

Дисциплина «Геотехника»

(курс «Механика грунтов»)

**Общий объем 108/3:
лекции, лабораторные работы,
СРС,**

форма контроля – зачет

**4-й курс,
направление «Строительство»**

Список литературы

Справочно-нормативная литература

1. ГОСТ 25100 – 2020. Грунты. Классификация. М., издательство стандартов, 2020.
2. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. М., Минстрой России, 2016.

Основная литература

1. Цытович Н.А. Механика грунтов. М., СИ, 1979.
2. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. М., СИ, 1981 или 1988.
3. Справочник проектировщика. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М., СИ, 2007.

Дополнительная литература

- 1. Швецов Г.И. Инженерная геология, механика грунтов, основания и фундаменты. М., ВШ, 1987.*
- 2. Малышев М.В., Болдырев Г.Г. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах). М., АСВ, 2000.*

Введение.

Основные понятия и определения.

Геотехника – научные методы и инженерные принципы строительной деятельности с использованием материалов земной коры, совокупность взаимосвязанных технических решений, приёмов и способов возведения подземных частей зданий и сооружений, включая способы освоения подземного пространства для строительства заглублённых помещений.

Геотехника базируется на знаниях, полученных из курса «Инженерная геология», законах механики грунтов, а также на теории и практике фундаментостроения и подземного строительства с учётом региональных особенностей инженерной геологии.

Механика грунтов, в свою очередь, является составной частью общей механики и геомеханики.

В механике грунтов изучается поведение грунтовых массивов под воздействием нагрузки (в т.ч. собственного веса грунта).

Механика грунтов – это научная база курса «Основания и фундаменты», входящего в дисциплину «Геотехника».

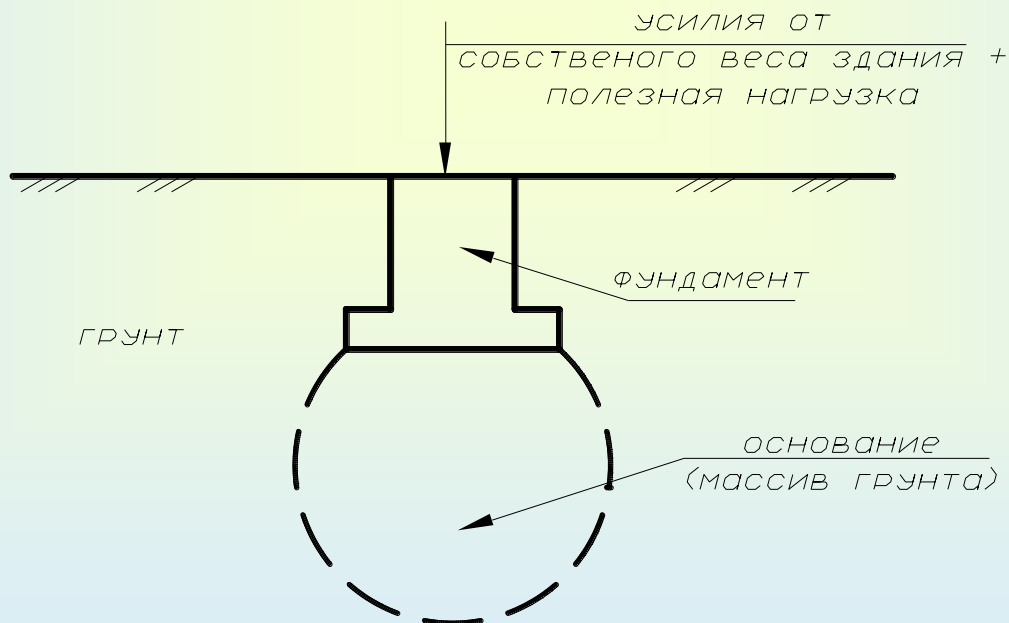
Грунт – это любые горные породы, почвы, осадки и техногенные образования, рассматриваемые как многокомпонентные динамические системы и часть геологической среды, изучаемые в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью человека.

В качестве основания, среды и материала при возведении здания.

Грунты в своем естественном состоянии часто отождествляют с упругим, упруго-пластичным, пластичным полупространством и поэтому в механике грунтов используются закономерности других дисциплин (в частности, сопротивление материалов, теор. и строит. механики и др.).

Основание – это массив грунта, воспринимающий давление от фундамента.

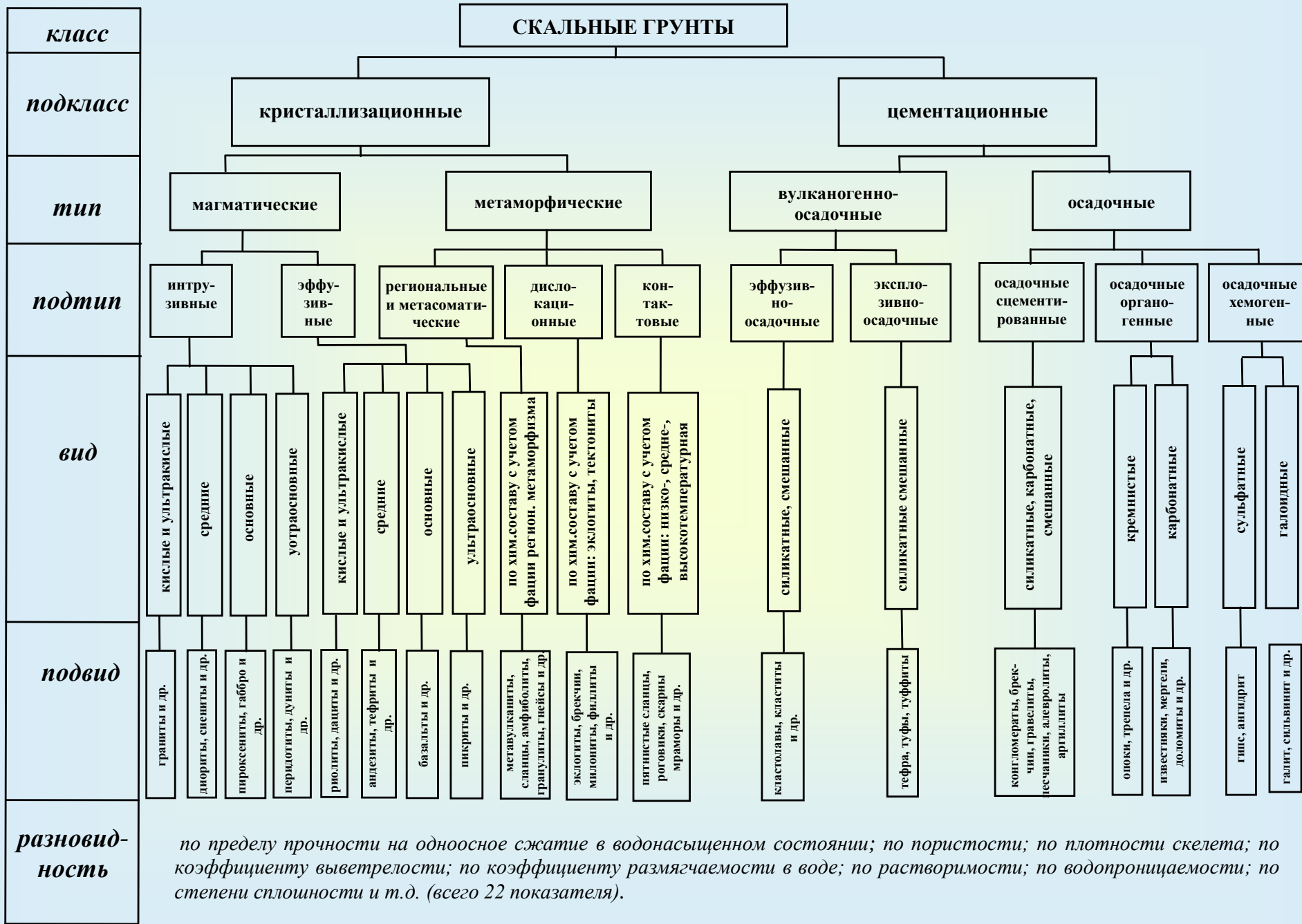
Фундамент – это конструкция, служащая для передачи грунту (основанию) веса здания или сооружения, и действующих на него нагрузок.

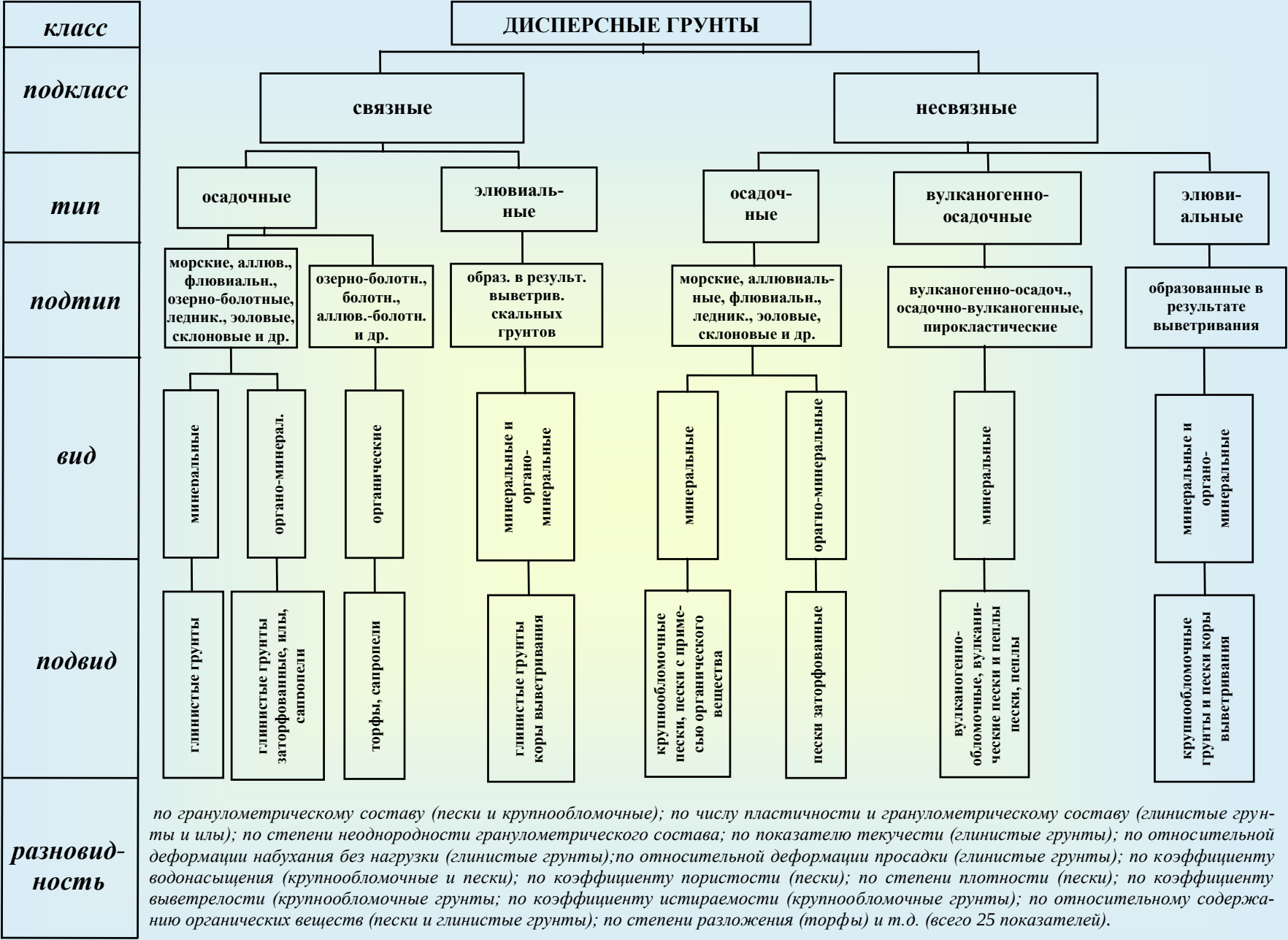


Классификация грунтов (ГОСТ 25100 – 2020)

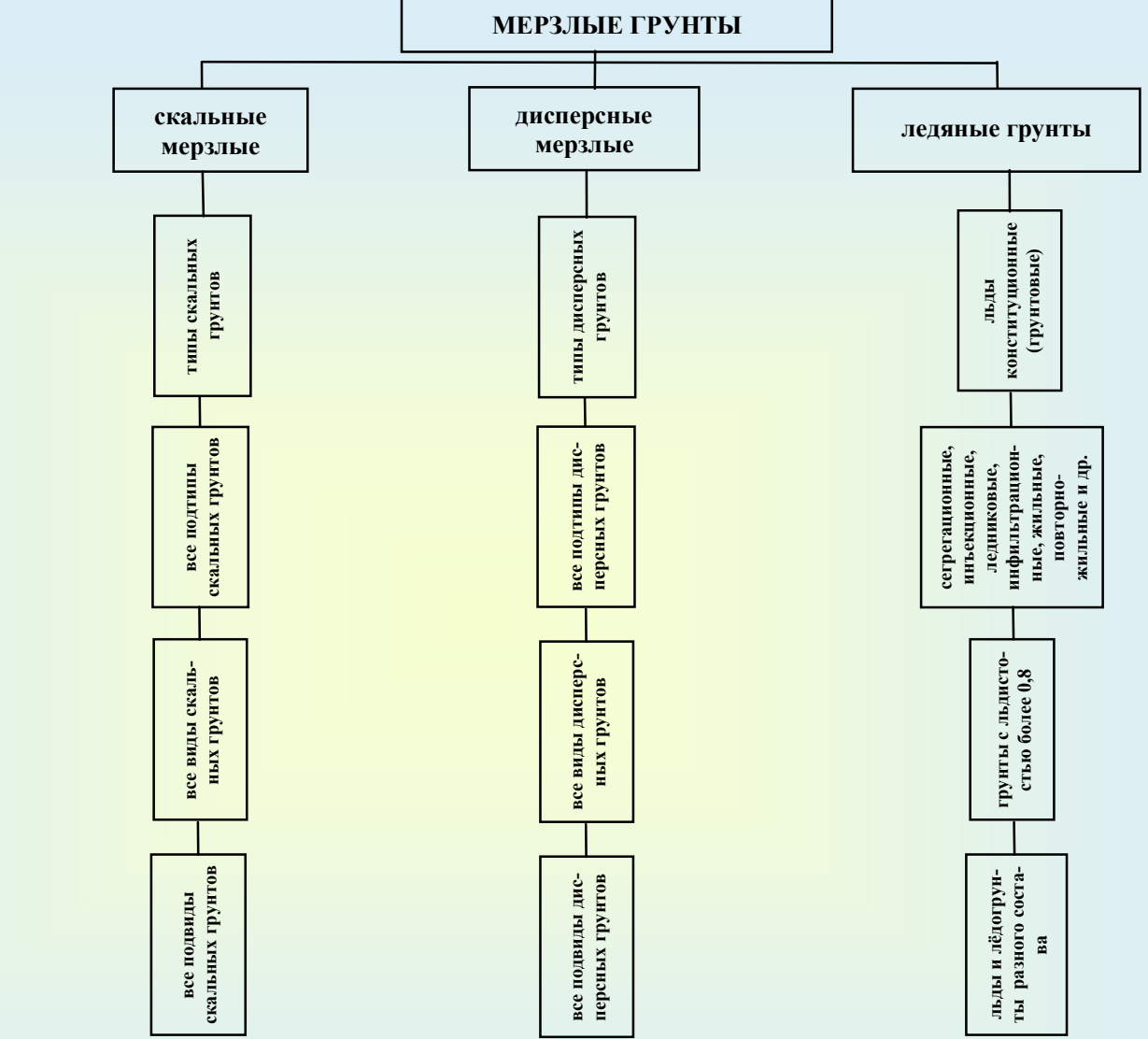
Классификационные ступени (уровни):

- *класс* – *по природе структурных связей;*
- *подкласс* – *по структурам грунтов, образованных соответствующими связями;*
- *тип* – *по основным генетическим категориям (происхождению);*
- *подтип* – *по условиям образования;*
- *вид* – *по вещественному составу;*
- *подвид* – *по петрографическому или литологическому составу;*
- *разновидность* – *по количественным показателям состава, строения, состояния и свойств грунтов.*



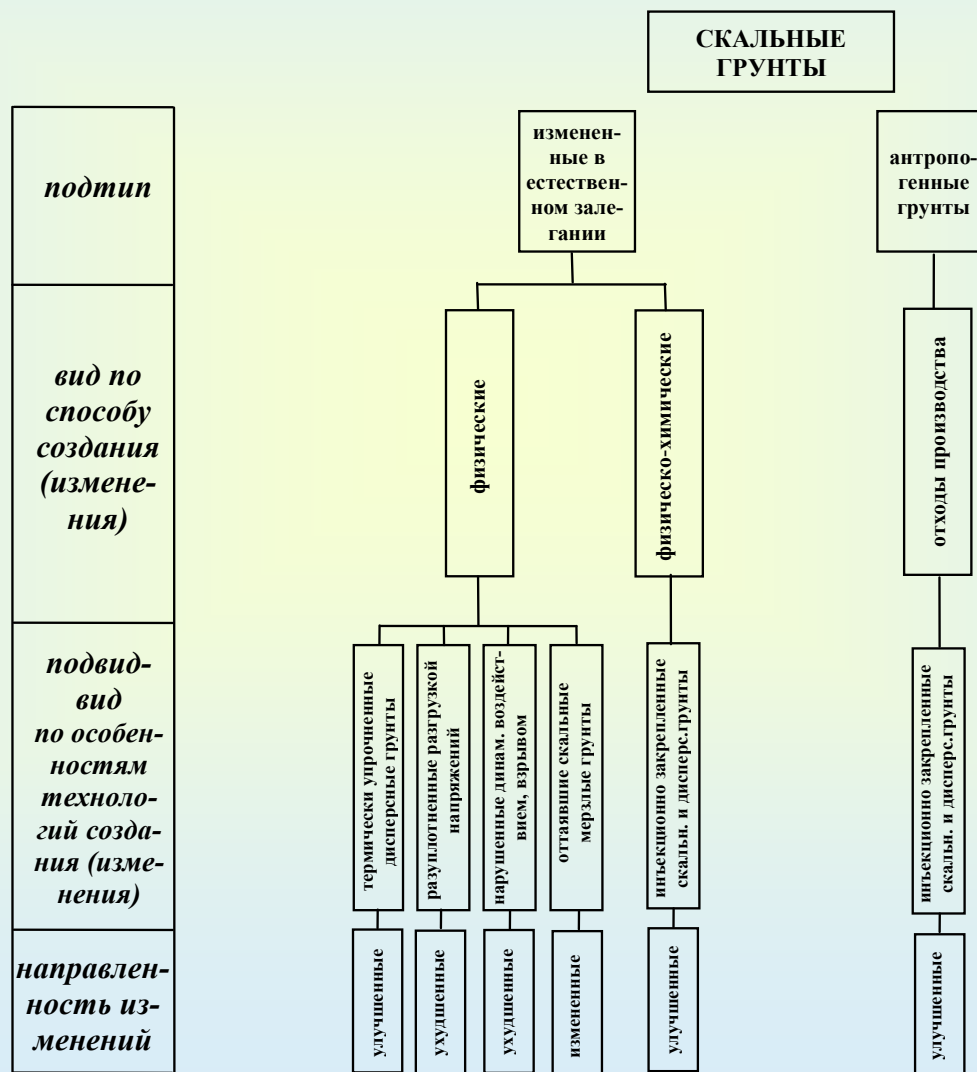


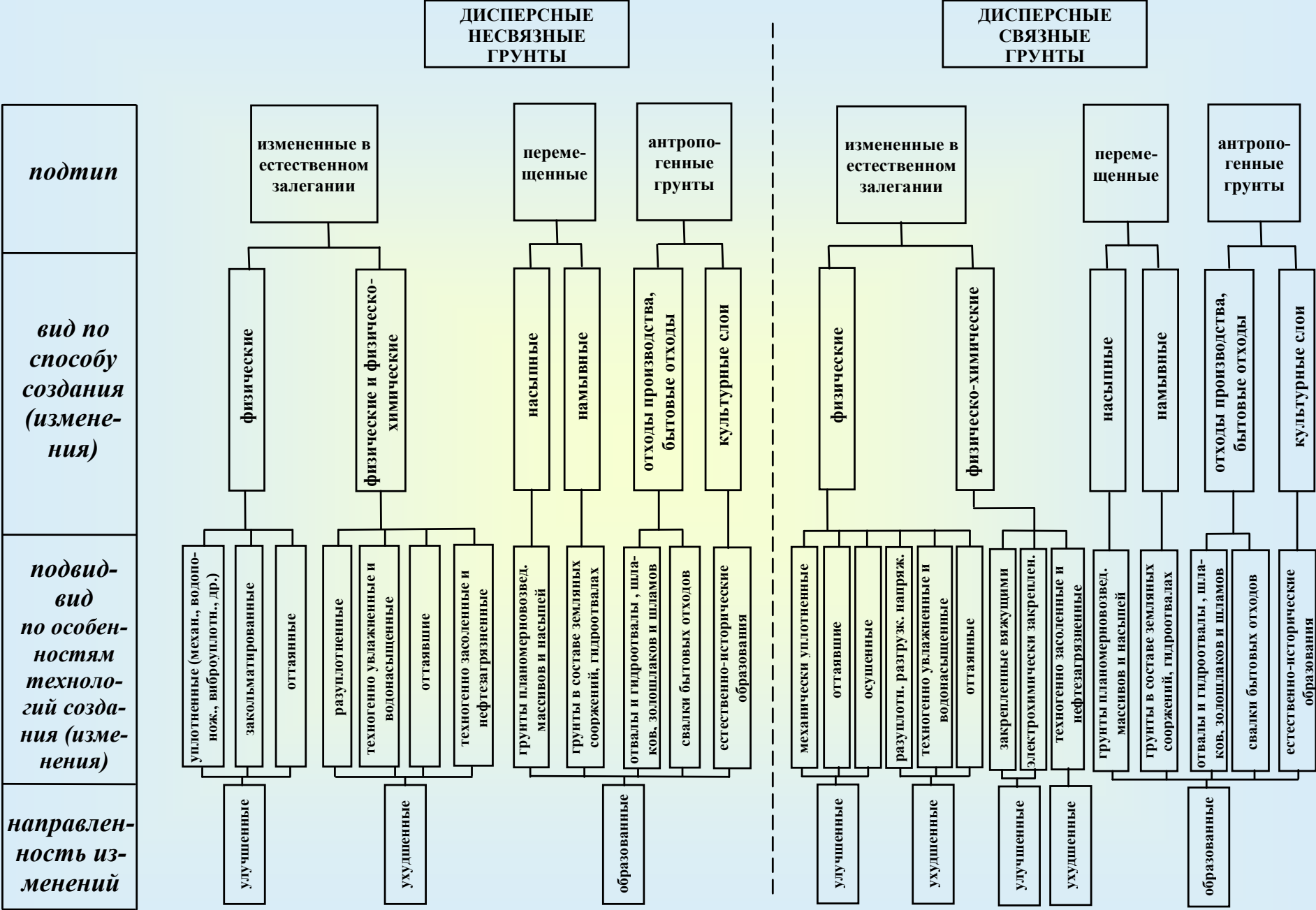
<i>класс</i>
<i>под-класс</i>
<i>тип</i>
<i>подтип</i>
<i>вид</i>
<i>подвид</i>
<i>разновидность</i>



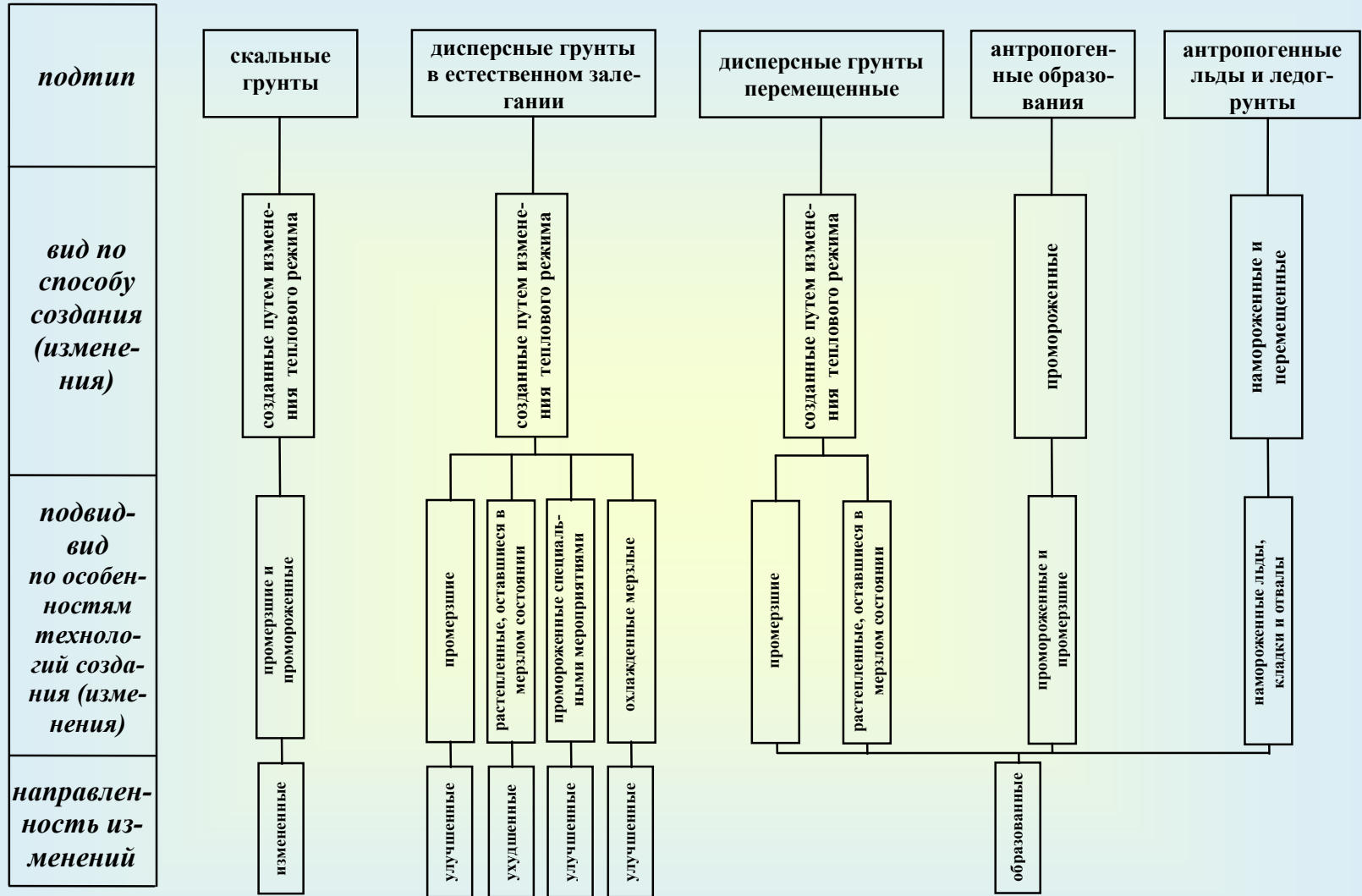
по относительной деформации морозного пучения, по льдистости за счет видимых ледяных включений; по температуре; степени засоленности и др.

Отдельно в ГОСТ 25100-2020 выделена ТИПОЛОГИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ (охватывает все классы). А именно:





МЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ



Фазовый состав нескальных грунтов

Грунт состоит из различных элементов, которые можно выделить в три группы:

1. Твердые минеральные частицы

(твердая фаза)

2. Вода в различных видах и состояниях

(жидкая фаза)

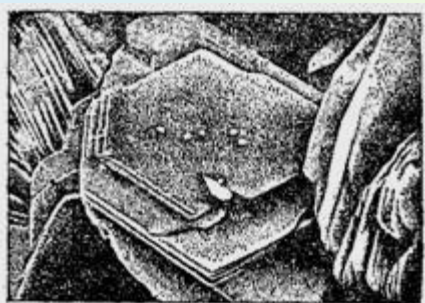
3. Газовые включения

(газообразная фаза)

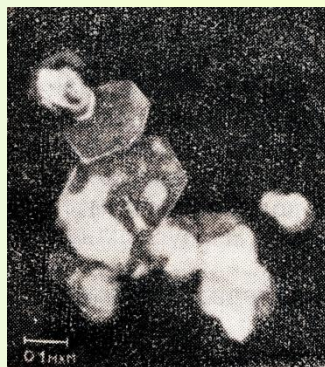
Твердая фаза

– представляет систему разнообразных по форме, составу и размерам твердых минеральных частиц.

по форме:



*пластинчатая форма
частиц каолинита*



*игольчатая форма
частиц аттапульгита*



по размерам и составу: от нескольких см (галечниковые) до < 1 мкм (глины)

Часть минералов инертна по отношению к воде (полевой шпат, кварц, слюда), часть – более активно взаимодействует с водой.

Чем мельче частицы грунта, тем больше удельная площадь поверхности (УПП) и грунт активнее взаимодействует с водой.

УПП – это отношение суммарной площади частиц к массе ($\text{м}^2/\text{г}$) или объему грунта ($\text{м}^2/\text{см}^3$).

УПП галечников – $0,00025 \text{ м}^2/\text{г}$;

УПП песков – $< 5 \text{ м}^2/\text{г}$;

УПП каолинита – $10 \text{ м}^2/\text{г}$;

УПП монтмориллонита – $800 \text{ м}^2/\text{г}$.

Большое влияние оказывает содержание в грунте растворимых водой и вступающих в реакцию с другими жидкостями минералов.

Многие горные породы сложены растворимыми минералами:

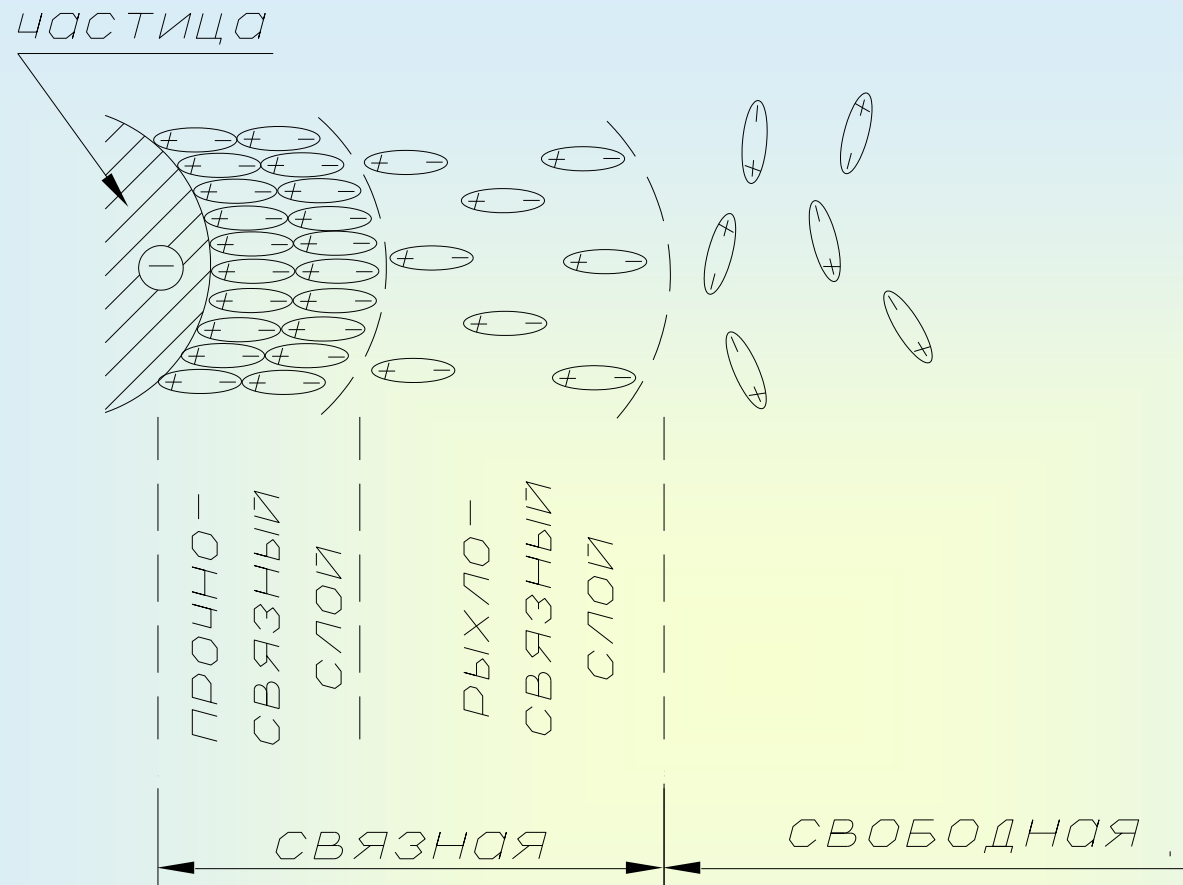
- гипс (водорастворим);*
- мрамор и известняк (быстрое разрушение от взаимодействия с кислотами);*
- лессовые грунты (ослабление или разрушение структурных связей при действии воды).*

Жидкая фаза

Вода в грунте может быть в парообразном, жидком и твердом состоянии.

