

## **Конспект лекций**

### **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Дисциплина "Грунтоведение" содержит важную информацию, необходимую в строительстве. В то же время известные литературные издания отличаются значительной объемностью и сложностью изложения материала. Последнее существенно затрудняет изучение сущности основных явлений и свойств грунтов, а также овладение принципами проектирования фундаментов.

Это затруднение еще более усугубляется при самостоятельном изучении дисциплины, в том числе при заочной форме обучения.

Целью пособия является помощь в изучении основных положений дисциплины, особенно в условиях ограниченности учебного времени или при заочной форме обучения.

Следуя поставленной цели и известному принципу методологии познания (от простого к сложному), автор стремился, чтобы данное пособие имело сравнительно небольшой объем и не было загромождено многочисленными формулами, схемами, описаниями методов изучения разнообразных свойств грунтов и в то же время раскрывало основные положения дисциплины.

Во избежание громоздкости пособия в нем пришлось опустить ряд более простых и понятных вопросов программы, для самостоятельного изучения которых приведен достаточно репрезентативный список литературы.

Сознавая, что данное учебное пособие не свободно от недостатков, будем признательны за любые замечания и пожелания, направленные на их устранение.

## **Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

### **1.1. Значение дисциплины**

Надежность зданий и сооружений зависит от многих факторов, но наиболее важным из них является работа основания и фундамента. Для обеспечения надежности основания и фундамента сооружения требуются весьма существенные затраты. Так, они могут составлять 20 % стоимости сооружений, а при строительстве плотин, шлюзов, мостовых устоев, башен, подпорных стен, резервуаров стоимость устройства основания и фундамента достигает 40...60 %.

Правильность проектирования и устройства основания и фундамента в значительной степени зависит от умения оценивать свойства грунтов в основаниях и их совместную работу с фундаментами и надземными конструкциями, от рациональности выбранных типов оснований и фундаментов и размеров последних, от качества выполнения этих работ.

В практике строительства известно много примеров опасной недооценки

значимости знаний об основаниях и фундаментах различных сооружений. Так, плотина высотой более 60 метров, построенная в штате Калифорния, рухнула из-за ошибки в оценке грунтов основания, что привело к гибели более 400 человек и принесло убытки более 11 млн. долларов.

Аналогичная катастрофа унесла около 100 человеческих жизней при разрушении плотины в штате Пенсильвания на реке Аустин.

В Канаде около г. Виннипега в 1912 году при загрузке зерном элеватор погрузился в грунт на 8,7 метра с креном около 30°. В г. Фарго (США) подобная авария привела к полному разрушению элеватора.

Особенно сложные условия строительства часто встречаются в гидротехнике, в том числе в гидромелиорации. Здесь сжимаемая толща грунта может находиться ниже поверхности грунтовой воды, грунты могут проявлять разнообразные свойства. Гидросооружения могут получать большие и неравномерные осадки. Грунты оснований могут набухать, проявлять морозное пучение, внезапно разжижаться. Часто невозможно открыть котлован под шлюз-регулятор из-за его заплывания.

В сельском строительстве имеются свои особенности проектирования и выполнения работ по фундаментостроению. Так, несимметричность здания и неоднородность грунтов под фундаментами часто приводят к неравномерным осадкам фундаментов и появлению трещин на стенах здания. Замачивание грунта около водонапорной башни вызывает крен башни и выход ее из строя. Строительство высоких водонапорных башен для сельских поселков требует особых фундаментов из-за значительных ветровых нагрузок. Строительство гаражей около жилых зданий часто приводит к боковым нагрузкам на стены подвалов зданий или гаражей, что вызывает выпор грунта из-под более высокого фундамента в сторону подвала.

## 1.2. Структура дисциплины

Дисциплина "Грунтоведение" состоит из двух разделов: "Механика грунтов" и "Основания и фундаменты". В первом разделе рассматриваются физико-механические свойства грунтов, распределение в них напряжений, деформации грунтов в основании сооружений и условия устойчивости массивов грунтов. Первый раздел опирается на знание следующих дисциплин: инженерной геологии, сопротивления материалов, теории упругости, гидравлики. Механика грунтов является необходимой теоретической базой для расчета оснований.

Второй раздел "Основания и фундаменты" освещает вопросы проектирования и устройства фундаментов в различных грунтовых условиях. Этот раздел опирается на следующие дисциплины: инженерную геологию, механику грунтов, строительную механику, строительные конструкции, технологию строительного производства, технику безопасности, экономику. Одновременно надземные конструкции невозможно рационально спроектировать без оценки деформаций грунтов основания, так как от этих

деформаций зависят усилия, возникающие в конструкциях, а иногда и их пригодность к эксплуатации.

### 1.3. Основные понятия

*Грунтом* называют горные породы и органо-минеральные образования, залегающие в верхних слоях земной коры и используемые в строительстве.

*Основанием* называют толщу грунтов, непосредственно воспринимающих нагрузку от сооружения. Основание является естественным, если грунты, слагающие его, не нарушены (рис. 1).

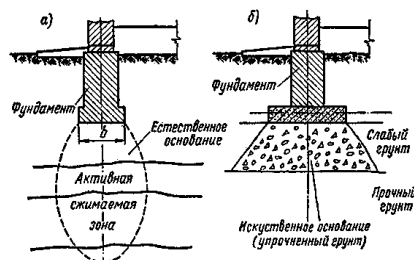


Рис. 1. Общий вид оснований и фундаментов.

Основание называют искусственным, если свойства грунтов искусственно улучшаются, например, путем упрочнения или замены.

*Фундаментом* является нижняя часть сооружения, предназначенная для передачи нагрузки от сооружения основанию. Фундамент должен рассматриваться в сочетании с основанием и с вышележащими конструкциями сооружения.

Нижняя опорная поверхность фундамента называется *подошвой*. Расстояния ее от поверхности земли определяют глубину заложения фундамента. Верхняя граница фундамента называется *обрезом фундамента*. Фундамент оказывает наиболее существенное влияние в пределах определенной зоны основания, называемой *активной зоной*.

*Осадка фундамента* – понижение отметки фундамента в результате проявления различных свойств основания: сжимаемости грунта, его усадки, проявления просадочности и др.

*Выпор* – перемещение грунта из-под подошвы фундамента к открытой поверхности грунта в результате разрушения основания. Происходит в случаях превышения допустимых нагрузок на грунт.

*Устойчивость фундамента* – способность фундамента сохранять свое пространственное положение при воздействии на него нагрузок. Устойчивость фундамента может потеряться из-за разрушения грунта под подошвой фундамента, при этом фундамент может сдвинуться, получить крен, опрокинуться.

*Устойчивость основания* – способность грунта сохранить свою пространственную структуру при нагружении. Устойчивые основания имеют большую *прочность* – способность противостоять нагрузкам не разрушаясь.

## 1.4. Виды грунтов

По происхождению грунты делятся на следующие группы:

1. Магматические, или изверженные.
2. Осадочные.
3. Метаморфические.
4. Искусственные.

Магматические образовались в результате извержения и остывания лавы; осадочные – в результате выветривания магматических и метаморфических пород; метаморфические – в результате химических и физических превращений из магматических и осадочных пород под действием высоких температур и давлений; искусственные – в результате производственной и хозяйственной деятельности людей.

По общей инженерно-геологической классификации пород и грунтов их делят на три класса:

1. Породы с жесткими связями между частицами, или скальные (происхождение – магматическое, осадочное или метаморфическое).
2. Породы и грунты без жестких связей между частицами, или рыхлые (осадочное происхождение).
3. Искусственные грунты с жесткими связями и без жестких связей (результат деятельности человека).

Механика грунтов как наука занимается изучением грунтов без жестких связей между частицами, т.е. рыхлыми.

По условиям формирования рыхлые грунты делятся на:

1. Континентальные отложения:
  - а) элювиальные (залегающие в месте их первоначального возникновения);
  - б) делювиальные (залегающие на склонах той возвышенности, где они возникли, и смываемые только атмосферными водами);
  - в) аллювиальные (переносимые водными потоками на значительные расстояния, образующие мощные толщи);
  - г) ледниковые – валунные глины и суглинки (морены);
  - д) эоловые – продукты физического выветривания горных пород и переноса воздушными течениями и вихрями (пески дюн и барханов и лессовые грунты);
  - е) биогенные образования (торфы разной степени разложения – озерные, болотные, озерно-болотные, озерно-аллювиальные, аллювиально-болотные и др.).
2. Морские отложения: органогенные грунты – ракушечники, дисперсные глины, органо-минеральные образования (илы, заторфованные грунты), пески, галечники.

## Глава 2. СОСТАВ И СТРОЕНИЕ ГРУНТА

### 2.1. Состав грунта

В состав природных грунтов входят три группы элементов:

1. Твердые частицы.
2. Вода в различных видах и состояниях.
3. Газообразные включения.

В зависимости от сочетания составных частей грунта различаются следующие системы элементов:

1. Трехкомпонентная система, состоящая из трех вышеуказанных групп элементов (т.е. твердых частиц и пустот между ними, заполненных воздухом и водой).

2. Двухкомпонентная система "твердые частицы – вода" (т.е. пустоты между частицами заполнены водой).

3. Двухкомпонентная система "твердые частицы – воздух".

Основой всех трех систем является группа твердых частиц.

## **2.2. Характеристика твердых частиц**

Твердые минеральные частицы грунтов представляют систему разнообразных по форме, составу и размерам минеральных зерен. Система этих минеральных частиц вместе с органическими частицами называется *скелетом грунта*.

По крупности минеральные частицы классифицируются следующим образом:

1. Валуны (окатанные) и камни (угловатые), имеющие средний размер более 20 см.

2. Булыжник – 10...20 см.

