пластических деформаций. Это связано с резким уменьшением скорости отжатия воды по тонким капиллярам пор глинистого грунта, с особыми свойствами связанной воды, с вязким сопротивлением относительному перемещению самих глинистых частиц. В песках средней крупности и крупных, крупнообломочных и трещиноватых скальных грунтах скорость развития пластических деформаций на несколько порядков больше, чем в глинистых грунтах. Пластические деформации значительно превышают упругие и только в малотрещиноватых скальных грунтах могут быть относительно невелики.

*Пластические деформации* в грунтах можно разделить на *объемные и сдвиговые*. Объемные деформации приводят к изменению объема пор в грунте, т. е. к его уплотнению, сдвиговые — к изменению его первоначальной формы и могут вызвать разрушение грунта. В водонасыщенных грунтах объемные деформации сопровождаются отжатием воды из пор грунта и имеют очень сложный характер.

В ряде случаев (динамическое воздействие на грунты, отрывка глубоких котлованов и т. п.) производится раздельное изучение упругих и пластических деформаций. Однако в большинстве случаев оказывается возможным

ограничиться изучением лишь общих (суммарных) деформации и вызываемых ими общих перемещений в массиве грунта.

*Уплотнение грунтов* — искусственное преобразование свойств грунтов в строительных целях без коренного изменения их физико-химического состояния; представляет собой процесс взаимного перемещения частиц грунта, в результате которого увеличивается число контактов между ними в единице объёма вследствие их перераспределения под действием прикладываемых к грунту механических усилий.

Уплотнение грунтов обычно протекает как процесс вытеснения из них газообразной (воздуха) и жидкой фазы (воды), вследствие чего происходит сближение твердых частиц и грунт, состоящий из трех фаз (твердая, жидкая — поровый раствор, газ) переходит в состояние, близкое к двух фазной системе — грунтовой массе; при максимальном уплотнении грунт содержит не более 3-5 % воздуха. Наибольшее уплотнение достигается при оптимальной для каждого грунта влажности.

Уплотнение грунтов производится для обеспечения их заданной плотности и уменьшения величины и неравномерности последующей осадки оснований и земляных сооружений. При уплотнении грунтов увеличивается их прочность, уменьшается сжимаемость и фильтрационная способность.

Качество уплотнения грунта обуславливается прежде всего его гранулометрическим составом, исходной влажностью, видом и техническими характеристиками грунтоуплотняющих машин, правильной организацией их работы. Как уже отмечалось, наилучшие результаты уплотнения достигаются при оптимальной влажности грунта (зависит от его гранулометрического состава).

### **Компрессионная зависимость и ее анализ**

*Сжимаемость* — способность грунтов изменять свое строение под нагрузкой за счет уменьшения пористости.

Определение основных показателей сжимаемости грунтов производится путем их уплотнения под нагрузкой без возможности бокового расширения в условиях одномерной задачи.

Сжимаемость под нагрузкой может быть двух видов: от воздействия постоянной нагрузки (уплотнения) и от действия динамической нагрузки (уплотняемость). При статической нагрузке уплотнение происходит, если структурные связи между частицами будут преодолены. При динамическом воздействии хорошо уплотняются маловлажные рыхлые песчаные грунты и неводонасыщенные грунты с жесткими контактами.

Сжимаемость грунта определяется экспериментальным путем. Основным прибором для лабораторного определения служит компрессионный прибор или одометр (рис 4.3).

*Компрессия* — это сжатие грунта без возможного бокового расширения.