Жидкая вода *разделяется на кристаллизационную, связную и свободную.*

Кристаллизационная вода *находится внутри частиц грунта и участвует в строении кристаллизационных решеток минералов.*



Прочносвязный слой – несколько рядов молекул, общая толщина слоя до 10^{-6} см, притяжение составляет несколько сотен МПа, плотность слоя достигает $1,2 - 2,4 \text{ г/см}^3$.

Связная вода, особенно вблизи поверхности частицы, имеет повышенную вязкость и температуру замерзания намного ниже 0°C ($\approx -80^{\circ}\text{C}$).

Количество связанной воды зависит от свойств грунта (удельной площади поверхности частиц).

Для удаления связанной воды требуются значительные усилия.

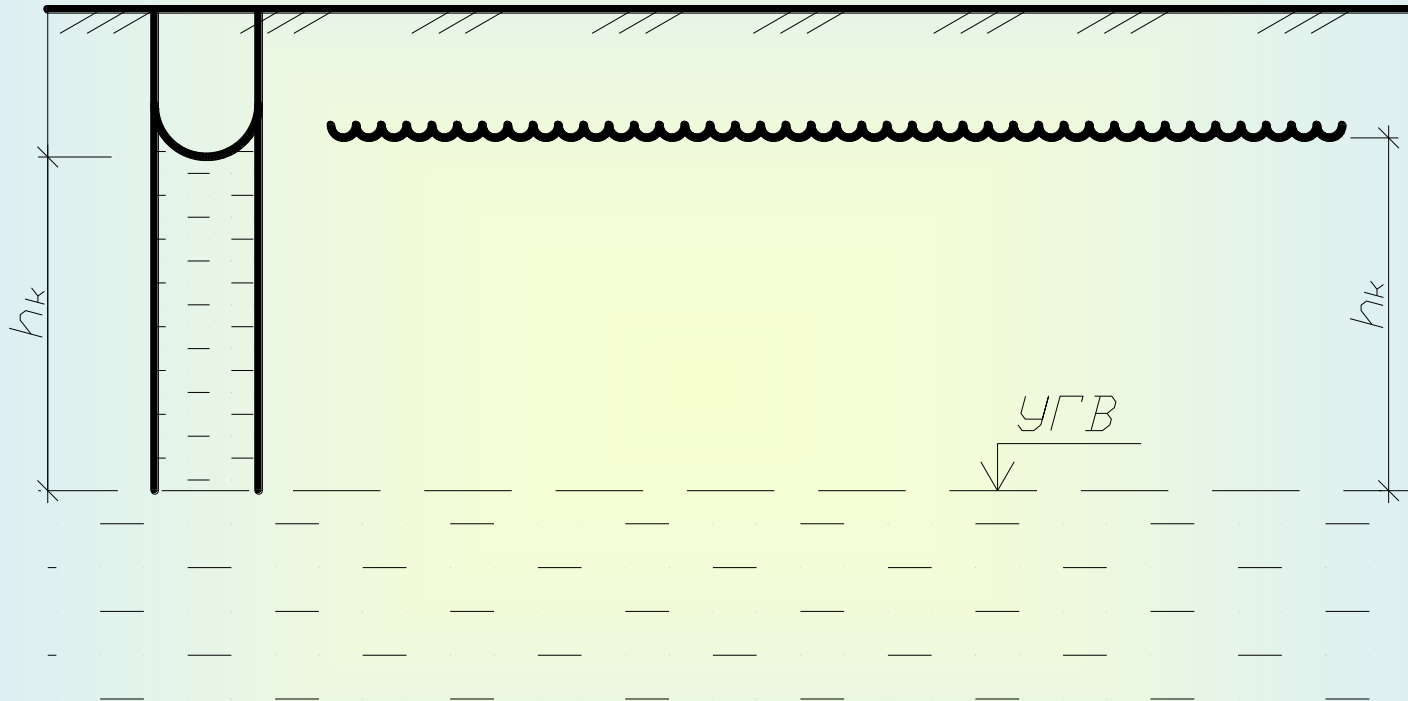
При уменьшении пленки связанной воды около одной частицы идет процесс выравнивания пленок за счет слоя другой частицы. Это приводит к миграции воды от нижних слоев к верхним (при высыхании).

Свободная вода подразделяется на гравитационную и капиллярную.

Гравитационная вода обладает обычными общеизвестными свойствами и перемещается в порах грунта под действием напоров.

(крупнообломочные грунты, гравелистые пески)

Поднятие капиллярной воды обуславливается наличием в грунтах каналов, чем они тоньше, тем выше подъем.



песок крупный – 3,5 см; песок ср.крупности – 35 см;

песок мелкий – 120 см; супесь – 3,5 м;

суглинок, глина – 6,5 м.

Газообразная фаза

Содержание воды и газа в грунте зависит от объема его пор: чем больше поры заполнены водой, тем меньше в них содержится газов.

В верхних слоях грунта ($\approx$ до 2 м) газовая составляющая представлена в основном атмосферным воздухом, ниже – метаном, азотом, сероводородом.

Газ в грунте может быть в свободном состоянии или растворен в воде.

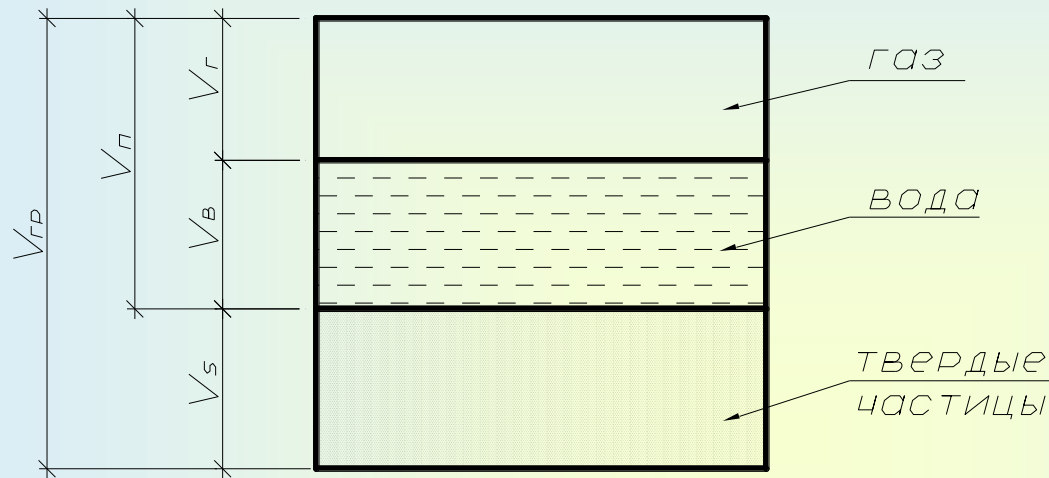
Свободный газ подразделяется на незащемленный и защемленный.

*Незащемленный газ сообщается с атмосферой
(до глубины 1 – 2 метра).*

Газ существенно влияет на свойства грунта (на сжимаемость), так как твердая и жидкая фазы практически не сжимаемы.

Уменьшение давления вследствие разработки котлована может привести к разрывам на поверхности грунта.

Физические характеристики грунтов



$$V_{гр} = V_s + V_n,$$

$$V_n = V_в + V_г,$$

$$m_{гр} = m_в + m_s,$$

$$q_{гр} = q_в + q_s.$$

$V_{гр}, m_{гр}, q_{гр}$ – соответственно объем, масса и вес грунта

$V_в, m_в, q_в$ – соответственно объем, масса и вес воды

V_s, m_s, q_s – соответственно объем, масса и вес твердых частиц

$V_г, V_n$ – объем газа и объем пор соответственно

Основные (базовые) характеристики

*(определяются экспериментально
по соответствующим ГОСТам)*

1) плотность грунта, ρ , г/см³

(это отношение массы образца грунта к его объему)

$$\rho = \frac{m_s + m_v}{V_{gr}}$$

*Методы определения: метод режущего кольца или
парафинирования.*

2) плотность твердых частиц грунта, ρ_s , г/см³

(это отношение массы твердых частиц к их объему)

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$



Метод определения: пикнометрический метод.

Основа метода заключается в определении объема твердых частиц по массе вытесненной ими воды.

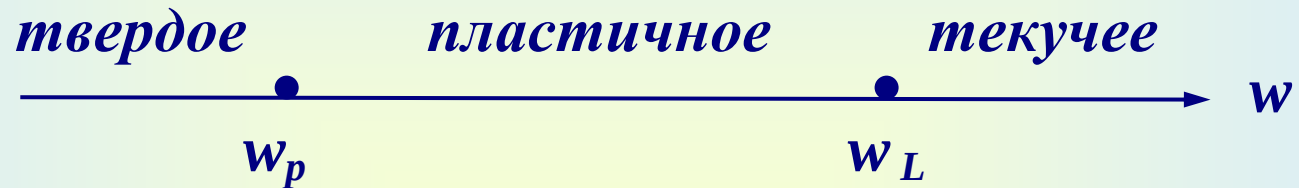
3) природная влажность грунта, w, % или д.е.

(это отношение массы воды к массе твердых частиц)

$$W = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{с}}} = \frac{m_{\text{гп}} - m_{\text{с}}}{m_{\text{с}}}$$

Метод определения: метод высушивания.

Для глинистых грунтов:



3.1) влажность на границе раскатывания, w_p , % или д.е.

3.2) влажность на границе текучести, w_L , % или д.е.

Метод определения: метод высушивания.

Производные (расчетные) характеристики

1) удельный вес грунта, γ , кН/м³

$$\gamma = \frac{q_s + q_b}{V_{gp}}, \quad q = m \cdot g, \quad \Rightarrow$$

$$\gamma = \frac{m_s \cdot g + m_b \cdot g}{V_{gp}} = \frac{(m_s + m_b)}{V_{gp}} \cdot g = \rho \cdot g,$$

$$\gamma = \rho \cdot g$$

2) удельный вес твердых частиц, γ_s , кН/м³

$$\gamma_s = \frac{q_s}{V_s}, \quad q = m \cdot g, \quad \Rightarrow$$

$$\gamma_s = \frac{m_s \cdot g}{V_s} = \frac{m_s}{V_s} \cdot g,$$

$$\gamma_s = \rho_s \cdot g$$

3) плотность сухого грунта, ρ_d , т/м^3 или г/см^3

(это отношение массы твердых частиц грунта к объему образца грунта)

$$\rho_d = \frac{m_s}{V_{gp}},$$

$$\rho = \frac{m_s + m_e}{V_{gp}}, \quad w = \frac{m_e}{m_s} \Rightarrow$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w}$$

4) удельный вес сухого грунта, γ_d , кН/м³

(это вес единицы объема абсолютно сухого грунта)

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w}$$

5) *относительное содержание твердых частиц,
m, % или д.е.*

*(это отношение объема твердых частиц к полному
объему грунта)*

$$m = \frac{V_s}{V_{gp}} \cdot 100\%,$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}, \quad \rho_d = \frac{m_s}{V_{gp}} \Rightarrow$$

$$m = \frac{\rho_d}{\rho_s}$$

б) пористость грунта, n , % или д.е.

(это отношение объема пор к полному объему грунта)

$$n = \frac{V_n}{V_{gp}} \cdot 100\%,$$

$$n + m = 1, \Rightarrow$$

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}$$

7) коэффициент пористости, e , д.е.

(это отношение объема пор к объему твердых частиц)

$$\begin{aligned} e &= \frac{V_n}{V_s} = \frac{n}{m} = \frac{1-m}{m} = \\ &= \frac{1 - \cancel{\rho_d} / \cancel{\rho_s}}{\cancel{\rho_d} / \cancel{\rho_s}} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}, \\ e &= \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \end{aligned}$$

8) коэффициент водонасыщения, S_r , д.е.

(это отношение объема воды в грунте природной влажности к объему воды при полном водонасыщении)

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

W_{sat} – *полная влагоемкость грунта;*

$$W_{sat} = \frac{e \cdot \gamma_w}{\gamma_s} \Rightarrow S_r = \frac{W \cdot \gamma_s}{e \cdot \gamma_w}$$

(классификация грунтов по коэффициенту водонасыщения – см. лекцию 2, п.2 – крупнообломочные грунты, п.3 – песчаные грунты)

9) удельный вес грунта во взвешенном в воде состоянии, γ_{sb} , кН/м³

(это вес единичного объема грунта, помещенного ниже уровня воды)

$$\gamma_{sb} = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e}$$

для глинистых грунтов

10.1) число пластичности, I_p , %

(определяет вид пылевато-глинистого грунта)

$$I_p = W_L - W_p$$

(классификация по числу пластичности грунтов –

см. лекцию 2, глинистые грунты, п.1)

10.2) показатель текучести, I_L , д.е.

(определяет консистенцию пылевато-глинистого грунтов)

$$I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p}$$

*(классификация по показателю текучести грунтов –
см. лекцию 2, глинистые грунты, п.2)*

Основные закономерности механики грунтов.

Механические свойства грунтов

Кроме общих закономерностей сплошных тел, грунты, как дисперсные системы имеют свои закономерности.

К ним относятся:

- закон уплотнения (сжимаемости) грунтов;*
- закон Кулона (сопротивление грунтов сдвигу);*
- закон ламинарной фильтрации (водопроницаемость грунтов).*

Сжимаемость грунтов. Закон уплотнения

Под воздействием нагрузок, сжимаемость грунтов может происходить за счет:

- уменьшения объема пор;*
- деформаций твердых частиц;*
- деформаций воды и газа в порах.*

Учитывая, что нагрузки, передаваемые на основание, сравнительно не велики, то в основном сжимаемость грунтов происходит за счет изменения объема пор (вода практически не сжимаема, твердые частицы мало сжимаемы).

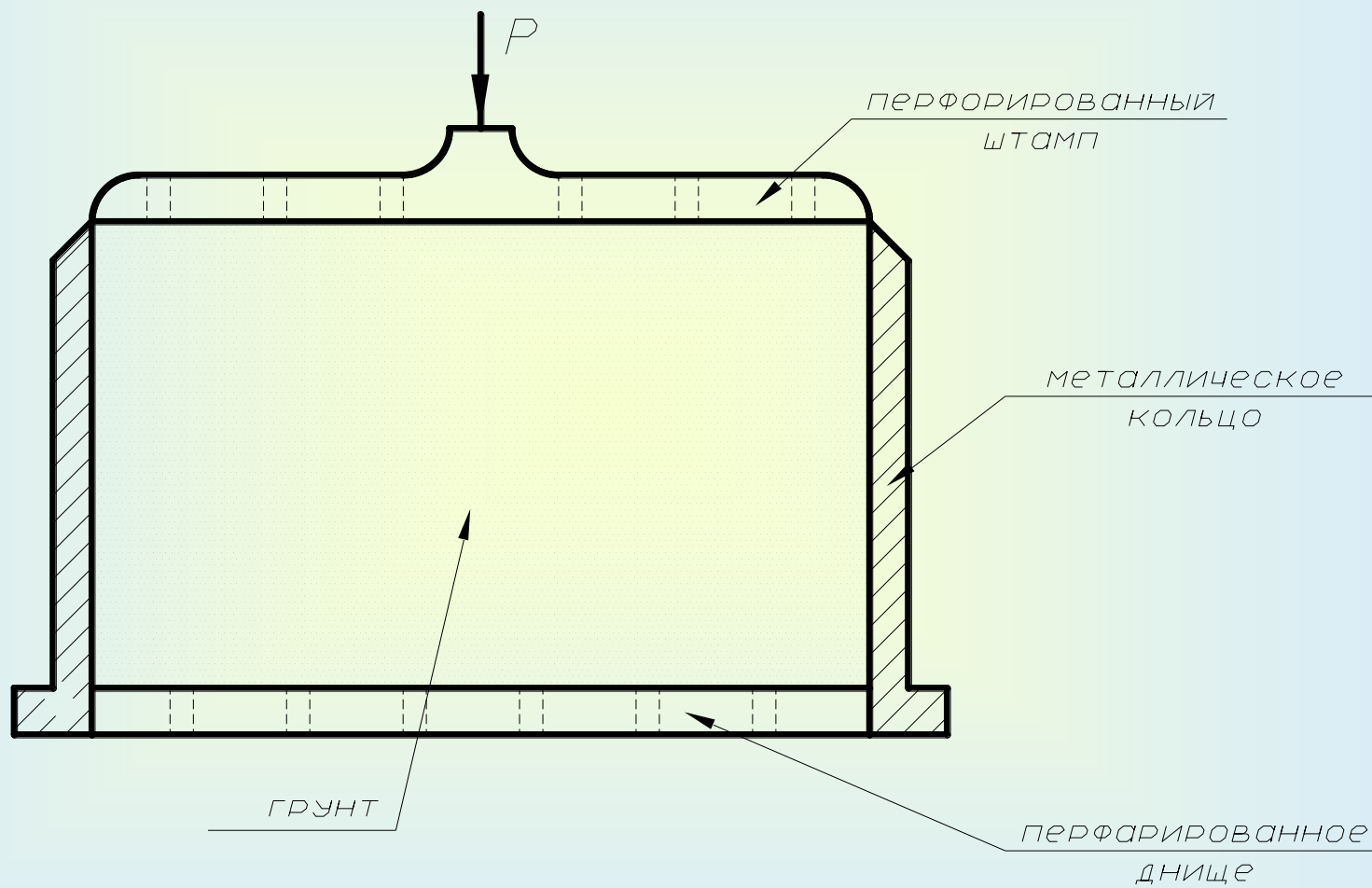
Деформации в грунте могут быть упругими и остаточными.

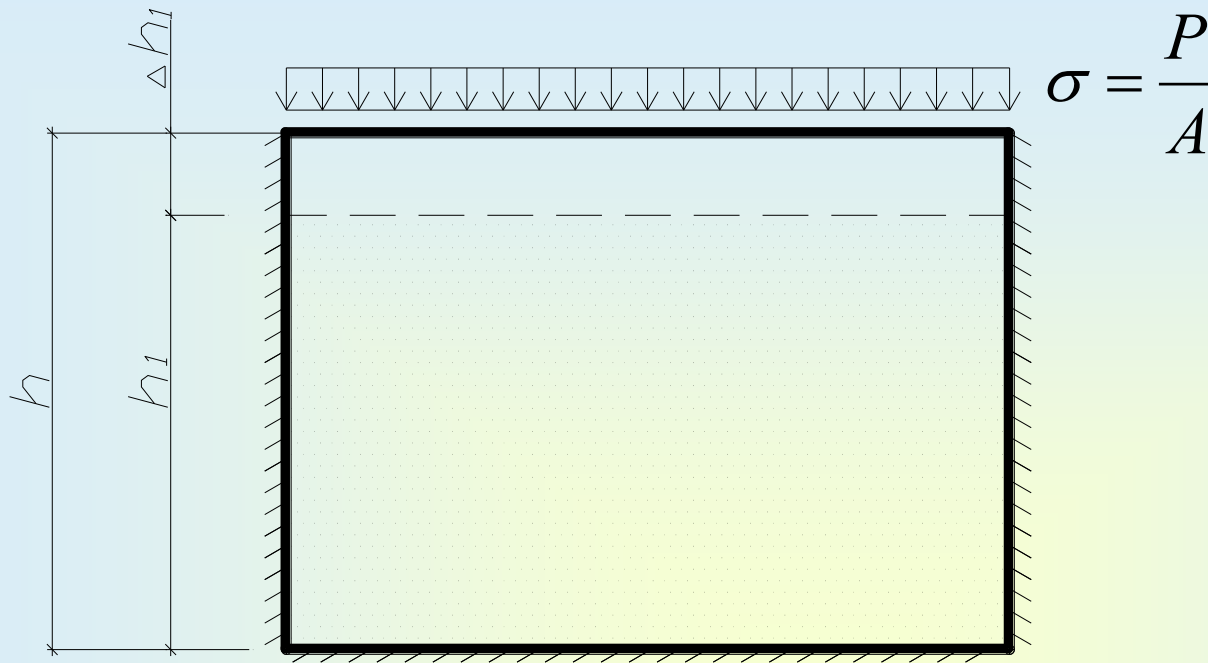
Упругие деформации происходят за счет упругих деформаций минеральных частиц, пленок воды, упругого сжатия пузырьков воды.

Остаточные деформации происходят за счет переукомпановки минеральных частиц.

Остаточные деформации много больше упругих.

Схема одометра





Δh_1 – величина изменения высоты грунтового образца после приложения нагрузки;

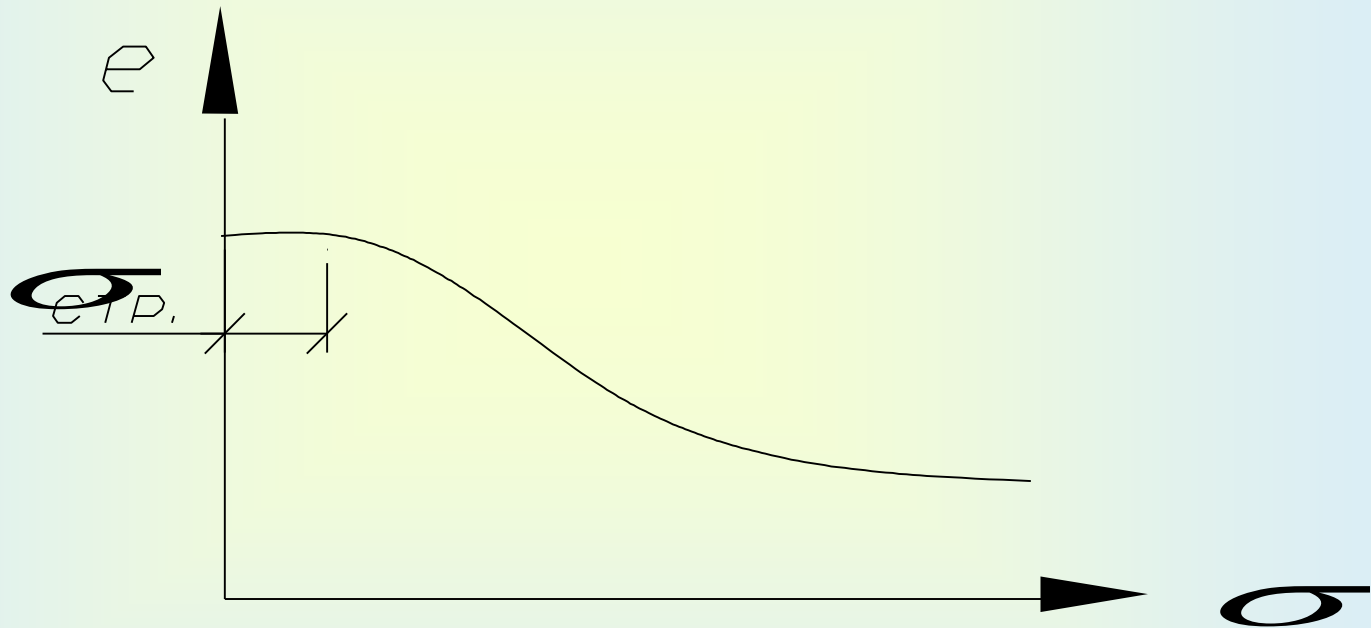
e_0 – начальный коэффициент пористости грунта;

e_1 – коэффициент пористости грунта после загрузки;

A – площадь грунтового образца.

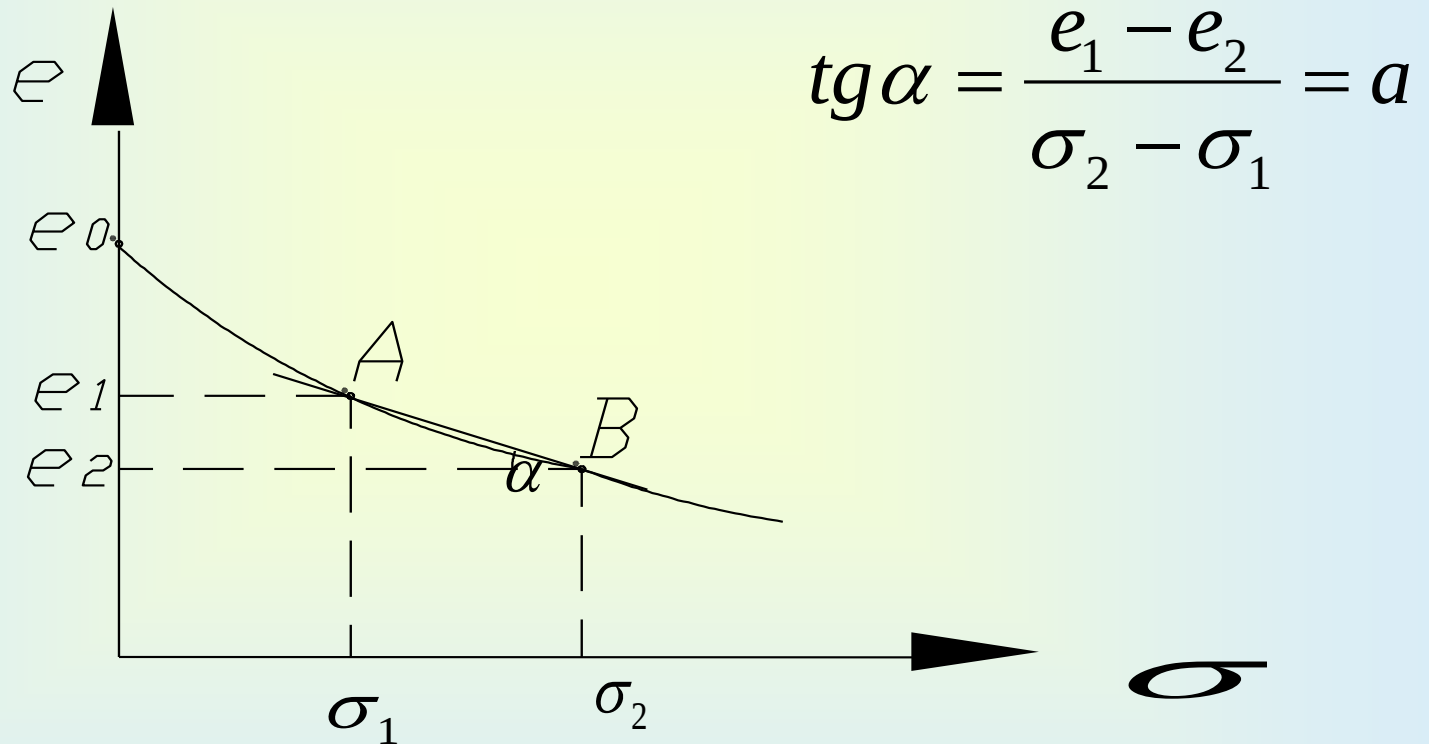
«компрессионная кривая» ($e = f(\sigma)$)

для грунтов, обладающих структурной прочностью



«компрессионная кривая» ($e = f(\sigma)$)

для грунтов, не обладающих структурной прочностью



a – коэффициент уплотнения, МПа^{-1}

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{e_1 - e_2}{\sigma_2 - \sigma_1} = a$$

Для малого интервала изменения напряжения «компрессионную кривую» можно описать в виде формулы:

$$\Delta e = a \cdot \Delta \sigma$$

или

$$de = a \cdot d\sigma$$

$$de = a \cdot d\sigma \quad \text{– закон уплотнения} \\ \text{(сжимаемости)}$$

При небольших изменениях давлений изменение коэффициента пористости прямопропорционально этим давлениям.

Методы оценки сжимаемости грунта.

Определение **модуля деформации** **(самостоятельно)**

1. Метод компрессионных испытаний

2. Стабилометрические испытания

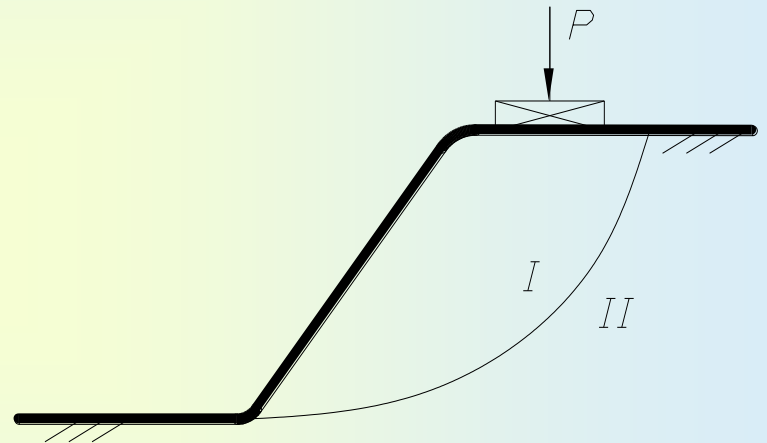
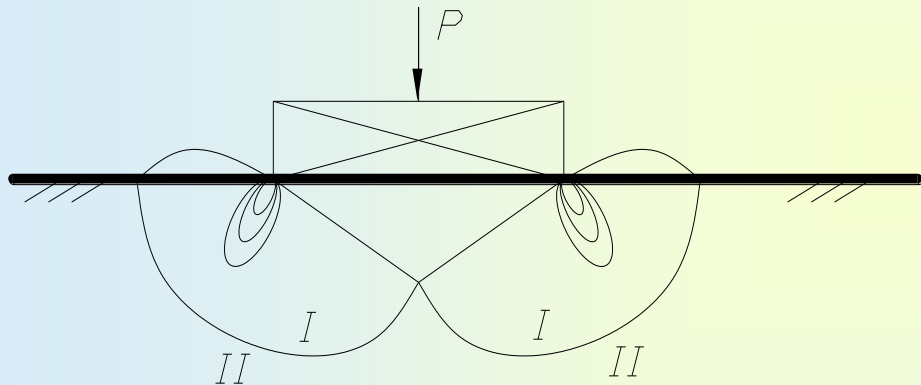
3. Штамповые испытания

4. Прессиометрические испытания

5. Статическое и динамическое зондирование

Сопротивление грунтов сдвигу.