3. Галька (окатанные) и щебень (угловатые) – 4...10 см

4. Гравий (окатанные) и хрящ (угловатые) – 2 мм...4 см.

5. Песчаные частицы – 0,05...2 мм.

6. Пылеватые частицы – 0,001...0,05 мм.

7. Глинистые частицы – менее 0,001 мм.

Минеральные частицы грунтов могут содержать различные минералы. Наиболее часто встречается около 100 минералов. Причем самыми распространенными минералами в грунтах являются: кварц, полевые шпаты, слюды, глинистые минералы.

Минеральные частицы по различному взаимодействуют с водой. Так, частицы из кварца, полевого шпата и других силикатов обладают высокой водопрочностью (т.е. слабой растворимостью). Частицы из других минералов (гипс, доломит, сидерит и др.) слабоустойчивы в воде. Частицы из глинистых минералов являются гидрофильными и при взаимодействии с водой сильно набухают (но сами практически нерастворимы).

## **2.3. Виды воды в грунте**

Установлены следующие виды воды в грунтах [4, 8]:

1. Вода в форме пара.
2. Связанная вода:

- а) прочносвязанная (гигроскопическая, адсорбционная);
- б) рыхлосвязанная (пленочная).

3. Свободная вода:

- а) капиллярная;
- б) гравитационная с положительным внутренним давлением;
- в) гравитационная с отрицательным внутренним давлением;
- г) капиллярно-гравитационная.

4. Вода в твердом состоянии.

5. Кристаллизационная вода и химически связанная.

*Вода в форме пара* является важным видом воды, так как при незначительной влажности грунта только она может свободно перемещаться в нем. Путем конденсации из этого вида образуются другие виды воды в грунтах. Парообразная вода в грунте находится в динамическом равновесии с другими видами воды.

*Связанная вода* представляет собой следующее. Молекулы воды являются диполями, а грунтовые частицы в большинстве заряжены отрицательно. Поэтому молекулы воды удерживаются частицей грунта. Первые ряды молекул притягиваются с силой в несколько сот МПа. Эти слои относятся к прочносвязанной воде. Ее плотность в среднем равна  $2 \text{ г/см}^3$ . Удалить ее можно лишь путем подогрева грунта до температуры  $150...300 \text{ }^\circ\text{C}$ . На расстоянии около  $0,5 \text{ мкм}$  от частицы электромолекулярные силы близки к нулю. Слои воды между указанной границей и прочно связанной водой являются рыхлосвязанной водой (пленочной). Ее плотность близка к обычной свободной воде ( $1 \text{ г/см}^3$ ). Удалить ее из грунта можно выдавливанием от одного до нескольких МПа.

*Свободная вода* – вода, находящаяся за пределами действия электромолекулярных сил. Так, капиллярная вода, заполняя мелкие поры в грунте, движется под действием сил поверхностного натяжения капиллярных менисков. Капиллярную воду подразделяют [4] на воду углов пор, капиллярно-подвешенную, капиллярно-подпертую. Первая из них имеет место при частичном заполнении пор грунта, вторая существует в верхней зоне грунтового полупространства, зависая в грунте после впитывания дождевых осадков, третья находится непосредственно над поверхностью свободной гравитационной воды и образует так называемую «капиллярную кайму». Используемое в литературе название «Подпертая» не совсем удачно, т.к. эта вода находится выше поверхности гравитационной воды не из-за ее выталкивания вверх, а из-за подтягивания вогнутыми менисками из зоны гравитационной воды.

*Гравитационная вода* заполняет пространство между частицами грунта, в котором капиллярные силы не проявляются, т.е. в более крупных порах. Перемещается в грунте под действием гравитационных сил.

Гравитационная вода может быть двух видов: с положительным внутренним давлением и с отрицательным. Первая встречается наиболее часто, например, в водоносных пластах выше глинистых водоупоров. Вторая – в нисходящих потоках в условиях «грунтового сифона» и «капиллярного

сброса» [8].

Капиллярно-гравитационная вода перемещается под действием и гравитационных сил и сил поверхностного натяжения. Чаще всего встречается в области над гравитационной грунтовой водой мелиорированных территорий [8].

*Вода в твердом состоянии* образуется при замерзании жидкой фазы. Кристаллы льда в большинстве случаев играют роль цемента, т.е. скрепляют частицы, но иногда (в глинистых грунтах) замерзание воды может вызвать пучение грунта, а при повторном замерзании – оттаивании – уменьшить прочность грунта.

*Кристаллизационная и химически связанная вода* входит в состав кристаллических решеток минералов. Кристаллизационная вода сохраняет свою молекулярную форму  $H_2O$  (например,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), химически связанная – нет ( $Ca(OH)_2$ ). Удаление кристаллизационной воды изменяет свойства минерала, а удаление химически связанной приводит к распаду минерала.

## 2.4. Газ в грунте

Газы и пары всегда имеются в поровом пространстве грунта. Содержание газообразных включений зависит от объема пор. Газы находятся в свободном, защемленном и адсорбированном состоянии. Газы в двух последних состояниях оказывают влияние на деформационные свойства грунтов за счет проявления сжимаемости газа. Адсорбированные газы удерживаются на поверхности частиц грунта молекулярными силами. При увлажнении они вытесняются водной пленкой (гигроскопической водой). Защемленные газы образуются при увлажнении грунта одновременно с разных сторон, особенно сверху и снизу. Удалить адсорбированные и защемленные газы трудно. Так, в глинистых грунтах для этого необходимо приложить давление около 200 МПа. Наличие адсорбированных и защемленных газов приводит к многолетней осадке насыпей из глинистых грунтов, деформациям и разрывам насыпей.

## 2.5. Строение грунта

Строение грунта отражается его структурой и текстурой. *Структура грунта* – это размер слагающих его частиц, их форма, характер поверхности, количественное соотношение элементов и характер их взаимосвязи. Основными типами структур являются глыбистая, комковатая, ореховая, зернистая, плитчатая, чешуйчатая, призматическая, микроагрессивная, пылевато-микроагрессивная, овальная, игольчатая, трубчатая, пloidчатая.

Структурные связи между элементами грунта можно привести к двум основным видам:

- 1) водно-коллоидные (коагуляционные и конденсационные);
- 2) кристаллизационные.

Первые обуславливаются электромолекулярными силами между

частицами грунта, с одной стороны, и пленками воды и коллоидными оболочками, с другой. Коагуляционные связи образуются при свертывании коллоидов, а конденсационные – при их уплотнении и образовании гелей (студней). Вторые образуются за счет появления новых кристаллических соединений в местах контактов частиц. Первые – вязко-пластичные мягкие обратимые. Вторые – жесткие необратимые (водостойкие и не водостойкие).

В зависимости от наличия связей рыхлые грунты делятся на связные и несвязные (сыпучие).

*Текстура грунта* – пространственное расположение элементов грунта. Типы текстур: беспорядочная, слоистая, ориентированная.

## Глава 3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ИХ ПОКАЗАТЕЛИ

### 3.1. Основные свойства грунтов

Основными свойствами грунтов являются плотность, влажность, пористость. *Плотность* – способность грунта сохранять свою массу в пределах определенного пространства или изменять ее при наличии воздействий. *Влажность* – способность удерживать определенное количество воды и изменять его при внешних воздействиях. *Пористость* – способность грунта вмещать в себя рассредоточено по всему объему газы и жидкости.

### 3.2. Показатели свойств

*Показатель свойств* (упрощенно, физический показатель) – количественная характеристика, отражающая обладание свойством. Показателями плотности грунта ввиду его сложности являются два показателя: объемная масса грунта и объемная масса твердых частиц ( $\rho$  и  $\rho_s$ ). *Объемная масса грунта*  $\rho$  – это масса единицы объема грунта в естественном состоянии. В природе обычно  $\rho = 1,3...2,4$  г/см<sup>3</sup>. *Объемная масса твердых частиц* – это масса частиц в единице объема грунта, мысленно уплотненного до состояния отсутствия пор ( $\rho_s$ ). Значение  $\rho_s$  для минеральных грунтов изменяется незначительно. Так, среднее значение для чистых песков  $\rho_s \approx 2,66$  г/см<sup>3</sup>, для супесей  $\rho_s \approx 2,70$  г/см<sup>3</sup>, для суглинков  $\rho_s \approx 2,71$  г/см<sup>3</sup>, для глин  $\rho_s \approx 2,74$  г/см<sup>3</sup>. Для торфов  $\rho_s \approx 1,4...2,1$  г/см<sup>3</sup>.

Из показателей объемной массы получают *силовые показатели*: объемный вес грунта, объемный вес твердых частиц, объемный вес сухого грунта, объемный вес грунта, находящегося во взвешенном состоянии в воде (соответственно  $\gamma$ ,  $\gamma_s$ ,  $\gamma_{ск}$ ,  $\gamma_{взв}$ ). Пересчет первых трех показателей из массовых производится на основании второго закона Ньютона  $\gamma = \rho g$ . Четвертый силовой показатель  $\gamma_{взв}$  определяется из значения объемного веса грунта в сухом состоянии за вычетом выталкивающей Архимедовой силы (эта формула будет получена далее).

Свойство влажность количественно характеризуется *массовой влажностью*  $W$  и *объемной влажностью*  $G$ . Первая определяется как отношение массы воды в грунте к массе твердых частиц:

$$W = \frac{m_g}{m_s} \quad (3.1)$$

и выражается в относительных единицах или в процентах: вторая – как отношение объема воды в порах ко всему объему пор:

$$G = \frac{V_g}{V_n} \quad (3.2)$$

Объемная влажность называется также *степенью водонасыщенности грунта*, или *коэффициентом водонасыщенности*.

