

# Тема №3: Механические свойства грунтов

*Механические свойства - это их способность сопротивляться изменению объема и формы в результате физических воздействий.*

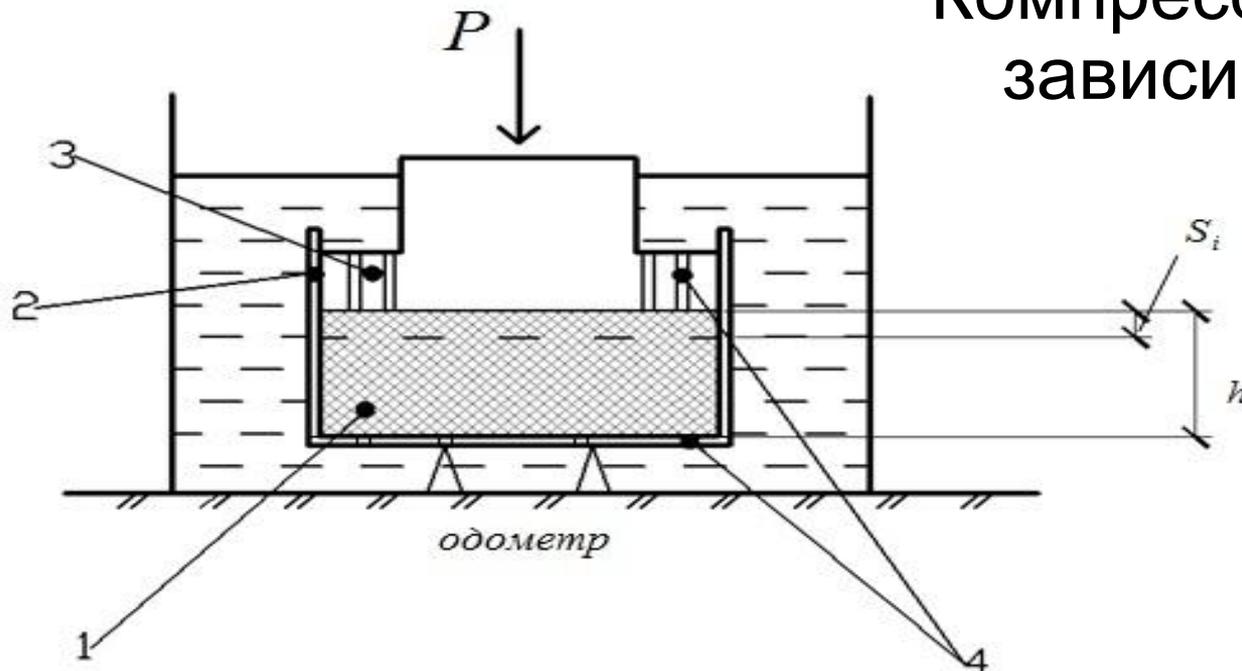
*Различают свойства грунтов:*

- 1. Деформационные** – способность грунта сопротивляться развитию деформаций.
- 2. Прочностные** - способность грунта сопротивляться разрушению.
- 3. Фильтрационные** - способность грунта пропускать и отжимать воду из пор под действием нагрузки

## **Механические свойства грунтов определяются в соответствии с ГОСТами:**

- **ГОСТ 12248-96 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости».**
- **ГОСТ 20276-99 «Методы полевого определения характеристик деформируемости».**
- **ГОСТ 20522-96 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний»**

### **Компрессионная зависимость**



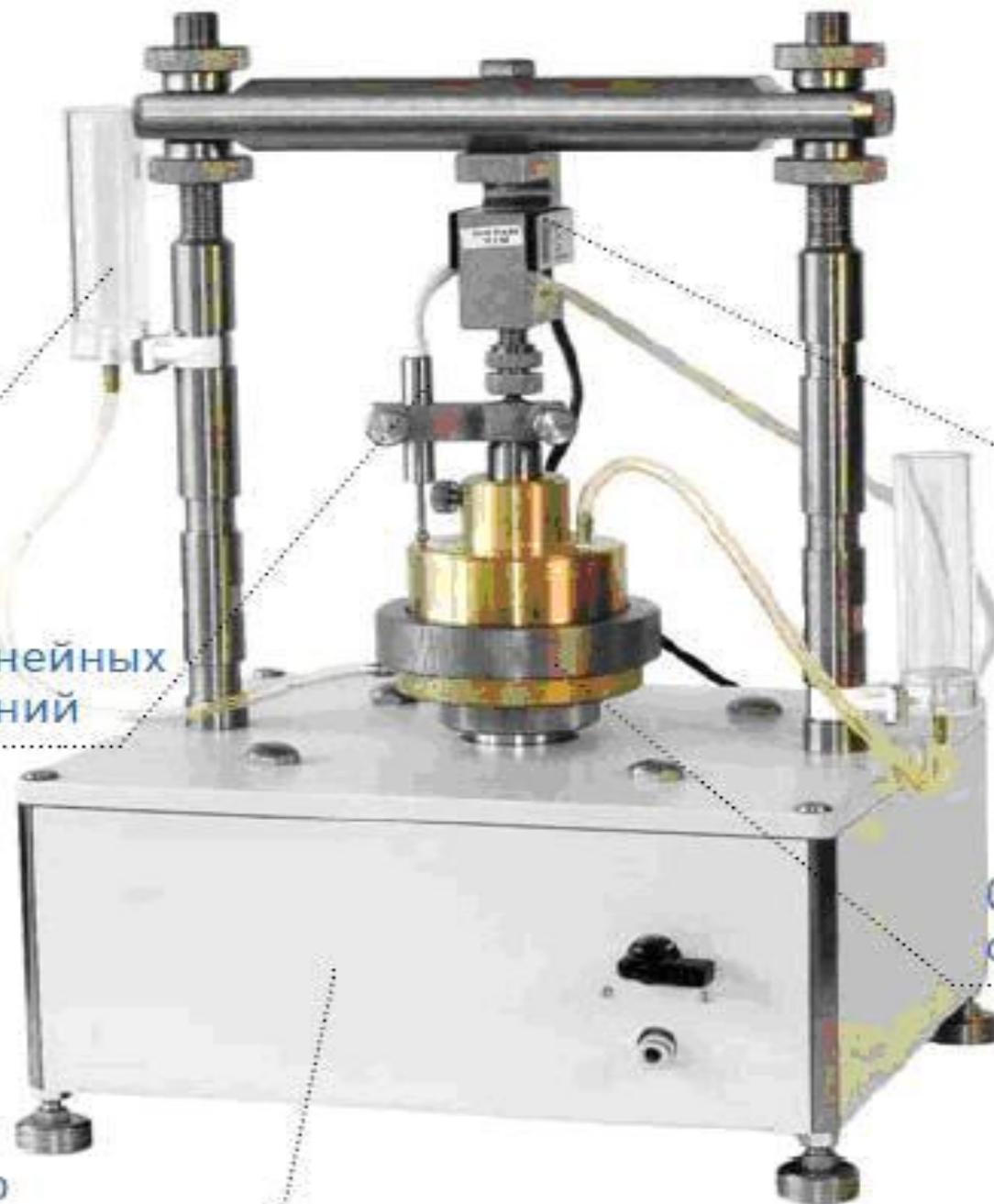
Колба

Датчик силы

Датчик линейных  
перемещений

Одометр  
фильтрационный

Устройство  
осевого нагружения



Полностью водонасыщенный образец грунта (1) помещают в кольцо (2) и с помощью поршня (3) прикладывают силу  $P$ . Сжатие образца в одомере происходит за счет уменьшения объема пор  $V_{пор}$  и отжатия воды через отверстия (4)

## **Изменение пористости:**

$$\Delta n = \frac{\Delta V_{пор}}{V} = \frac{A \cdot S_i}{A \cdot h} = \frac{S_i}{h}$$

$$e_i = e_o - (1 + e_o) \frac{S_i}{h}$$

$e_i$  – текущий коэффициент пористости;

$A$  – площадь сечения, м<sup>2</sup>;

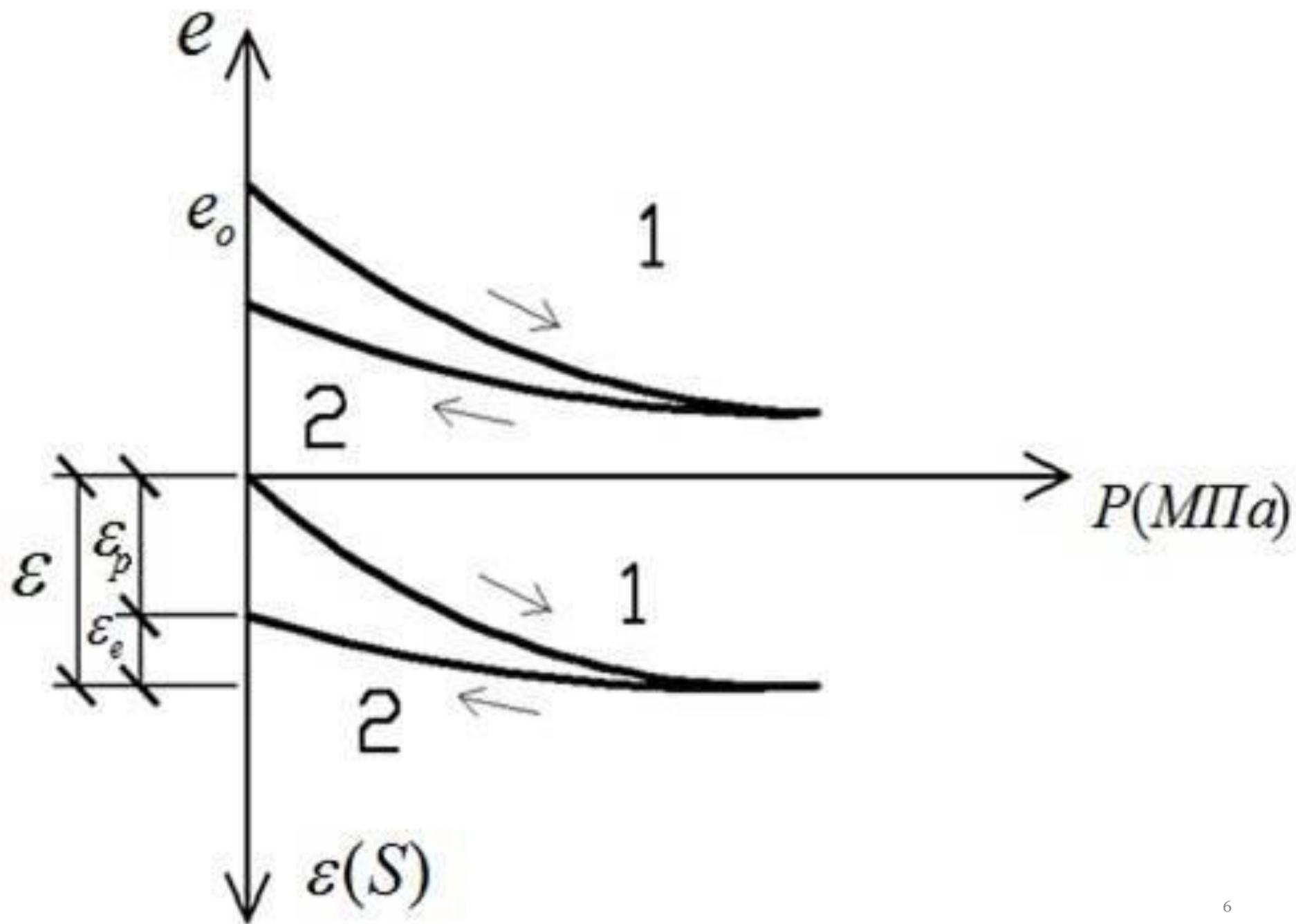
$h$  – первоначальная высота образца, мм;