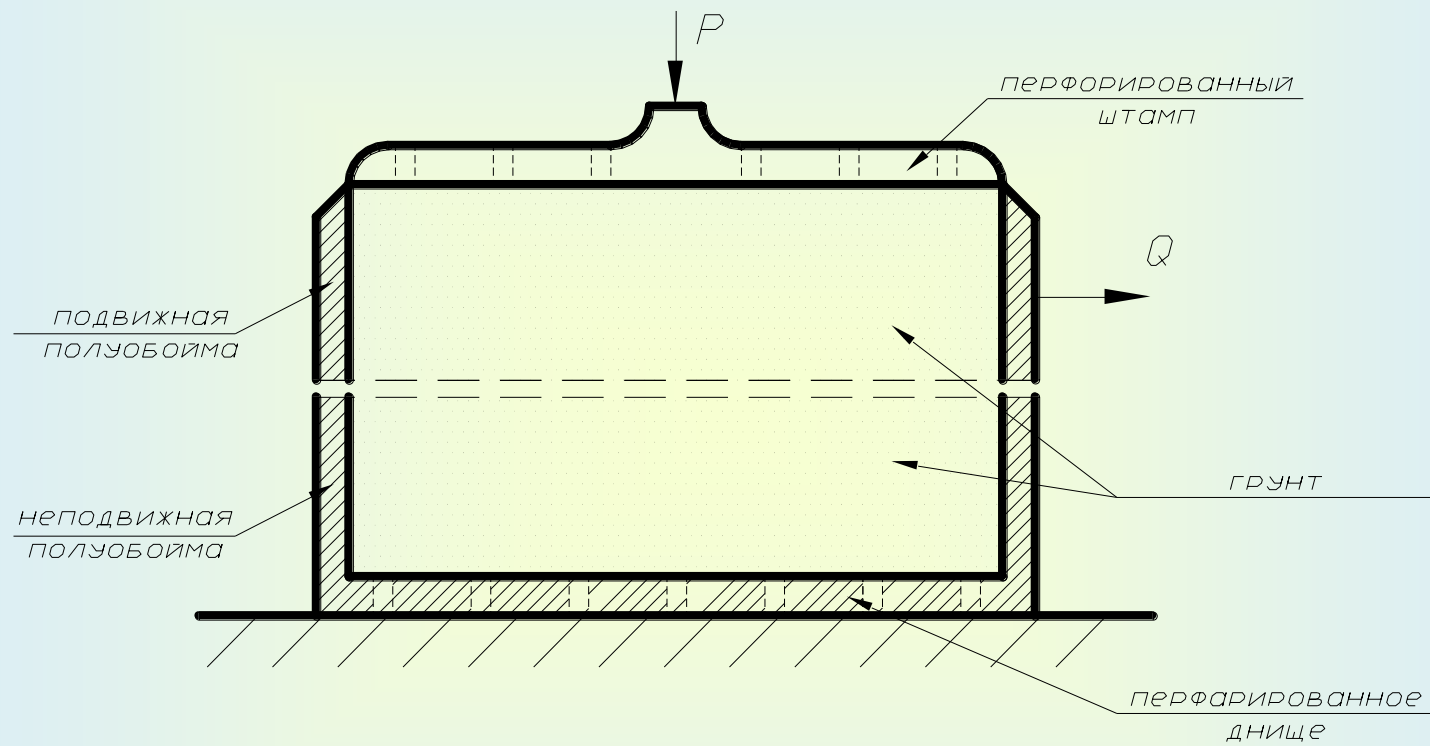
Закон Кулона

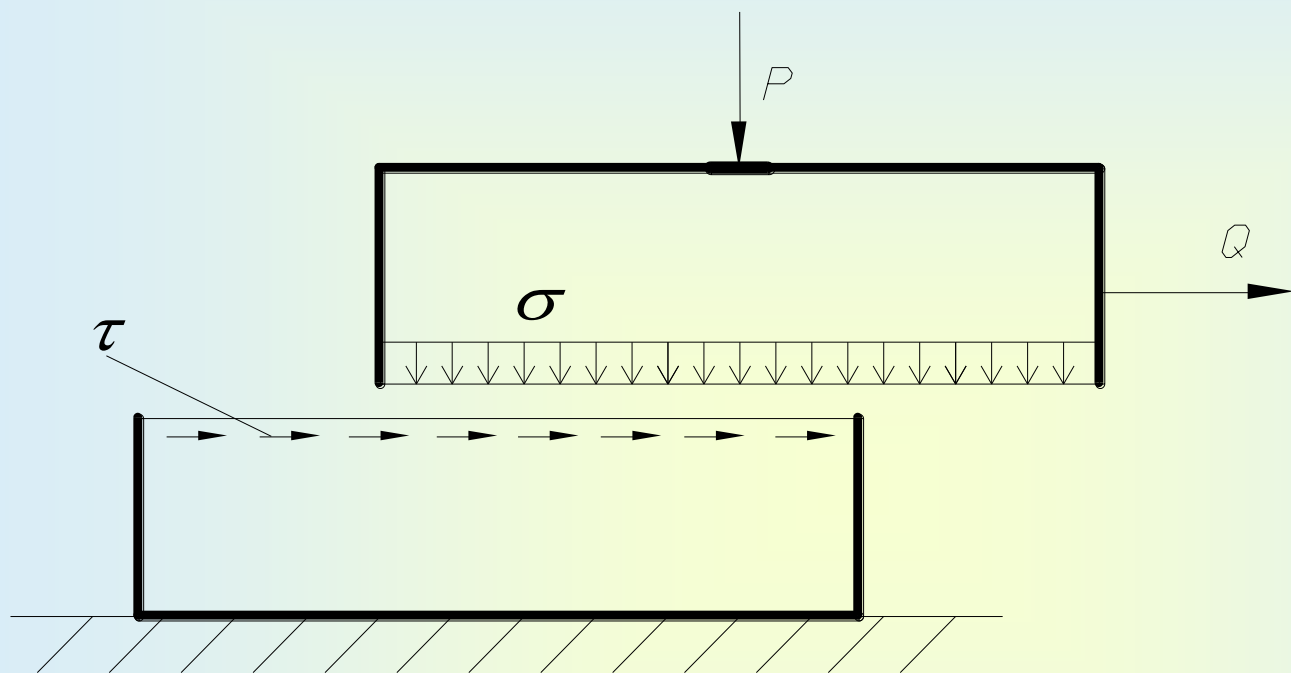


Прочность грунта определяется двумя характеристиками:

φ — угол внутреннего трения, град;

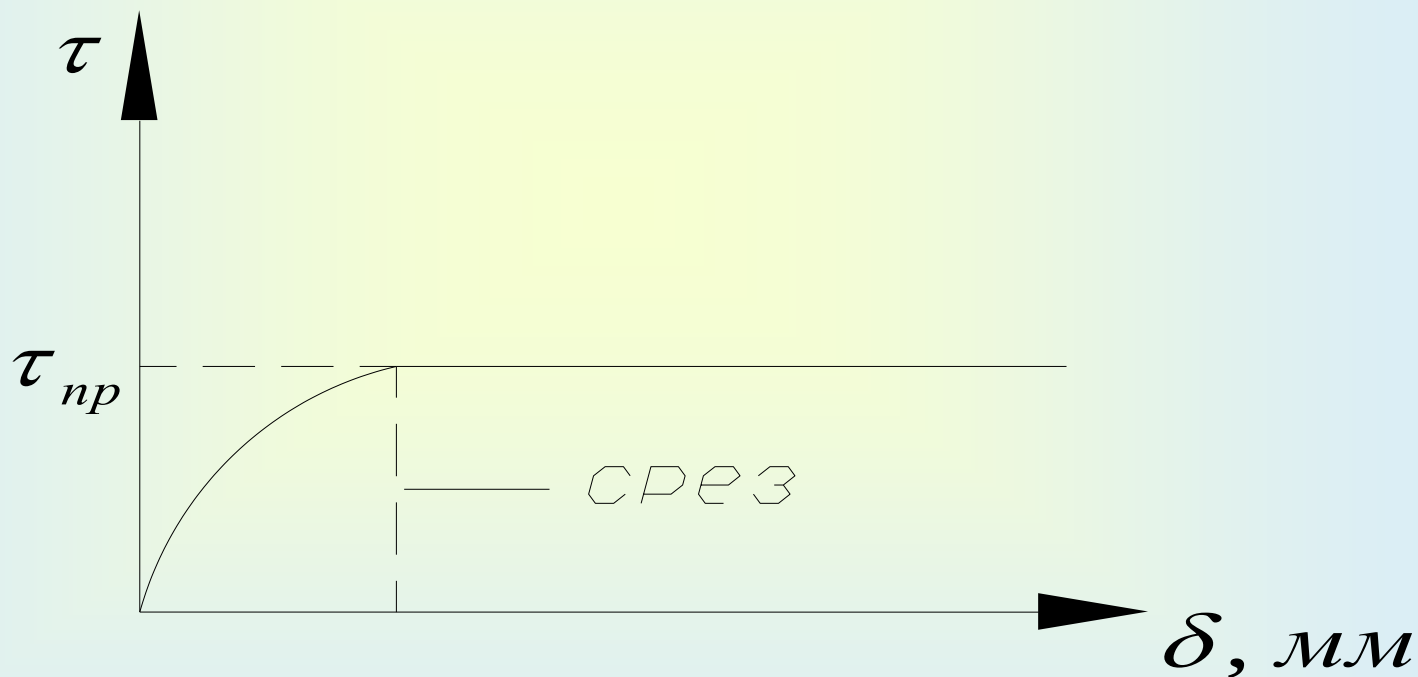
c — удельная сила сцепления, кПа



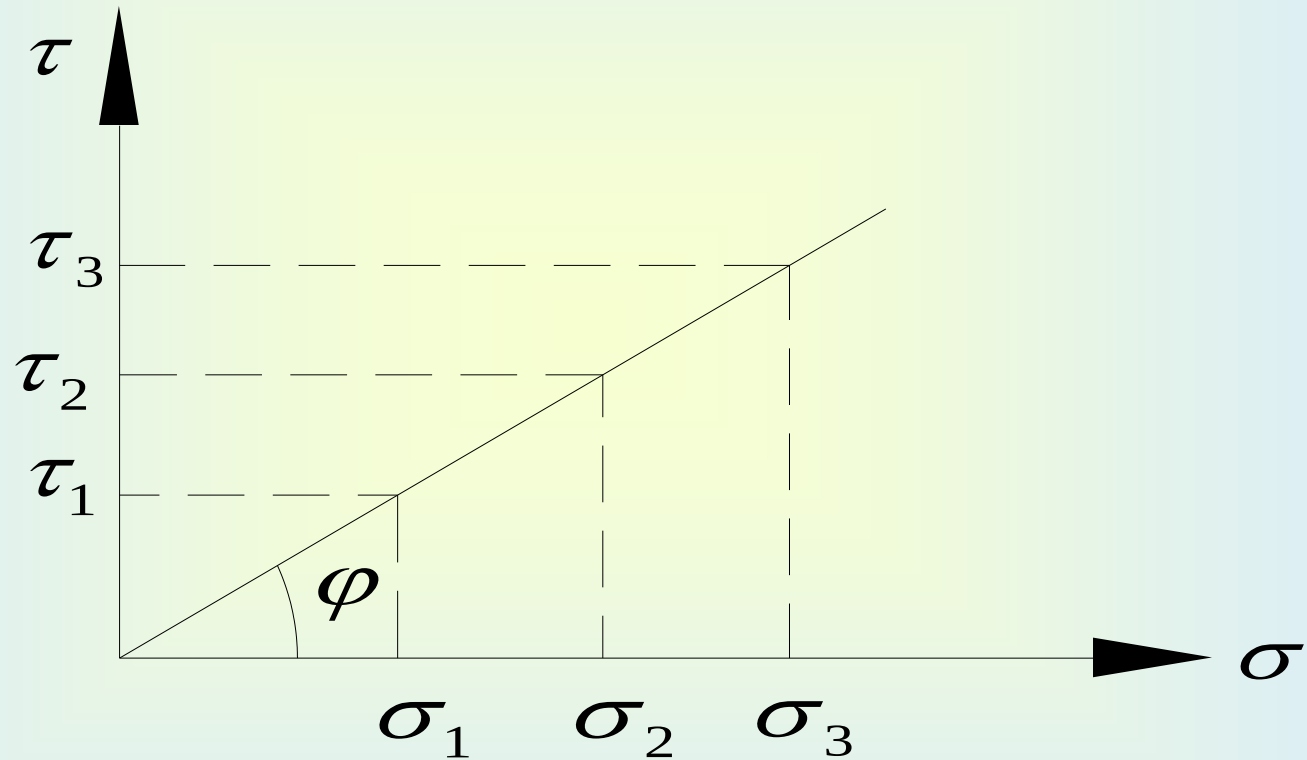


$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad \tau = \frac{Q_{np}}{A}$$

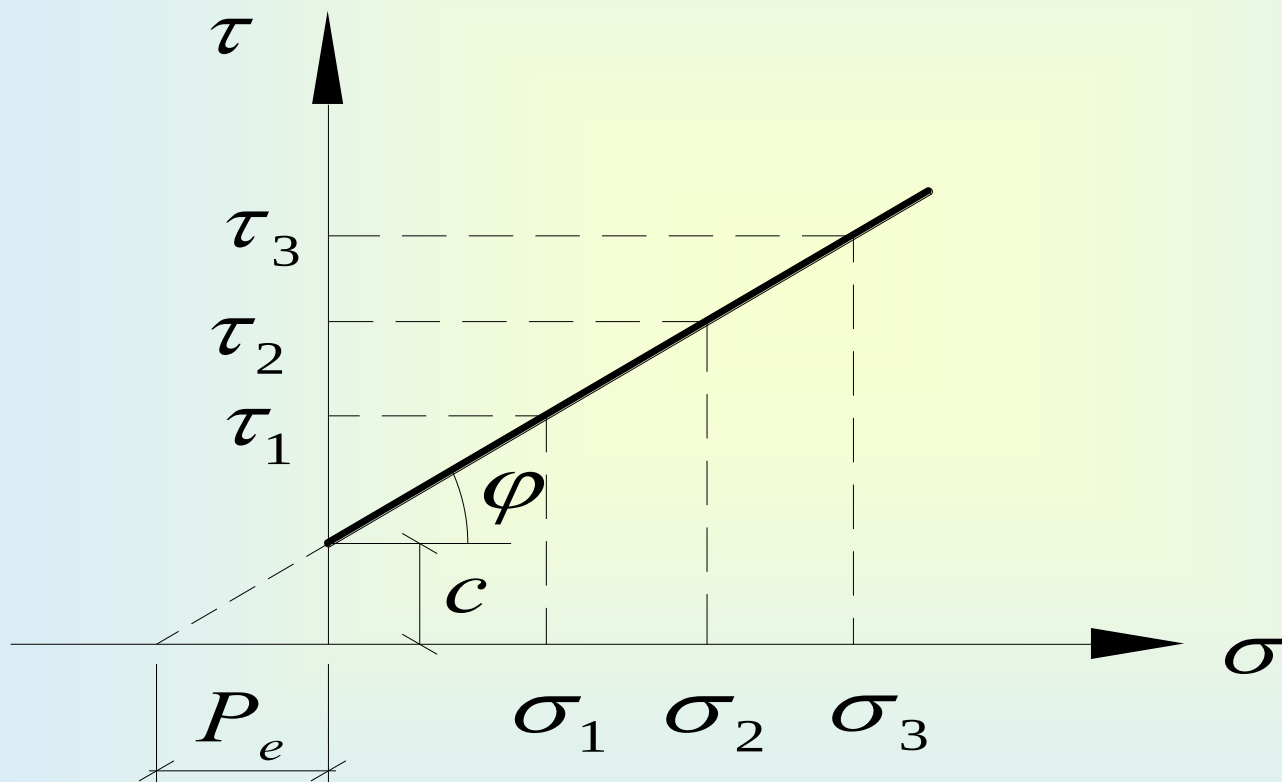
Q_{np} – предельные сдвигающие усилия, соответствуют незатухающим деформациям или стремительному срезу.



*График сопротивления грунта сдвигу
для несвязных грунтов ($\tau = f(\sigma)$)*



*График сопротивления грунта сдвигу
для связных грунтов ($\tau = f(\sigma)$)*



$$P_e = \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi}$$

Закон Кулона для несвязных грунтов

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Сопротивление несвязных грунтов срезам есть сопротивление трению, пропорциональное нормальным давлениям.

Закон Кулона для связных грунтов

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$$

Сопротивление связных грунтов срезам есть функция первой степени от нормальных давлений.

Методы определения
прочностных показателей грунта

(φ, c)

(самостоятельно)

1. Метод одноплоскостного среза

2. Стабилометрические испытания

3. Сдвиг целиков грунта

4. Испытания грунтов крыльчаткой

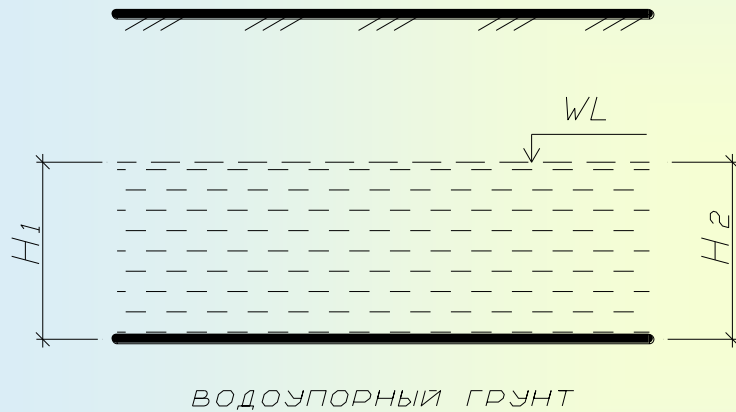
5. Статическое и динамическое зондирование

Водопроницаемость грунтов.

Закон фильтрации

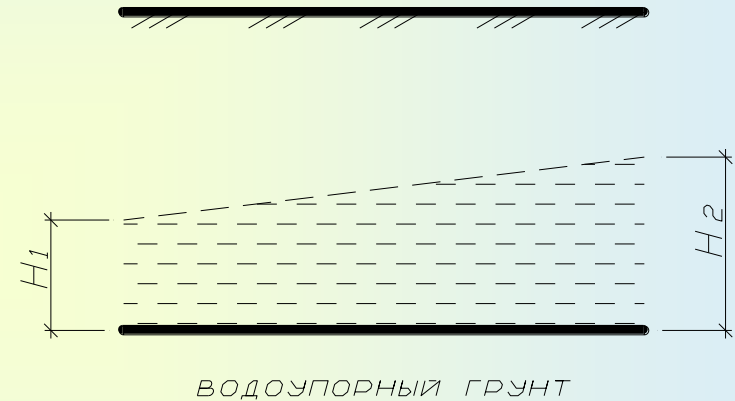
Фильтрацией называется движение свободной воды в порах грунта в условиях, когда поток воды почти полностью заполняет поры грунта.

Фильтрация воды становится возможной только при создании разницы напоров.



$$H_1 = H_2$$

*фильтрация
не возможна*



$$H_1 < H_2$$

*фильтрация
возможна*

Опытами установлено, что движение воды в грунте с достаточной для практических целей точностью можно считать параллельноструйной, т.е. ламинарной.

Закон ламинарной фильтрации

(закон Дарси)

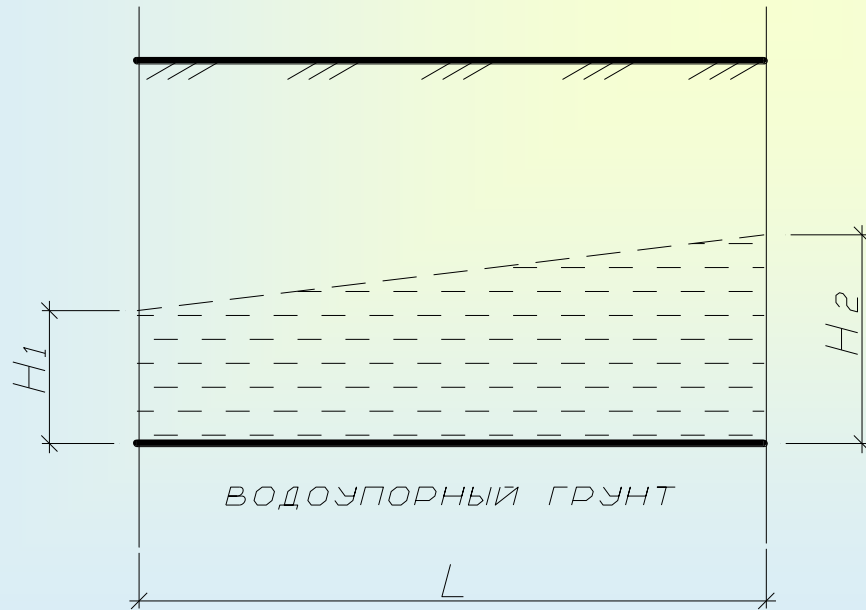
$$v = k_{\phi} \cdot I$$

Скорость фильтрации прямопропорциональна гидравлическому градиенту напора.

v – скорость фильтрации;

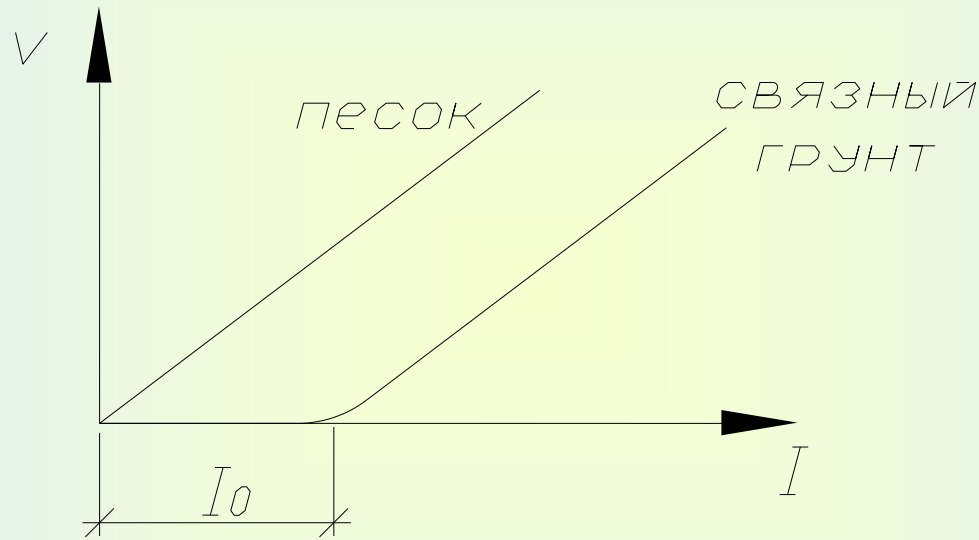
k_f – коэффициент фильтрации, равен скорости фильтрации при $I = 1$;

I – гидравлический градиент напора равный потере напора на отрезке пути фильтрации



$$I = \frac{H_1 - H_2}{L}$$

Зависимость скорости фильтрации от гидравлического градиента напора



I_0 — начальный гидравлический градиент напора, при достижении которого начинается фильтрация воды в грунте

*Закон ламинарной фильтрации
для связных грунтов*

$$v = k_{\phi} \cdot (I - I_0)$$

Коэффициент фильтрации изменяется в широких пределах:

для песка: $k_{\phi} = 1 \cdot 10^{-2}$ см/с

для глины: $k_{\phi} = 1 \cdot 10^{-8}$ см/с

Методы определения
коэффициента фильтрации
 (k_{ϕ}) (самостоятельно)

1. Лабораторный метод

2. Полевой метод

(для расчета притока воды в котловане)

– метод пробных откачек из скважин

(ниже УГВ);

– метод заполнения скважин водой

(выше УГВ).

**Теория
распределения напряжений
в грунтовом массиве**

Для определения напряжений в грунтовом массиве используется теория линейно – деформируемых тел.

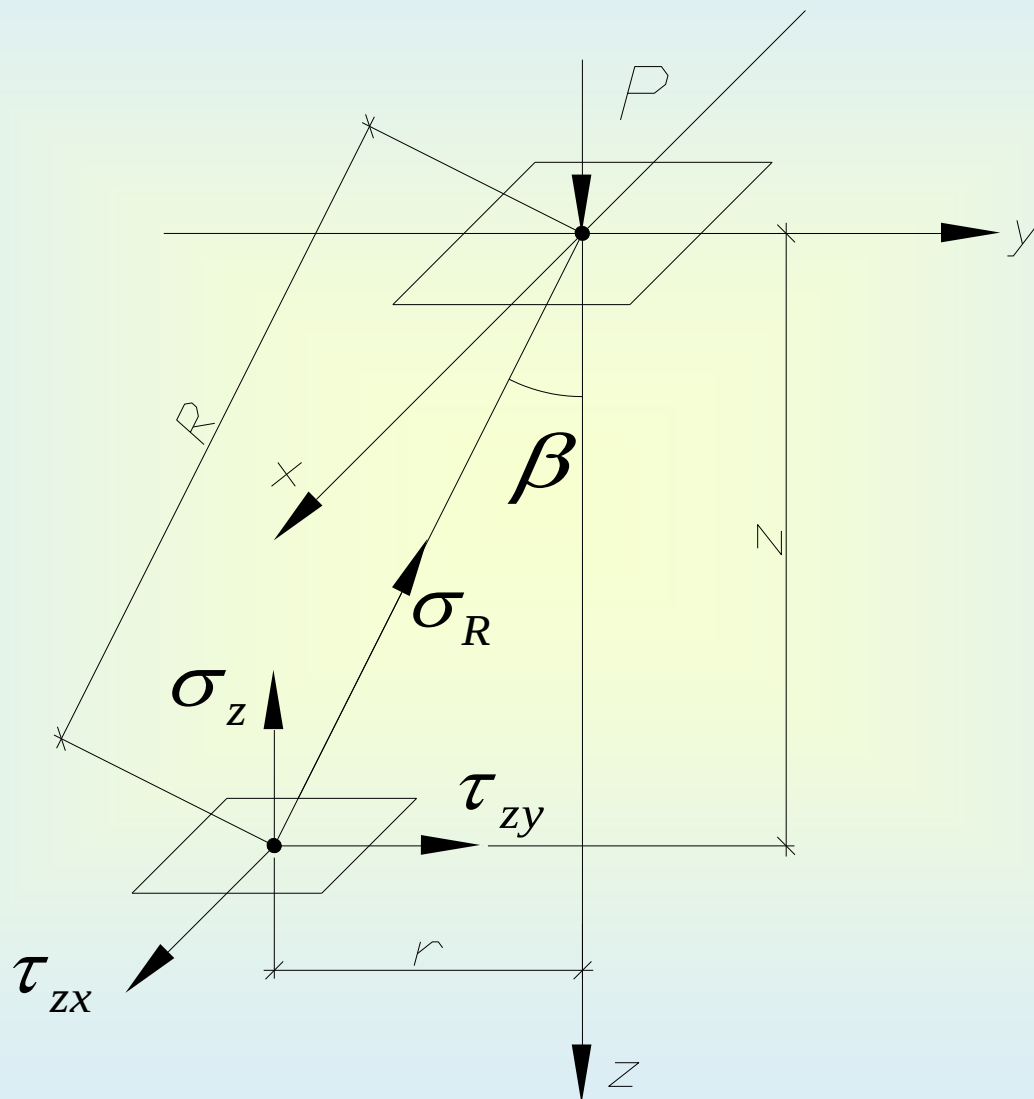
В механике грунтов для определения напряжений от внешних нагрузок используются решения следующих задач:

- 1. Задача Ж.Буссинеска (1885 год).*
- 2. Задача А.Лява (1935 год).*
- 3. Задача Фламана (1892 год).*

Предпосылки,
принятые при решении задач:

- 1. Среда линейно-деформируемая.*
- 2. Силы действуют на поверхность упругого полупространства.*
- 3. Среда однородна и изотропна.*
- 4. Собственный вес грунта в решениях задач не учитывается.*
- 5. Напряжения рассматриваются после стабилизации деформаций.*

1. Задача Ж.Буссинеска (1885 год)



Как постулат принимается:

$$\sigma_R = B \cdot \frac{\cos \beta}{R^2},$$

$$B = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi},$$

где σ_R — равнодействующая,

R — расстояние от рассматриваемой точки до точки приложения силы,

B — коэффициент, получаемый из условия равновесия.