*Пористость грунта* отражается относительным значением объема пор в грунте. При этом используются два показателя: коэффициент пористости  $n$  и удельный коэффициент пористости  $e$ . Первый выражается как отношение объема пор к общему объему грунта:

$$n = \frac{V_n}{V} \quad (3.3)$$

второй – как отношение объема пор к объему скелета грунта:

$$e = \frac{V_n}{V_s} \quad (3.4)$$

К приведенным выше основным свойствам грунтов, изучаемым в настоящей дисциплине, следует прибавить свойство "дисперсность грунта" – способность грунта рассеиваться в воздухе или воде при движении объема грунта. Это свойство количественно выражается более сложным, чем три вышеуказанные, показателем, называемым "гранулометрический состав" и отражающимся векторной величиной – системой чисел, расположенных в определенном порядке.

*Гранулометрический состав* – количественное содержание фракций различного размера в грунте. Массовое содержание фракций каждого размера выражается в процентах по отношению к общей массе всего грунта. Гранулометрический состав является одним из важнейших показателей, определяющих физические свойства грунта. От него зависят пористость, водопроницаемость, пластичность, усадка и др.

Гранулометрический состав определяется рядом способов. Наиболее распространенным из них является ситовый. Применяют также способ отмучивания (для песчаных и супесчаных грунтов), пипеточный (для глинистых грунтов), ареометрический (для фракций менее 0,25 мм, более крупные – ситовым способом), полевой способ Рутковского (для выделения глинистой, пылевой, песчаной фракций).

Ситовый анализ проводят путем просеивания воздушно-сухого грунта на ситах с размером отверстий: 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,10 мм.

При анализе глинистых грунтов фракции грунта разделяют по скорости падения частиц, взвешенных в спокойной жидкости. Скорость  $v$  падения зависит от размера частицы. Размер частиц определяется по формуле Стокса:

$$v = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho_s - \rho_g}{\eta}, \text{ см/с}, \quad (3.5)$$

где  $r$  – радиус частиц, см:

$\rho_v$  – объемная масса воды, г/см<sup>3</sup>;

$\eta$  – коэффициент вязкости воды, г/см·с;

$g$  – ускорение свободного падения, см/с<sup>2</sup>.

В результате гранулометрического анализа получают таблицу (матрица – строка, матрица – столбец), в которой отражено массовое или процентное содержание различных по размеру фракций. Для наглядности гранулометрический состав изображают графически рядом способов: кривой гранулометрического состава, циклограммой, диаграммой – треугольником. Каждый из способов имеет свои преимущества и недостатки. Так, кривая состава наглядна, но требует значительного времени для отражения очередного анализа. Циклограмма, представляющая собой круг, разбитый на сектора, еще более наглядна, но требует еще больше времени и места для отражения результатов анализа. Способ треугольника очень экономичен по времени, но имеет пониженную точность. Указанные способы подробно изучаются при проведении лабораторных работ.

Приведенные выше и другие показатели используются для расчетов при проектировании сооружений. В связи с этим показатели грунтов делят на классификационные и расчетные. Классификационные показатели позволяют относить грунт к определенным подразделениям. Основными классификационными показателями являются гранулометрический состав, коэффициент пористости, объемная влажность и др. Расчетными показателями являются объемная масса грунта, объемная масса твердых частиц и др. Основная часть расчетных показателей рассматривается далее при выполнении различных расчетов.

Используя различные классификационные показатели, выполняют классификации грунтов. Классификации различают общие, частые, региональные, отраслевые.

*Общие классификации* охватывают все наиболее распространенные типы грунтов. Общие классификации строятся на генетической основе с учетом последующих изменений. Эти классификации являются основой, на которой строятся все остальные классификации. Общая классификация грунтов приведена в [4].

*Частные классификации* подразделяют и детально рассматривают отдельные группы грунтов по одному или нескольким признакам. К ним относятся классификации осадочных обломочно-песчано-глинистых грунтов по гранулометрическому составу, глинистых по числу пластичности, лессовых по степени просадочности и т. п.

*Региональные классификации* рассматривают грунты определенной территории. В основе их лежит генетическое и возрастное подразделение грунтов, отраженное в общей классификации [7].

*Отраслевые классификации* подразделяют грунты к зависимости от определенного вида строительства: гидротехнического, дорожного или при использовании грунтов как оснований сооружений и т. д. Отраслевая классификация для оснований сооружений приведена в [9].

*Отраслевая классификация* представляет ряд частных классификаций грунтов. Так, грунты делятся на две группы: скальные, нескальные. Скальные грунты – это породы с жесткими связями между частицами (спаянные и сцементированные). Нескальные – это породы без жестких связей. Они подразделяются на:

1) крупнообломочные, содержащие более 50 % по массе обломков пород размером более 2 мм;

2) песчаные – сыпучие в сухом состоянии грунты, содержащие менее 50 % по массе частиц размером более 2 мм и не обладающие свойством пластичности;

3) глинистые – связанные грунты с мягкими связями.

Крупнообломочные и песчаные грунты по гранулометрическому составу подразделяются на следующие виды:

валунный грунт – масса частиц размером более 200 мм больше 50 %;

галечниковый (щебенистый) – более 10 мм больше 50 %;

гравийный (дресвяной) – более 2 мм больше 50 %;

песок гравелистый – более 2 мм больше 25 %;

песок крупный – более 0,5 мм больше 50 %;

песок средней крупности – более 0,25 мм больше 50 %;

песок мелкий – более 0,1 мм больше или равно 75 %;

песок пылеватый – более 0,1 мм меньше 75 %.

Крупнообломочные и песчаные грунты по степени влажности подразделяются на:

маловлажные –  $0 < G \leq 0,5$ ;

влажные –  $0,5 < G \leq 0,8$ ;

насыщенные –  $0,8 < G \leq 1,0$ .

### 3.3. Расчетные формулы для определения показателей

Представим условно образец грунта в виде куба. При этом компоненты грунта условно отделим друг от друга. Объем образца примем равным единице. Тогда

$$n = \frac{V_n}{V} = \frac{V_n}{1} = V_n = V - V_s.$$

Возьмем отношение  $\rho_{ск}/\rho_s$ . Преобразуем его:

$$\frac{\rho_{ск}}{\rho_s} = \frac{\frac{m_s}{V}}{\frac{m_s}{V_s}} = \frac{1}{\frac{V}{V_s}} = \frac{V_s}{V} = \frac{V_s}{1} = V_s.$$

Тогда

$$n = V - V_s = 1 - \frac{\rho_{ск}}{\rho_s} = \frac{\rho_s - \rho_{ск}}{\rho_s},$$

т.е.

$$n = \frac{\rho_s - \rho_{ск}}{\rho_s}. \quad (3.6)$$

Коэффициент пористости

$$e = \frac{V_n}{V_s} = \frac{n}{1-n}$$

или

$$e = \frac{\rho_s - \rho_{ск}}{\rho_{ск}}. \quad (3.7)$$

Через коэффициент пористости можно получить величину  $n$ . Из

$$e = \frac{n}{1-n}$$

имеем

$$\begin{aligned} n &= e(1 - n) = e - en; \\ n + en &= e; \\ n(1+e) &= e; \end{aligned}$$

откуда

$$n = \frac{e}{1+e}. \quad (3.8)$$

Для определения  $n$  и  $e$  по выше полученным формулам необходимо определить  $\rho_{ск}$ . Но при высушивании грунта (особенно глинистого) может измениться его объем, а значит, и объемная масса его скелета  $\rho_{ск}$ . Поэтому формулы (3.6) и (3.7), не всегда удобные для практического применения, преобразуют к виду, не содержащему  $\rho_{ск}$ .

Выполним преобразование формулы (3.7). Имеем

$$e = \frac{\rho_s - \rho_{ск}}{\rho_{ск}} \text{ и } W = \frac{m_g}{m_s}.$$

Найдем из  $W$  выражение  $\rho_{ск}$ , которое равно  $m_s/V$ , и подставим его в формулу (3.7):

$$W = \frac{m_g}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} = \frac{m}{m_s} - \frac{m_s}{m_s} = \frac{m}{m_s} - 1.$$

Откуда

$$W + 1 = \frac{m}{m_s} = \frac{\frac{m}{V}}{\frac{m_s}{V}} = \frac{\rho}{\rho_{ск}};$$

откуда

$$\rho_{ск} = \frac{\rho}{W + 1}.$$

Далее, преобразовав (3.7):

$$e = \frac{\rho_s - \rho_{ск}}{\rho_{ск}} = \frac{\rho_s}{\rho_{ск}} - 1,$$

подставим в него полученное выражение для  $\rho_{ск}$ :

$$e = \frac{\rho_s}{\frac{\rho}{W + 1}} - 1 = \frac{\rho_s(W + 1)}{\rho} - 1. \quad (3.9)$$

Выполним преобразование формулы (3.8) для  $n$ :

$$\begin{aligned} n &= \frac{e}{1+e} = \frac{\frac{\rho_s(W + 1)}{\rho} - 1}{1 + \frac{\rho_s(W + 1)}{\rho} - 1} = \frac{\frac{\rho_s(W + 1) - \rho}{\rho}}{\frac{\rho_s(W + 1)}{\rho}} = \frac{[\rho_s(W + 1) - \rho] \cdot \rho}{\rho \cdot [\rho_s(W + 1)]} = \\ &= \frac{\rho_s(W + 1) - \rho}{\rho_s(W + 1)} = 1 - \frac{\rho}{\rho_s(W + 1)} = n. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Для выражения степени водонасыщенности грунта  $G$  через ряд основных показателей грунта:  $\rho$ ,  $\rho_s$ ,  $W$  проведем преобразования:

$$G = \frac{V_g}{V_n},$$

но  $V_g = m_g/\rho_g$  и  $V_n$  при условии заполнения пор полностью водой будет равно

$$V_{g,n} = \frac{m_{g,n}}{\rho_g}.$$

Тогда

$$G = \frac{W}{W_{g,n}}, \quad (3.11)$$

где  $W_{g,n}$  – массовая влажность насыщения грунта.