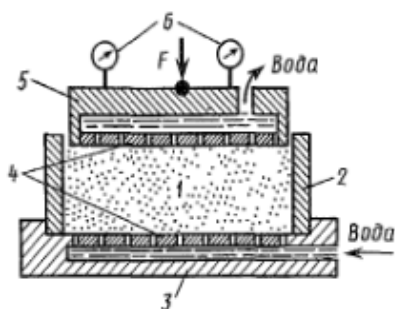
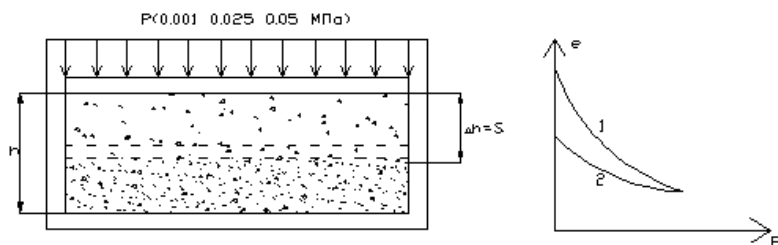


Рис. 4.3. Схема одометра компрессионного прибора

(Схема одометра компрессионного прибора показана на рис. 4.3. Образец грунта 1, помещенный в металлическое кольцо 2, устанавливается на дно 3. Сверху на образец через штамп 5 с помощью нагрузочного устройства отдельными ступенями передается сила  $F$ , вызывающая в образце сжимающие напряжения  $\sigma = F/A$ , где  $A$  — площадь поперечного сечения образца. В дне и штампе имеются тонкие отверстия 4, обеспечивающие отток поровой воды при сжатии образца грунта или, наоборот, поступление воды в грунт при необходимых условиях испытания. Под действием силы  $F$  происходит вертикальное перемещение штампа, вызывающее осадку образца. Величина этих перемещений измеряется индикаторами часового типа 5, устанавливаемыми на штампе одометра. Чтобы уменьшить влияние силы трения деформирующегося образца грунта о стенки кольца, диаметр образца должен в три раза и более превышать его высоту.)

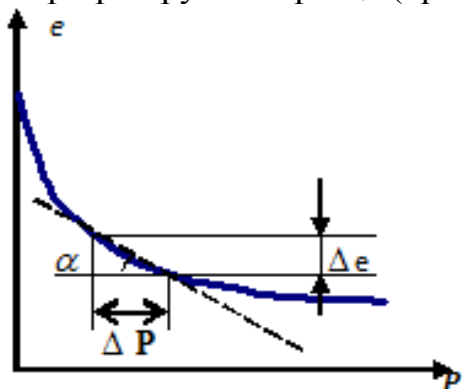
По результатам испытаний строим график *компрессионной кривой* (к к).



$$e = f(P)$$

1 — при возрастании нагрузки (ветвь сжатия);

2 — при разгрузке образца (кривая набухания или ветвь расширения).



На небольшом участке рассмотрим приращение нагрузки  $\Delta P$  и получим соответственно  $\Delta e$ . Заменим дугу прямой и рассмотрим угол  $\alpha$ .

$$\Delta e = - \operatorname{tg} \alpha \Delta P$$

(-) — с увеличением нагрузки  $\alpha$  — уменьшается.

В дифференциальной форме:

$$de = - \operatorname{tg} \alpha \Delta P$$

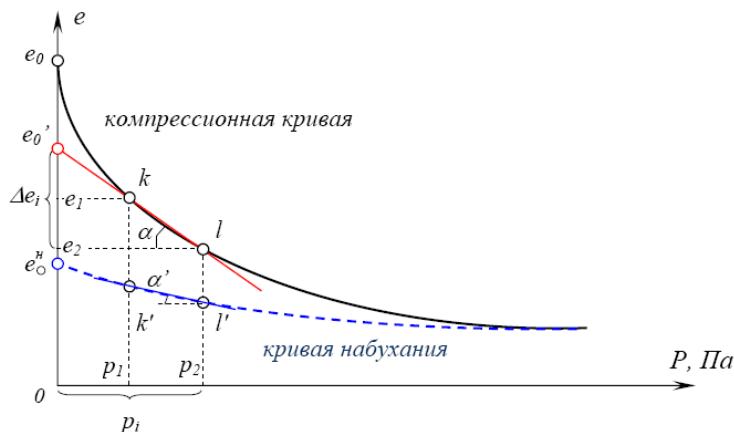
$\operatorname{tg} \alpha = m_0$  и тогда  $\boxed{de = - m_0 dP}$  – основная математическая форма закона уплотнения (компрессии).