Разложив σ_R на площадки, параллельные координатным осям:

$$\sigma_z = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi} \cdot \frac{z^3}{R^5},$$

$$\tau_{zx} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi} \cdot \frac{x \cdot z^2}{R^5},$$

$$\tau_{zy} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi} \cdot \frac{y \cdot z^2}{R^5}$$

Для применения в практике используются :

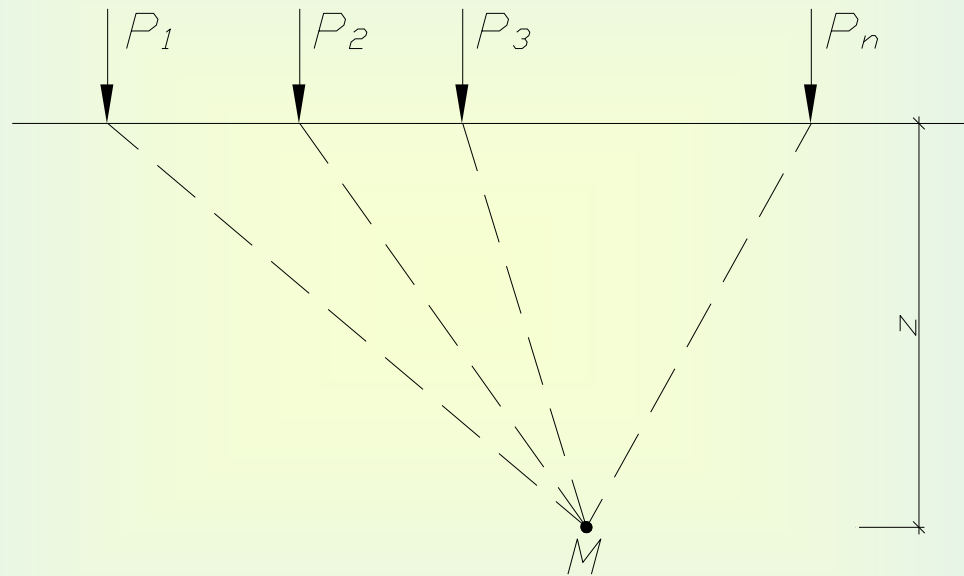
$$\sigma_z = K_z \cdot \frac{P}{z^2},$$

$$\tau_{zx} = K_{zx} \cdot \frac{P}{z^2},$$

$$\tau_{zy} = K_{zy} \cdot \frac{P}{z^2},$$

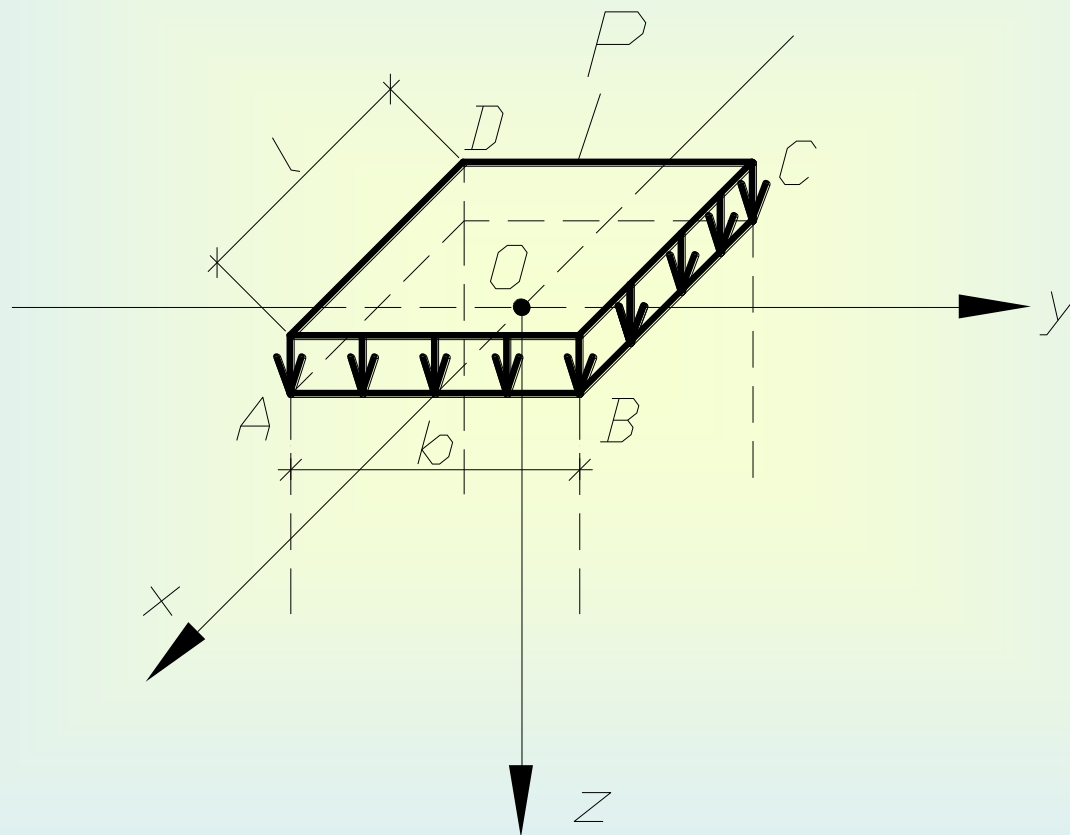
где K_z , K_{zx} , K_{zy} – коэффициенты влияния, определяемые по таблицам в зависимости от соотношения r к z

Для определения напряжений от действия нескольких сосредоточенных сил:



$$\sigma_z = K_{z1} \cdot \frac{P_1}{z^2} + K_{z2} \cdot \frac{P_2}{z^2} + \dots + K_{zn} \cdot \frac{P_n}{z^2}$$

2. Задача А.Лява (1935 год)



Например, для точек, лежащих на перпендикуляре к плоскости загрузки в т.А

$$\sigma_{z,A} = \frac{P}{2\pi} \left[\frac{b \cdot l \cdot z}{D} \cdot \frac{l^2 + b^2 + 2 \cdot z^2}{D^2 \cdot z^2 + l^2 \cdot b^2} + \arcsin \left(\frac{l \cdot b}{\left(\sqrt{l^2 + z^2} \right) \cdot \left(\sqrt{b^2 + z^2} \right)} \right) \right],$$

где l, b – размеры площади загрузки в плане;

D – величина, определяемая по формуле

$$D = l^2 + b^2 + z^2$$

или

$$\sigma_{z,A} = K_{z,A} \cdot P,$$

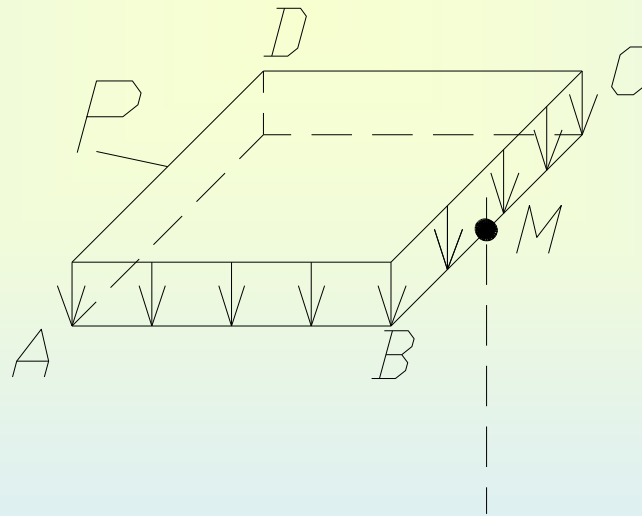
Аналогично, для точек, лежащих на перпендикуляре к плоскости загрузки в т.О:

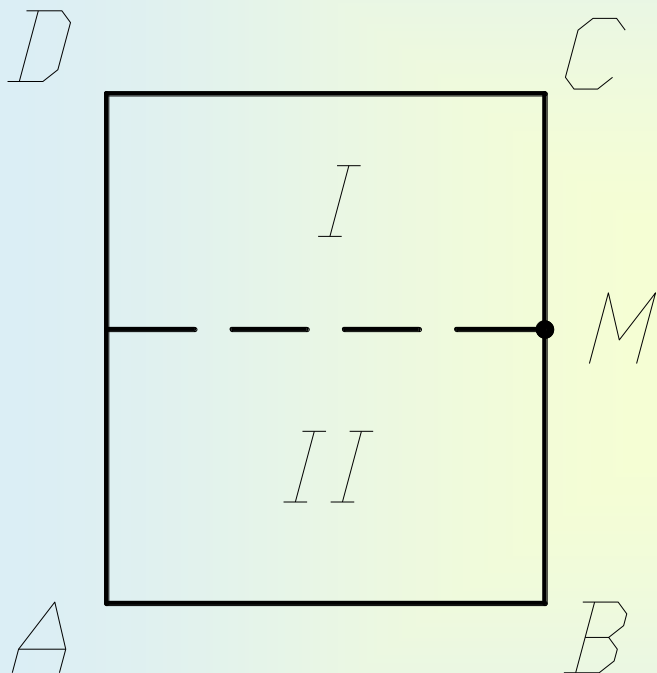
$$\sigma_{z,o} = K_{z,o} \cdot P,$$

где K_z – коэффициент влияния напряжений, определяемый по таблицам в зависимости от соотношений l к b и z к b .

Метод угловых точек

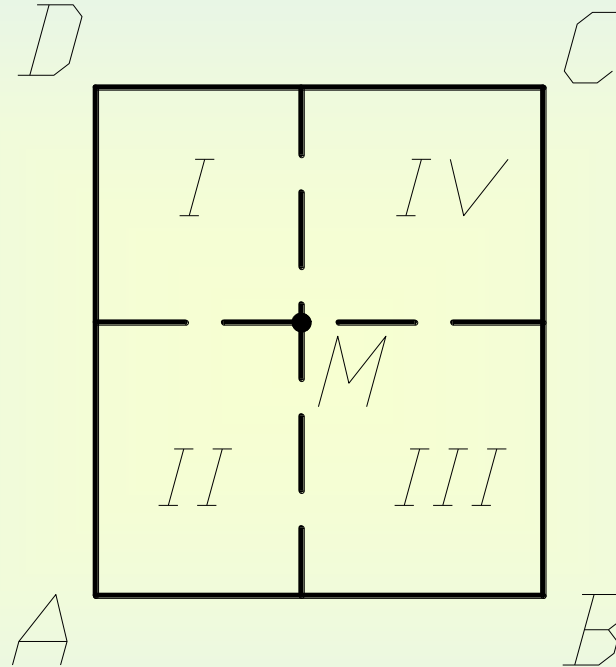
1 случай (вертикаль проходит через т.М, лежащую на контуре площади загрузки)





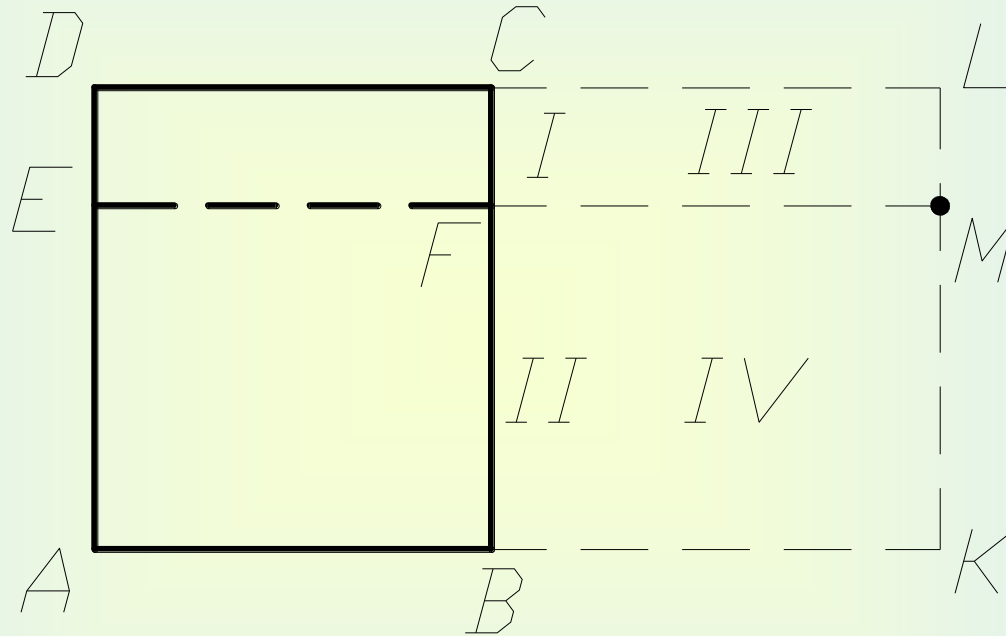
$$\sigma_{z,M} = (K_{z,I} + K_{z,II}) \cdot P$$

2 случай (т.М лежит внутри контура площади загруз-
жения)



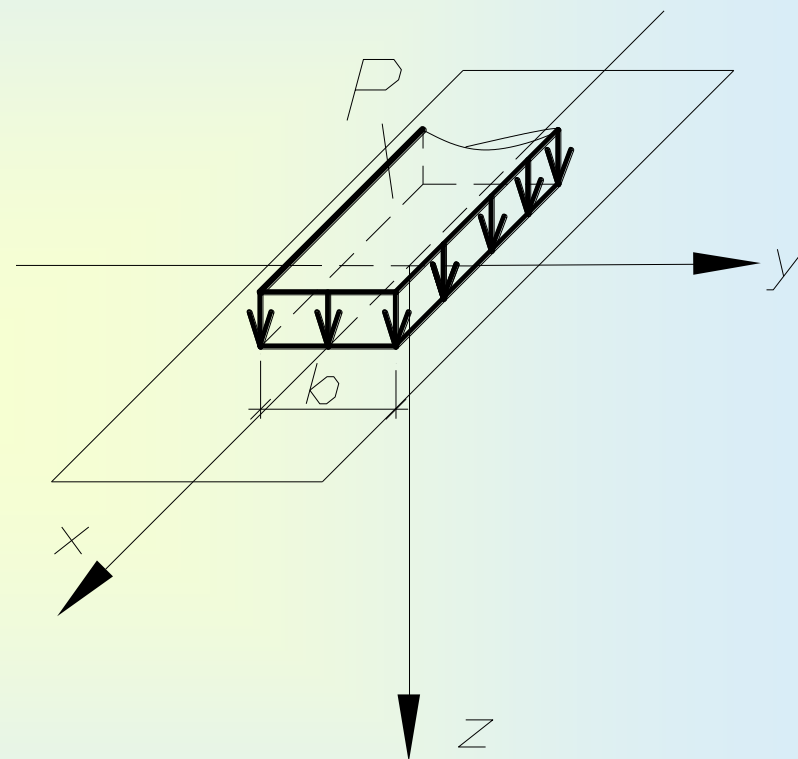
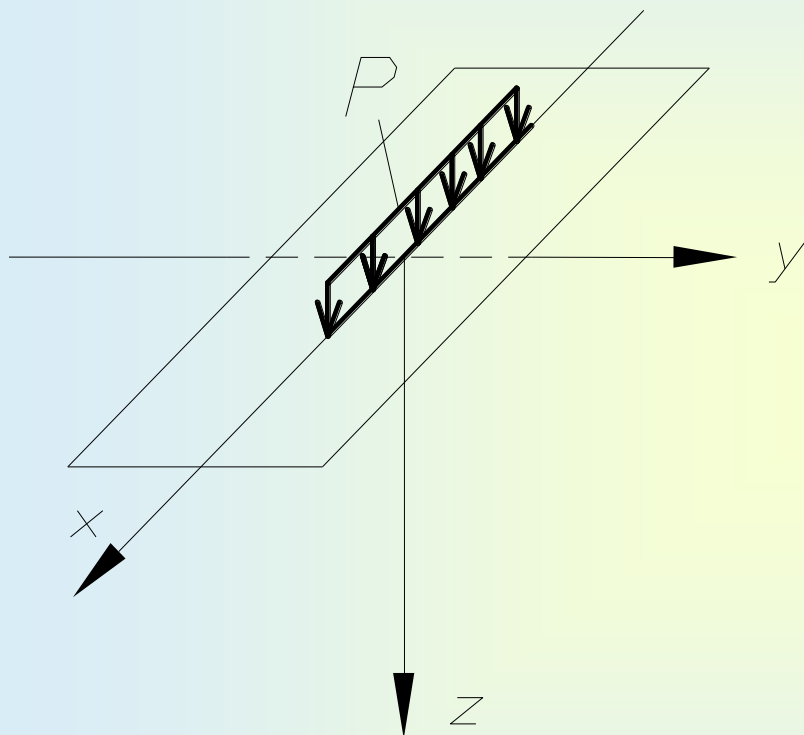
$$\sigma_{z,M} = (K_{z,I} + K_{z,II} + K_{z,III} + K_{z,IV}) \cdot P$$

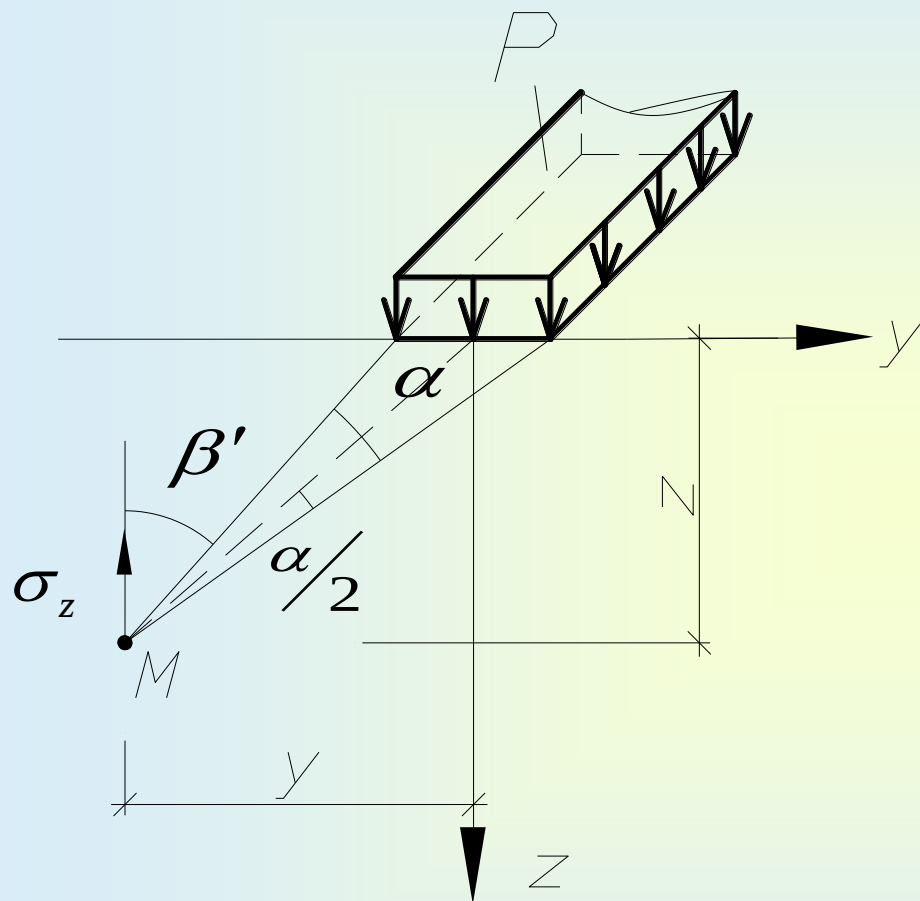
3 случай (т.М лежит вне контура площади загрузки)



$$\sigma_{z,M} = (K_{z,I} + K_{z,II} - K_{z,III} - K_{z,IV}) \cdot P$$

3. Задача Фламана (1892 год)





$$\sigma_z = \frac{P}{\pi} (\alpha + \sin \alpha \cdot \cos 2 \cdot \beta),$$

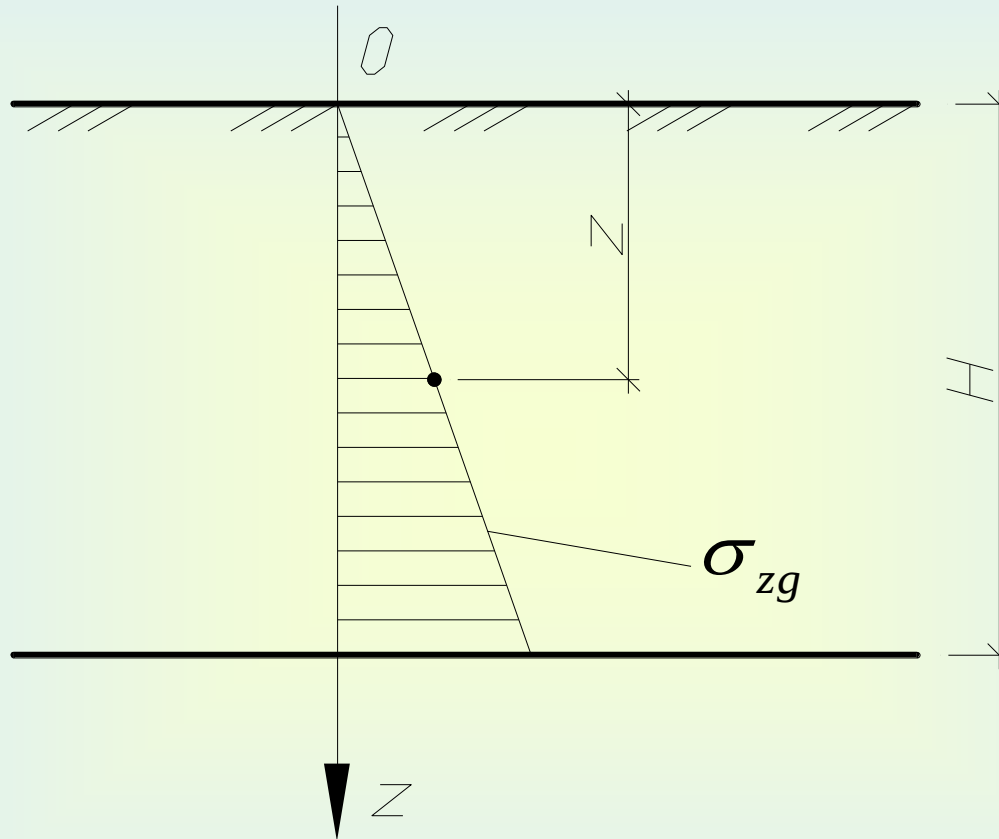
$$\beta = \frac{\alpha}{2} + \beta'$$

Напряжения
от собственного веса грунта

$$\sigma_{zg} = \gamma \cdot Z,$$

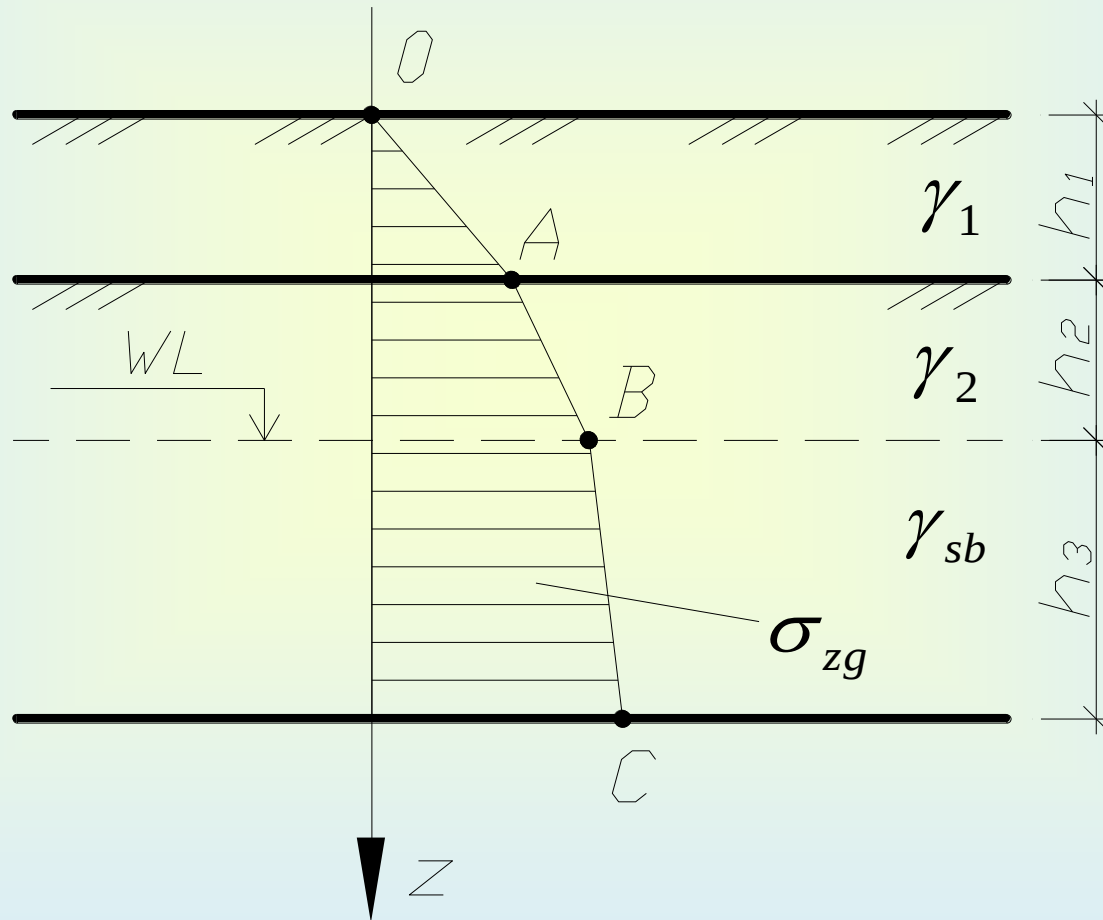
где z – глубина расположения рассматриваемой точки,
 γ – удельный вес грунта

1 случай – при однородном напластовании грунта



$$\sigma_{zg} = \gamma \cdot z$$

**2 случай – при неоднородном напластовании грунта и
наличии грунтовых вод**



m. O:

$$\sigma_{zg,O} = 0$$

m. A:

$$\sigma_{zg,A} = \gamma_1 \cdot h_1$$

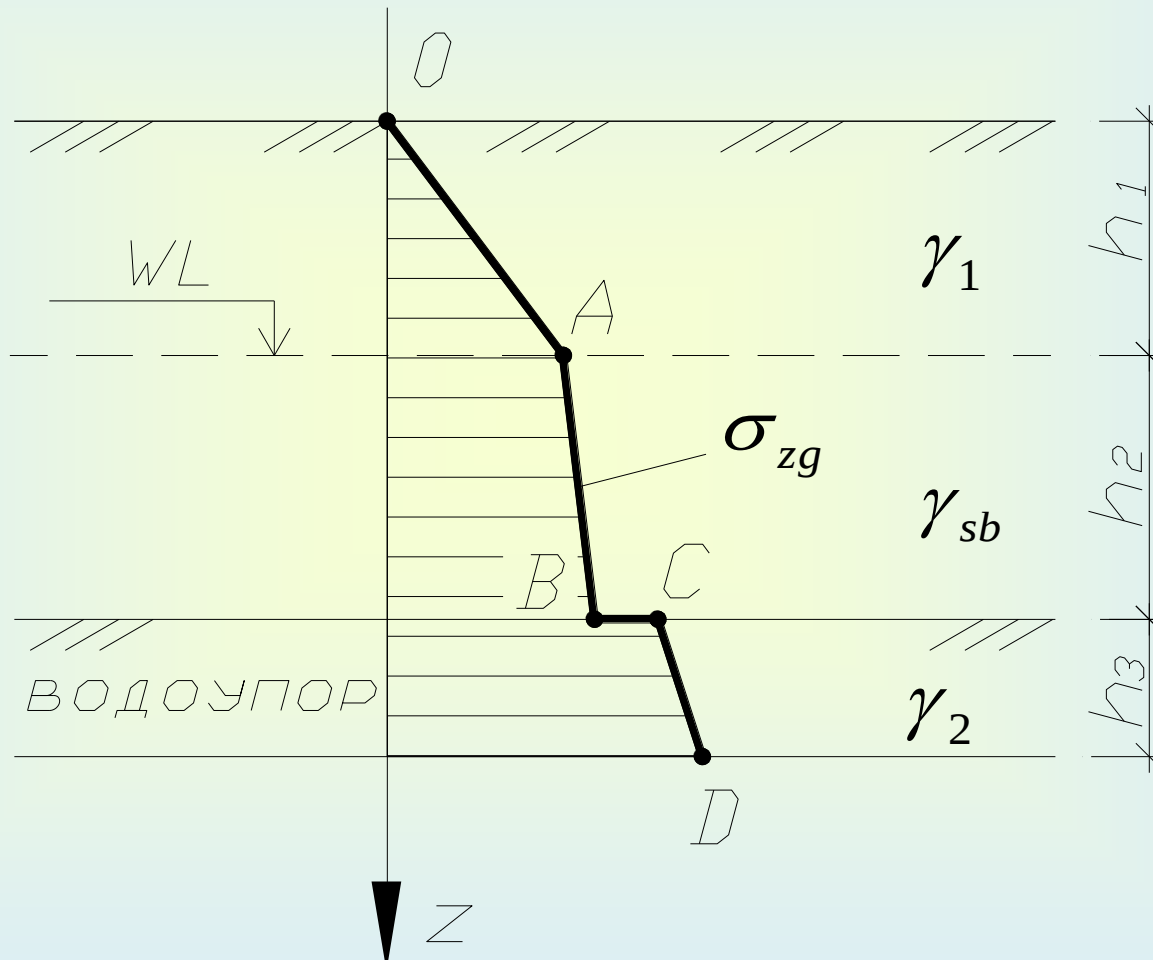
m. B:

$$\sigma_{zg,B} = \sigma_{zg,A} + \gamma_2 \cdot h_2$$

m. C:

$$\sigma_{zg,C} = \sigma_{zg,B} + \gamma_{sb} \cdot h_3$$

3 случай – при наличии водоупорного слоя грунта



т. О:

$$\sigma_{zg,O} = 0$$

т. А:

$$\sigma_{zg,A} = \gamma_1 \cdot h_1$$

т. В (чуть выше водоупора):

$$\sigma_{zg,B} = \sigma_{zg,A} + \gamma_{sb} \cdot h_2$$

т. С (на водоупоре):

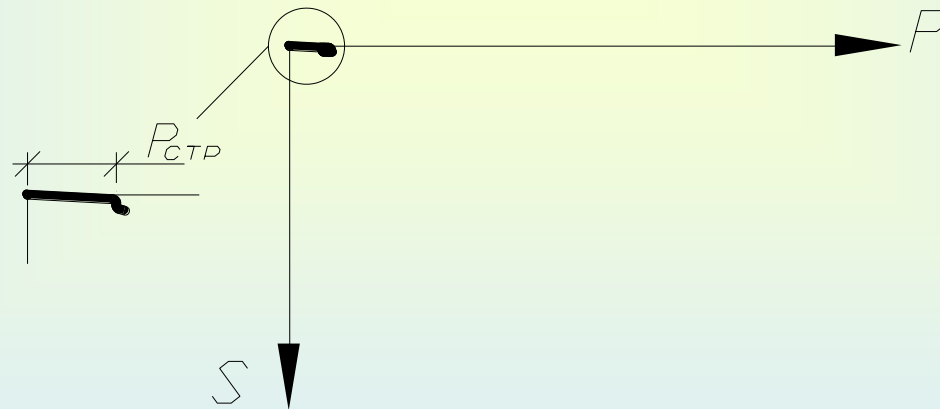
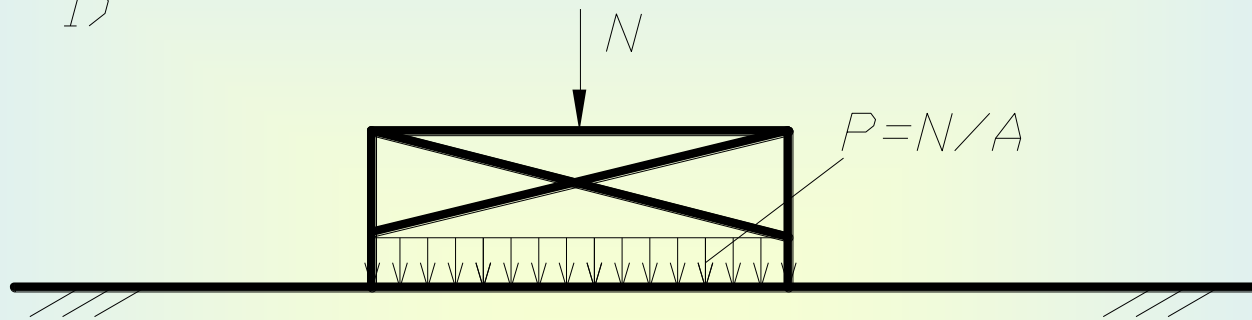
$$\sigma_{zg,C} = \sigma_{zg,B} + \gamma_w \cdot h_3$$

**Теория
предельного напряженного состояния
(предельного равновесия)
грунтов**

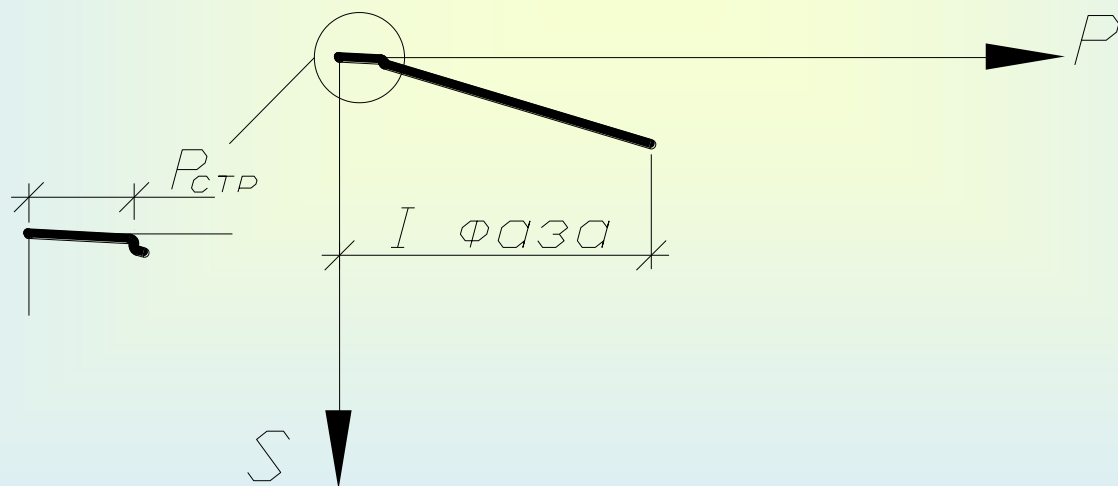
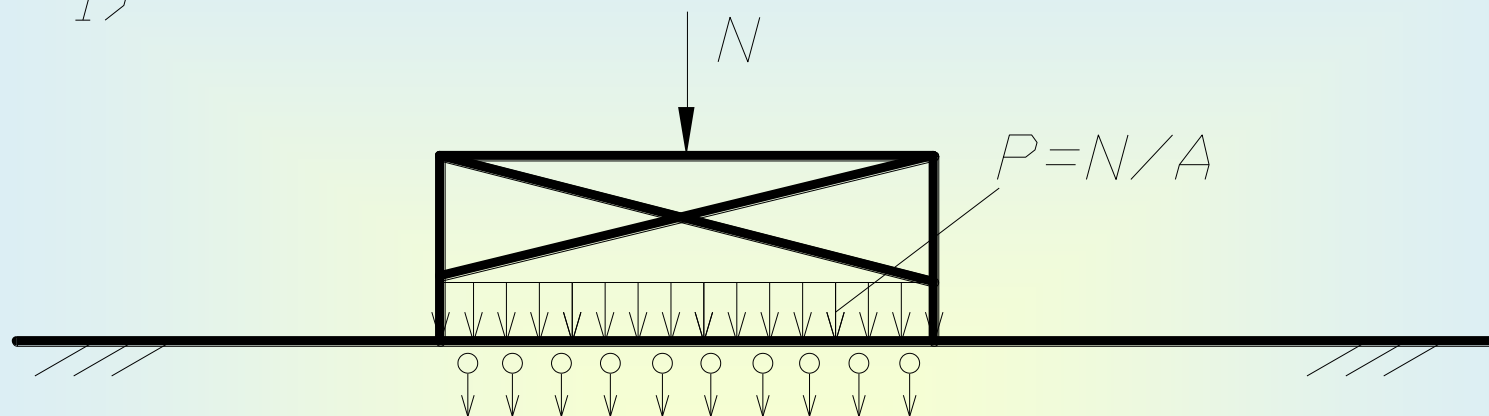
Напряженное состояние в любой точке грунтового массива считается предельным, если малейшее силовое воздействие нарушает существующее равновесие и приводит грунт в неустойчивое состояние (образование поверхностей скольжения, разрывы, выпоры и т.п.)