Преобразуем  $W_{g,n}$ , рассматривая единицу объема грунта:

$$W_{g,n} = \frac{m_{g,n}}{m_s} = \frac{V_n \cdot \rho_g}{V_s \cdot \rho_s} = \frac{e \cdot \rho_g}{\rho_s}. \quad (3.12)$$

Подставим выражение для  $W_{g,n}$  в выражение для  $G$ . Получим

$$G = \frac{W}{W_{g,n}} = \frac{W \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_g}. \quad (3.13)$$

При  $\rho_g = 1 \text{ г/см}^3$  выражения (3.12) и (3.13) упрощаются.

Получим расчетную формулу для объемного веса скелета грунта, находящегося под уровнем гравитационной грунтовой воды. Тогда

$$\gamma_{гзв} = \frac{g_{s,гзв}}{V} = \frac{g_{s,гзв}}{1} = g_{s,гзв} = g_s - g_{г,\Delta} = V_s \gamma_s - V_g \gamma_g = V_s (\gamma_s - \gamma_g).$$

Далее из (3.4)

$$e = \frac{V_n}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1,$$

откуда

$$V_s = \frac{V}{1+e} = \frac{1}{1+e}.$$

Тогда

$$\gamma_{гзв} = \frac{\gamma_s - \gamma_g}{1+e}. \quad (3.14)$$

## Глава 4. ОСОБЫЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

### 4.1. Пластичность

*Пластичностью* грунта называют его способность изменять свою форму без разрыва сплошности под воздействием внешней силы и сохранять форму после устранения этой силы. Пластичность обусловлена наличием в грунте связанной воды. Свойство пластичности присуще связным грунтам (глинистым). Эти грунты проявляют пластичность лишь при определенном содержании связанной воды. При этом пластичность характеризуют числом пластичности  $I_p$ , которое равно разности двух характерных массовых влажностей: влажности на границе раскатывания и влажности на границе текучести:

$$I_p = W_T - W_p, \quad (4.1)$$

Предел, или граница, текучести – это граничное значение влажности, при

превышении которой грунт переходит из пластичного состояния в текучее. Предел, или граница, раскатывания – это минимальное значение влажности, при которой частицы грунта еще способны перемещаться друг относительно друга без нарушения сплошности грунта.

Пластичное состояние грунта является частью общего диапазона состояния грунта в зависимости от содержания влаги. В этом диапазоне состояния грунта оцениваются степень подвижности слагающих грунт частиц при механическом воздействии, т.е. консистенцией. Консистенцию грунта отражают показателем консистенции  $I_L$ :

$$I_L = \frac{W - W_p}{I_p}. \quad (4.2)$$

Приведенные показатели пластичности используют для классификации грунтов, определения нормативного давления на грунт и др.

## 4.2. Набухаемость

*Набухаемость грунта* – способность грунта увеличиваться в объеме в процессе смачивания. Это свойство присуще грунтам, имеющим в своем составе глинистые частицы. При этом набухаемость зависит от водопроницаемости грунта. Так, моренные глины набухают незначительно. Набухаемость обусловлена в основном образованием в грунте рыхлосвязанной воды. Оболочки этой воды, образующиеся вокруг глинистых частиц, уменьшают сцепление между этими частицами, раздвигая их и увеличивая объем грунта. Причиной образования рыхлосвязанной воды является разница в концентрации солей в поровом растворе и в воде, окружающей грунт. Характер набухания определяется минералогическим и гранулометрическим составом грунта, составом обменных катионов, структурно-текстурными особенностями, влажностью, химическим составом и концентрацией раствора вокруг объема грунта, величиной давления на грунт.

Для приближенной оценки способности грунта к набуханию используют показатель  $\Pi$ :

$$\Pi = \frac{e_o - e_m}{1 + e_o}, \quad (4.3)$$

где  $e_o$  – коэффициент пористости грунта естественного состояния;

$e_m$  – коэффициент пористости того же образца грунта при влажности, равной влажности на границе текучести, определяемый по формуле

$$e_m = \frac{W_m \rho_s}{\rho_s}. \quad (4.4)$$

При  $\Pi < -0,3$  глинистый грунт относят к набухающим.

Кроме приведенного показателя способности грунта к набуханию, используют следующие показатели:

1) степень набухания, определяемую по относительному изменению объема или высоты образца грунта;

2) влажность набухания, являющуюся влажностью, при которой

прекращается процесс поглощения воды;

3) давление набухания – давление, развиваемое набухающим грунтом при невозможности объемных деформаций грунта;

4) время набухания – время, в течение которого происходит набухание грунта.

Набухание необходимо учитывать при строительстве плотин и водохранилищ, при вскрытии грунтов выемками и котлованами. В этих случаях возможно изменение гидрогеологических условий, а также увеличение влажности вскрытого грунта за счет поступивших атмосферных осадков

### 4.3. Усадочность

*Усадочностью* грунта называют его способность уменьшаться в объеме в результате удаления воды. Удаление воды при этом происходит в основном за счет высыхания грунта или осмотических процессов. Усадочность проявляется в наибольшей степени у глинистых и биогенных грунтов. Более всего она зависит от начальной влажности, пористости, минералогического состава грунта, структуры и текстуры.

Количественно усадочность характеризуют относительным уменьшением линейных или объемных размеров образца грунта, называемых линейной и объемной усадкой соответственно. Линейную усадку определяют по формуле

$$b_l = \frac{l_1 - l_2}{l_1}, \quad (4.5)$$

где  $l_1$  – начальный линейный размер образца;

$l_2$  – линейный размер после усадки.

Объемную усадку определяют как

$$b_v = \frac{V_1 - V_2}{V_1}, \quad (4.6)$$

где  $V_1$  – начальный объем образца;

$V_2$  – объем после усадки.

Усадка учитывается при строительстве в условиях возможного уменьшения влажности грунта. При этом возможно как уплотнение грунта, так и образование трещин, увеличивающих водопроницаемость грунта и уменьшающих его устойчивость. В откосах гидромелиоративных каналов трещины могут достигать глубины нескольких метров. Для предотвращения образования трещин глинистые грунты гидросооружений, подвергающихся периодическому увлажнению и высыханию, защищают слоем несвязных грунтов (песка, гравия).

### 4.4. Размягчаемость

*Размягчаемость грунта* – это его способность снижать свою прочность за счет ослабления кристаллизационных и конденсационных связей между элементарными частицами грунта под действием воды. Размягчаемость

характеризуется коэффициентом размягчаемости  $K_p$ :

$$K_p = \frac{\sigma_{сж}^н}{\sigma_{сж}^с}, \quad (4.7)$$

где  $\sigma_{сж}^н$  – сопротивление грунта сжатию после насыщении его водой;

$\sigma_{сж}^с$  – сопротивление сжатию образца того же грунта в сухом состоянии.

#### 4.5. Размокаемость

*Размокаемость* является одним из физических свойств, характеризующих водопрочность грунта. *Водопрочность* – это способность грунта сохранять механическую прочность и устойчивость при взаимодействии с водой. Это взаимодействие может быть статическим и динамическим. При статическом взаимодействии с водой грунт может набухать и размокать, при динамическом – размывается.

Таким образом, размокаемость – это способность грунтов при взаимодействии со спокойной водой терять связность и превращаться в рыхлую массу с частичной или полной потерей несущей способности.

Размокаемость является результатом ослабления, а часто и растворения структурных связей между элементами грунта в процессе их гидратации. Способностью к размоканию обладают дисперсные грунты. Размокаемость определяется минералогическим составом грунтов, составом обменных катионов, характером структурных связей, дисперсностью, влажностью, характером водного раствора, взаимодействующего с грунтом и др.

Размокаемость характеризуется временем размокания и характером размокания. *Время размокания* – время, в течение которого образец, помещенный в воду, теряет связность и распадается на структурные элементы разного размера. Характер размокания отражает качественную картину распада образца грунта.

#### 4.6. Тиксотропность

Глинистые, лессовые и песчаные грунты могут обладать тиксотропными свойствами. *Тиксотропность* – это способность грунта разжижаться, теряя структурные связи. Причина тиксотропности в особенностях водно-коллоидных связей между частицами грунта. При динамическом воздействии на такой грунт связанная вода переходит в свободное состояние, водные оболочки в местах контакта частиц резко утолщаются и частично или полностью экранируют молекулярное сцепление частиц, за счет чего нарушаются связи между частицами и коллоидная система (тонкодисперсный грунт) разжижается. После устранения воздействия частицы опять связываются между собой, а свободная вода переходит в связанное состояние. Происходит превращение по схеме: гель – золь, а затем золь – гель.

Для характеристики тиксотропности грунтов существуют различные показатели: время застудневания, зыбкость, тиксотропный предел и др.

Тиксотропные свойства грунтов зависят от гранулометрического состава грунта, минералогического состава, состава обменных катионов, влажности и др. Наиболее важным фактором, обуславливающим тиксотропные свойства грунта, является гранулометрический состав. Так, тиксотропность наблюдается лишь тогда, когда в грунте содержатся глинистые частицы (хотя бы 1,5... 2%).

В практике тиксотропные явления наблюдаются при забивке свай, при динамической нагрузке на фундамент, при вибробурении, при вибропогружении.

#### 4.7. Плывунность

Свойством, близким и сходным с тиксотропностью, является плывунность грунтов. *Плывунность* – это способность дисперсных грунтов (чаще водонасыщенных) переходить в подвижное состояние при вскрытии их выработками и под динамическим воздействием и продолжать перемещаться после устранения динамического воздействия. Грунт, обладающий таким свойством, называют плывуном. Грунты, склонные к плывунности, делятся на два типа:

- 1) грунты, лишенные структурных связей;
- 2) грунты с водно-коллоидными связями.