$e_o$  – начальный коэффициент пористости;

$S$  – осадка грунта, мм;

$\varepsilon$  – относительная деформация сжатия.

$$\varepsilon = \frac{S}{h}$$



1 - Компрессионная ветвь (при приложении нагрузки) отображает уменьшение пористости при возрастании нагрузки

2 - Декомпрессионная ветвь (после удаления нагрузки) отображает обратный процесс - увеличение  $V$ , т.е. набухание

Расположение ветви набухания ниже ветви сжатия свидетельствует о том, что грунт обладает значительной остаточной (пластической)  $\varepsilon_p$  деформацией

Ветвь набухания обусловлена упругими деформациями  $\varepsilon_e$

# ***Виды и причины деформаций***

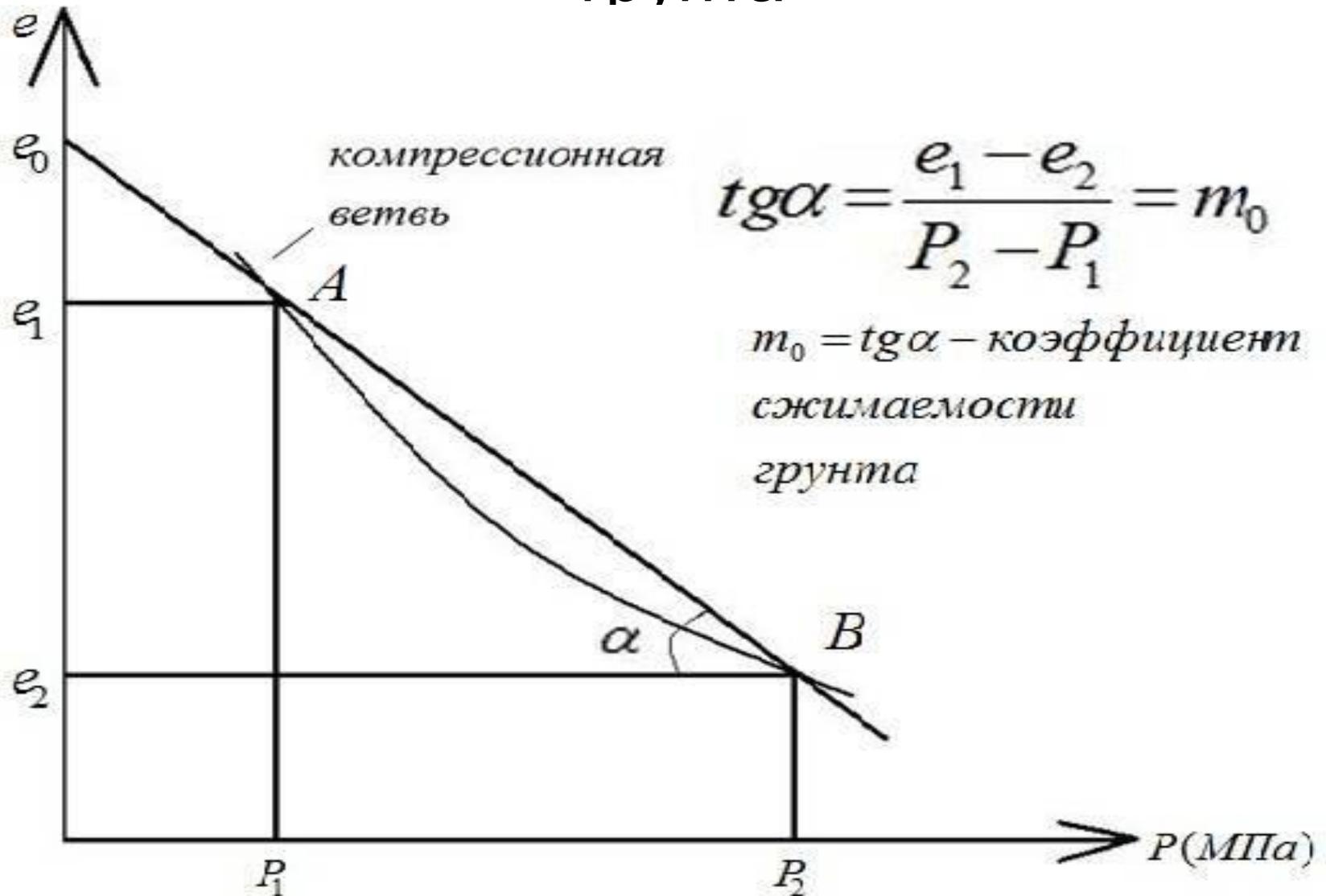
## ***Физические причины упругих деформаций:***

- упругость минеральных частиц;*
- упругость воды;*
- упругость замкнутых пузырьков воздуха.*

## ***Физические причины остаточных деформаций:***

- уплотнение грунта;*
- сдвиги частиц грунта;*
- разрушение частиц в точках контакта.*

# Определение коэффициентов сжимаемости грунта



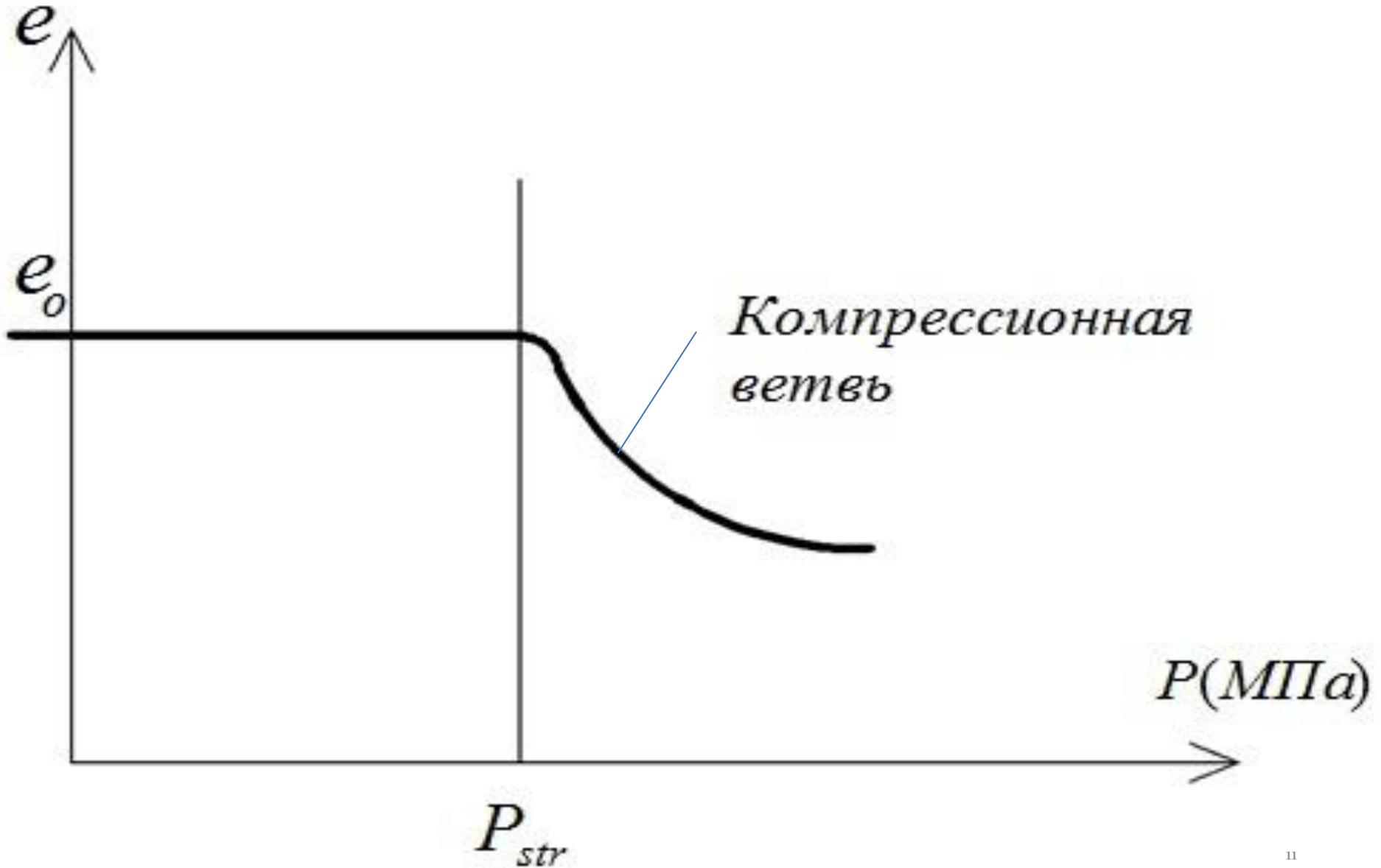
Из-за криволинейного характера графика компрессионных испытаний коэффициент сжимаемости будет зависеть от интервала выбранных напряжений.

При одинаковых значениях  $P_1$  и  $P_2$  более сжимаемым будет тот грунт, у которого  $m_0$  будет больше  $\frac{m_0}{1 + e_0}$   $m_v$  - коэффициент относительной сжимаемости грунта

## Закон компрессионного уплотнения

При небольшом изменении сжимающих напряжений уменьшения коэффициента пористости пропорционально увеличению сжимающего напряжения  $\Delta e = m_0 \Delta P$

# Структурная прочность грунта



Многие грунты природного сложения, кроме скальных, могут быть уплотнены, что сопровождается возникновением в них хрупких кристаллизационных связей. Эти связи придают грунту некоторую прочность, которая называется **структурной прочностью грунта**.

При  $P < P_{str}$  процесс уплотнения в грунте практически не развивается

При  $P > P_{str}$  происходит резкое уплотнение или разрушение грунта

Структурную прочность иногда используют для ограничения мощности сжимаемой толщи под подошвой фундамента, полагая, что при напряжениях в основании, не превышающих  $P_{str}$ , уплотнения грунта не происходит.

# Способы определения модуля деформации грунта

В качестве деформационной характеристики зависимости между напряжениями и деформациями используют модуль деформации  $E$ , который является основной деформационной характеристикой.