Фазы напряженного состояния грунта

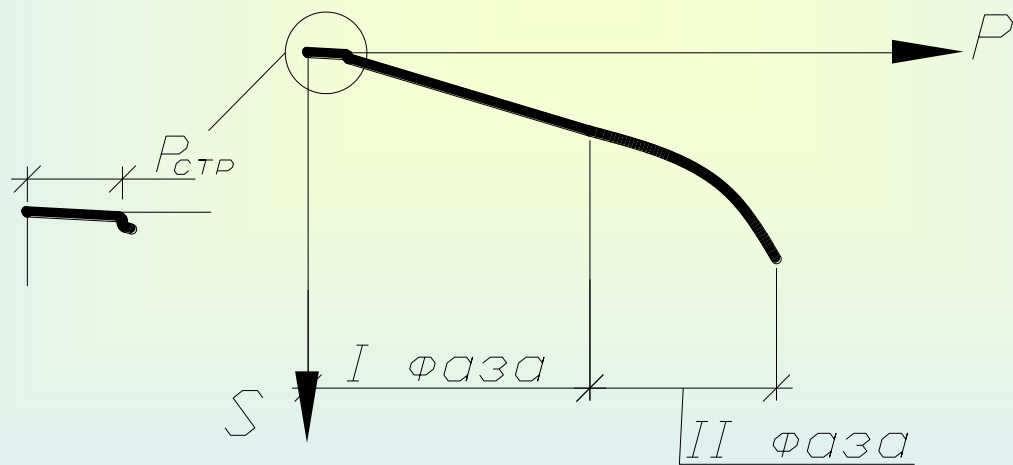
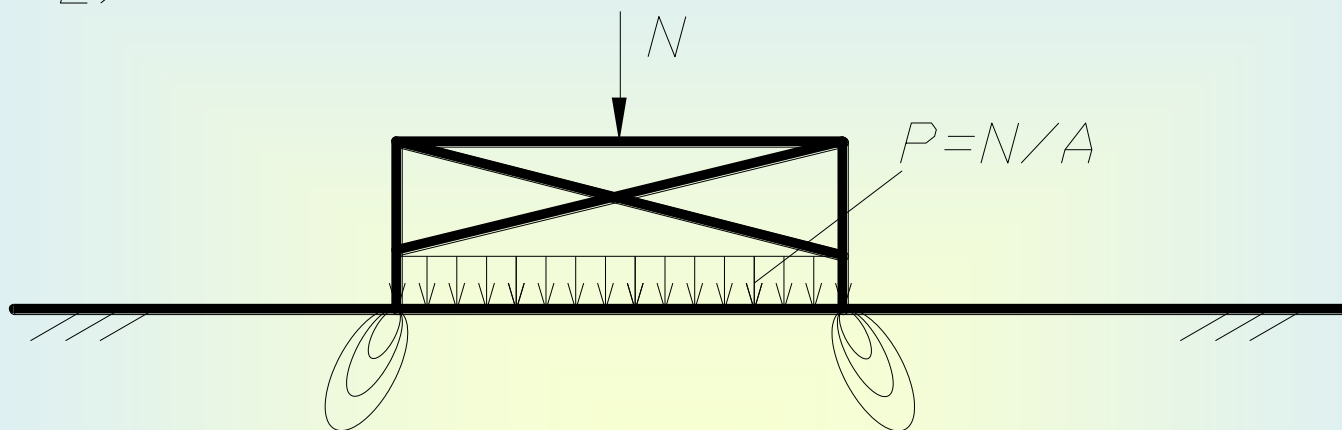
1)



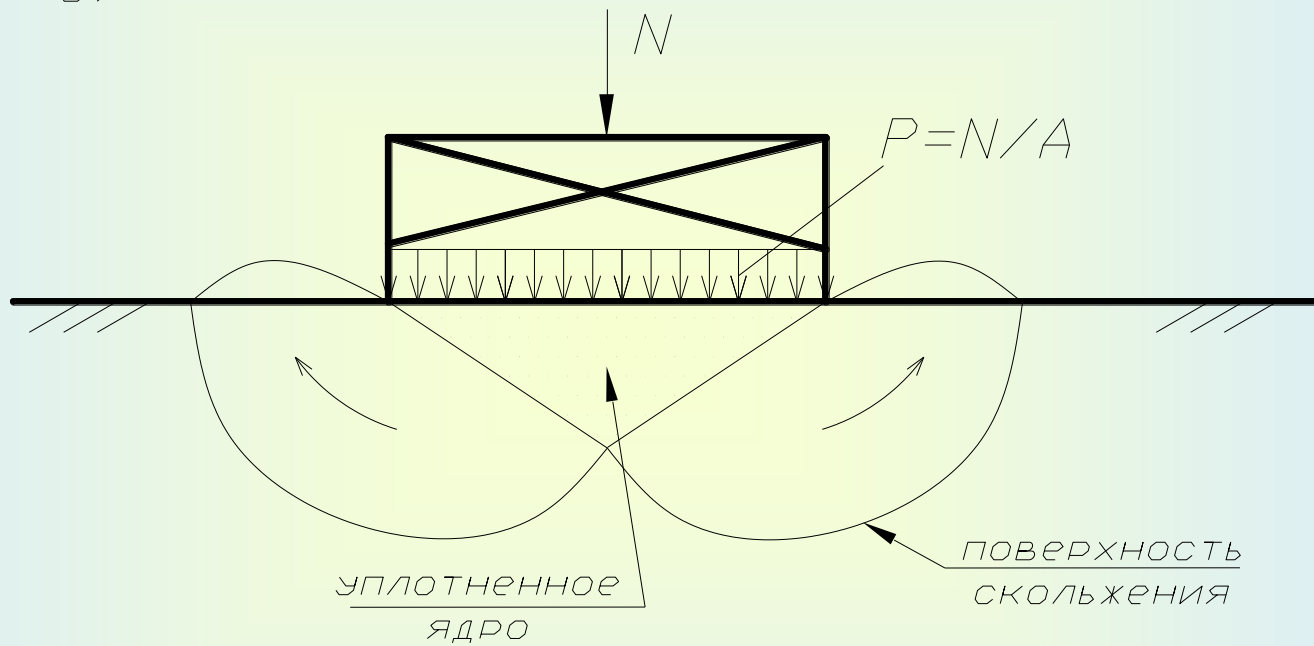
1)

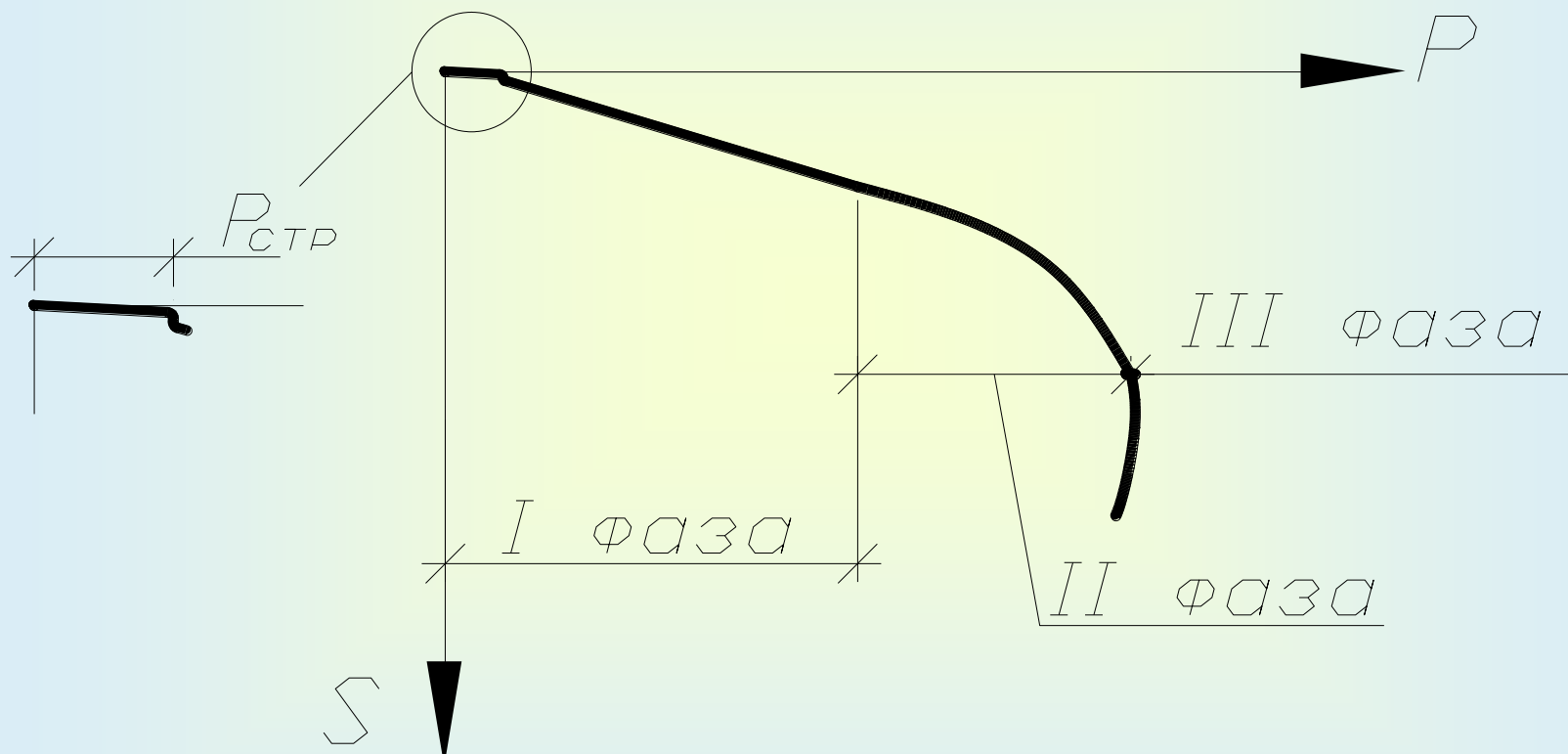


2)



3)

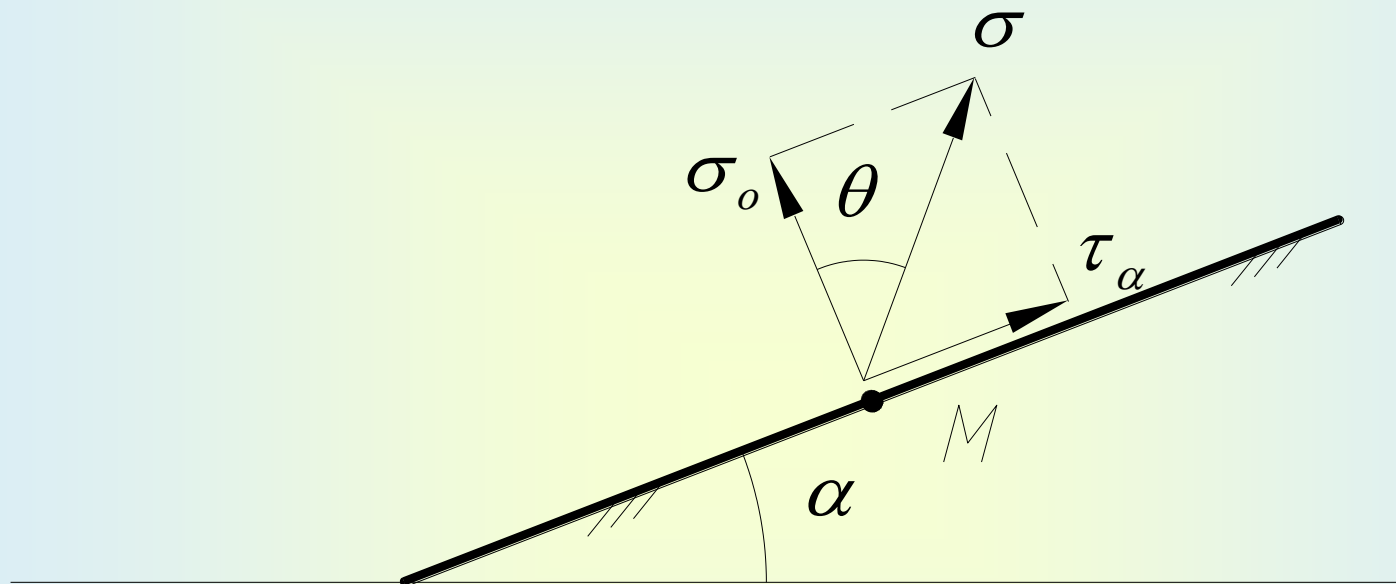




Условия

предельного напряженного состояния (равновесия)

грунтов



$$\sigma_o = \sigma_\alpha + P_e,$$

где σ_o – общие нормальные напряжения в точке (с учетом сил связности);

σ_α – нормальные напряжения без учета сил связности;

P_e – силы связности;

τ_α – касательные напряжения

общая запись условия предельного равновесия

$$\tau_{\alpha} = f \cdot (\sigma_{\alpha} + P_e),$$

где f – коэффициент внутреннего трения

$$f = \operatorname{tg} \varphi$$

Частные случаи уравнений предельного равновесия

1. По результатам одноплоскостного сдвига

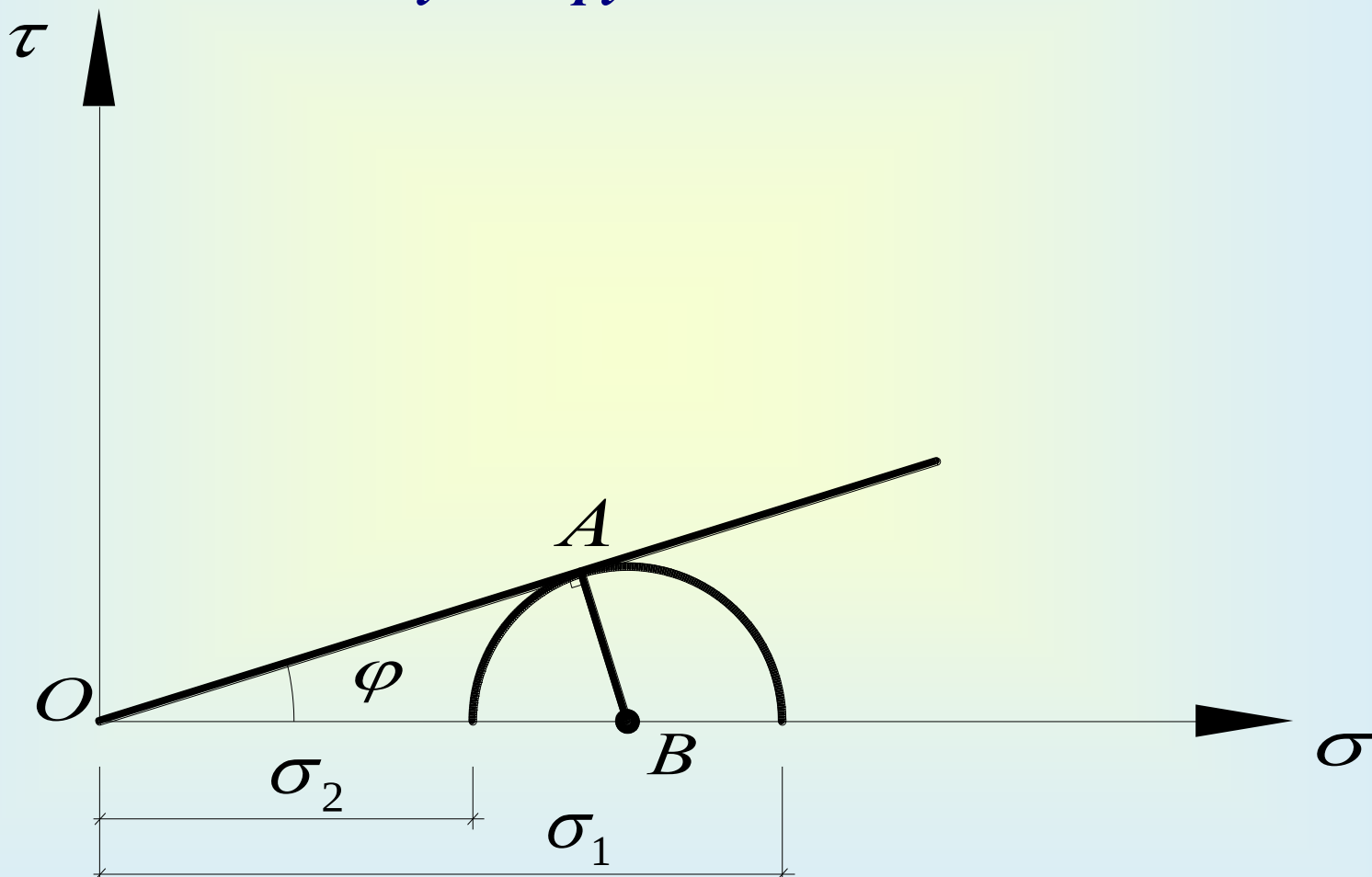
(закон Кулона)

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (\text{для сыпучих грунтов})$$

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (\text{для связных грунтов})$$

2. По результатам стабилόμεтрических испытаний грунтов

– для сыпучих грунтов:



σ_1, σ_2 – главные напряжения,

φ – угол внутреннего трения

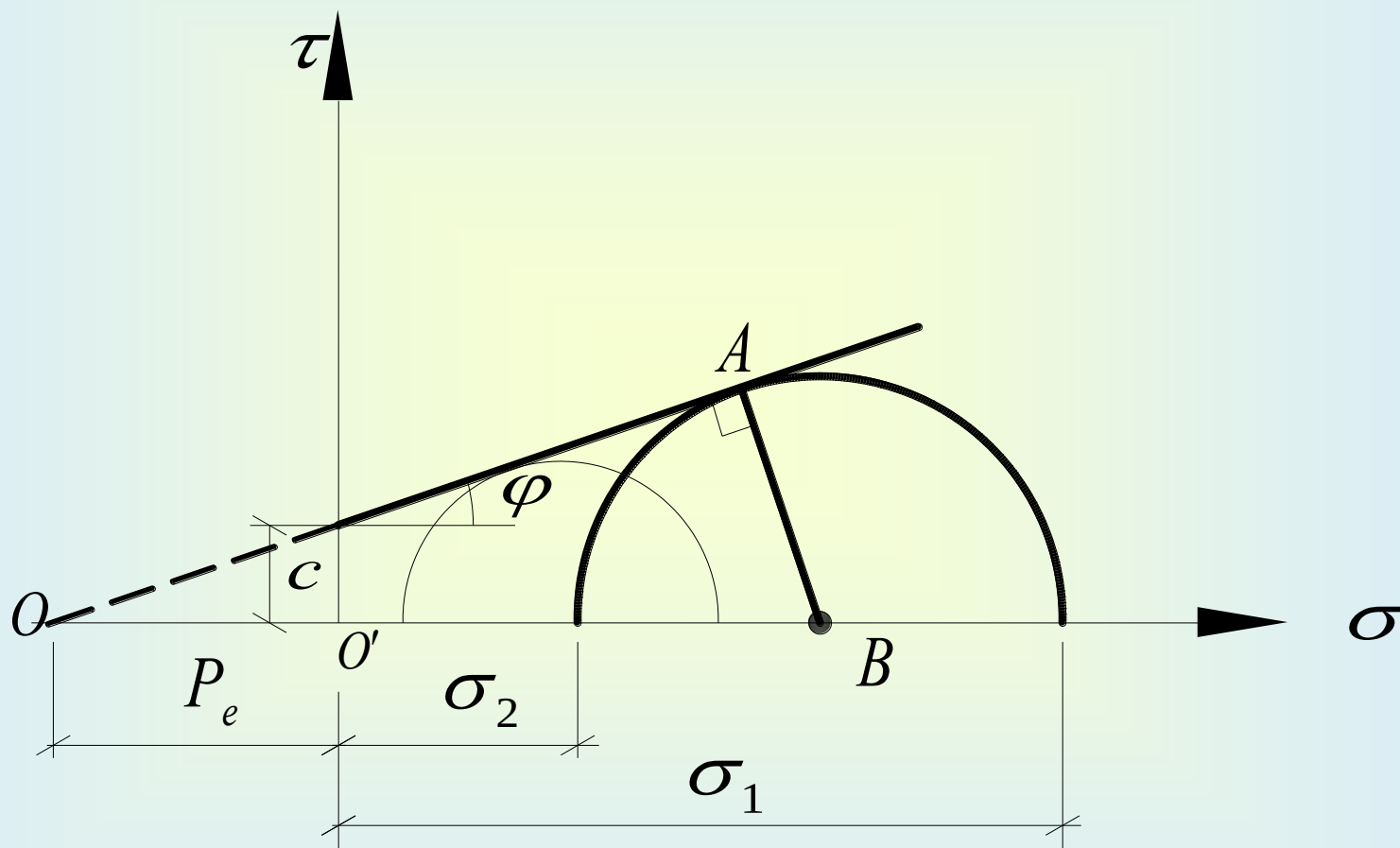
$$\sin \varphi = \frac{AB}{OB} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right) / \left(\sigma_2 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right) \rightarrow$$

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}$$

или

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} \pm \frac{\varphi}{2}\right)$$

– для связных грунтов



$$\sin \varphi = \frac{AB}{OB} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right) / \left(\sigma_2 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} + P_e \right) \rightarrow$$

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2 + 2P_e}$$

Уравнения равновесия:

для сыпучих грунтов

$$\tau \leq \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

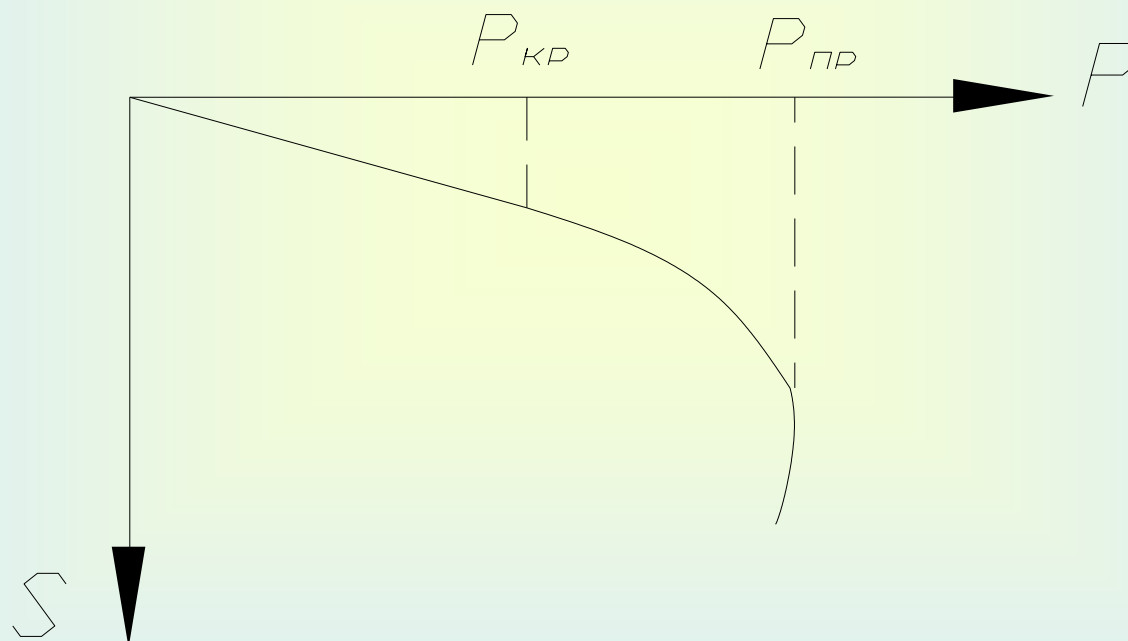
$$\sin \varphi \leq \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}$$

для связных грунтов

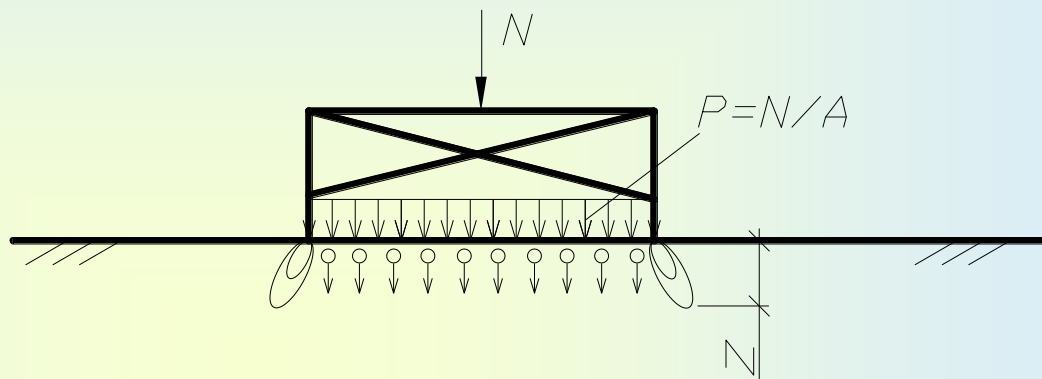
$$\tau \leq \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c,$$

$$\sin \varphi \leq \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2 + 2P_e}$$

Критическая и предельная нагрузки (давления)
на основание



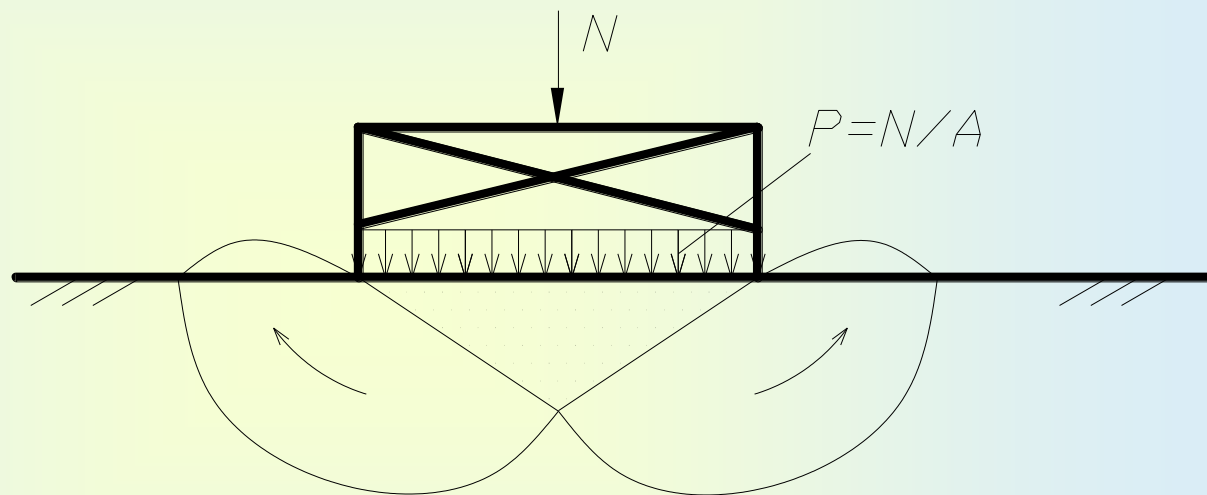
$P_{кр}$
при $z \rightarrow 0$



$P_{кр}$ — критическая нагрузка на основание, соответствует окончанию фазы уплотнения и началу возникновения зон сдвигов в грунте ($z \rightarrow 0$).

На графике — граница I и II фаз.

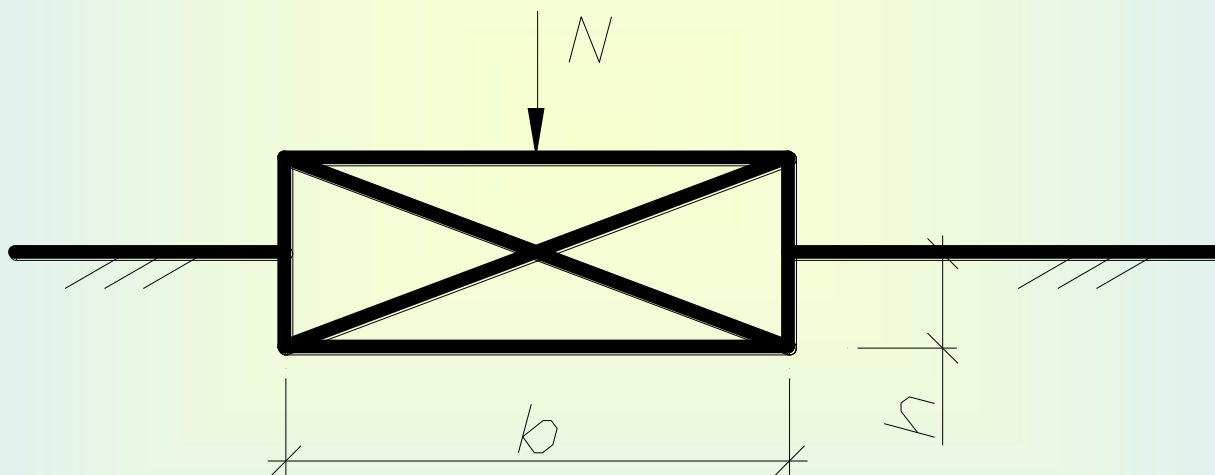
P_{np}



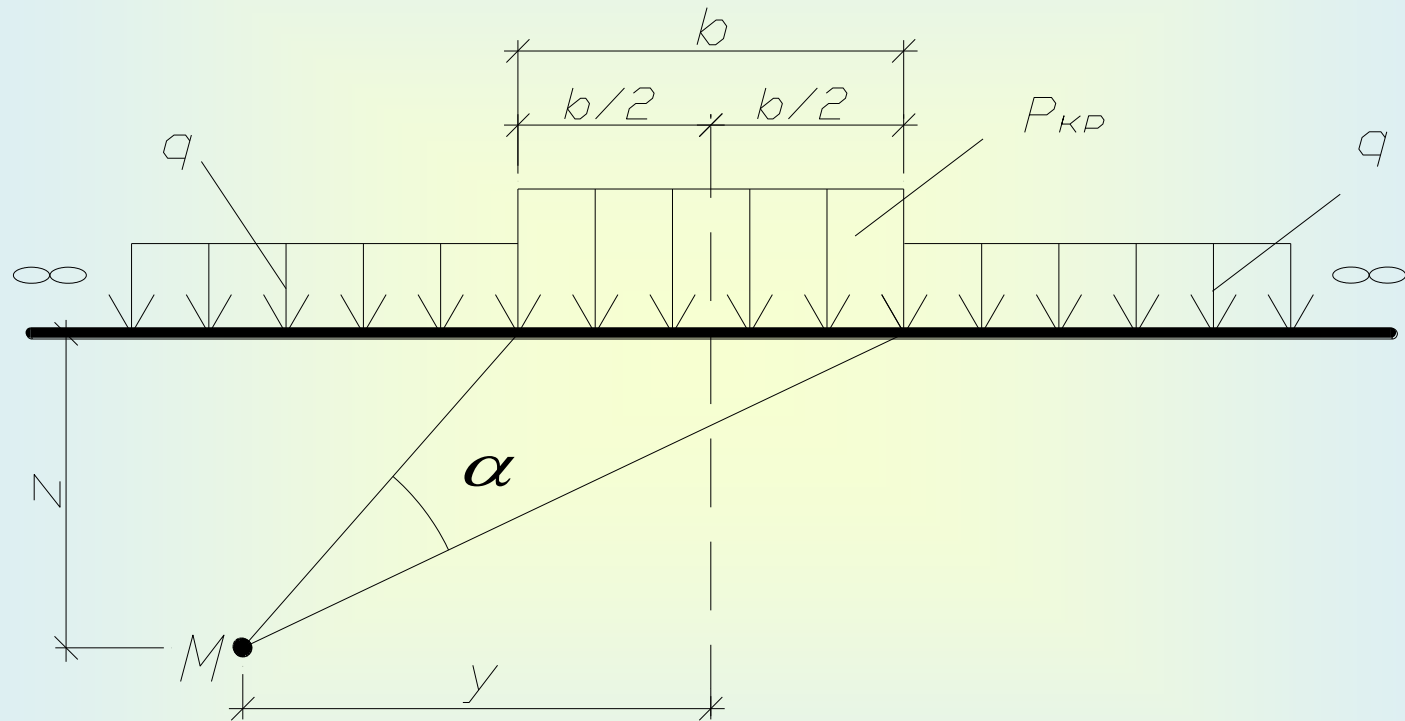
$P_{пр}$ – предельная нагрузка на основание, при которой развиваются зоны пластических деформаций под всей площадью загрузки, полностью исчерпывается несущая способность грунта и происходит разрушение грунта.