Первые являются песками и переходят в плывунное состояние при потере трения между частицами при их взвешивании в воде за счет разрушения скелета под воздействием динамической нагрузки или давления гравитационной грунтовой воды. Вторые могут быть песками, пылеватыми грунтами и глинистыми. Переход их в плывунное состояние обусловлен тиксотропными свойствами и происходит под воздействием динамической нагрузки. Известны примеры катастроф, связанных с плывуностью грунтов.

#### 4.8. Просадочность

*Просадочность* – способность, лессовых и песчаных грунтов при их замачивании под давлением резко уменьшаться в объеме. Наиболее ярко это свойство проявляется у лессовых грунтов. Их способность состоит в том, что они обладают высокой пористостью, малой влажностью, высоким содержанием пылеватых частиц, повышенным содержанием легкорастворимых солей.

Механизм просадки представляет собой следующее. Вода, попадая в просадочный грунт с большой пористостью, размягчает и частично растворяет соли на контактах частиц. В результате связи между частицами ослабляются. Частицы получают возможность под действием нагрузки перемещаться друг относительно друга в новое положение равновесия, соответствующее данной нагрузке. При этом частицы в грунте приобретают более плотную упаковку, что обуславливает общее уменьшение объема грунта и его просадку.

Способность грунта к просадке определяется по степени влажности грунта

и значению показателя  $\Pi$ :

$$\Pi = \frac{e_0 - e_t}{1 + e_0}, \quad (4.3)$$

Грунты обладают просадочностью, если  $G < 0,8$  и

$\Pi > -0,1$  при  $0,1 > I_p \geq 0,01$ ;

$\Pi > -0,17$  при  $0,14 > I_p \geq 0,1$ ;

$\Pi > -0,24$  при  $0,22 > I_p \geq 0,14$ .

Лессовые грунты подразделяются на два типа: I – когда под действием собственного веса грунта вся увлажненная толща проседает не более, чем на 5 см; II – когда проседает более, чем на 5 см. При I типе просадка развивается в основном ближе к подошве фундамента. При II – просадка развивается на большую глубину за счет действия собственного веса грунта.

#### 4.9. Пучинистость

*Пучинистость* – способность грунта увеличиваться в объеме в процессе его промерзания. Пучинистости подвержены глинистые грунты, торф, пески мелкие и пылеватые. Наиболее подвержены пучинистости глины. Для проявления пучинистости грунт должен быть влажным. При промерзании пучинистого грунта к охлажденному слою происходит подток воды с нижележащих слоев. В результате в грунте образуются ледяные прослойки, что увеличивает грунт в объеме. При оттаивании возникают осадки оттаивания, вызванные действием собственного веса грунта. Эти осадки являются результатом уменьшения объема грунта при вытаивании льда и последующего отжатия воды из грунта.

Пучинистость грунтов приводит к разрушению дорожных покрытий, образованию трещин в стенах зданий, возникновению крена сооружения, разрушению отмосток у стен и зданий и др. Возможность возникновения вспучивания грунта приводит к необходимости закладывать подошву фундамента ниже глубины промерзания грунта, а верх земляных сооружений защищать слоем непучинистого грунта, например, среднезернистого песка.

### Глава 5. ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ ГРУНТОВ

#### 5.1. Фильтрационные зависимости

*Водопроницаемость* грунтов – это способность пропускать через себя воду. Движение воды в грунтах называется фильтрацией. Для фильтрации воды в грунте необходимо наличие напора, который представляет собой столб воды, создающий давление в грунте. Это давление при отсутствии фильтрации называют гидростатическим, или внутриводным, а при наличии фильтрации – фильтрационным. Напор воды создает определенный градиент при фильтрации через грунт. Его выражают как

$$i = \frac{H_1 - H_2}{L}, \quad (5.1)$$

где  $H_1$  – напор на входе в зону фильтрации, м;

$H_2$  – напор на выходе из зоны фильтрации, м;

$L$  – расстояние между входом и выходом из зоны фильтрации, м.

Основной зависимостью, отражающей движение воды в зоне фильтрации, является закон Д'Арси:

$$v_{\phi} = K_{\phi} i, \quad (5.2)$$

где  $v_{\phi}$  – скорость фильтрации воды в грунте, м/сут.;

$K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации, м/сут.

Из (5.2) видно, что коэффициент фильтрации равен  $v_{\phi}$  при  $i = 1$ .

В глинистых грунтах фильтрация воды начинается лишь при определенном значении градиента, называемом начальным  $i_n$ . Соответственно зависимость, отражающая движение воды в грунте, будет иметь вид, отличный от (5.2):

$$v_{\phi} = K_{\phi} (i - i_n), \quad (5.3)$$

Для определения фильтрационного расхода, например, при отрывке котлована под фундамент, используется формула Де'Пюи:

$$Q_{\phi} = K_{\phi} \frac{H_1^2 - H_2^2}{2L}, \quad (5.4)$$

где  $Q_{\phi}$  – фильтрационный расход, м/сут.;

$K_{\phi}$  – средний коэффициент фильтрации вскрытого пласта, м/сут.;

$H_1$  – напор в начале депрессионной кривой, м;

$H_2$  – напор в конце кривой, м;

$L$  – расстояние между началом и концом депрессионной кривой, м.

Формула Де'Пюи получается из формулы Д'Арси с использованием зависимости

$$Q_{\phi} = v_{\phi} F, \quad (5.5)$$

где  $F$  – средняя площадь фильтрационного потока, м<sup>2</sup>.

Площадь поперечного сечения потока определяется через высоту столба воды над водоупором.

## 5.2. Определение фильтрационных характеристик песчаных грунтов

Для песчаных грунтов коэффициент фильтрации определяют с помощью простейшего прибора, состоящего из трубы длиной  $L$ , заполненной грунтом, и двух трубок – подводящей и отводящей воду. При градиенте напора  $H_1-H_2$ , вода будет фильтроваться под действием градиента напора  $i$ , вычисляемого по формуле (5.1). Измерив объем воды, профильтровавшейся через грунт за время  $t$ , определяют коэффициент фильтрации из зависимости

$$K_{\phi} = \frac{V}{F \cdot i \cdot t}, \quad (5.6)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения образца грунта, м<sup>2</sup>.

## 5.3. Особенности изучения глинистых грунтов

Для определения коэффициента фильтрации глинистых грунтов, даже не

обладающих начальным градиентом, необходимо создавать большой напор. Это определяет особенности устройства фильтрационных приборов для глинистых грунтов. Наиболее типичным является прибор, в котором образец грунта помещают в кольцо, устанавливаемое на фильтрующее днище. Сверху располагается перфорированный штамп. Вода поступает под фильтрующее днище, проходит через грунт, заполняет пространство над штампом и выливается в колбу. Для ускорения начала измерения камера над штампом заранее заполняется водой. При образовании на выходе из камеры выпуклого мениска сток воды будет пульсационный. Для предотвращения этого добиваются учащения пульсаций меньшими дозами (каплями), используя различные технические средства. Для исключения испарения воды прибор герметизируется закручивающейся крышкой.

Для предотвращения движения воды вдоль стенок кольца к фильтрующему штампу прикладывают внешнюю нагрузку, большую структурной прочности грунта. При этом коэффициент фильтрации несколько уменьшается. Для более точного определения коэффициента фильтрации используют образец, имеющим диаметр на 8...10 мм меньше внутреннего диаметра кольца, а зазор между грунтом и стенками кольца заполняют вязким материалом, не фильтрующим под прикладываемым напором.

Такой прибор позволяет определять коэффициент фильтрации суглинков и глин от текучей до тугопластичной консистенции при весьма малой водопроницаемости ( $K_f = 10^{-9}$  см/с).

#### 5.4. Особые условия изучения фильтрации

В условиях работы гидромелиоративных систем значение фильтрационного давления в грунте может существенно отличаться от значения нейтрального давления. Для таких условий создан прибор для определения фильтрационных характеристик грунтов ( $K_f, i_n$ ). Схема прибора приведена на рис. 2 [8].

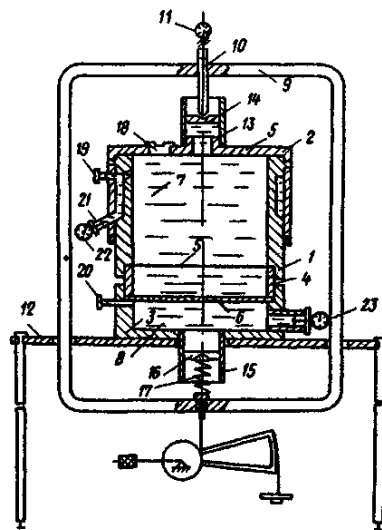


Рис. 2. Прибор для определения фильтрационных характеристик

в условиях независимости нейтрального давления от фильтрационного.

Устройство отличается тем, что оно содержит корпус 1 с днищем 3 и крышкой 2 с закрепленными на них соосными верхним 13 и нижним цилиндром 15 с поршнями 14, 16, кольцо 4 для образца грунта и нагрузочную раму 9 со штоком 10. Нейтральное давление в приборе создается силой пружины 17, а фильтрационное – силой тяги рамы грузом, установленным на рычаге. Фильтрационный расход определяется по скорости движения поршня 14 (16) в цилиндре 13 (15).

Прибор позволяет с повышенной точностью определять фильтрационные характеристики грунтов для условий, наиболее приближенных к реальным, в том числе при изменении атмосферного давления, что оказывает существенное влияние на фильтрационную способность грунта.

Помимо приведенных выше существуют и иные методы определения фильтрационных характеристик грунтов, в том числе полевые, основанные на откачках воды из грунта или налива воды [10].