**1) Определение модуля деформации с помощью компрессионной кривой.**

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta S} h \cdot \beta \qquad E = \beta \frac{(1 + e_0)}{m_0}$$

$\Delta P$  – приращение нагрузки, МПа;

$\Delta S$  – приращение осадки, мм;

$h$  – первоначальная высота образца, мм;

$\beta$  – коэффициент бокового расширения грунта

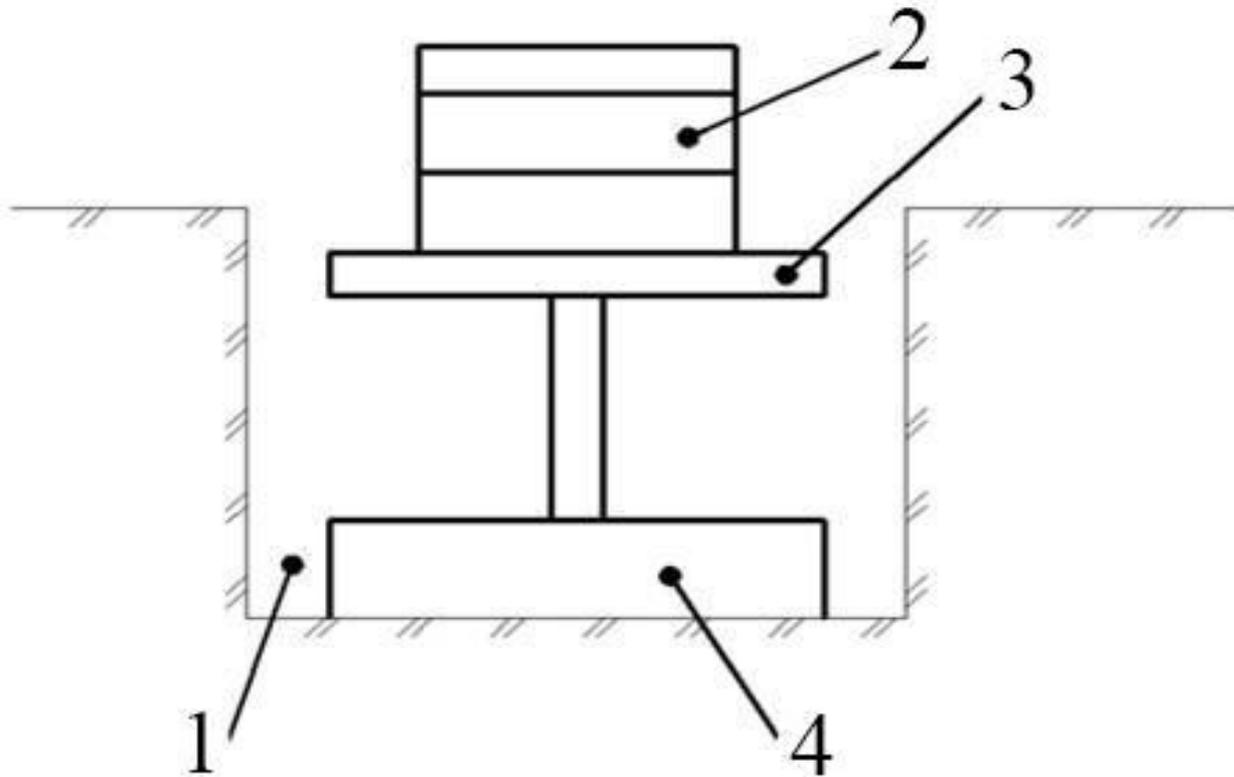
*При решении пространственной задачи  
используют*

$$G = \frac{E}{[2(1+\nu)]} - \text{модуль сдвига}$$

$$K = \frac{E}{1-2\nu} - \text{модуль объемной деформации}$$

$\nu$  – коэффициент Пуассона

## 2) Испытание статической нагрузкой



*На дно шурфа (1) устанавливают штамп (4), к платформе (3) прикладывают ступенями нагрузку (2), фиксируют осадку грунта.*

# Формула Шлейхера:

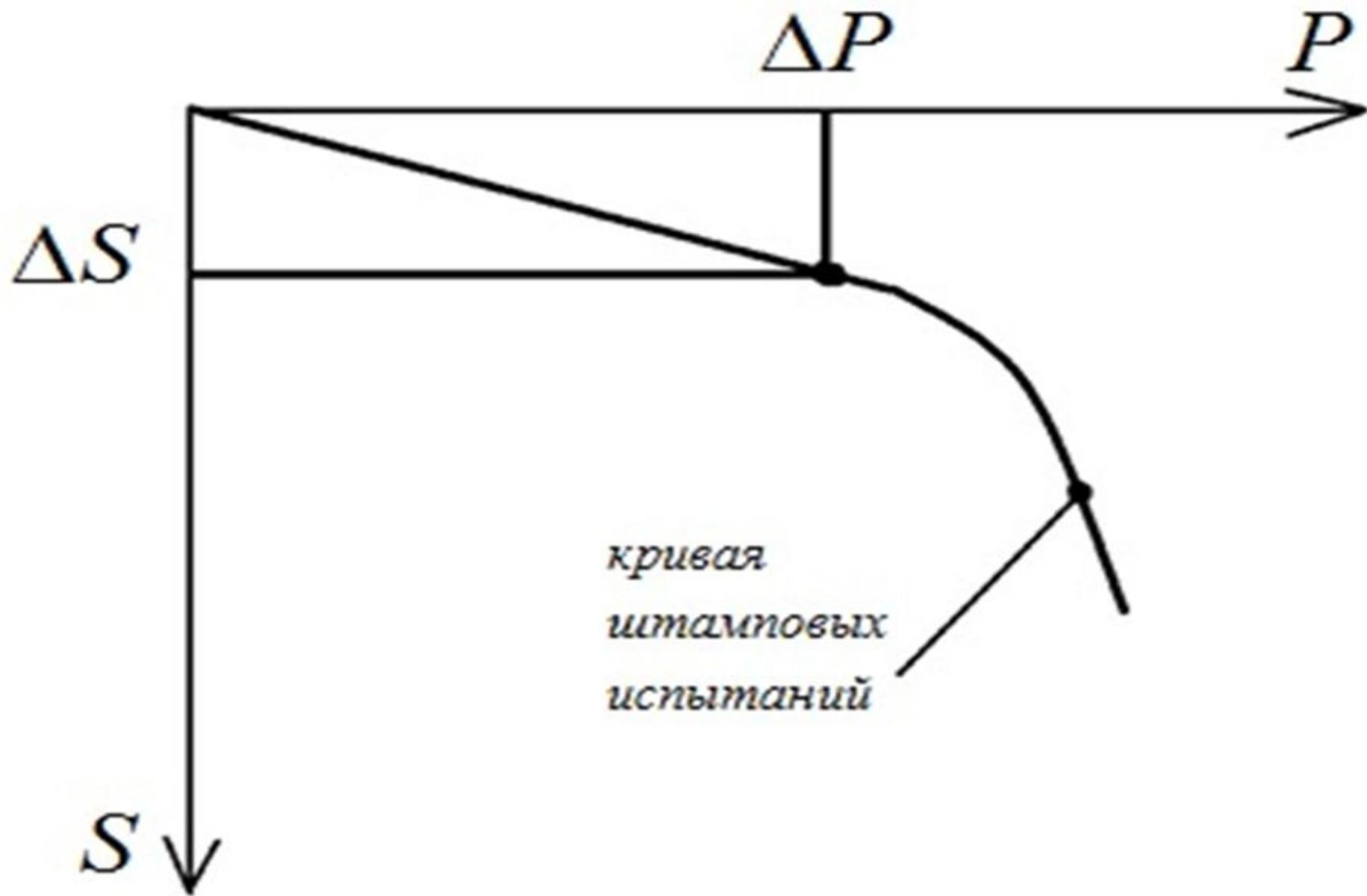
$$E = \omega \cdot d (1 - \nu^2) \frac{\Delta P}{\Delta S}$$

$\omega$  – коэффициент, для круглых штампов равен 0,8;

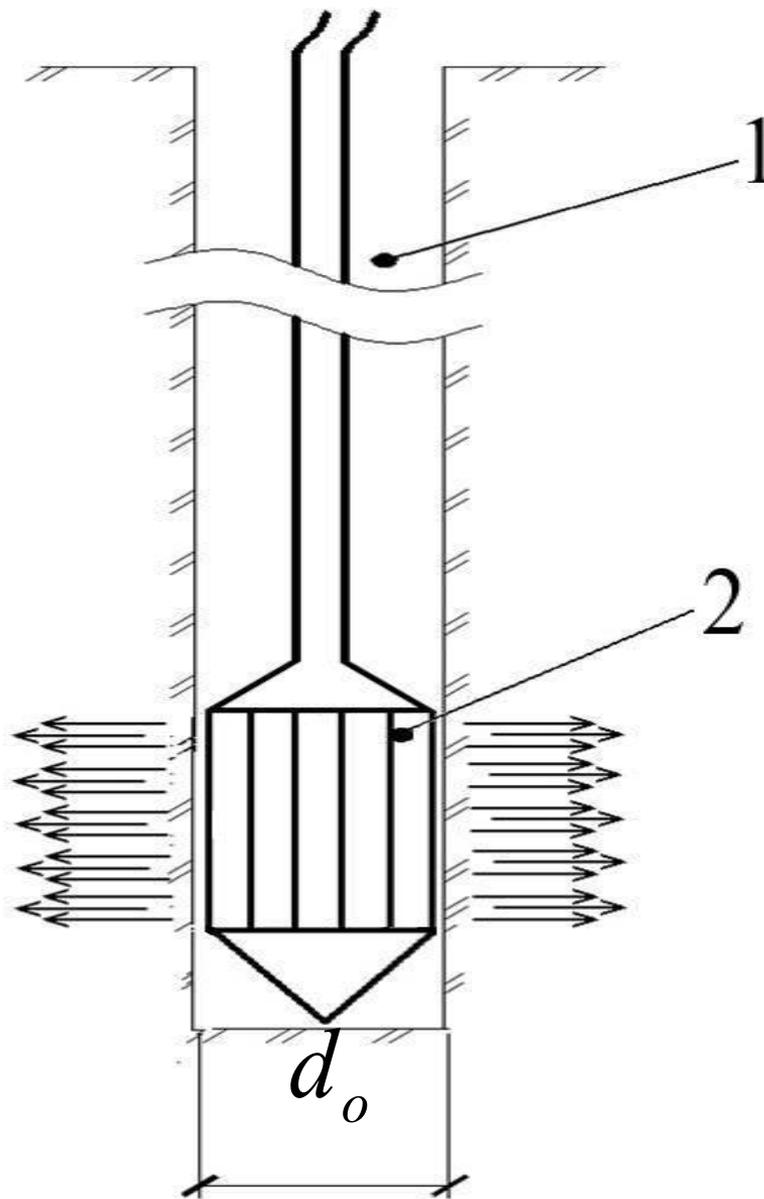
$d$  – диаметр штампа, мм;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

$$\nu = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$



### 3) При помощи прессиометра



*В скважину (1) опускают цилиндрический резиновый баллон, заполненный жидкостью, т.е. прессиометр (2). Давление жидкости в баллоне увеличивают, оно передается на стенки скважины и уплотняет окружающий грунт. С помощью датчиков фиксируется давление и деформация грунта*

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta S} \cdot (1 + \nu) d_o$$

*Применяется только для изотропных грунтов*

# Водопроницаемость грунта

*Это свойство водонасыщенного грунта под действием разности напоров пропускать через свои поры сплошной поток воды. Зависит от:*

- гранулометрического состава;*
- минерального состава;*
- пористости;*
- градиента напора.*

## Закон ламинарной фильтрации Дарси

**Фильтрация** – это неразрывное течение воды по всему сечению пор.

**Ламинарный** - это параллельно – струйчатый характер движения воды.

$$V_f = k_f \cdot i$$

$V_f$  – скорость фильтрации, см/сек, м /час; определяется объемом воды, проходящей через единицу площади за единицу времени.