На графике – граница II и III фаз (деформации могут увеличиваться без приложения дополнительной нагрузки).

Определение критической нагрузки на основание



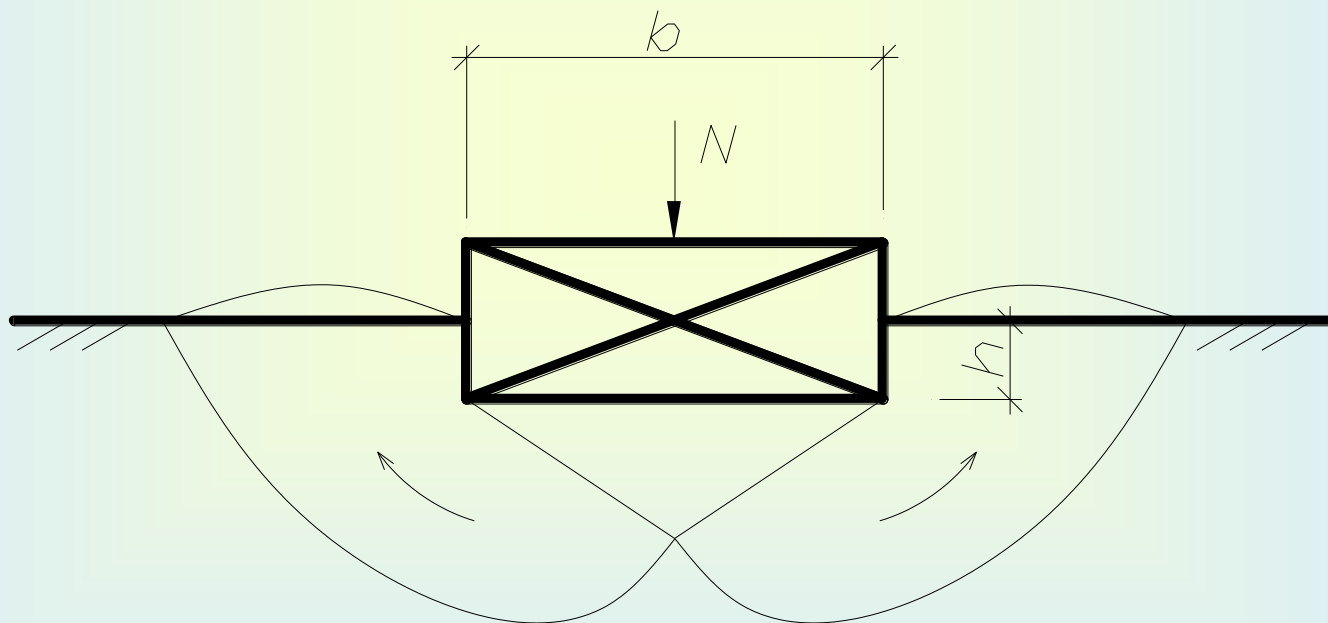
или



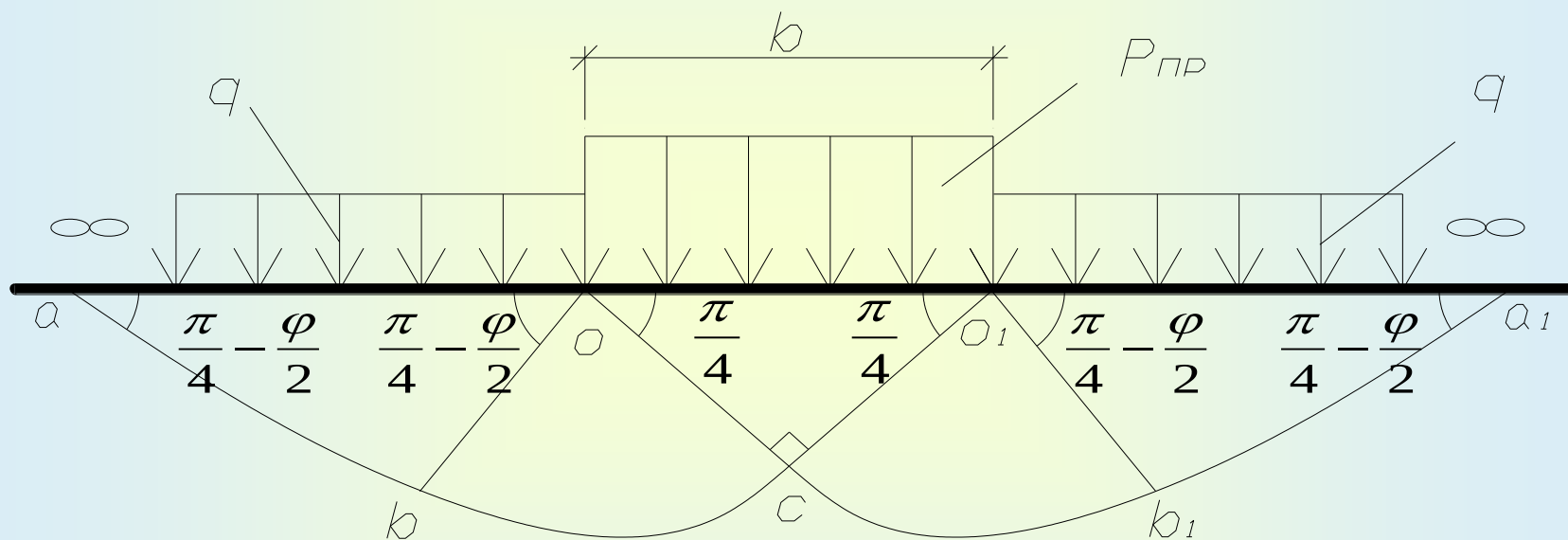
$$P_{\kappa p} = \frac{\pi}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} \cdot (\gamma \cdot z_{\max} + \gamma \cdot h + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi) + \gamma \cdot h,$$

где $z_{\max} \rightarrow 0$

Определение предельной нагрузки на основание



или



Δoco_1

– прямоугольный треугольник,

Δobc и Δo_1b_1c

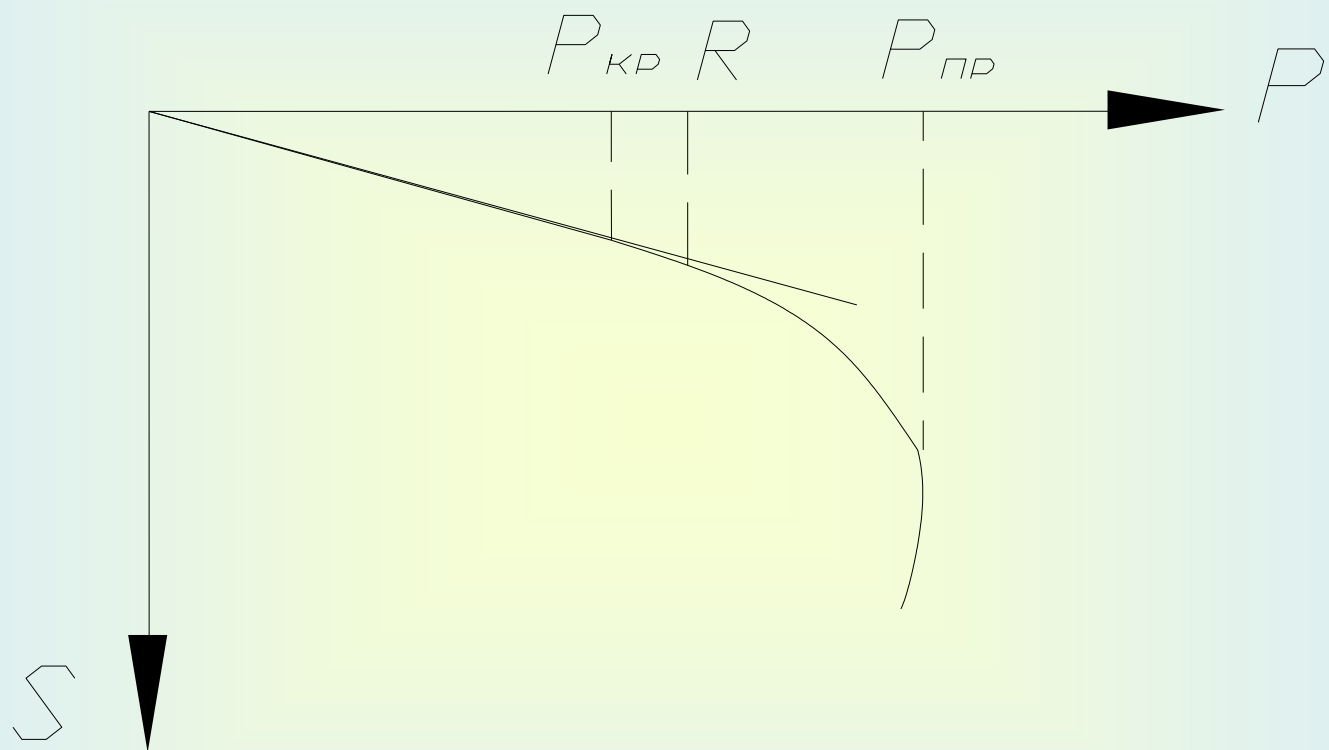
– криволинейные треугольники,

Δabo и $\Delta a_1b_1o_1$

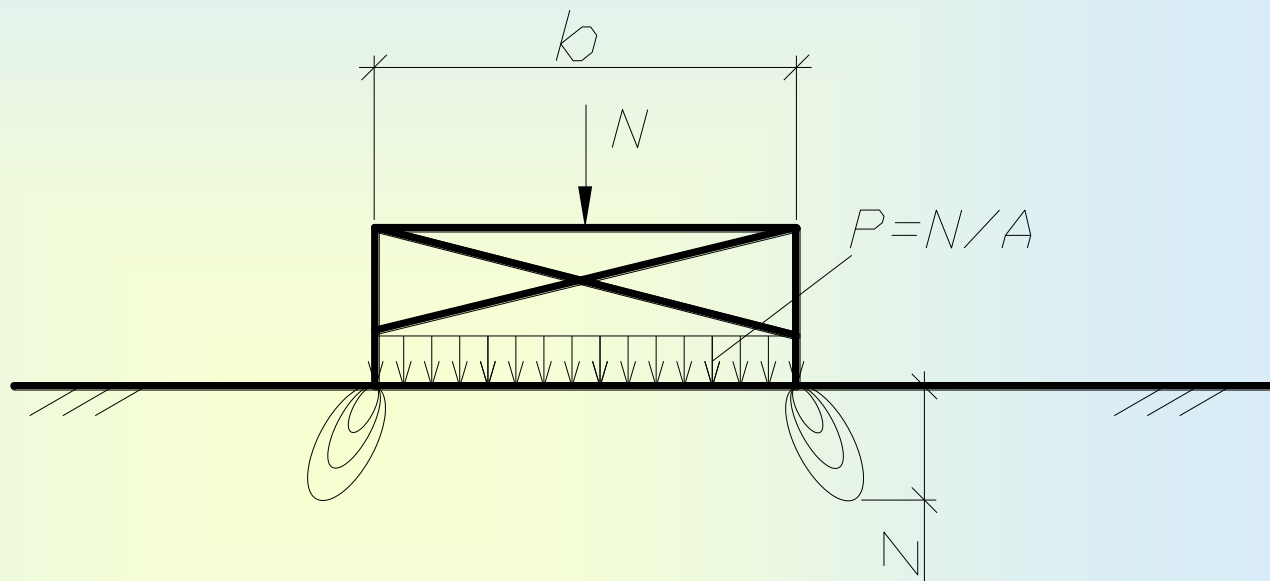
– прямолинейные треугольники

$$P_{np} = N_{\gamma} \cdot \gamma \cdot b_1 + N_q \cdot q + N_c \cdot c,$$

$$b_1 = \frac{b}{2}$$



R
npu z=0,25b



Для практических целей расчета допускается развитие зон пластических деформаций на максимально возможную глубину

$$z = z_{\max} = 0,25 \cdot b,$$

и при этих условиях получена величина R (расчетное сопротивление грунта).

при $z_{\max} = 0,25 \cdot b$ получим

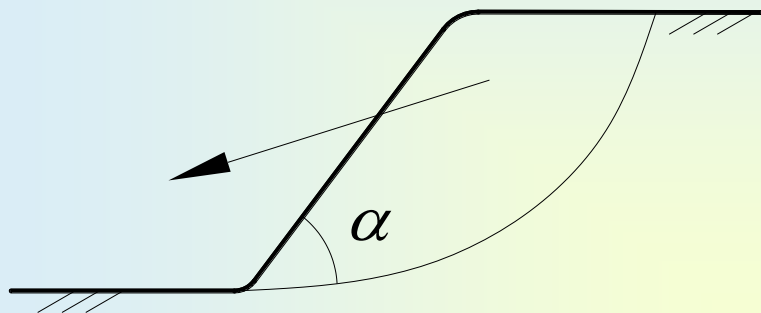
$$R = \frac{\gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2}}{k} \cdot \left[M_{\gamma} \cdot k_z \cdot b \cdot \gamma_{II} + M_q \cdot d \cdot \gamma'_{II} + (M_q - 1) \cdot d_b \cdot \gamma'_{II} + M_c \cdot c_{II} \right]$$

**Понятие
об устойчивости откосов**

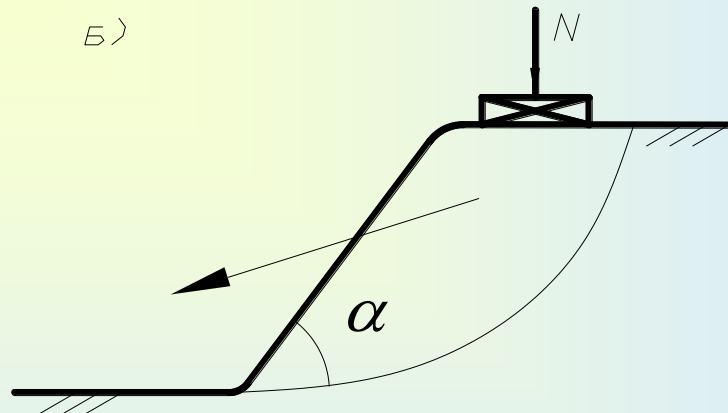
Основной причиной нарушения устойчивости откоса является достижение грунтом предельного равновесия и его превышение.

Нарушение равновесия сопровождается движением больших масс грунта и происходит внезапно.

a)



б)

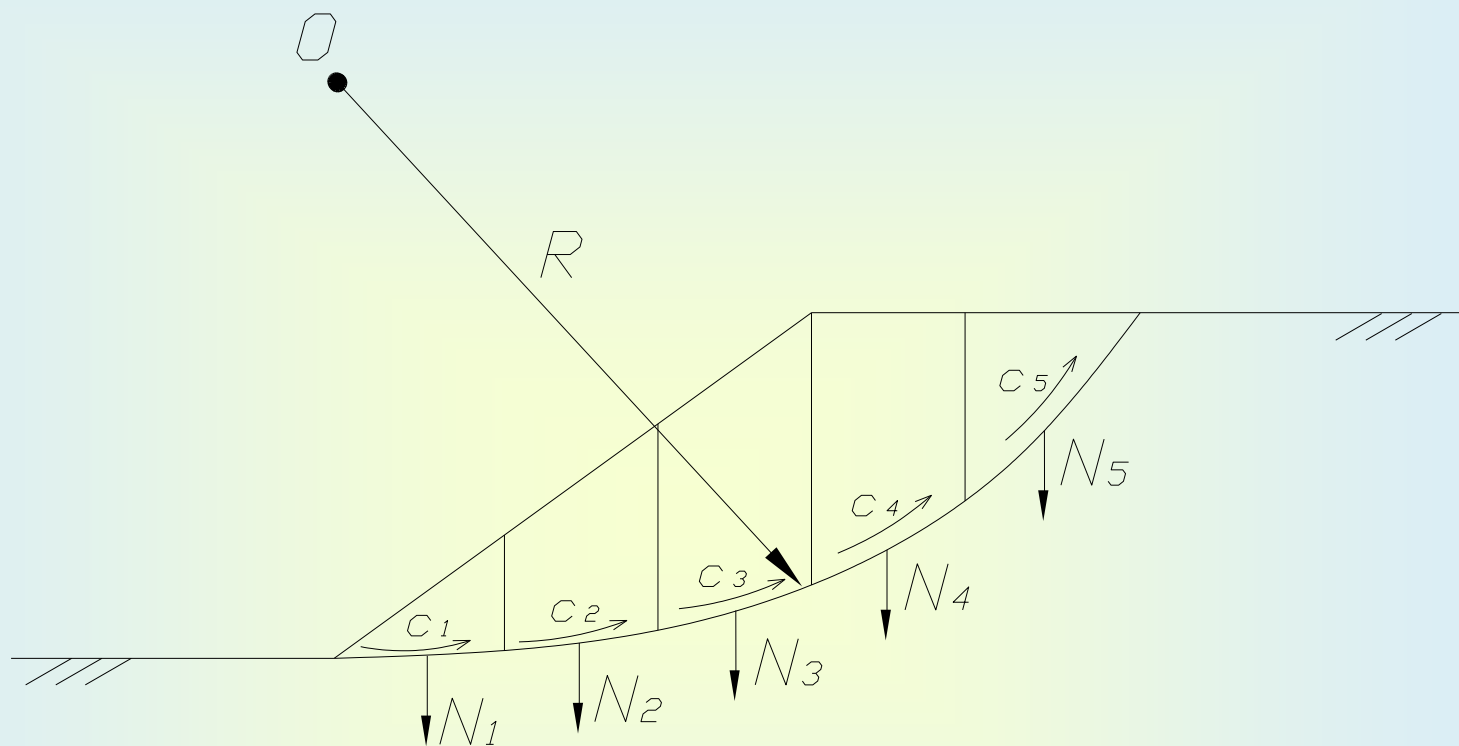


Устойчивость откоса будет обеспечена при назначении такого угла α , при котором не произойдет нарушения его равновесия от внешних нагрузок и собственного веса грунта.

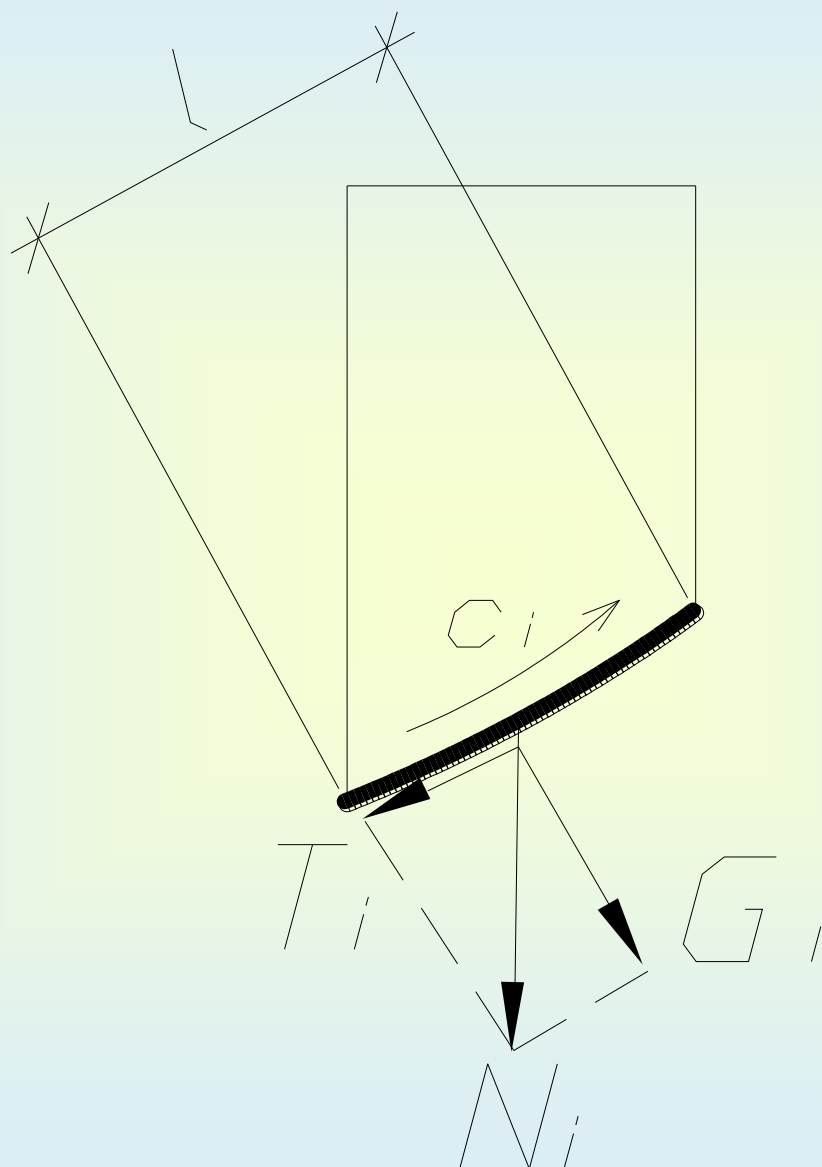
*Метод круглоцилиндрических
поверхностей скольжения*

Метод базируется на экспериментальных данных, что поверхность обрушения (скольжения) может быть принята круглоцилиндрической.

Расчет дает определенный запас прочности.



Откос находится в состоянии предельного равновесия.



c_i – удельные силы сцепления;

l_i – длина дуги выделенного элемента;

N_i – собственный вес выделенного элемента;

T_i – горизонтальная составляющая N_i (сдвигающая);

G_i – вертикальная составляющая N_i (нормальная)

$$\sum M_o = 0;$$

$$\sum T_i \cdot R - \sum G_i \cdot tg\varphi \cdot R - \sum c \cdot l_i \cdot R = 0,$$

$$\sum T_i - \sum G_i \cdot tg\varphi - \sum c \cdot l_i = 0$$

$$k_{ycm} = \frac{\sum M_{y\partial}}{\sum M_{c\partial\partial}};$$

$$k_{ycm} = \frac{\sum G_i \cdot tg\varphi \cdot R + \sum c \cdot l_i \cdot R}{\sum T_i \cdot R} =$$

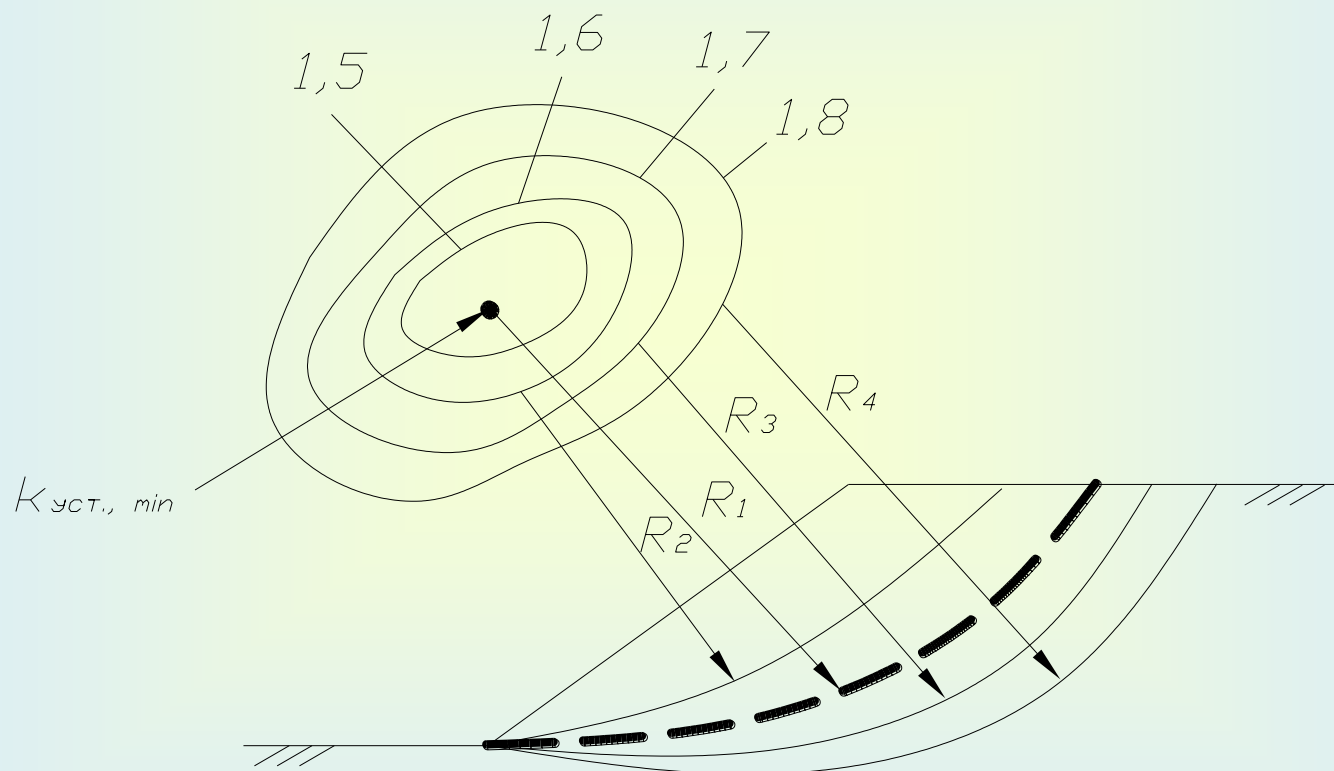
$$= \frac{\sum G_i \cdot tg\varphi + \sum c \cdot l_i}{\sum T_i}$$

если $k_{уст} \geq 1,2$ – откос устойчив;

$k_{уст} < 1,2$ – откос неустойчив

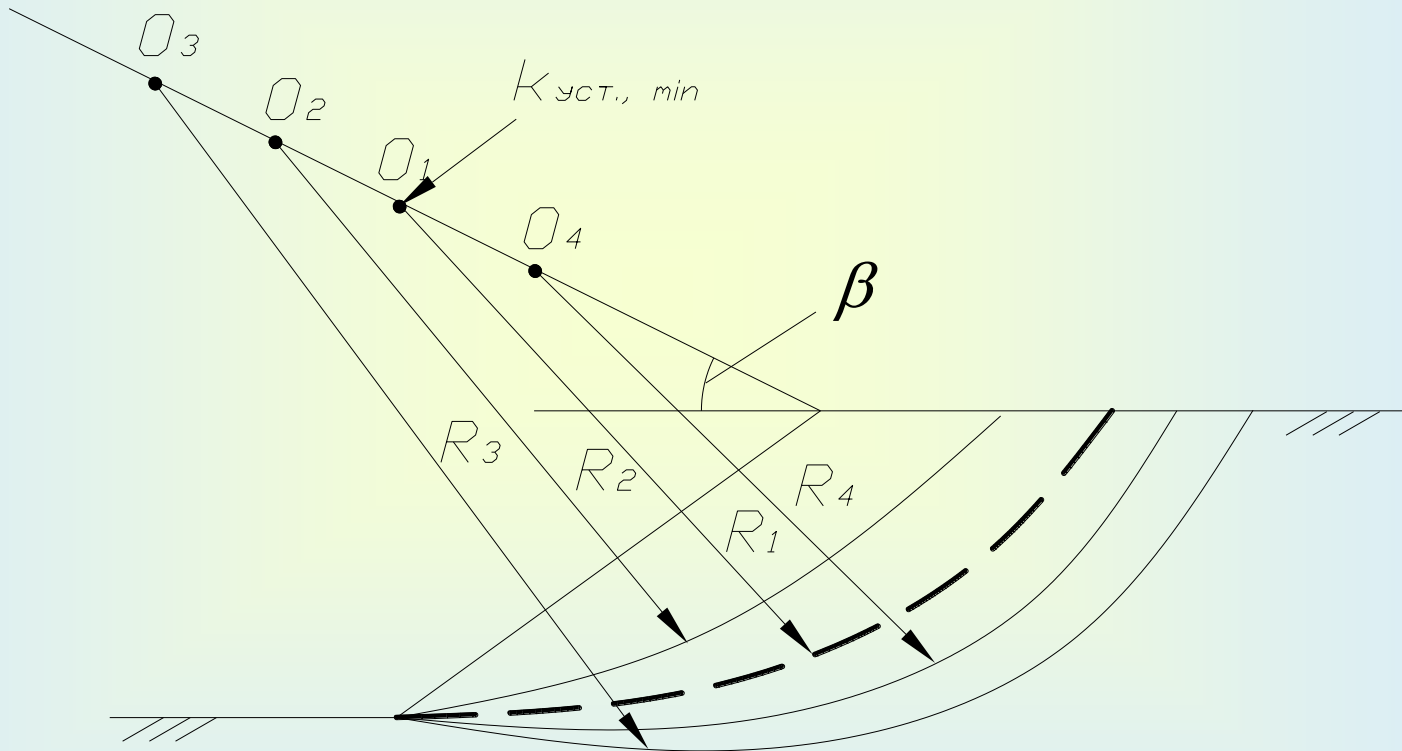
Определяется минимальный коэффициент устойчивости, который и укажет положение наиболее опасной поверхности скольжения.