## Глава 6. СЖИМАЕМОСТЬ ГРУНТОВ

### 6.1. Компрессионные испытания

*Сжимаемость грунта* – это его способность уменьшаться в объеме под действием внешней нагрузки. Сжимаемость проявляется за счет уменьшения пористости грунта путем местных сдвигов частиц, соскальзывания более мелких частиц в соседние поры, а также изменения толщины водно-коллоидных оболочек минеральных частиц.

Для установления основных показателей сжимаемости грунтов проводят их испытания на уплотнение под нагрузкой. При этом создаются такие условия, чтобы деформации грунта развивались только в одном направлении. Эти условия соответствуют сжатию реального грунта под сплошной равномерно распределенной нагрузкой. Прибор для таких испытаний называется одометром.

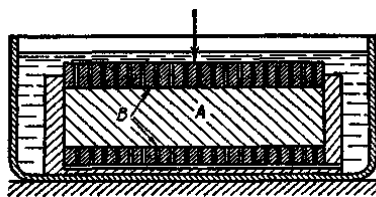


Рис.3. Схема одометра для испытания грунта.

Нагрузку на грунт А через штамп В прикладывают ступенями. Зависимость между коэффициентом пористости грунта и соответствующими ему давлениями называют компрессионной кривой.

Полностью водонасыщенные грунты изменяют свою пористость лишь при изменении их влажности, т.е. при выдавливании или отсасывании воды. Если грунт, насыщенный водой, обладает малой водопроницаемостью, то кривую можно построить косвенным путем. Для этого используется зависимость между влажностью насыщения  $W_n$  и коэффициентом пористости (см. формулу

3.12).

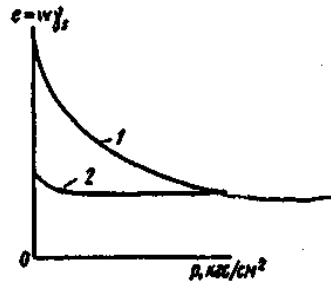


Рис. 4. Компрессионная кривая:  
1 – ветвь уплотнения; 2 – ветвь разуплотнения.

Для грунтов, имеющих хорошую водопроницаемость, приведенным выше способом нельзя построить компрессионную кривую. Это обусловлено тем, что при разгрузке образца влажность его восстанавливается почти мгновенно. Для получения метода построения кривой, пригодного для всех грунтов, рассмотрим схему, изображенную на рис. 5.

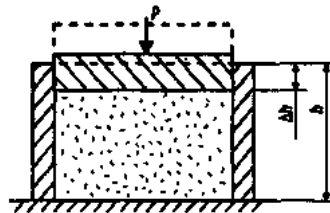


Рис. 5. Схема к выводу формулы Терцаги.

При приложении каждой ступени нагрузки соответствующее ей значение коэффициента пористости равно:

$$e_i = e_0 - \frac{\Delta V_{n_i}}{V_s}, \quad (6.1)$$

где  $e_0$  – начальное значение коэффициента пористости;

$\Delta V_{n_i}$  – изменение объема пор;

$V_s$  – объем скелета.

Изменение объема пор происходит за счет изменения объема образца без бокового расширения, т.е. за счет осадки  $\Delta h$ :

$$\Delta V_{n_i} = \Delta h_i F, \quad (6.2)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения образца;

$\Delta h_i$  – изменение высоты образца.

Из выражения (3.8) и  $m = 1 - n$ , где  $m$  – объем твердых частиц в единице объема грунта, находим, что

$$m = \frac{1}{1 + e_0}. \quad (6.3)$$

Тогда объем твердых частиц во всем объеме образца  $V$  равен

$$V_s = \frac{hF}{1 + e_0}. \quad (6.4)$$

Подставляя (6.4) и (6.2) в (6.1), получим выражение, называемое формулой Терцаги:

$$e_i = e_o - (1 + e_j) \frac{\Delta h_i}{h_o}. \quad (6.5)$$

Полученное выражение позволяет вычислять коэффициенты пористости по значению осадки штампа, что пригодно для любых грунтов и их любых влажностей.

## 6.2. Коэффициент сжимаемости грунта

В практике в основаниях сооружений давление изменяется на небольшую величину (0,1...0,3 МПа). Учитывая это, участок кривой, соответствующий такому изменению давления, можно принять прямым (рис. 6). Тогда уравнение этой прямой будет иметь вид:

$$e_i = e_o - tg \alpha p_i, \quad (6.6)$$

где  $tg \alpha$  характеризует сжимаемость грунта.

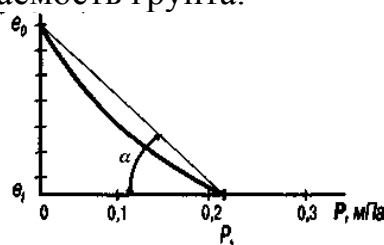


Рис. 6. Схема к определению выражения (6.6).

Назовем  $a = tg \alpha$  коэффициентом сжимаемости грунта. Тогда выражение (6.6) примет вид:

$$e_i = e_o - a p_i. \quad (6.7)$$

Коэффициент  $a$  может быть выражен через  $P$  и  $e$  краевых точек диапазона изменений давлений:

$$a = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1}. \quad (6.8)$$

Отсюда видно, что коэффициент сжимаемости грунта равен отношению изменения коэффициента пористости к изменению давления. Для ветви набухания компрессионной кривой аналогичный коэффициент называют коэффициентом набухания.

При расчетах осадок грунтов часто пользуются коэффициентом относительной сжимаемости

$$a_o = \frac{a}{1 + e_o}. \quad (6.8')$$

Для выяснения физической сущности  $a_o$  выполним некоторые преобразования. Из (6.7) имеем

$$e_o - e_i = a p_i.$$

Из (6.5) соответственно

$$e_o - e_i = (1 + e_o) \frac{\Delta h_i}{h_o}.$$

Отсюда

$$ap_i = (1 + e_0) \frac{\Delta h_i}{h_0}$$

и

$$\frac{a}{1 + e_0} = \frac{\Delta h_i}{h_0 p_i}. \quad (6.9)$$

Из (6.9) видно, что коэффициент относительной сжимаемости равен относительной осадке  $\Delta h_i / h_0$ , соответствующей изменению давления на единицу. Из (6.9) получаем также формулу для определения осадки:

$$\Delta h_i = p_i h_0 a_0. \quad (6.10)$$

Продифференцируем уравнение (6.7), получим

$$de_i = -adp_i. \quad (6.11)$$

Полученное соотношение характеризует сжимаемость грунта уже не приближенно, как (6.7), а точно и называется *законом уплотнения грунтов*. Этот закон ложится в основу ряда фундаментальных положений механики грунтов. Формулируется он следующим образом: **бесконечно малое изменение относительного объема пор грунта прямо пропорционально бесконечно малому изменению давления**. Этот закон можно распространить и на случай конечных, но небольших изменений давления. Тогда он будет записан в следующем виде:

$$e_1 - e_2 = a(p_2 - p_1). \quad (6.12)$$

Формулируется он так: **при небольших изменениях уплотняющих давлений изменение коэффициента пористости прямо пропорционально изменению давления**.

## Глава 7. СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРУНТОВ СДВИГУ

### 7.1. Испытания грунтов на плоский сдвиг

*Сдвигом* называется процесс смещения одной части рассматриваемого объема грунта относительно другой под воздействием внешних сил. Различают сдвиги общие и местные. *Общим сдвигом* является сдвиг всей рассматриваемой части грунта, на которую действует определенная сила. *Местным сдвигом* называется сдвиг одного из участков рассматриваемого объема грунта, на который действует определенная сила.

Внутренним сопротивлением, препятствующим сдвигу в идеально сыпучих грунтах, например, в чистом песке, является трение: в идеально связных (например, вязких дисперсных глинах) – сцепление, обусловленное внутренними структурными связями частиц. Природные грунты обладают обоими видами внутренних сил сопротивления.

Грунты оценивают по показателям их сопротивления сдвигу, которые являются основными прочностными показателями грунтов. Это – коэффициент внутреннего трения и коэффициент сцепления. Силы трения и сцепления направлены касательно к поверхности скольжения. Для определения показателей сопротивления грунта сдвигу производят испытания образца грунта по ряду методов: плоскостного среза, простого одноосного

сжатия, трехосного сжатия, среза по цилиндрической поверхности, вдавливания.

Плоскостной срез производится на односрезном приборе, схема которого приведена на рис. 7.

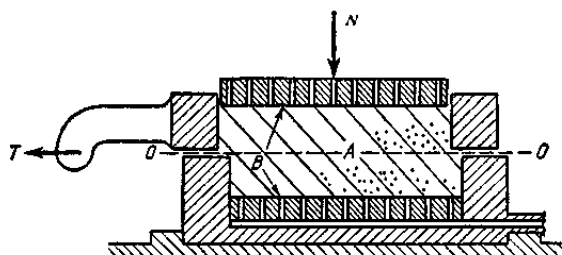


Рис. 7. Прибор испытания грунта на срез.

При определенном вертикальном давлении на образец увеличивают степенями сдвигающую нагрузку до тех пор, пока не произойдет срез (что обнаруживается по непрерывному скольжению подвижной части прибора при достигнутой постоянной сдвигающей нагрузке). Вертикальную сжимающую силу и касательную силу, при которой произошел срез, измеряют. Затем опыт повторяют с таким же образцом, но при другой сжимающей силе и т. д. По полученным результатам определяют соответствующие напряжения и строят диаграмму предельных напряжений при сдвиге  $\tau = f(\sigma)$  (рис. 8).

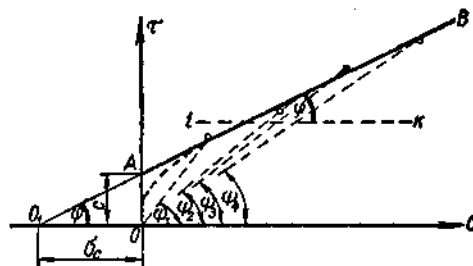


Рис. 8. Сдвиговая диаграмма:  $\sigma$  – нормальные напряжения;  $\tau$  – касательные напряжения.