$i$  – гидравлический градиент или градиент напора

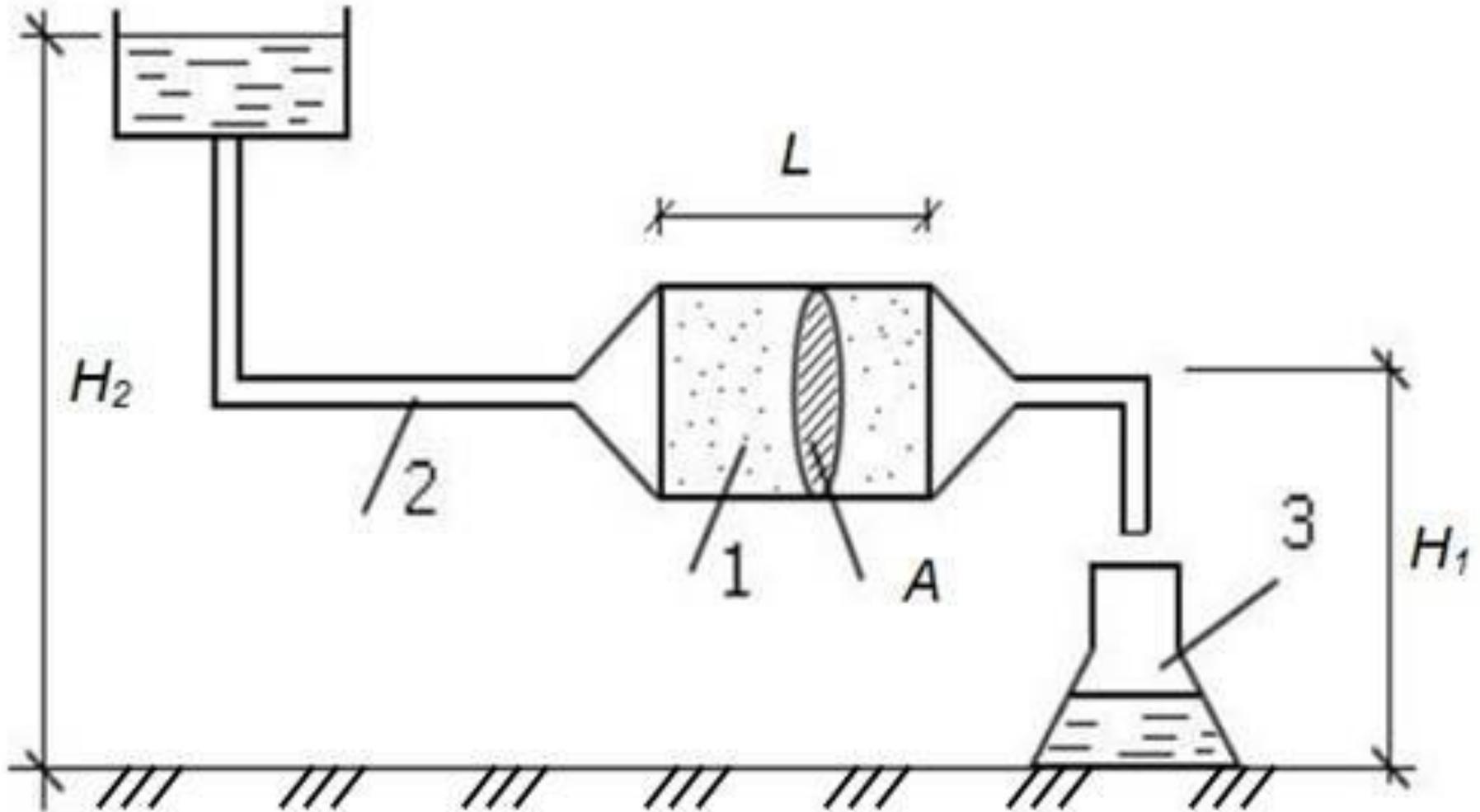
$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_2 - H_1}{L}$$

$\Delta H$  – перепад высот, м;

$L$  – длина пути фильтрации, м;

$k_f$  – коэффициент фильтрации, см/сек, м/час, м/сут.  
(определяется экспериментально).

# Определение коэффициента фильтрации песчаных грунтов



Грунт (1) помещается в трубку с поперечным сечением  $A$  и длиной  $L$ ; по подводящей трубке (2) к грунту подводится вода, фильтруется через грунт и собирается в колбе (3).

Коэффициент фильтрации определится как:

$$K_f = \frac{V}{A \cdot i \cdot t}$$

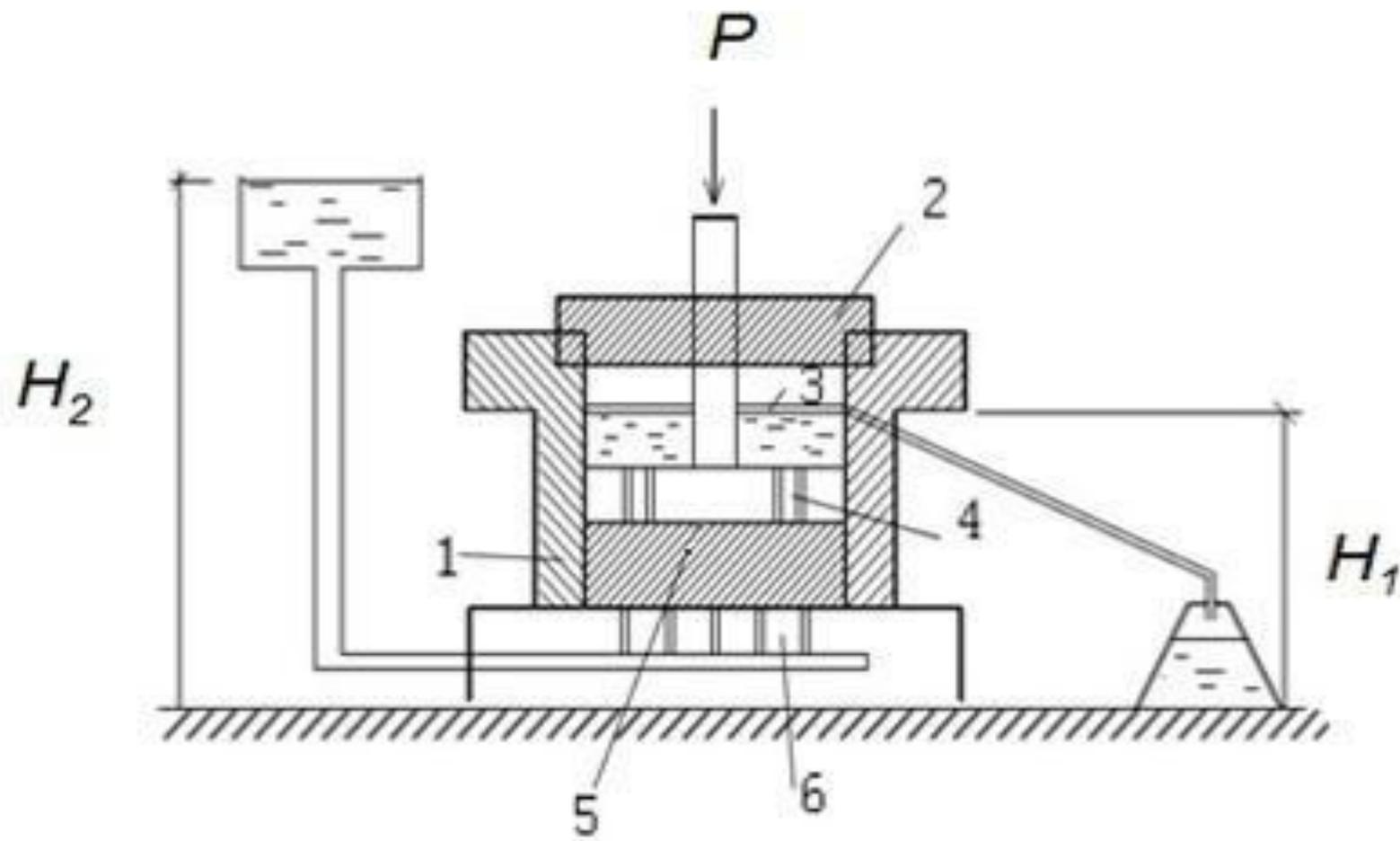
$K_f$  – коэффициент фильтрации

$V$  – объем профильтровавшейся воды

$t$  – время фильтрации

# Определение коэффициента фильтрации глинистых грунтов

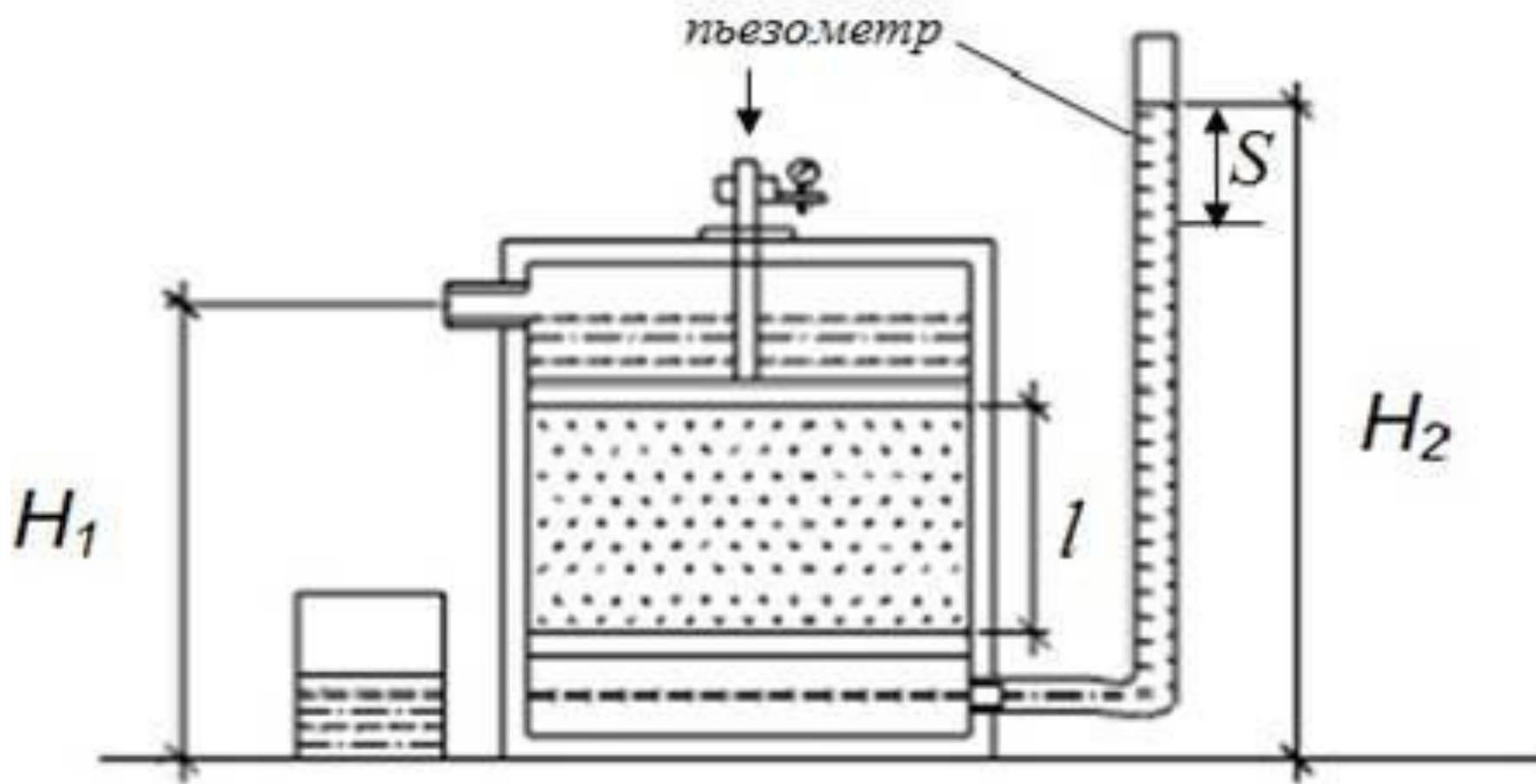
*Производится на приборе Б.И. Далматова*



Образец грунта (5) помещается в кольцо (1), установленное на фильтрующем днище (6). Сверху устанавливается поршень (4) и на него наливается вода до слива в колбу. Для предотвращения образования мениска на уровне сливного отверстия предусмотрена пластинка (3). Прибор герметично закрывается крышкой (2).