**Относительное изменение коэффициента пористости пропорционально изменению нагрузки (для малых интервалов нагрузок).**

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\Delta h}{h}$$

(Для водонасыщенных грунтов строится зависимость  $W=f(P)$ .)

### Коэффициент сжимаемости.



$$m_0 = \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} = \frac{e_1 - e_2}{p}$$

$$m_0 = \operatorname{tg} \alpha$$

где

$e_1$  и  $e_2$  – коэффициенты пористости до начала испытания и после испытания образцов грунта;  $p$  – действующее давление.

*Коэффициент сжимаемости равен отношению изменения коэффициента пористости к величине действующего давления.*

По коэффициенту сжимаемости грунты подразделяются на три категории:

- сильносжимаемый –  $m_0 > 0,5 \text{ (МПа)}^{-1}$
- среднесжимаемый –  $0,1 > m_0 > 0,5 \text{ (МПа)}^{-1}$
- малосжимаемый –  $m_0 < 0,5 \text{ (МПа)}^{-1}$

Для грунтов полностью водонасыщенных изменение пористости возможно лишь при изменении их влажности.

Для прогноза деформации уплотнения грунтов воздействием приложенных к ним нагрузок помимо величин напряжений, вызывающих эту деформацию, необходимо располагать показателями сжимаемости грунта. Показатели, определяющие меру сжимаемости грунтов, называют компрессионными характеристиками.

Коэффициент сжимаемости ( $m_0$ ) представляет собой характеристику, с помощью которой можно оценить категорию грунта по сжимаемости.

Коэффициент сжимаемости можно определить из построения компрессионной кривой.

При расчете осадок уплотнения грунта пользуются величиной коэффициент относительной сжимаемости:  $m_v = \frac{m_0}{1 + e_0}$ ;  $m_v = \frac{S_i}{hp_i}$

Коэффициент относительной сжимаемости равен относительной осадке, приходящейся на единицу действующего давления.

### Общий случай компрессионной зависимости.

Общий случай компрессионной зависимости. Выше рассматривалось уплотнение образца грунта только под действием вертикального сжимающего напряжения  $\sigma_z = \sigma$ . Остальные компоненты сжимающих напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  во внимание не принимались. Однако в общем случае они также будут оказывать влияние на деформируемость элементарного объема грунта, находящегося в массиве (рис. 4.7).

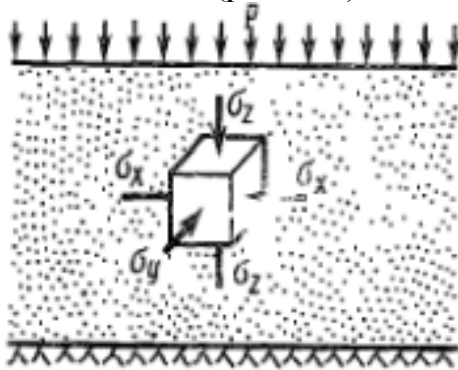


Рис. 4.7. Схема напряжений в элементе грунта при действии сплошной равномерно распределенной нагрузки

Действительно, чем большие значения реактивных напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  возникнут в элементе грунта от приложенных вертикальных нагрузок, тем меньшей сжимаемостью будет обладать этот грунт.

Введение условия  $de = -m_0 dP$  позволяет рассматривать грунт в интервале изменения напряжений от  $\sigma'$  до  $\sigma''$  как линейно деформируемую среду. Тогда для описания деформируемости грунта в этих условиях можно использовать уравнения обобщенного закона Гука.

(Уравнения состояния модели теории линейного деформирования записываются в виде обобщенного закона Гука:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)]; \quad \gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy}; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x)]; \quad \gamma_{yz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{yz}; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)]; \quad \gamma_{zx} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{zx}, \end{aligned}$$

где  $E$  — модуль общей линейной деформации;  $\nu$  — коэффициент поперечного линейного расширения (коэффициент Пуассона), часто называемые деформационными характеристиками грунта; три компоненты линейных деформаций  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_z$ . )

Поскольку при действии на поверхности массива грунта равномерно распределенной нагрузки  $p$ , соответствующей схеме компрессионного сжатия, площадки, к которым приложены напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$ , будут главными (т. е.  $\tau_{zx} = \tau_{yz} = \tau_{yx} = 0$ ), эти уравнения запишутся в виде