Диаграмма для сыпучего грунта имеет вид прямой, проходящей через начало координат  $\tau$  и  $\sigma$  под углом  $\varphi$  к оси вертикальных давлений. Тогда из диаграммы имеем

$$\tau_i = \sigma_i \operatorname{tg} \varphi. \quad (7.1)$$

Угол  $\varphi$  называют углом внутреннего трения.  $\operatorname{tg} \varphi = f_t$ , называют коэффициентом внутреннего трения. Указанная зависимость для сыпучих грунтов установлена Кулоном в 1773 году и называется *законом Кулона*. Формулируется он так: **предельное сопротивление сыпучих грунтов сдвигу есть сопротивление трения, прямо пропорциональное нормальному давлению**. Скорость проведения опыта на сдвиг в песках не влияет на величину  $\tau$ . Песчаный грунт при сдвиге достигает определенной пористости в зоне сдвига. Эта пористость называется критической. Она практически постоянна для данного песка независимо от того, был ли он уплотнен до начала опыта или нет.

## 7.2. Особенности испытаний водонасыщенных глинистых грунтов

Связные грунты (глинистые) при сдвиге проявляют себя иначе. Это обусловлено особенностями связей между частицами глинистого грунта. Частицы в таком грунте связаны пластичными (водно-коллоидными) связями и частично жесткими (кристаллизационными). Наличие водно-коллоидных связей обуславливает зависимость сопротивления сдвигу от влажности грунта. Эти же связи обуславливают пластичность грунта и, как следствие ее, влияние скорости сдвига на сопротивление сдвигу.

Ввиду зависимости сопротивления сдвигу от влажности грунта и скорости сдвига существуют два вида испытаний глинистого грунта: по закрытой системе (неконсолидированно-недренированные грунты) и по открытой системе (консолидированно-дренированные грунты).

В первом случае образец испытывают так, чтобы из пор не выдавливалась вода и не изменялась плотность – влажность. Такие условия испытания можно обеспечить лишь при быстром сдвиге. В результате быстрого сдвига получают следующие кривые (рис. 9).

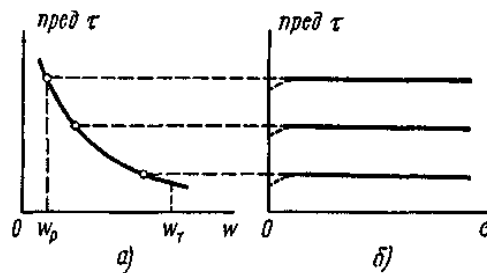


Рис. 9. Кривые сдвига неконсолидированных грунтов:  
а – зависимость сопротивления грунта от влажности;  
б – зависимость от вертикального давления.

Из диаграммы видно, что сопротивление сдвигу не зависит от давления.

Во втором случае глинистый грунт вначале уплотняют, а затем делают сдвиг при данном уплотняющем давлении и получают зависимость сдвигающих напряжений от нормальных давлений. В этом случае диаграмма сдвига будет иного характера, чем при быстром сдвиге (рис. 10).

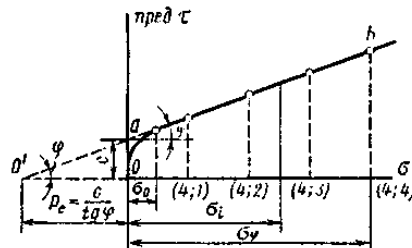


Рис. 10. Кривая сдвига консолидированного грунта.

Из диаграммы видно, что сдвигающие напряжения зависят от величины

нормального давления. При проведении испытаний по открытой системе влияние влажности на сдвигающие напряжения исключают следующим образом. Уплотняют образец наибольшим заданным давлением до полной стабилизации осадки, а затем, разгружая его до необходимых давлений, производят срез. И так как кривая разуплотнения практически параллельна оси давлений, то в определенном диапазоне давлений имеем одну плотность, а значит, и влажность, так как у водонасыщенных грунтов прямая зависимость  $e$  и  $W$  (см. главу 6).

Испытывая на сдвиг образцы определенного грунта в этом диапазоне давлений в соответствии с ветвью разгрузки компрессионной кривой, получают зависимость сдвигающих усилий только от нормальных давлений при одной и той же влажности.

Диаграмма сдвига, полученная при испытании грунта по открытой системе, имеет вид прямой в довольно большом диапазоне давлений. Уравнение ее выражает закон Кулона для связных грунтов:

$$\tau_i = C + \operatorname{tg}\varphi\sigma_i, \quad (7.2)$$

где  $C$  – коэффициент сцепления грунта.

Формулируется он так: **предельное сопротивление связных грунтов сдвигу при завершённой их консолидации есть функция первой степени от нормального давления.**

В формуле (7.2) иногда взамен параметра  $C$  используют параметр  $\sigma_c$  (см. диаграмму на рис. 8), который называется давлением связности. Тогда  $C = \sigma_c \operatorname{tg}\varphi$  и уравнение (7.2) имеет вид

$$\tau_i = (\sigma_i + \sigma_c) \operatorname{tg}\varphi, \quad (7.3)$$

Давление связности – условное понятие, это эквивалентное давление, приложенное к сыпучему грунту и создающее в нем сопротивление сдвигу, равное сопротивлению в связном грунте, обусловленному только силами сцепления.

Результаты испытаний на сдвиг по закрытой системе используются при прогнозе прочности грунтов в условиях, когда устройство сооружения не изменяет существенно плотности – влажности (откосы каналов, дамб и др.). Результаты испытаний по открытой системе используют для прогнозирования прочности грунта для случаев, когда он под сооружением достиг полной консолидации.

### 7.3. Сдвиг в условиях трехосного сжатия

Опыты на трехосное сжатие производятся в стабилometре. Испытания на трехосное сжатие применяются для связных и сыпучих грунтов. Грунт при этом может быть обжат с боков любым заданным давлением, что хорошо отвечает работе грунта в природных условиях. Конструкция прибора изображена на рис. 11.

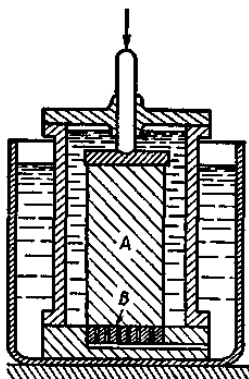


Рис. 11. Конструкция стабилометра.

В результате испытания грунта получают при заданной величине бокового давления  $\sigma'_2, \sigma''_2, \sigma'''_2$  разрушающее осевое давление  $\sigma'_1, \sigma''_1, \sigma'''_1$  для каждого образца грунта. По этим давлениям при помощи кругов Мора получают диаграмму предельных напряжений сдвига (рис. 12).

Из диаграммы сдвига получают показатели сопротивления грунта сдвигу:  $\varphi$  и  $C$ .

Кроме того, из результатов трехосного сжатия можно определить модуль общей (линейной) деформации  $E_o$  и коэффициент относительной поперечной деформации  $\mu_o$ :

$$E_o = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\varepsilon_z}, \quad (7.4)$$

где  $\Delta\sigma_1$  – приращение осевого давления;

$\Delta\varepsilon_z$  – приращение относительной продольной деформации  $\varepsilon_z$ .

$$\varepsilon_z = \frac{S_i}{h}, \quad (7.5)$$

где  $S_i$  – осадка  $i$ -ой ступени нагрузки;

$h$  – начальная высота образца.

$$\mu_o = \frac{E_{об} - E_o}{2E_{об}}, \quad (7.6)$$

где  $E_{об}$  – модуль объемной деформации.

$$E_{об} = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\Theta}, \quad (7.7)$$

где  $\Delta\theta$  – приращение относительной объемной деформации  $\theta$ .

$$\theta = \frac{\Delta V}{V}, \quad (7.8)$$

где  $V$  и  $\Delta V$  – объем образца и соответственно изменение объема.

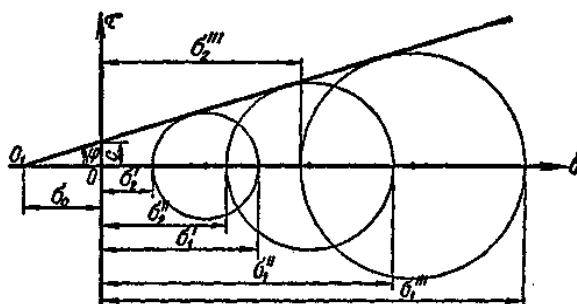


Рис. 12. Диаграмма сдвига, полученная на стабилометре.

#### 7.4. Полевые испытания грунтов

Кроме приведенных выше лабораторных испытаний, существуют полевые методы испытаний грунта. Они проводятся в скважинах и шурфах.

Так, существует метод лопастных испытаний грунтов. В скважину ниже конца обсадной трубы вдавливаются и поворачиваются лопасти крыльчатки. Замеряется максимальный скручивающий момент. По моменту и размерам лопастей на основании формулы [11, с. 56] определяют сдвигающее напряжение  $\tau$ , которое можно приближенно считать равным сцеплению грунта,  $\tau \approx C$ . Этот метод применяют для испытания пластичных глинистых грунтов, а также для илистых и водонасыщенных супесчаных грунтов и других, пробы которых взять трудно, не нарушив их структуру.

Существует метод шарового штампа, когда штамп, имеющий шаровую лобовую поверхность, задавливается в грунт. По нагрузке, осадке штампа и его геометрическим параметрам определяют на основании формулы [11, с. 57] сцепление  $C_{ш}$ , которое включает в себя и внутреннее трение.