$$K_f = \frac{V}{A \cdot i \cdot t}$$

# Компрессионно-фильтрационный прибор



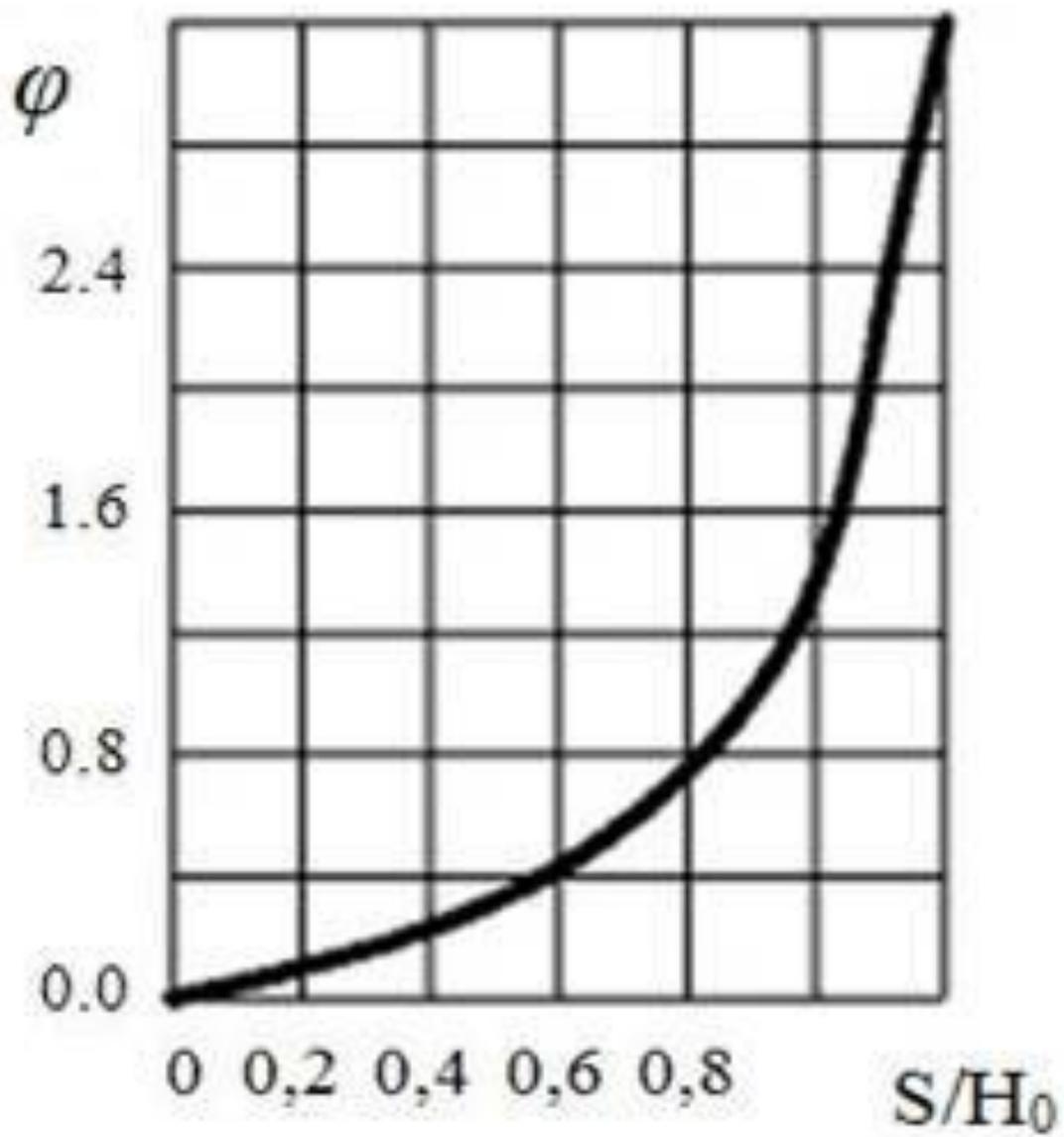
$$K_f = \varphi \frac{al}{At}$$

$\varphi$  – коэффициент, зависящий от величины падения столба воды в трубке ( $S$ ), определяемый по графику или формуле

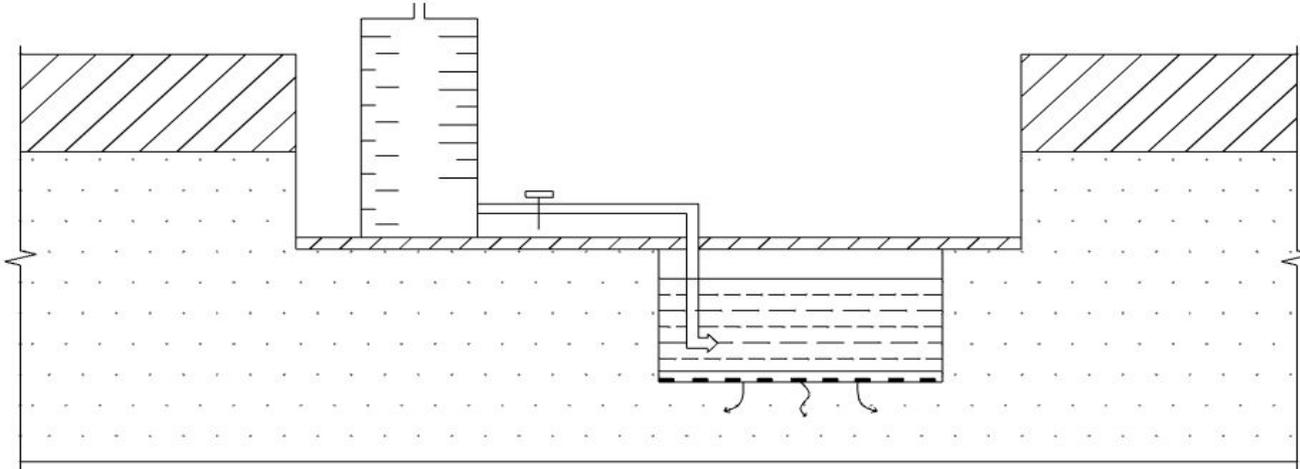
$$\varphi = -\ln\left(1 - \frac{S}{H_0}\right)$$

$$H_0 = H_2 - H_1$$

$a$  – площадь поперечного сечения трубки (пьезометра)



# Полевые испытания

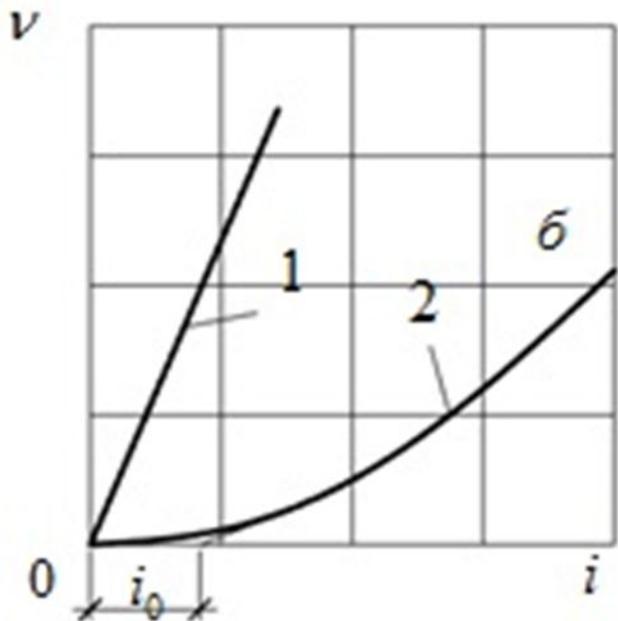


Метод налива воды в шурф (метод А. К. Болдырева)

Принимают  $i \approx 1$ ,  $v \approx k_f$

$$K_f = \frac{V_{\omega}}{A_K}$$

$A_K$  - площадь кольца в шурфе



Исленные опыты по  
 в песчаных  
 от полную  
 на Дарси (кривая  
 с глинистыми  
 систематическое  
 этого закона (кривая 2).  
 тах, особенно плотных, при

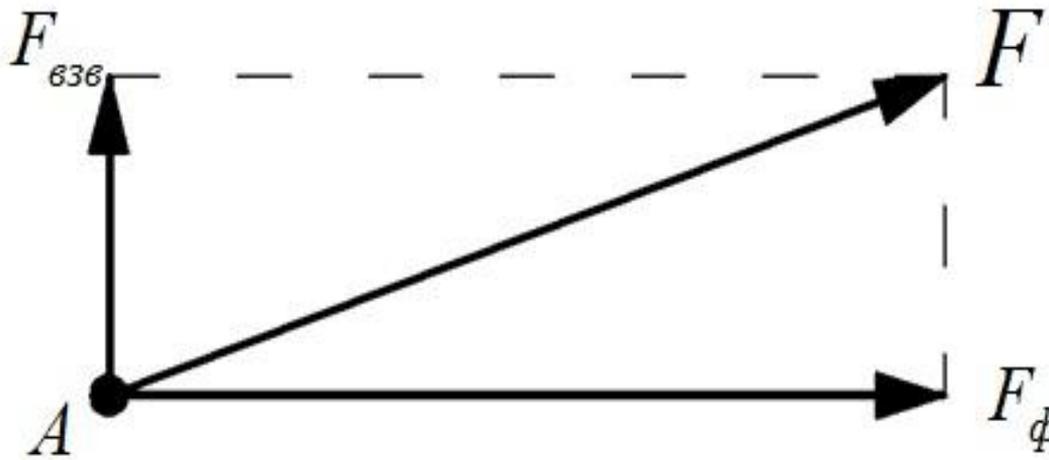
относительно небольших значениях градиента  
 напора фильтрация может не возникать (начальный  
 участок кривой 2). Увеличение градиента приводит к  
 постепенному, очень медленному развитию  
 фильтрации. Наконец, при некоторых значениях  
 гидравлического градиента устанавливается  
 постоянный режим фильтрации.

Закон ламинарной фильтрации для глинистых грунтов принимают в виде

$$v = k' (i - i_0),$$

где  $k'$  – коэффициент фильтрации глинистого грунта, определяемый в интервале зависимости между точками а и б;

$i_0$  – начальный градиент напора, т.е. участок на оси  $i$ , отсекаемый продолжением отрезка прямой аб до пересечения с этой осью.



Твердая частица

На каждую твердую частицу  $A$ , находящуюся в фильтрационном потоке, действует сила  $F$ , которая раскладывается на составляющие:

- $F_{\phi}$  – фильтрационная сила (сила гидродинамического движения воды) – стремящаяся переместить твердую частицу грунта с потоком воды;
- $F_{взв}$  – взвешивающая (Архимедова сила) – оказывающая взвешивающее воздействие на твердую частицу.

При движении воды в грунтах происходят процессы, осложняющие строительство:

- **Механическая суффозия** – перенос мелких частиц с потоком воды. Приводит к увеличению пористости, увеличению скорости фильтрации и разрушению стенок котлованов.