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]\end{aligned}\quad (4.9)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона, равный, по определению, отношению абсолютных величин поперечных и продольных деформаций образца при одноосном сжатии без ограничения бокового расширения:

$$\nu = \varepsilon_x / \varepsilon_z = \varepsilon_y / \varepsilon_z. \quad (4.10)$$

Напомним, что в компрессионных испытаниях  $\sigma_x = \sigma_y = 0$ ;  $\sigma_x = \sigma$ . Тогда из первых двух уравнений системы (4.9) получается

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1 + \nu} \sigma_z. \quad (4.11)$$

### **Коэффициент бокового давления.**

Введем понятие *коэффициента бокового давления грунта* в состоянии покоя  $\xi$ , определяющего соотношение абсолютных значений нормальных напряжений, действующих по вертикальным и горизонтальным площадкам элементарного объема грунта в условиях невозможности его бокового расширения.

Тогда в соответствии с рис. 4.7 из выражения (4.11) можно установить связь между коэффициентами  $\xi$  и  $\nu$

$$\xi = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{\sigma_y}{\sigma_z}; \quad \nu = \xi / (1 + \xi); \quad \xi = \nu / (1 - \nu). \quad (4.12)$$

Таким образом, если при проведении компрессионных испытаний оказывается возможным измерить боковые напряжения, возникающие в образце в результате приложения к нему сжимающего напряжения  $\sigma$ , то эти коэффициенты могут быть определены. Некоторые конструкции одометров компрессионных приборов позволяют провести такие измерения.

Теоретически коэффициент бокового давления любого материала может меняться в пределах от 0 до 1. Тогда пределы изменения коэффициента Пуассона составят  $0 \leq \nu \leq 0,5$ . (Наиболее распространенные значения коэффициента бокового давления: для песчаных грунтов  $\xi = 0,25 \dots 0,37$ , для глинистых (в зависимости от консистенции)  $\xi = 0,11 \dots 0,82$ . Им соответствуют следующие пределы изменения коэффициента Пуассона; для песчаных грунтов  $\nu = 0,2 \dots 0,27$ ; для глинистых  $\nu = 0,1 \dots 0,45$ . Чем ближе глинистый грунт по консистенции приближается к текучему состоянию, тем значения  $\xi$  и  $\nu$  будут больше.

Если в последнее уравнение системы (4.9) подставить значения  $\sigma_x = \sigma_y$  из выражения (4.11) и провести преобразования в соответствии с формулами (4.12), то получим

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \left( 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) = \frac{\sigma_z}{E} \left( 1 - \frac{2\xi^2}{1+\xi} \right) = \frac{\sigma_z}{E} \beta,$$

где  $\beta$  — коэффициент, зависящий от  $\nu$  или от  $\xi$ , коэффициент  $\beta$  всегда меньше 1. Следовательно, относительная деформация сжатия  $\varepsilon_z$  в условиях компрессионного нагружения грунта всегда меньше относительной деформации этого же образца грунта при одноосных испытаниях ( $\varepsilon_z = \sigma_z / E$ ).

### Модуль деформации.

Сжимаемость грунта можно выразить и через модуль общей деформации грунта  $E_p$ .

$E_p$  является аналогом модуля упругости  $E$ , определяемым в соответствии с основным законом теории упругости (закон Гука).

$E_p = P / \xi$ , где  $\xi$  (кси) - относительная деформация.

$E_p$  зависит от вида грунта и от нагрузки.  $E_p = \frac{\beta(1 + e_0)}{m_0}$ , где  $\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}$ ,

где

$\nu$  (ню) - коэффициент Пуассона, учитывающий боковое расширение грунта.

$E_p$  отражает в отличие от  $E$  упругую и необратимую (остаточную) часть общей деформации грунта.

$E_p = 10-50$  Па (100-500 кг/см<sup>2</sup>) — для песчаных грунтов;

$E_p = 50-75$  Па (500-750 кг/см<sup>2</sup>) — для глинистых грунтов.