Построение изолиний коэффициента устойчивости



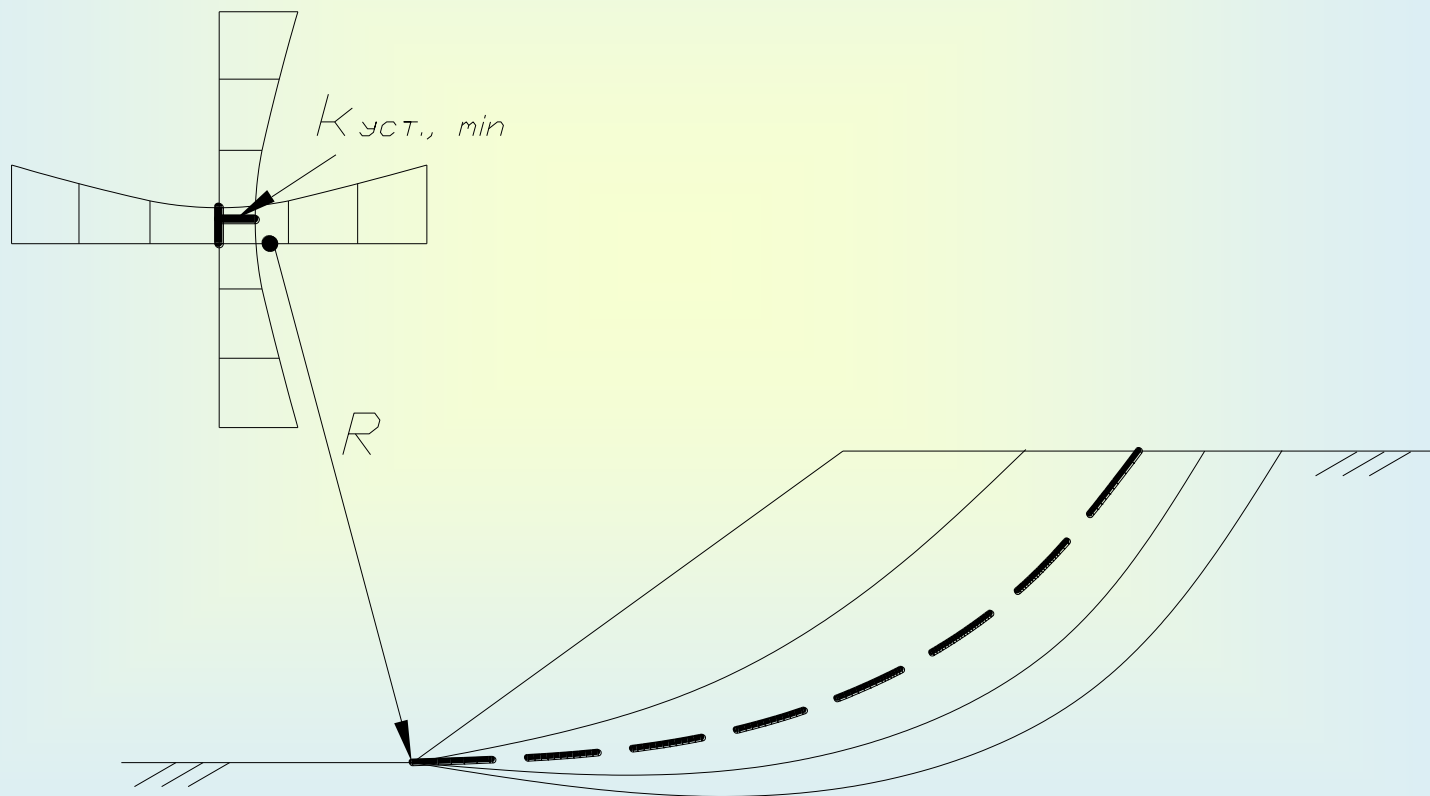
Определение $k_{уст., \min}$

по лучу, исходящему с бровки откоса



Построение по перпендикулярам

(оси x, y)



Меры по увеличению устойчивости откоса:

- уполоаживание откоса;*
- осушение грунтов откоса;*
- закрепление грунтов в откосе;*
- поддержание откоса подпорной стенкой.*

**Давление грунта
на подпорные стенки
(ограждающие конструкции)**

Определение давлений грунта на ограждающие конструкции производится на базе теории предельного напряженного состояния.

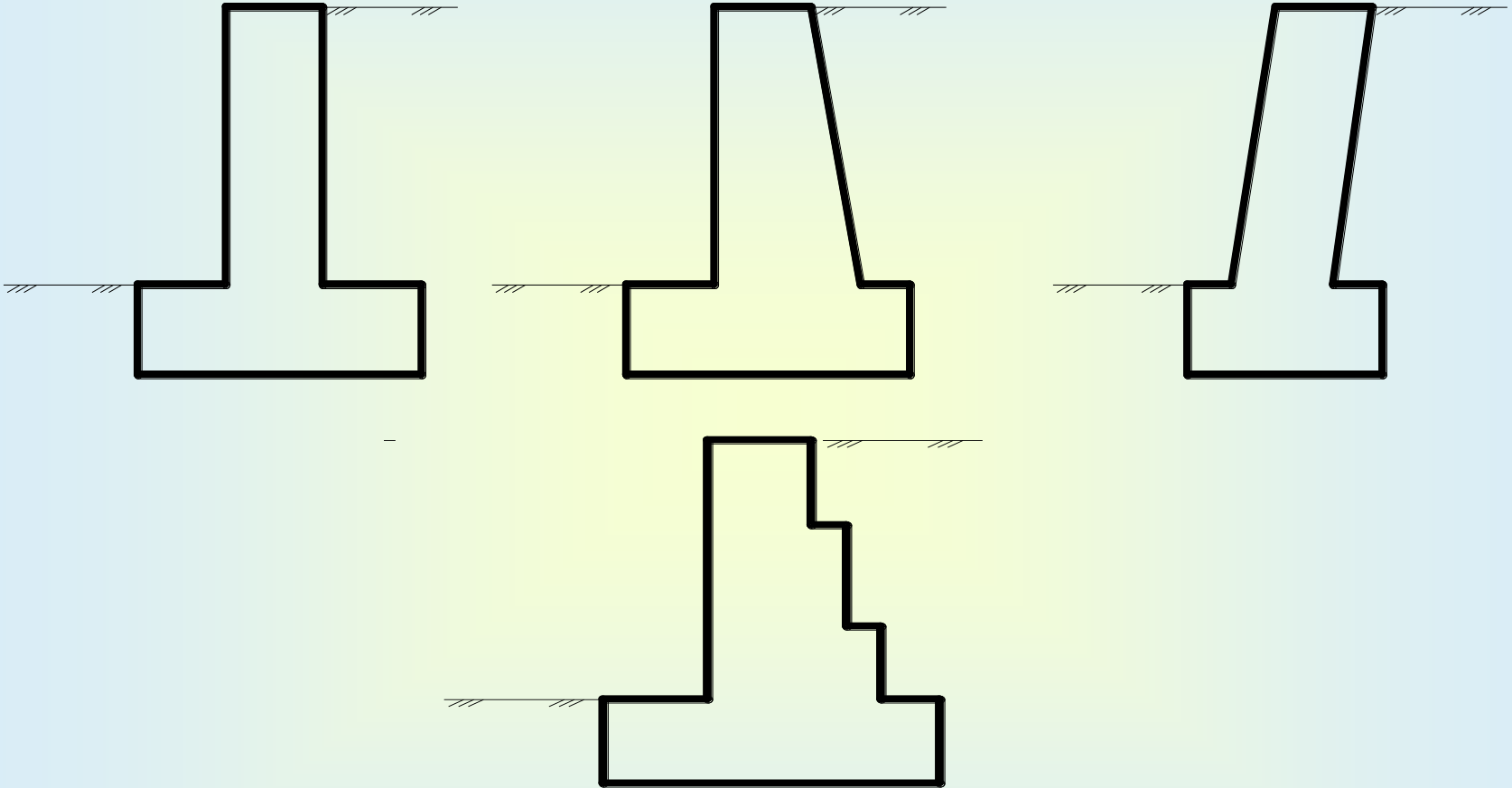
Если крутизна откоса более предельной, то для его удержания применяются подпорные сооружения (подпорные стенки – ПС).

Подпорные стены различают:

— массивные;

— тонкостенные.

Массивные подпорные стены

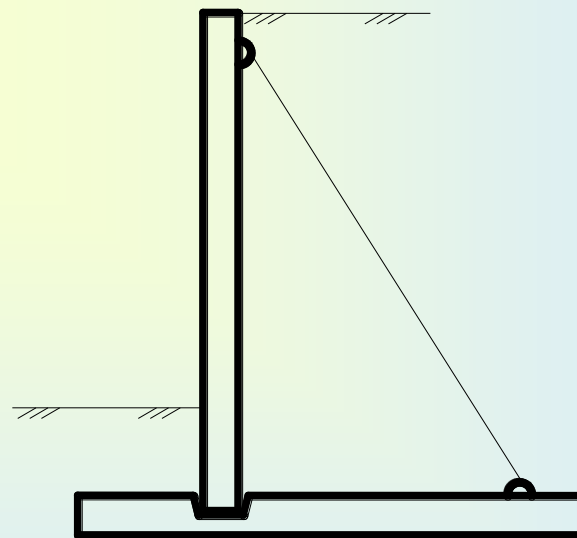
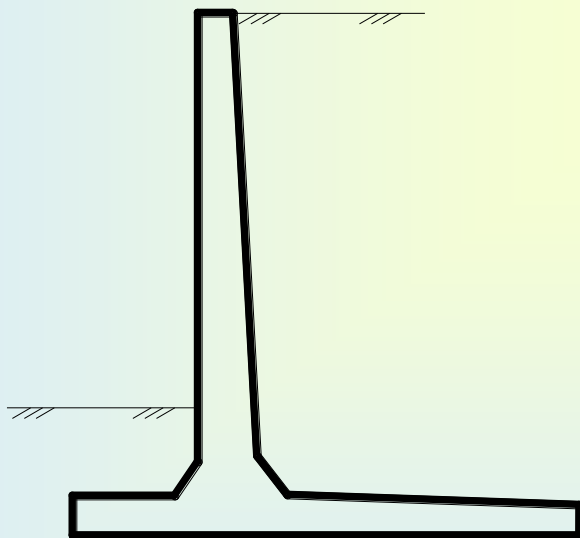


Устойчивость на сдвиг и опрокидывание массивных стен обеспечивается их собственным весом.

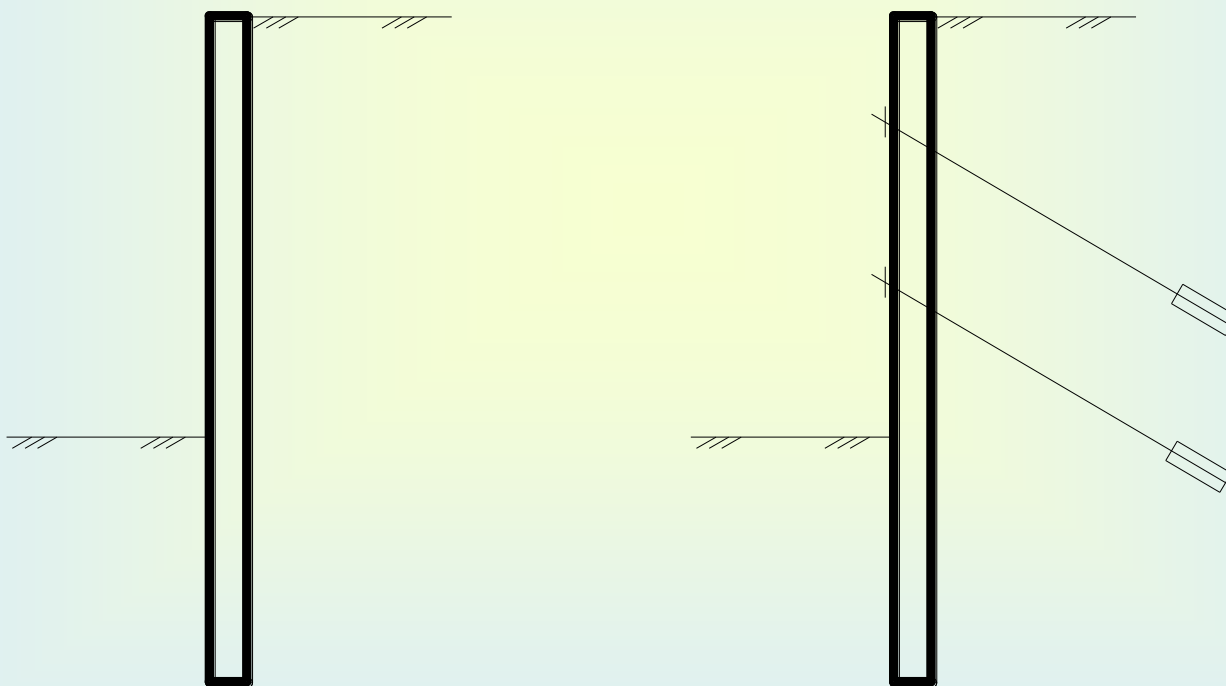
Тонкостенные подпорные стены

Устойчивость тонкостенных стен обеспечивается собственным весом стены и грунта, вовлекаемого ею в работу, либо их защемлением в грунте.

*Тонкостенные
(традиционные)*

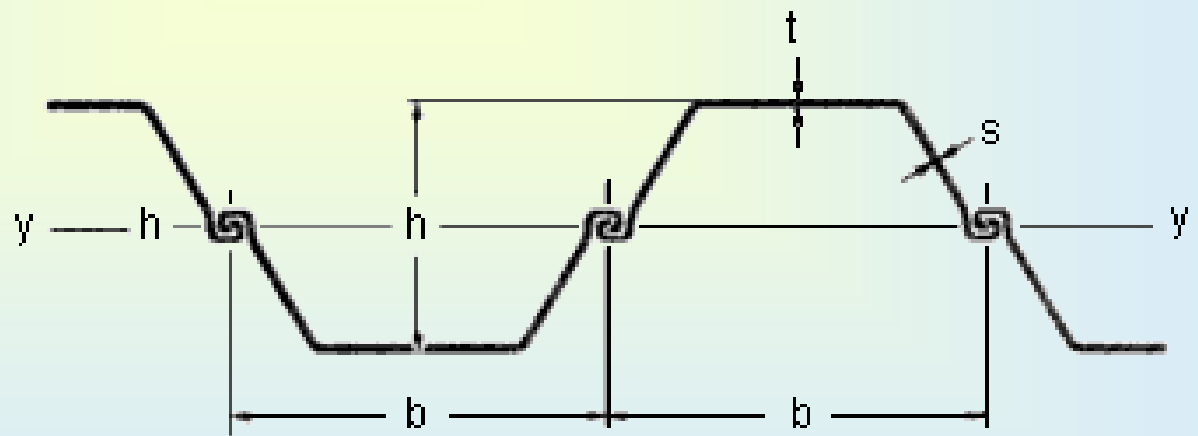


*Тонкостенные
(заземленные)*





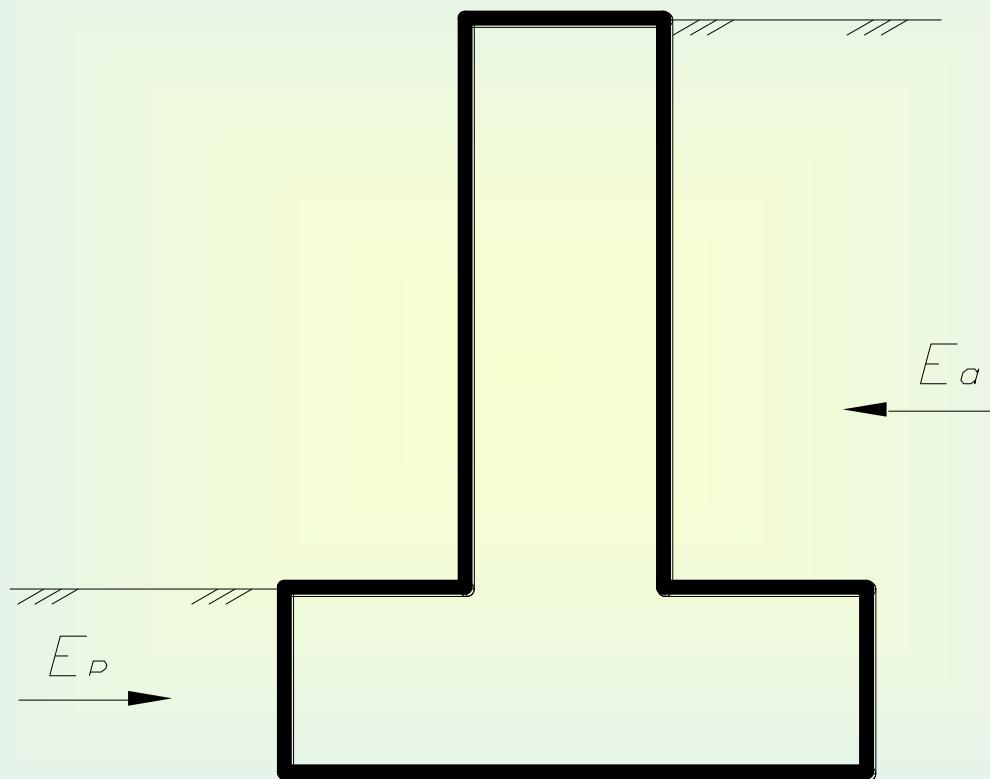
*шпунтовые
ограждения*



Различают активное и пассивное давление грунта на подпорные стены.

Активное – это давление грунта на стену, реализуемое в направлении ее возможного смещения, действует со стороны грунта засыпки.

Пассивное – это давление грунта на стену в направлении противоположном ее возможному смещению (пассивный отпор).

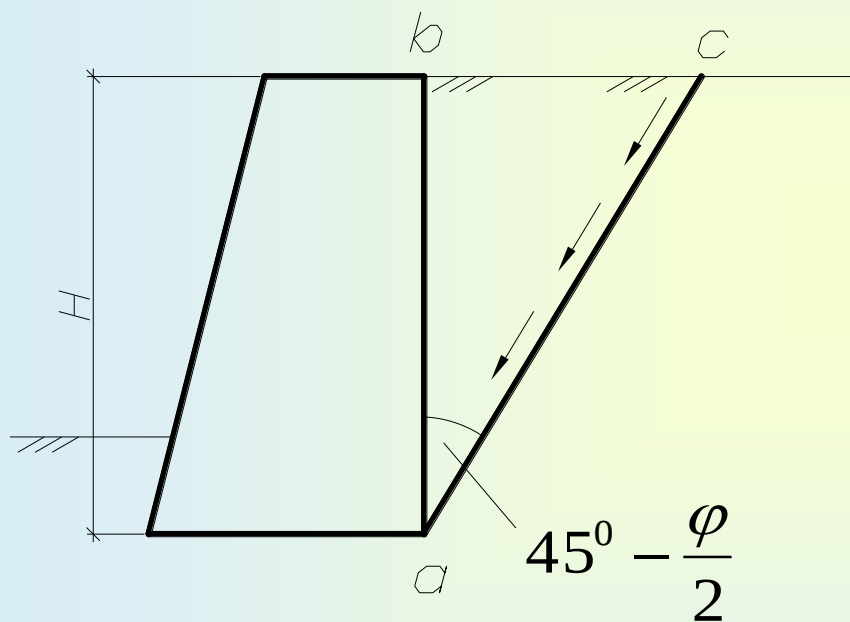


Определение
активного давления грунта

*Допущения,
принятые для определения активного давления грунта*

- 1. Поверхность скольжения грунта плоская.*
- 2. Из всех возможных поверхностей скольжения, выбирается та, при которой давление грунта на подпорную стену будет максимальным.*
- 3. Грунт рассматривается однородным.*
- 4. Трение грунта о стенку отсутствует.*

1. Грунт несвязный. Стенка вертикальна. Пригрузка на поверхности грунта засыпки отсутствует.



**abc – призма обрушения
грунта**

**ac – прямолинейная
поверхность
скольжения**

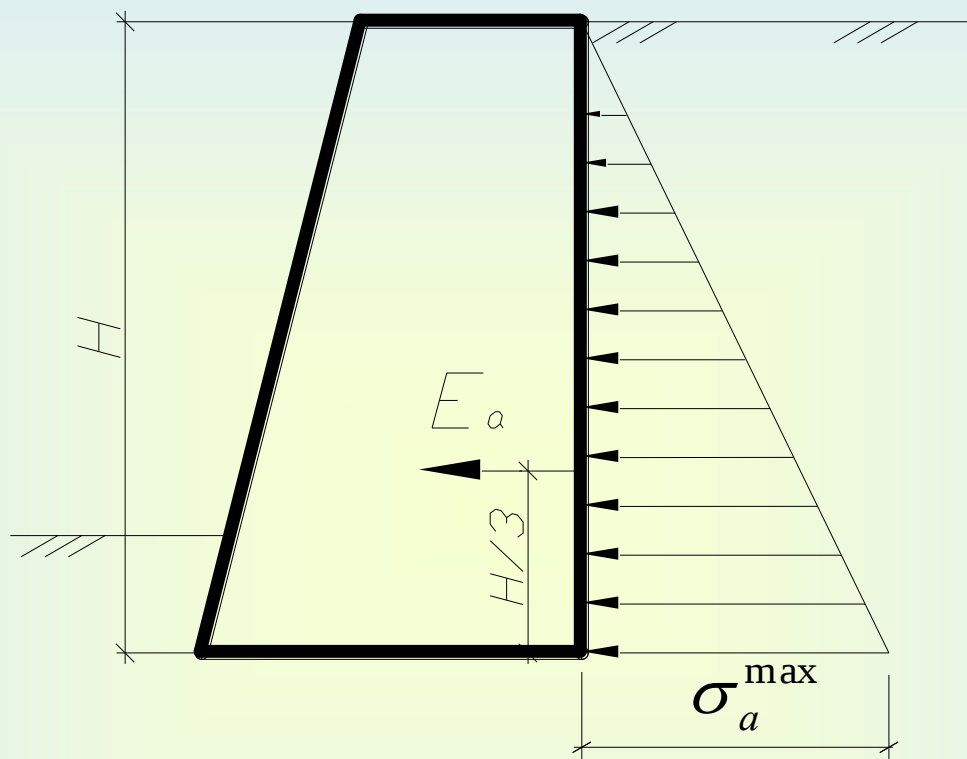
$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right),$$

$$\sigma_1 = \gamma \cdot z, \quad \sigma_2 = \sigma_a \Rightarrow$$

$$\sigma_a = \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right),$$

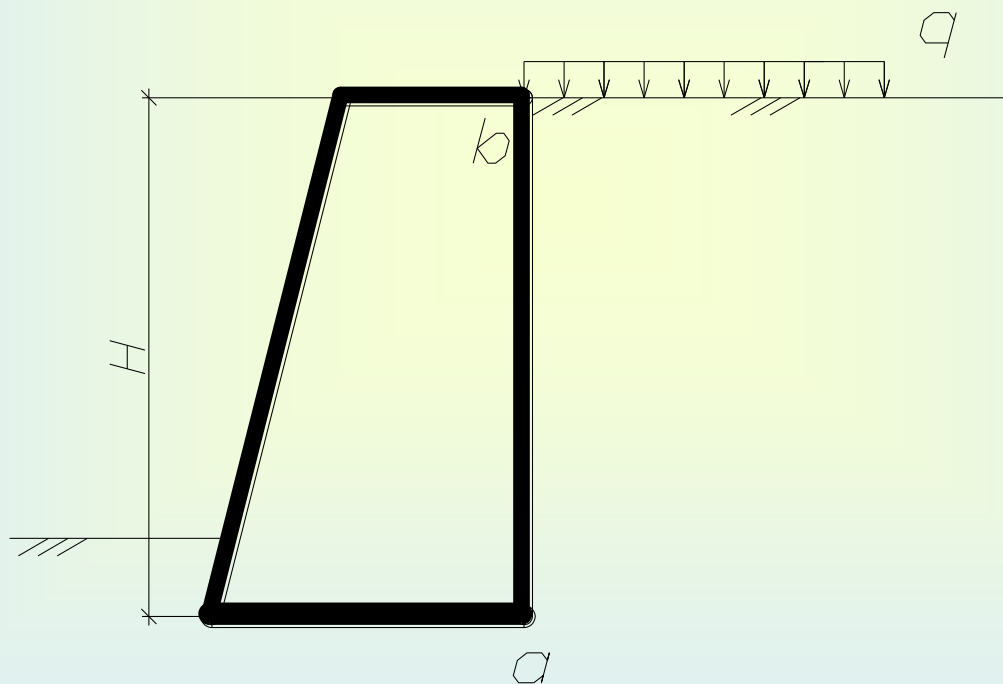
$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad \text{— коэффициент}$$

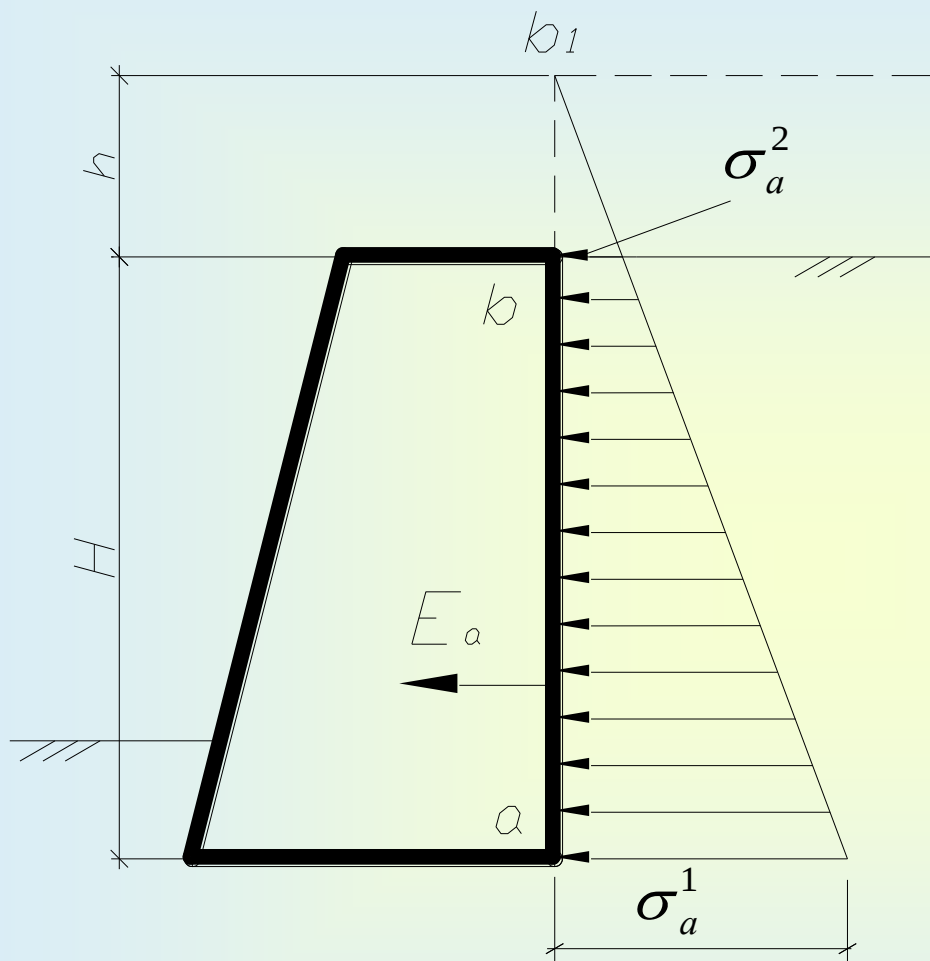
активного давления



$$E_a = \frac{1}{2} \cdot \sigma_a^{\max} \cdot H$$

2. Грунт несвязный. Стенка вертикальна. На поверхности грунта засыпки действует пригрузка интенсивностью q .





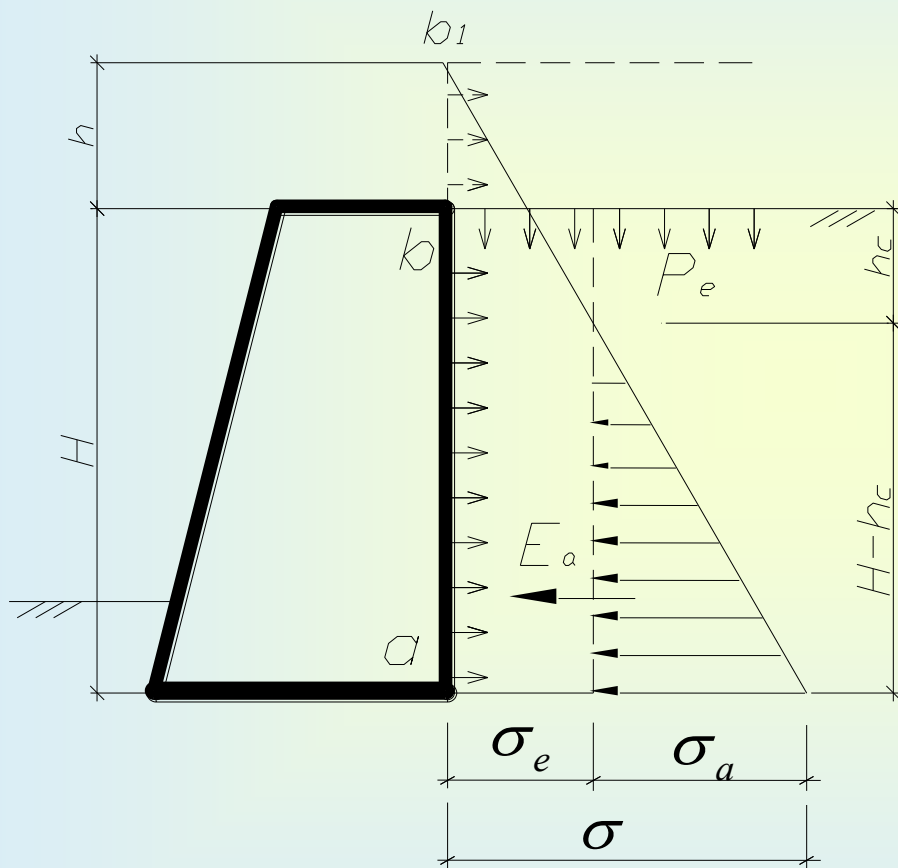
$$h = \frac{q}{\gamma}$$

$$\sigma_a = (\gamma \cdot z + q) \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right),$$

$$E_a = \frac{\sigma_a^1 + \sigma_a^2}{2} \cdot H =$$

$$= \left(\frac{\gamma \cdot H}{2} + q \right) \cdot H \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

3. Грунт связный. Стенка вертикальна. Пригрузка отсутствует.



$$P_e = \frac{c}{\tan \varphi} \rightarrow$$

$$h = \frac{c}{\gamma \cdot \tan \varphi}$$

$$\sigma_a = \sigma - \sigma_e =$$

$$= \left[\left(H \cdot \gamma + \frac{c}{\gamma \cdot \operatorname{tg} \varphi} \cdot \gamma \right) \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] - \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi}, \rightarrow$$

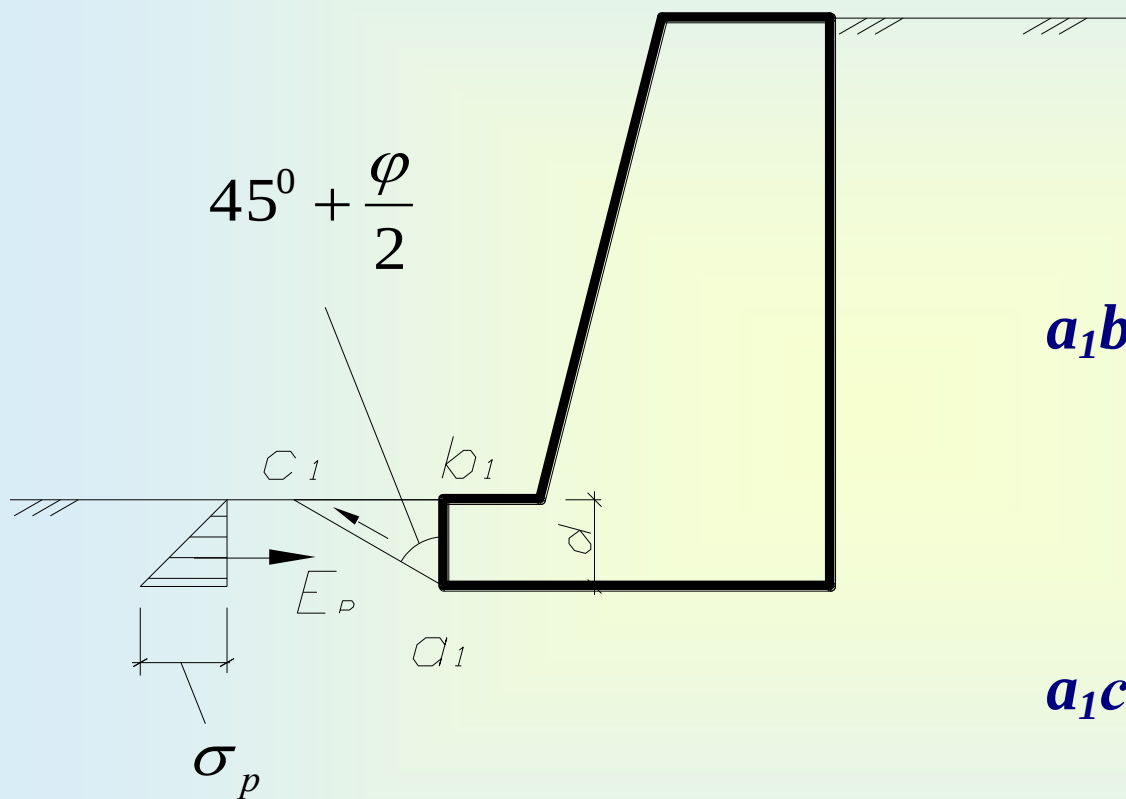
$$\sigma_a = \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right),$$

$$h_c = \frac{2c}{\gamma \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}$$

$$E_a = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \cdot tg^2 \left(45^0 - \frac{\varphi}{2} \right) -$$

$$- 2c \cdot H \cdot tg \left(45^0 - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{2c^2}{\gamma}$$

Определение
пассивного давления грунта



$a_1b_1c_1$ – призма выпора
грунта

a_1c_1 – прямолинейная
поверхность
скольжения

для сыпучих грунтов

$$\sigma_p = \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right),$$

$$\lambda_p = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \text{ — коэффициент}$$

пассивного давления

для связных грунтов

$$\sigma_p = \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$$

**Деформации грунтов
и методы определения осадок**

Виды деформаций оснований

- 1. Осадка – деформации, происходящие в результате уплотнения грунта под воздействием внешних нагрузок без коренного изменения структуры грунта.*

2. Просадка – деформации, происходящие в результате уплотнения грунта под воздействием внешних нагрузок и собственного веса грунта с коренным изменением структуры грунта.