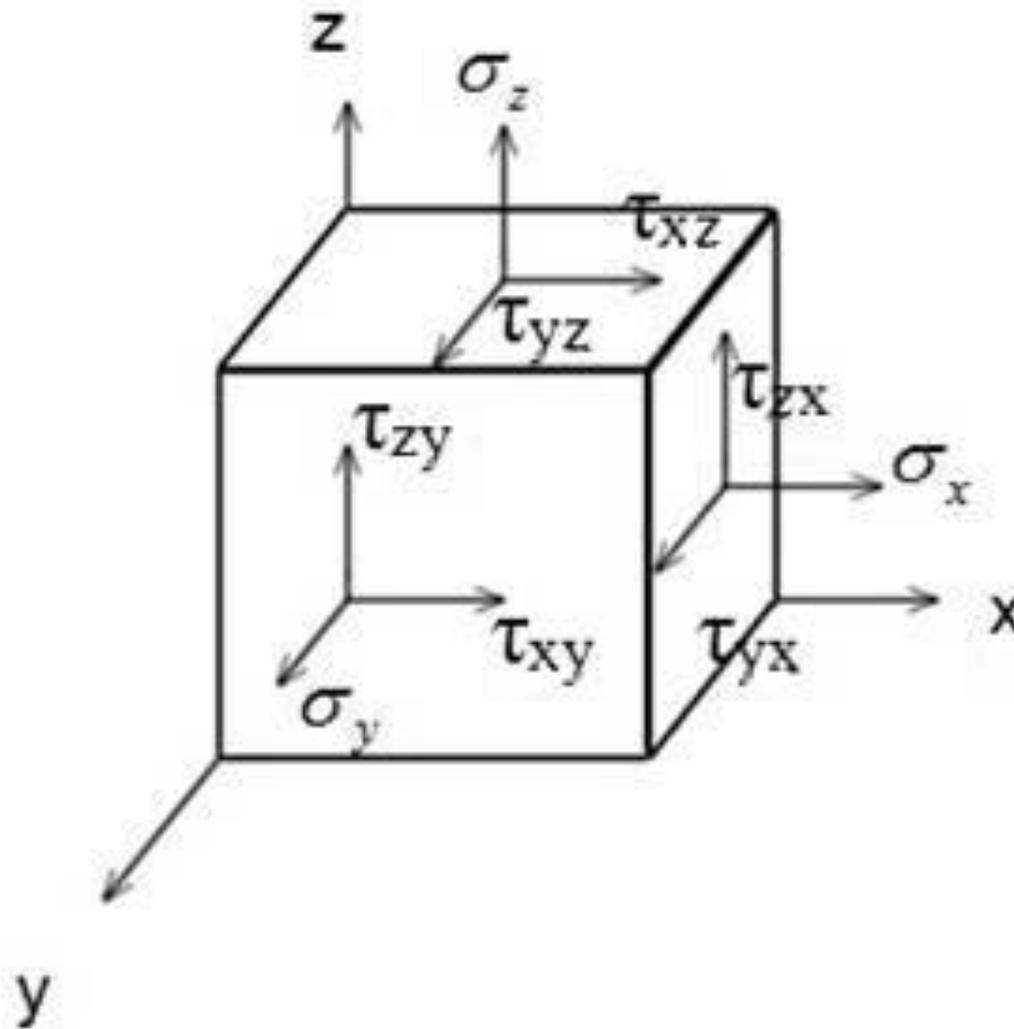
- **Кольматация** – отложение мелких частиц. Приводит к уменьшению пористости, уменьшению скорости потока воды, повышению устойчивости стенок котлованов, но способствует закупорке дренажных устройств.

Различают давление в водонасыщенных грунтах:

- **Эффективное** – давление в скелете грунта;

# Сопротивление грунтов сдвигу

## Закон Кулона

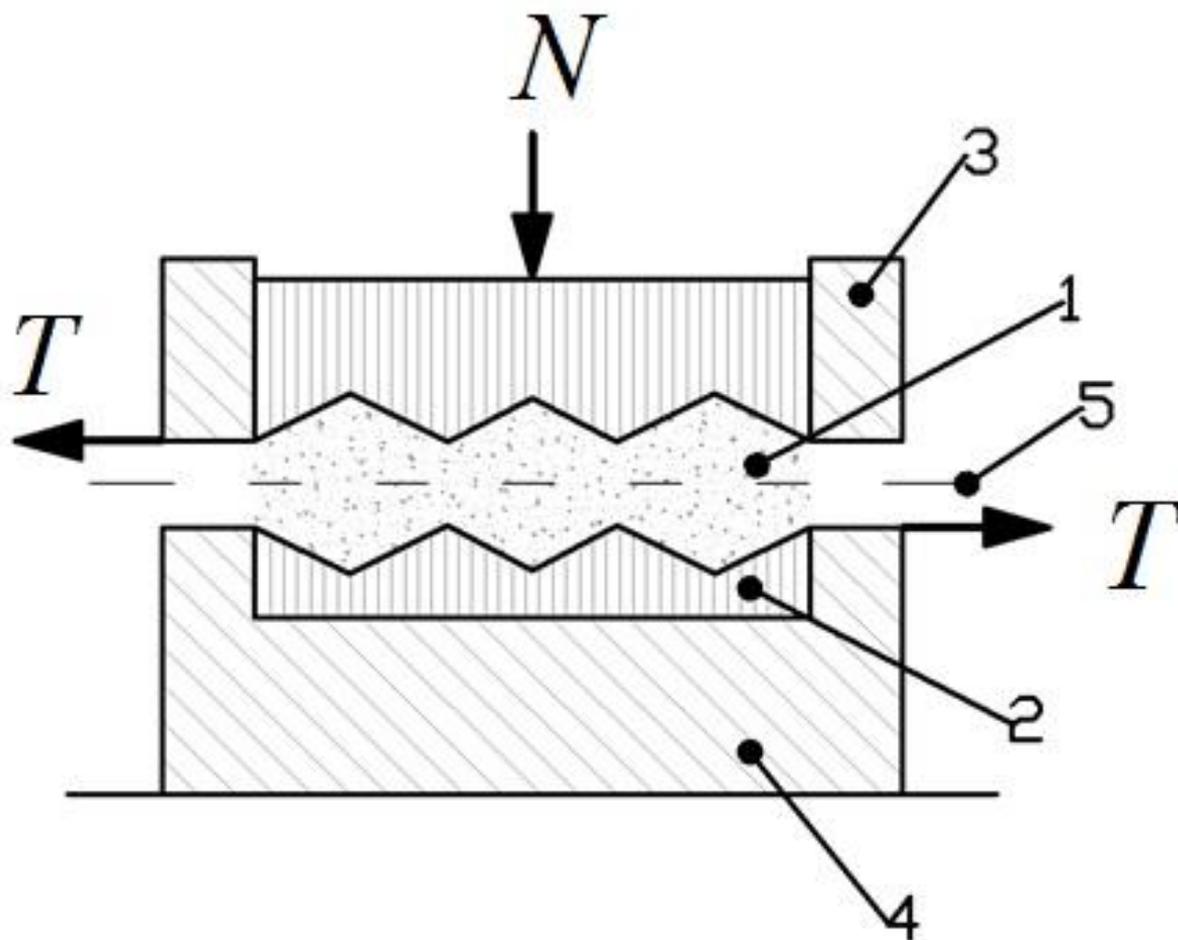


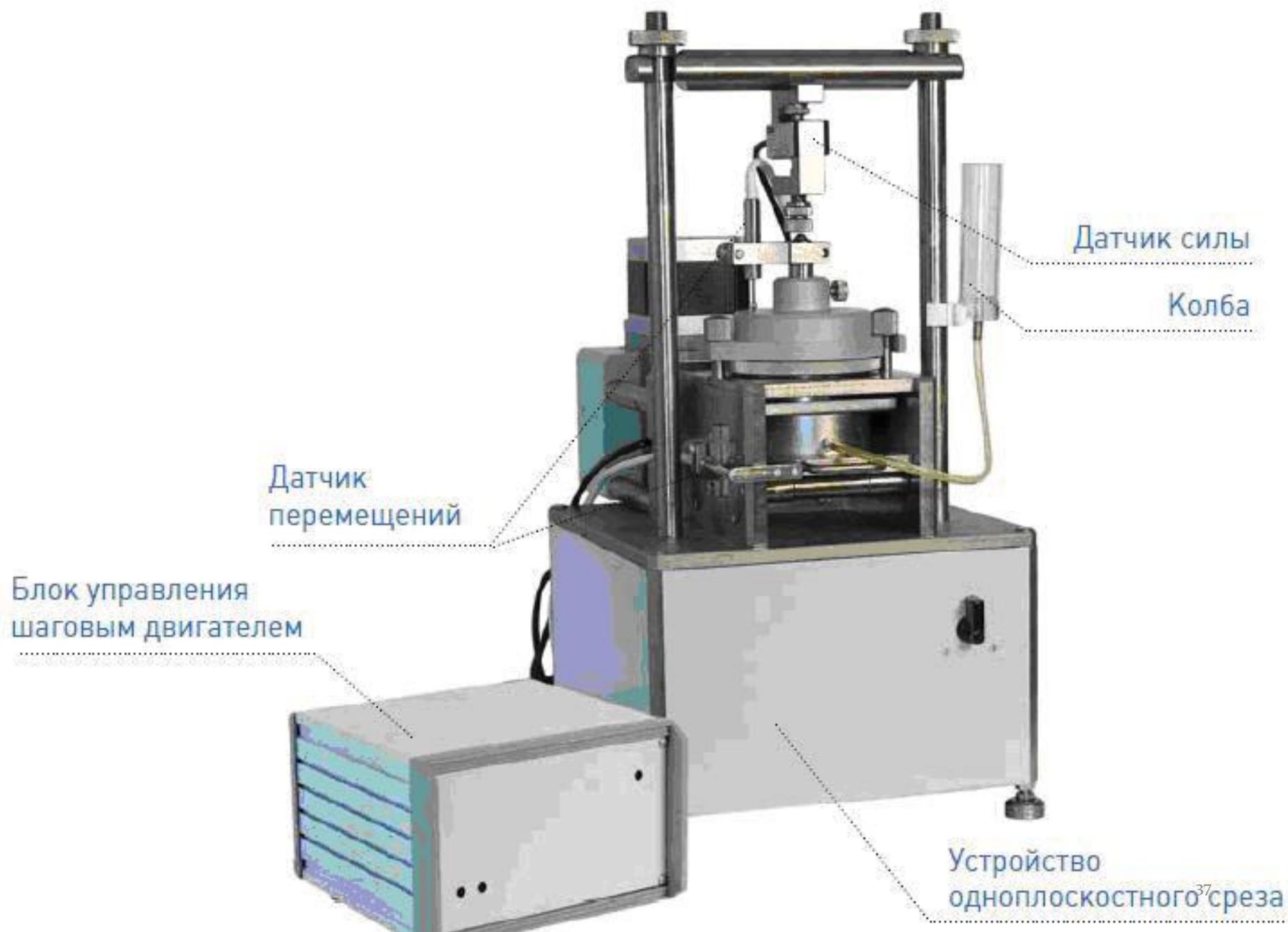
Грунты в основании сооружений испытывают воздействие не только нормальных (сжимающих) напряжений  $\sigma$ , но и касательных (сдвигающих) напряжений -  $\tau$ .

Предельное значение касательных напряжений  $\tau$ , при которых начинается разрушение грунта, называется **сопротивлением сдвигу**, которое является основной сдвиговой (прочностной) характеристикой.

# Способы испытания грунтов на сдвиг

## 1) Испытание грунтов на прямой сдвиг в сдвиговом приборе





Образец грунта (1 ) помещают в сдвиговой прибор с площадью поперечного сечения  $A$ , состоящий из нижней неподвижной обоймы (4) и верхней подвижной (3). Грунт укладывается между зубчатыми фильтрующими пластинами (2) и к нему прикладывается сила  $N$ . При этом в грунте возникают нормальные (сжимающие) напряжения.