Существуют методы испытания грунтов для определения их прочностных и деформационных характеристик путем задавливания или забивания в грунт конусного наконечника. Это так называемое статическое и динамическое зондирование грунтов.

Существуют методы полевых испытаний грунтов при помощи плоского штампа, который, в отличие от шарового штампа, нагружают ступенями (шаровый – одной нагрузкой).

### Глава 8. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ГРУНТЕ

#### 8.1. Напряженное состояние грунта

Нагрузка от сооружения и собственного веса грунта распространяется по грунтовому скелету. В точках контакта частиц скелета действуют элементарные силы. Направление действия их различно в зависимости от взаимного расположения частиц грунта. Существование этих элементарных сил, действующих на каждую частицу со сторон точек ее контакта с другими частицами, обуславливает наличие в частице внутренних сил,

противодействующих внешним элементарным силам. Состояние грунта, при котором между его частицами и внутри частиц возникают элементарные силы, называется напряженным состоянием.

Показателем напряженного состояния грунта является напряжение. *Напряжение* – это сумма элементарных сил, приходящихся на единичную площадку, сориентированную в массиве грунта определенным образом. Различают напряжения, нормальные по отношению к рассматриваемой площадке и касательные. Установлено, что для условий плоской задачи в каждой точке напряженного массива существуют две взаимно перпендикулярные площадки, в которых касательные напряжения равны нулю. Нормальные напряжения, действующие на эти площадки, называют главными напряжениями. Одно из них будет наибольшим, второе – наименьшим нормальным напряжением. Для условий пространственной задачи таких пар нормальных напряжений будет три. В площадках, отличных по положению (в пространстве грунтового массива) от главных площадок, существуют и касательные напряжения.

Возьмем произвольную точку в грунтовом массиве и наметим в ней три взаимно перпендикулярные площадки, сориентированные независимо от направления главных напряжений (например, одну параллельно горизонтальной поверхности грунтового полупространства).

Напряженное состояние в этой точке можно отразить через нормальные и касательные по отношению к этим площадкам напряжения. Для определенности напряженного состояния в точке необходимо для каждой площадки указать три вектора напряжения. Вектор нормального напряжения достаточно указать один, а векторов, касательных к площадке, необходимо указать два взаимно перпендикулярных. Отсюда видно, что всего по трем площадкам, проведенным через одну точку, необходимо определить девять векторов напряжений (рис. 13).

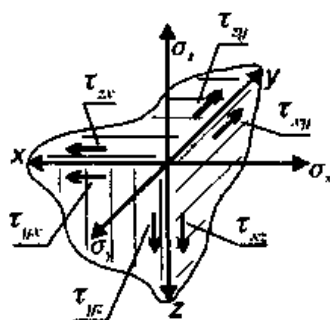


Рис. 13. Напряжения в точке грунтового массива.

Легко доказать математически, что  $\tau_{zy} = \tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ ,  $\tau_{yx} = \tau_{xy}$  (закон парности касательных напряжений). Отсюда видно, что достаточно определить уже шесть напряжений вместо девяти, а остальные три найти по закону парности напряжений. Впервые эта задача была решена Ж. Буссинеском (1885 г.).

В расчетной практике наибольший интерес представляют напряжения, действующие на площадках, параллельных плоскости, ограничивающей

полупространство грунтового массива. Для одной такой площадки это напряжения:  $\sigma_z$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{zy}$ . Задача по определению этих напряжений была решена В. Кирпичевым и Н. Цытовичем. Из-за сложности определения этих трех напряжений обычно находят одно из них – перпендикулярное ограничивающей поверхности ( $\sigma_z$ ). Это напряжение называют *сжимающим*. Под его воздействием происходит де-формация грунтов.

## 8.2. Напряжения при сосредоточенной и распределенной нагрузках

При действии на поверхности грунтового полупространства одной сосредоточенной силы расчетная схема будет иметь вид, показанный на рис. 14.

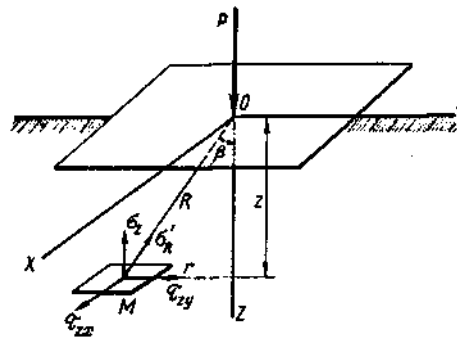


Рис. 14. Схема к определению  $\sigma_z$ .

В результате математического расчета получено выражение

$$\sigma_z = K \frac{P}{z^2}, \quad (8.1)$$

где  $K = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{1}{[1 + (r/z)^2]^{5/2}}$ .

Приведенная формула широко применяется при расчете осадок фундаментов. Для облегчения расчетов на основании этой формулы составлена таблица [11, с. 79]. В ней по  $r/z$  находят значение  $K$ .

При действии нескольких сосредоточенных сил (рис. 15) используется физический принцип суперпозиций: действие суммы равно сумме действию. Тогда сжимающее напряжение в любой точке массива для площадок, параллельных ограничивающей плоскости, находится простым суммированием:

$$\sigma_z = K_1 \frac{P_1}{z^2} + K_2 \frac{P_2}{z^2} + K_3 \frac{P_3}{z^2}. \quad (8.2)$$

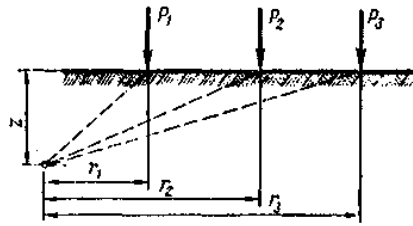


Рис. 15. Действие нескольких сосредоточенных сил.

При действии равномерно распределенной нагрузки  $P$  для прямоугольной ее формы из (8.1) получено решение для напряжений на угловой вертикали:

$$\sigma_{z_0} = K_0 P, \quad (8.3)$$

где  $K_0 = f(z/b, l/b)$  определяется по специальным таблицам [11, с. 82].

Для центра нагрузки  $\sigma_z$  определяется по аналогичной формуле, но коэффициент  $K_0$  увеличивается в четыре раза.

### 8.3. Метод угловых точек

Этот метод также основан на вышеприведенном принципе суперпозиций. Поэтому знание напряжения под углом прямоугольной площадки загрузки позволяет быстро вычислять напряжения для любой точки полупространства грунтового массива. На этой возможности основан метод угловых точек. Этот метод используется тогда, когда грузовая площадь может быть так разбита на прямоугольники, чтобы рассматриваемая точка для них стала угловой. Тогда на основе принципа суперпозиции напряжение будет равно сумме напряжений от прямоугольных площадей загрузки, для которых эта точка является угловой.

Рассмотрим три основных случая (рис. 16):

- 1) точки вертикали проецируются на контур нагрузки;
- 2) вертикаль лежит внутри прямоугольника;
- 3) вертикаль расположена вне прямоугольника.

В первом случае расчет производится по формуле

$$\sigma_z = (K_{o_1} + K_{o_2})P; \quad (8.4)$$

во втором случае – по формуле

$$\sigma_z = (K_{o_1} + K_{o_2} + K_{o_3} + K_{o_4})P; \quad (8.5)$$

в третьем – по формуле

$$\sigma_z = (K_{o_1} + K_{o_2} - K_{o_3} - K_{o_4})P; \quad (8.6)$$

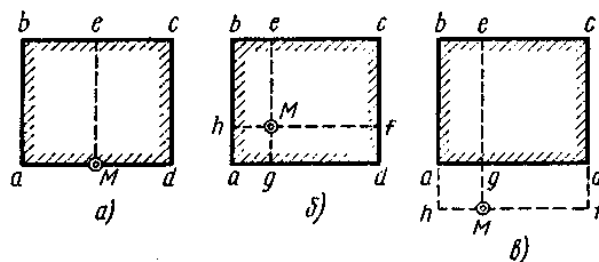


Рис. 16. Различное расположение расчетной вертикали.

### 8.4. Эпюры и изобары

Напряженная зона грунта изображается:

- 1) при помощи эпюр;
- 2) при помощи изобар.

*Эюра* – кривая распределения сжимающих напряжений в точках линии, расположенной в грунтовом полупространстве определенным образом. Наиболее часто используют эпюры напряжений для точек вертикали и горизонтали (рис. 17).

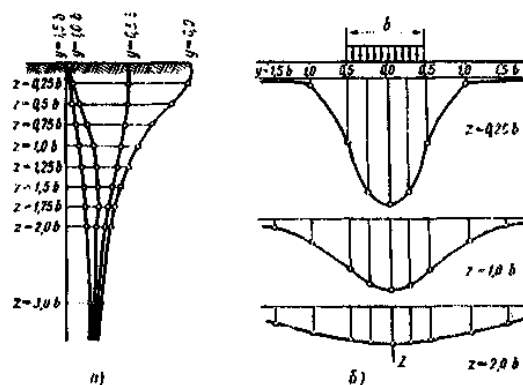


Рис. 17. Эпюры сжимающих напряжений.

*Изобара* – линия равных сжимающих напряжений, строящаяся на сечении грунтового полупространства (рис. 18). При этом используются приведенные выше формулы (8.3)...(8.6).

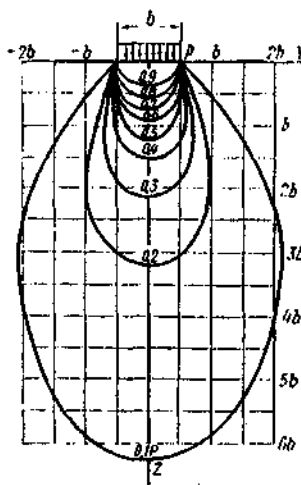


Рис. 18. Линии равных сжимающих напряжений.