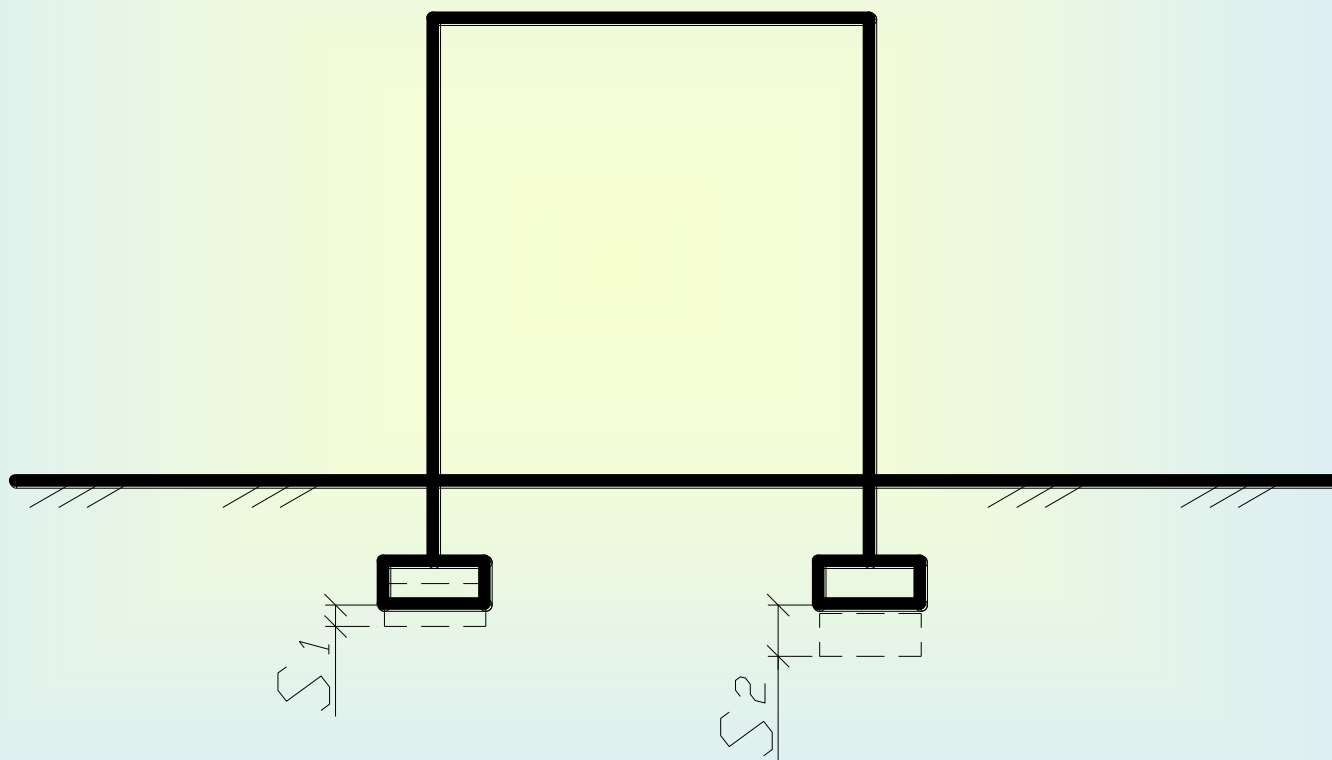
3. Подъем и усадка – деформации, связанные с изменением объема некоторых видов грунтов при изменении их влажности или температуры.

4. Оседание – деформации, вызванные разработкой полезных ископаемых, изменением гидрогеологических условий.

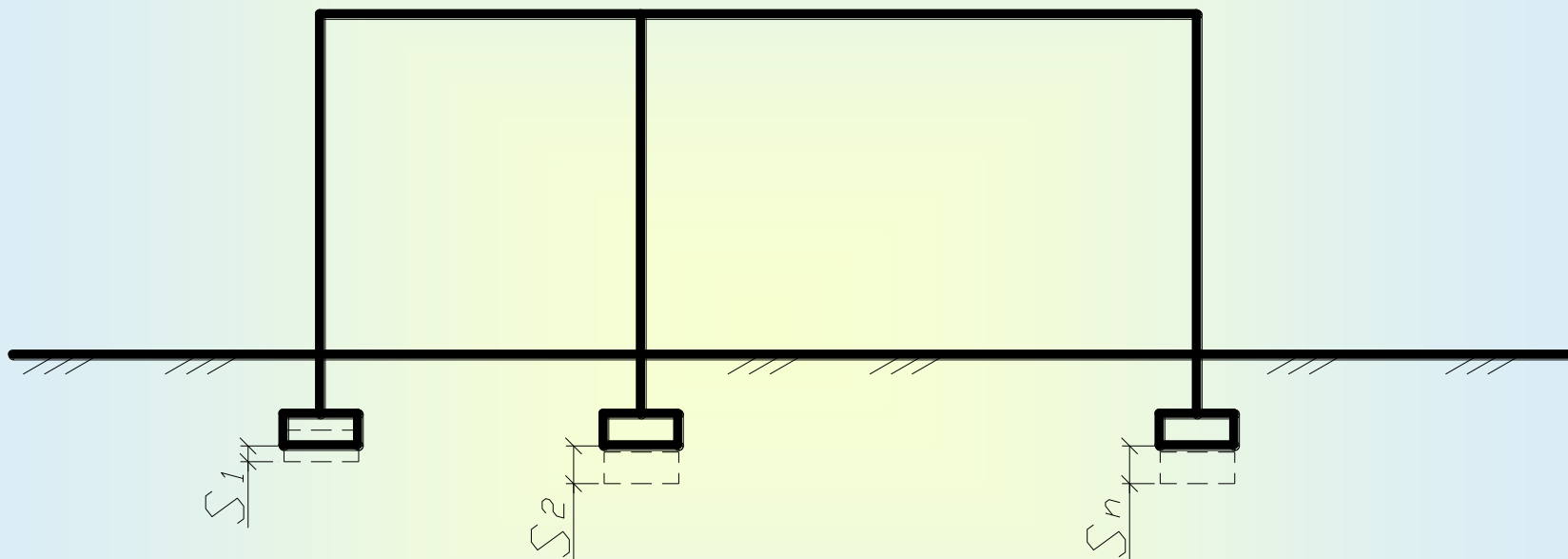
5. Горизонтальное перемещение – деформации, связанные с действием горизонтальных нагрузок на основание.

Виды совместных деформаций
основания и сооружения
(расчетные деформации)

1. Абсолютная осадка (подъем) основания отдельного фундамента, S , см.

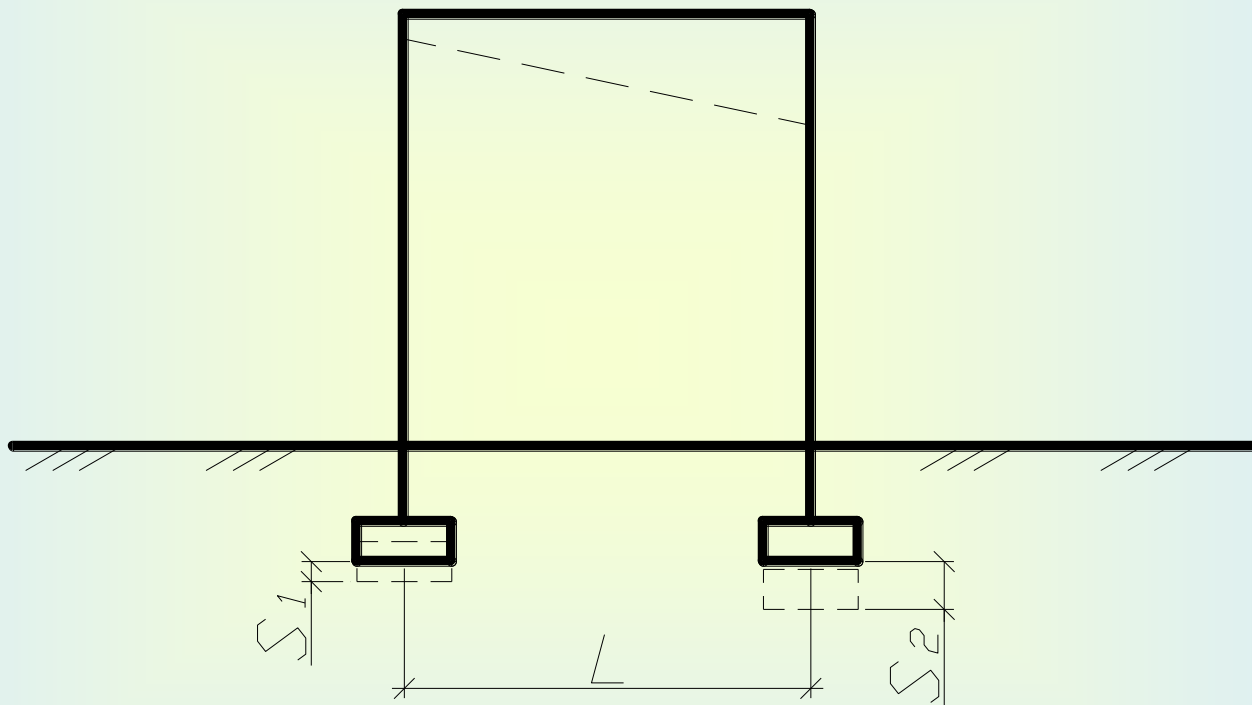


2. Средняя осадка основания сооружения.



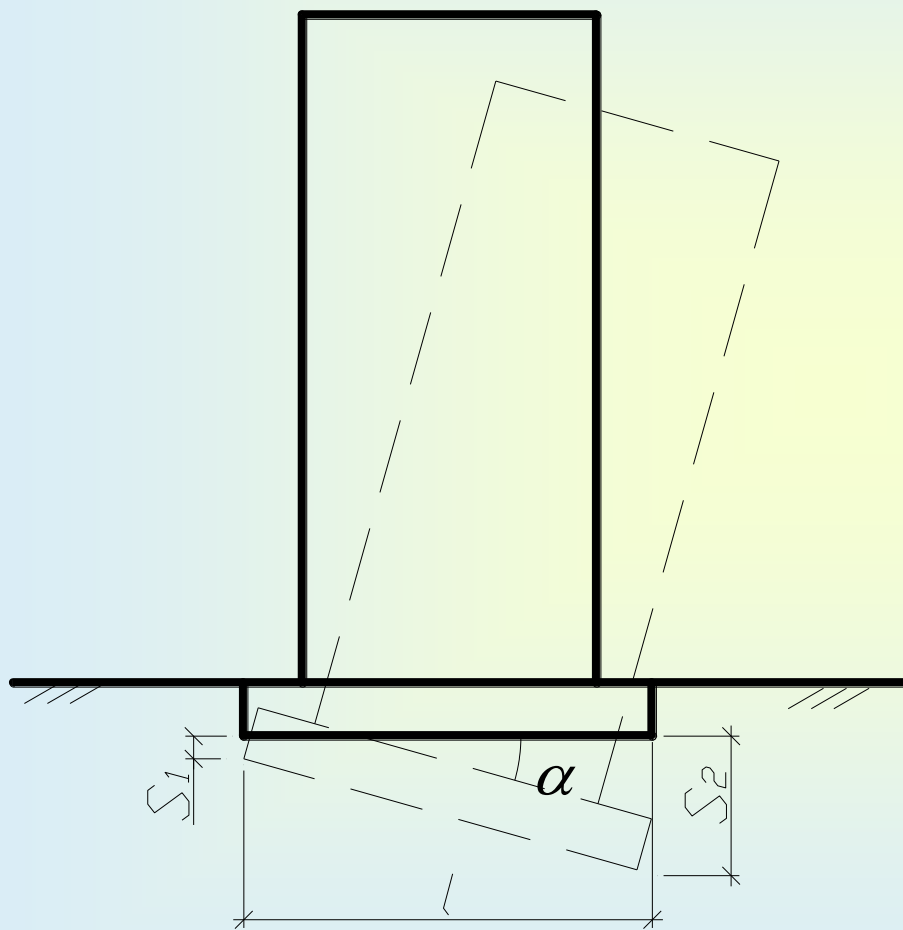
$$\bar{S} = \frac{S_1 \cdot A_1 + S_2 \cdot A_2 + \dots + S_n \cdot A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

3. Относительная разность осадок (подъемов) двух фундаментов.



$$\frac{\Delta S}{l} = \frac{|S_i| - |S_{i-1}|}{L}$$

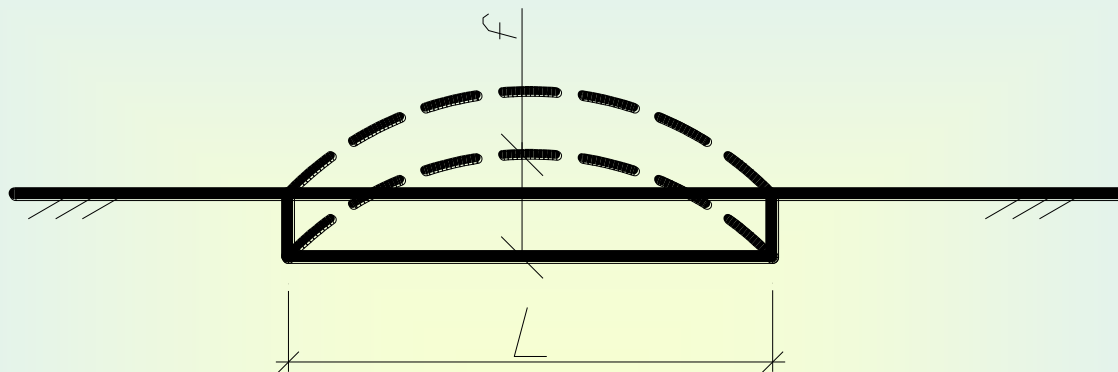
4. Крен фундамента (сооружения).



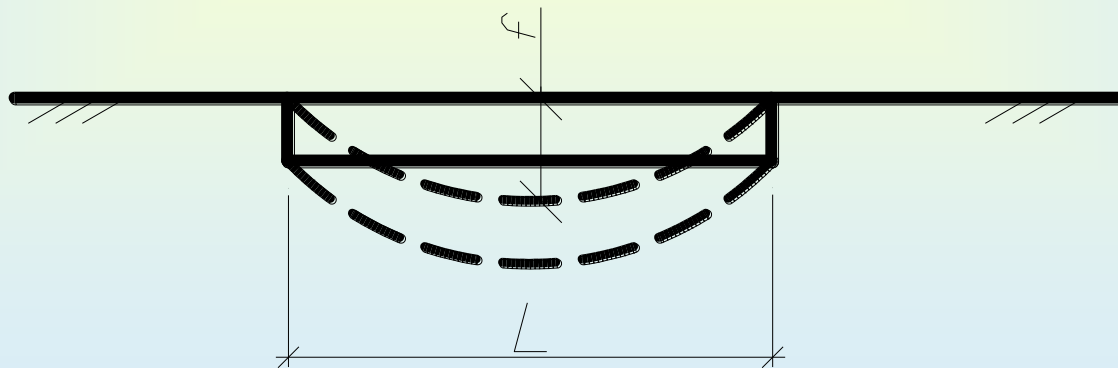
$$i = \operatorname{tg} \alpha = \frac{|S_1 - S_2|}{l}$$

5. Относительный прогиб или выгиб (f/l).

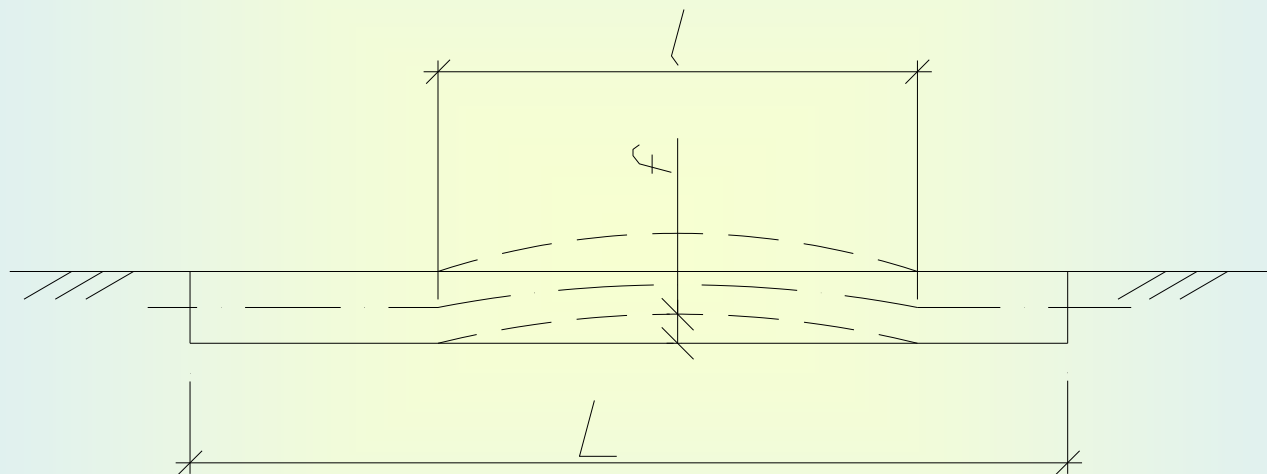
выгиб



прогиб

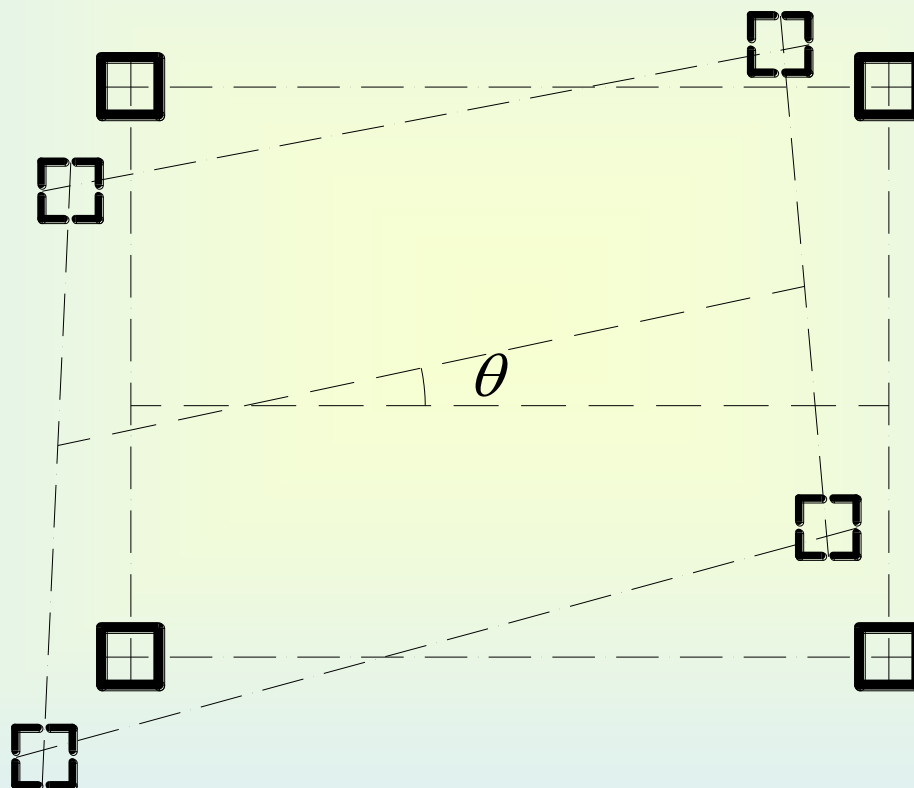


6. Кривизна изгибаемого участка (ρ).

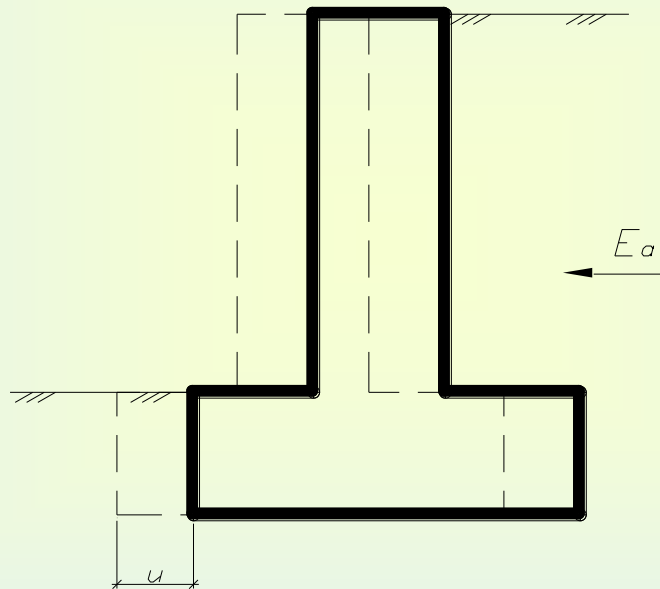


$$\rho = \frac{f}{l}$$

7. Относительный угол закручивания сооружения (θ).



8. Горизонтальное смещение (u).



Методы определения осадок (СП 22.13330.2016)

1. Метод послойного суммирования (основной метод расчета).

2. Метод линейно-деформируемого слоя конечной толщины (для определения средней осадки основания фундамента).

Метод послойного суммирования

Метод основан на предположении, что общая осадка основания фундамента равна сумме осадок отдельных слоев, на которые разбивается грунтовое основание в пределах сжимаемой толщи.

Нижняя граница сжимаемой толщи (ВС) определяется:

$$\sigma_{zp} \leq 0,5 \cdot \sigma_{zg}$$

При этом $H_c \geq H_{min}$:

- при $b \leq 10$ м $H_{min}=b/2$;*
- при $10 < b \leq 60$ м $H_{min}=(4+0,1b)$;*
- при $b > 60$ м $H_{min}=10$ м.*

Если в пределах H_c залегает грунт с $E \geq 100$ МПа, то нижняя граница сжимаемой толщи (ВС) принимается на кровле данного слоя.

Если в пределах H_c залегает грунт с $E \leq 7$ МПа или такой слой залегает ниже H_c , то этот слой включается в сжимаемую толщу, а за нижнюю границу сжимаемой толщи принимается минимальное из двух значений, соответствующих подошве данного слоя или глубине, где выполняется условие:

$$\sigma_{zp} \leq 0,2 \cdot \sigma_{zg}$$

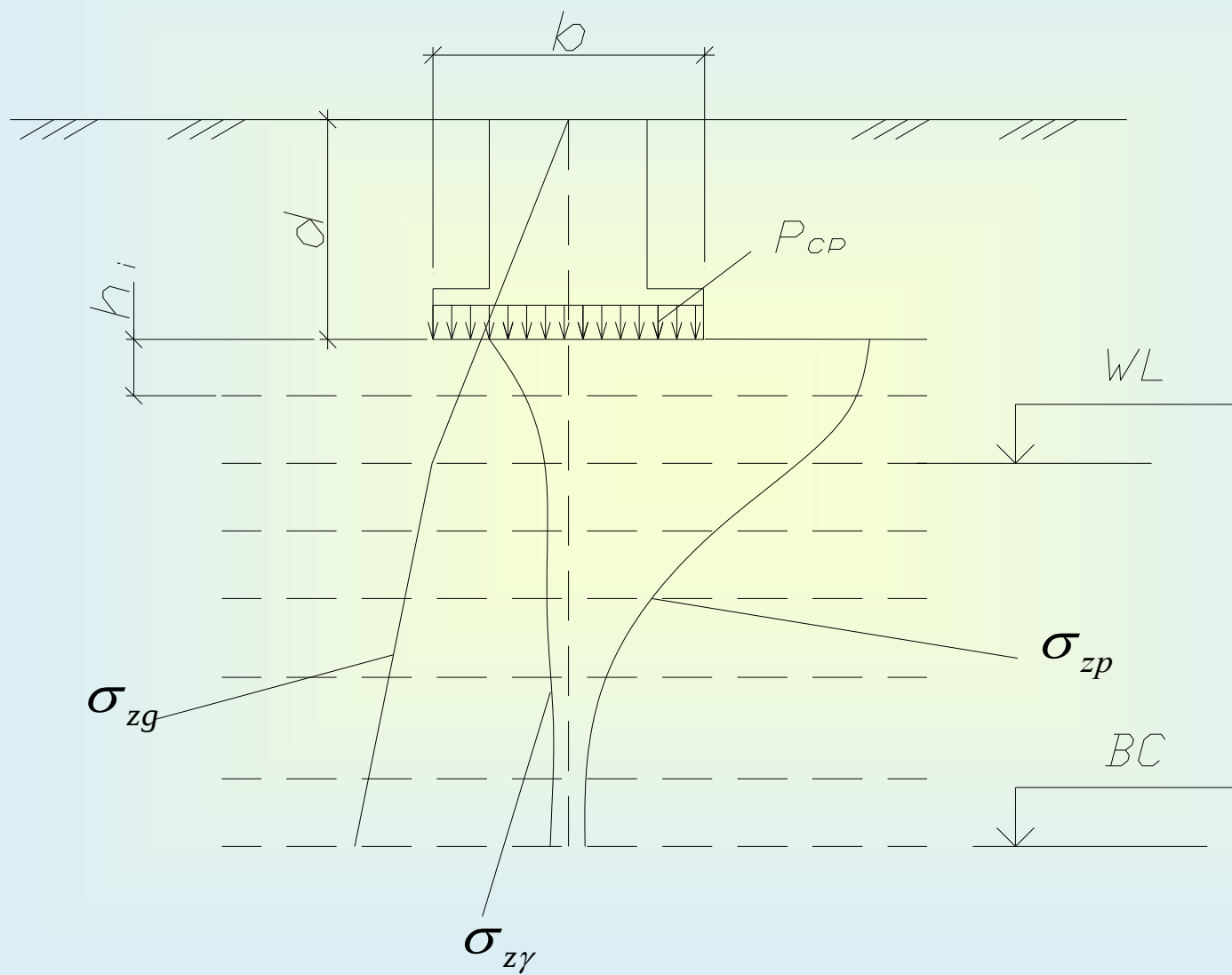
$$\Delta h_i \leq 0,4 \cdot b,$$

$$\sigma_{zg,i} = \sum_{i=1}^n (\gamma_{II,i} \cdot h_i),$$

$$\sigma_{zp} = \alpha \cdot P_{cp},$$

$$\sigma_{zg,0} = \gamma_{II} \cdot d,$$

$$\sigma_{z\gamma,i} = \alpha \cdot \sigma_{zg,0}.$$

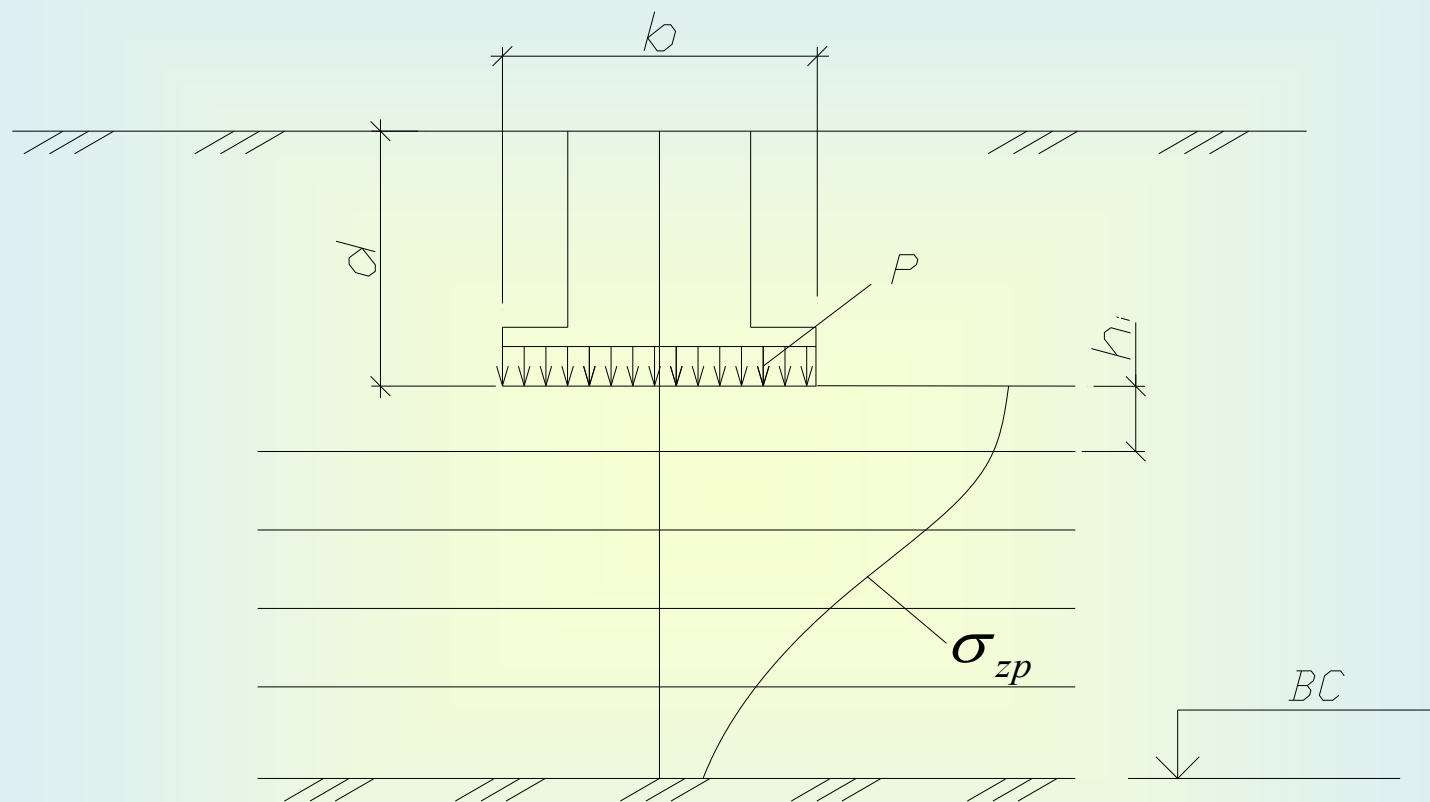


$$S = \beta \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{z\gamma,i}) \cdot h_i}{E_i} + \beta \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{z\gamma,i} \cdot h_i}{E_{e,i}}$$

Метод линейно-деформируемого слоя конечной толщины

Метод применяется для определения средней осадки фундамента, а также для предварительных расчетов деформаций оснований фундаментов сооружений нормального и пониженного уровней ответственности при:

- если ширина подошвы (диаметр) фундамента ≥ 10 м и $E \geq 10$ МПа;*
- если $150 \leq P_{cp} \leq 500$ кПа;*
- $d \leq 5$ м.*



$$\bar{S} = \frac{P \cdot b \cdot k_c}{k_m} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{k_i - k_{i-1}}{E_i}$$

k_c, k_m – коэффициенты, зависящие от толщины сжимаемого слоя, ширины подошвы фундамента, модуля деформации;

k_i, k_{i-1} – коэффициенты, зависящие от формы и соотношения размеров подошвы фундамента, относительной глубины.