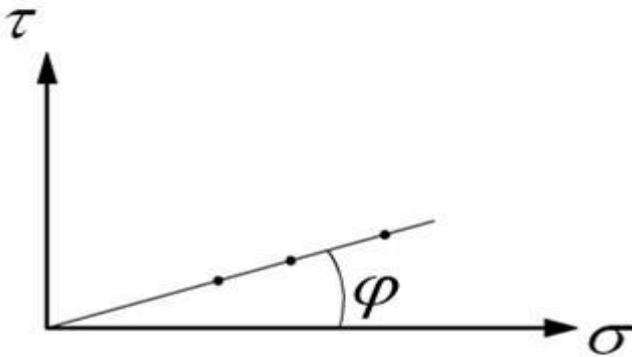
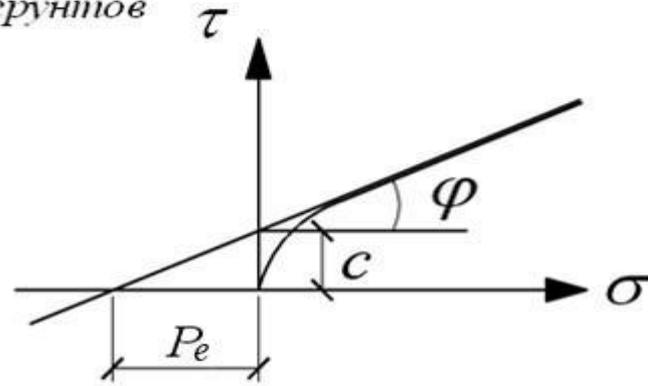
$$\sigma = \frac{N}{A}$$

При  $\sigma = \text{const}$  прикладывается сдвигающая сила  $T$ , в результате чего в некоторой плоскости (5) в грунте возникают касательные (сдвигающие) напряжения  $\tau$ .

$$\tau = \frac{T}{A}$$

При  $\tau = \tau_{\text{пред}}$  происходит сдвиг грунта в плоскости 5.

$\tau_{\text{пред}}$  называется **сопротивлением грунтов сдвигу**. По результатам испытаний строятся графики

<i>Несвязные (песчаные)</i>	<i>Связные (глинистые)</i>
<p data-bbox="285 192 821 278"><i>Закон Кулона для песчаных грунтов</i></p>  $\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$ $\operatorname{tg} \varphi = f$ $\tau = \sigma f$	<p data-bbox="975 192 1535 278"><i>Закон Кулона для глинистых грунтов</i></p>  $\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$ $\tau = c + \sigma f$

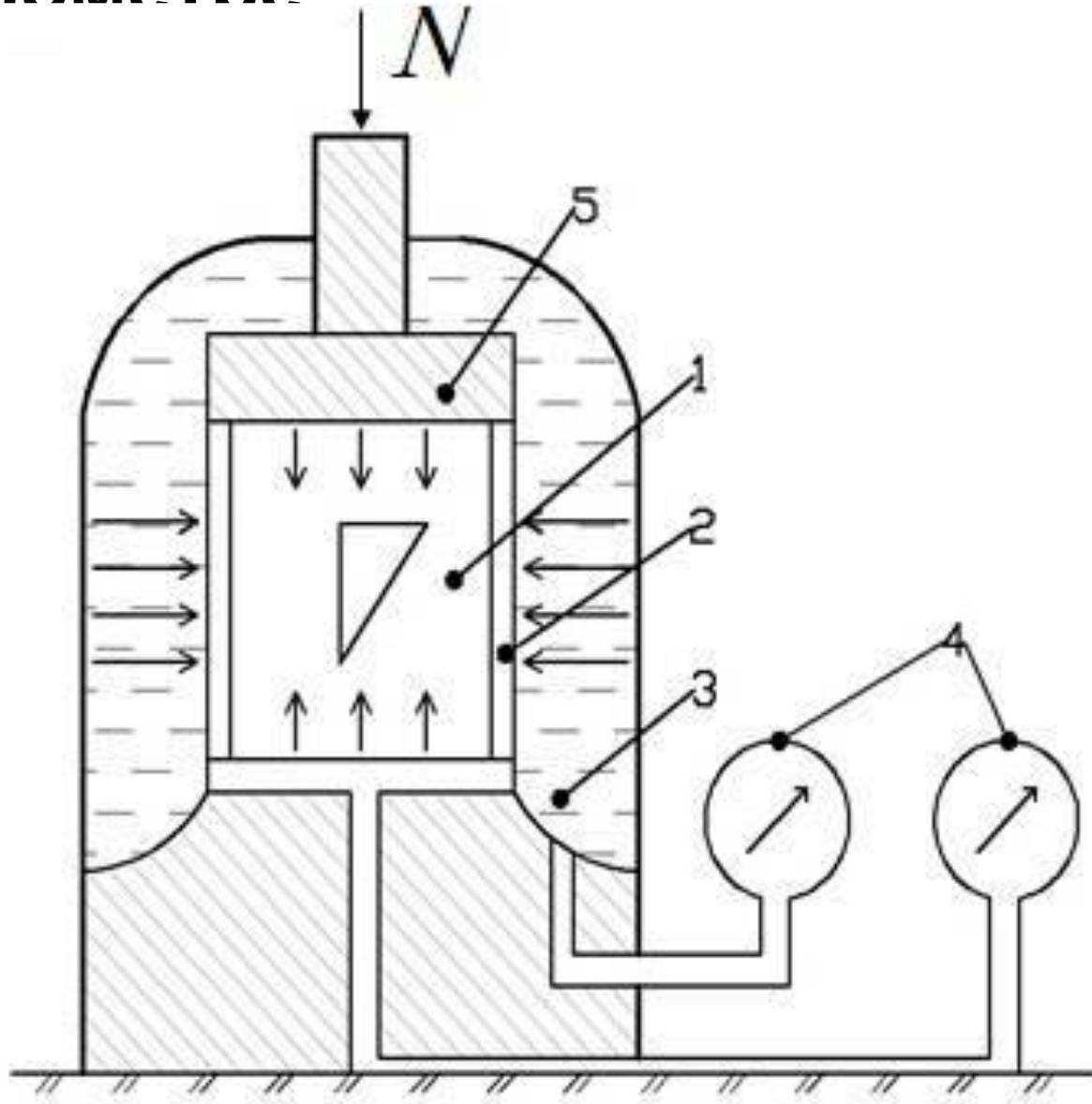
$\varphi$  – угол внутреннего трения грунта, град;

$f$  – коэффициент внутреннего трения грунта;

$c$  – удельное сцепление грунта, КПа;

$p_e$  – давление связности, КПа.

## 2) Испытание грунтов на трехосное сжатие в стабилометре



Панель управления давлением

Датчик перемещений

Датчик силы

Камера трехосного сжатия тип А

Устройство осевого нагружения

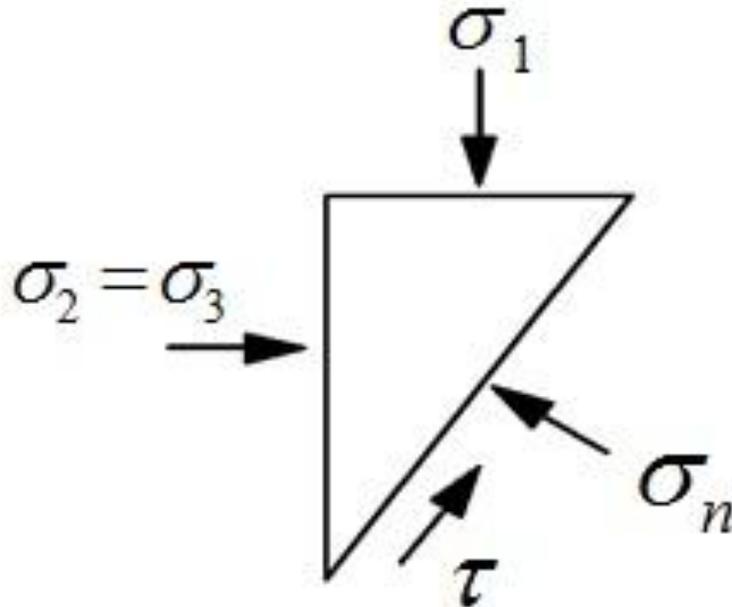
Блок электронно-преобразующий

Камера трехосного сжатия тип Б



С целью приближения лабораторных условий к естественным используют прибор для трехосного сжатия **стабилометр**

Образец грунта (1) в резиновой оболочке (2) помещают в колбу с жидкостью (3) и при помощи поршня (5) прикладывают силу  $N$



*Образец грунта подвергается всестороннему сжатию*

*Давление сооружений имитируется силой  $N$ ,  
давление соседних грунтов - давлением  
жидкости в колбе.*

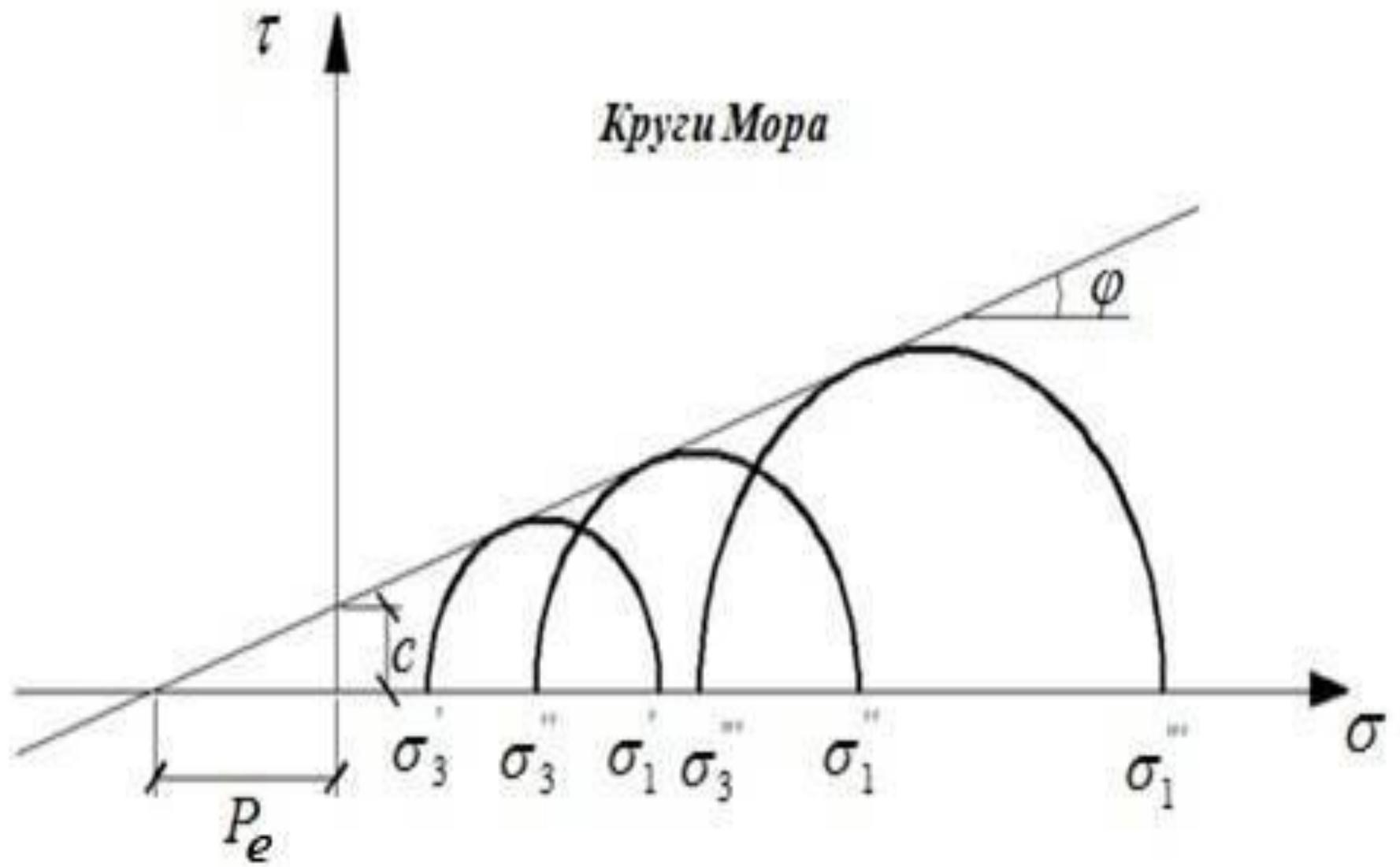
***Опыт проводят на 3 – х образцах***

*1 опыт:  $\sigma_2' = \sigma_3' \longrightarrow \sigma_1'$*

*2 опыт:  $\sigma_2'' = \sigma_3'' \longrightarrow \sigma_1''$*

*3 опыт:  $\sigma_2''' = \sigma_3''' \longrightarrow \sigma_1'''$*

# Круги Мора



# ***Условие предельного равновесия***

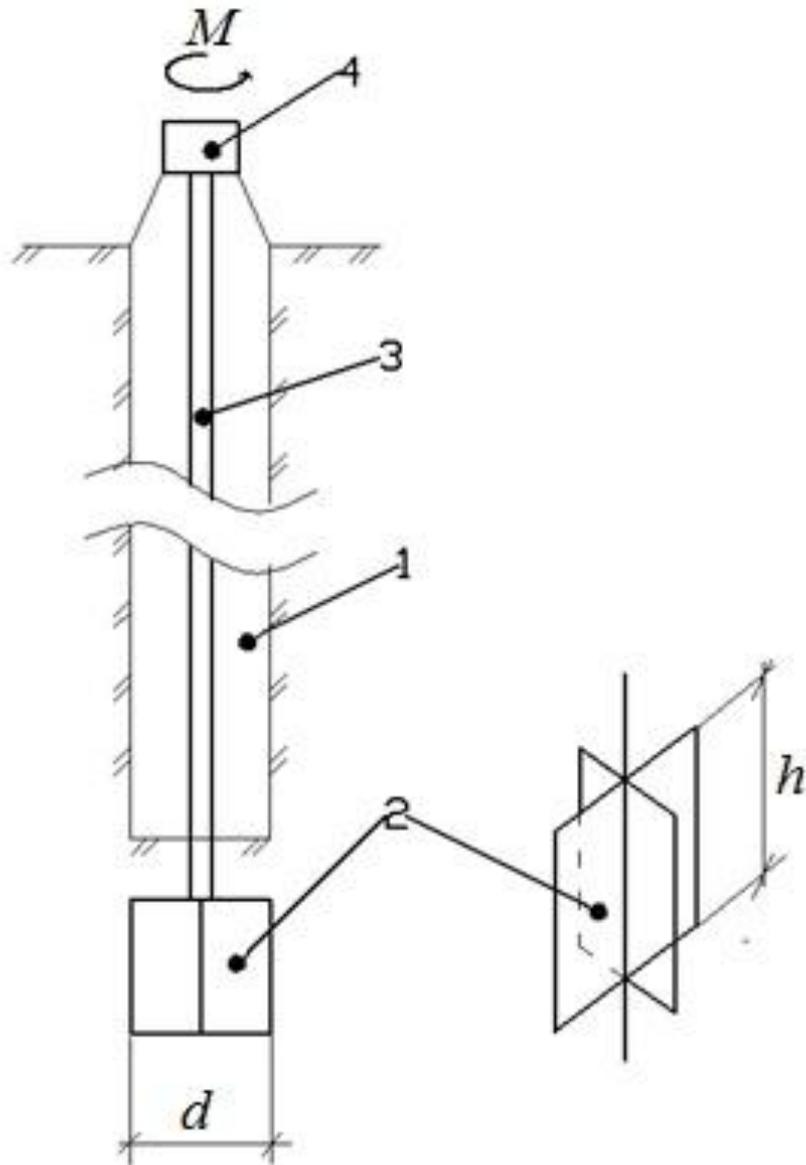
*сыпучие грунты:*

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$$

*связные грунты:*

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2P_e}$$

### 3) Испытание грунтов на срез с помощью крыльчатки



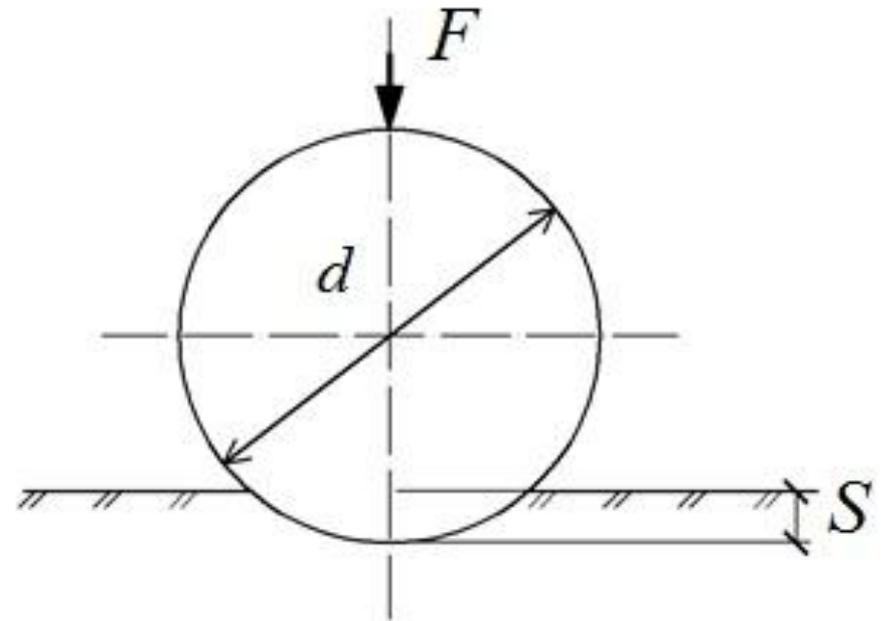
Через скважину (1) в грунт погружается крыльчатка (2). С помощью штанги (3) и вращательного устройства (4) она приводится в движение. Фиксируют максимальный крутящий момент  $M_{max}$

$$\tau = \frac{M_{\max}}{B} \quad B = \frac{\pi d^2 h}{2} \left(1 + \frac{d}{3h}\right)$$

$B$  – постоянная крыльчатки (в паспорте прибора)

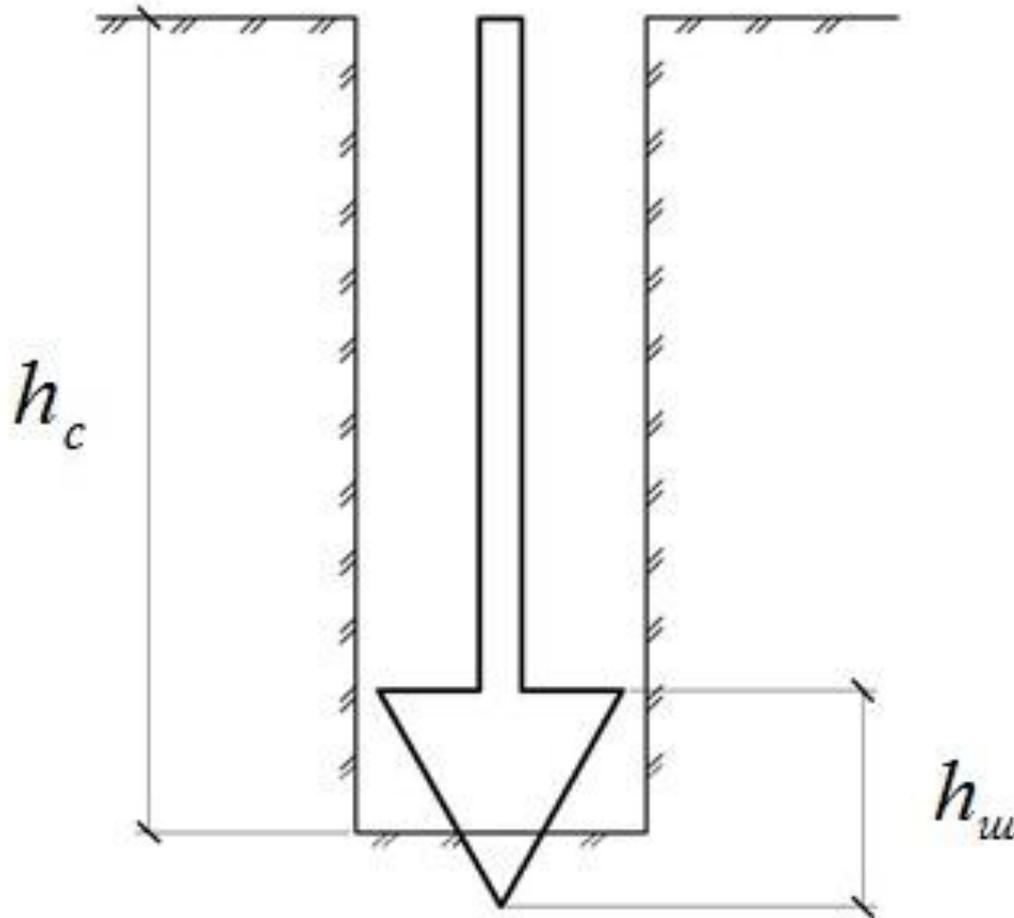
#### 4) Вдавливание штампов

Используется для грунтов с известным углом внутреннего трения  $\varphi$



$$c = 0,18 \frac{F}{\pi d S}$$

# Виды испытаний вдавливанием штампов



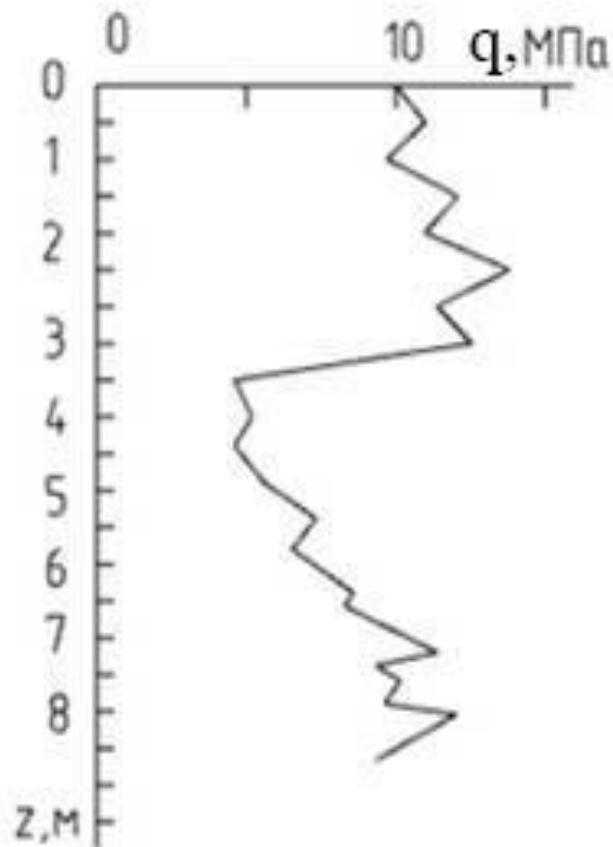
$h_c > h_w$  – глубинное зондирование

$h_c < h_w$  – пенетрация

# ***Методы зондирования***

- ***Статическое:*** заключается в медленном задавливании в грунт стандартного зонда.
- ***Динамическое:*** производится путем забивки или ударно- вращательного погружения в грунт зонда с коническим наконечником

## Статическое зондирование



$$q_s = \frac{N}{A}$$

$$A = 10 \text{ cm}^2$$

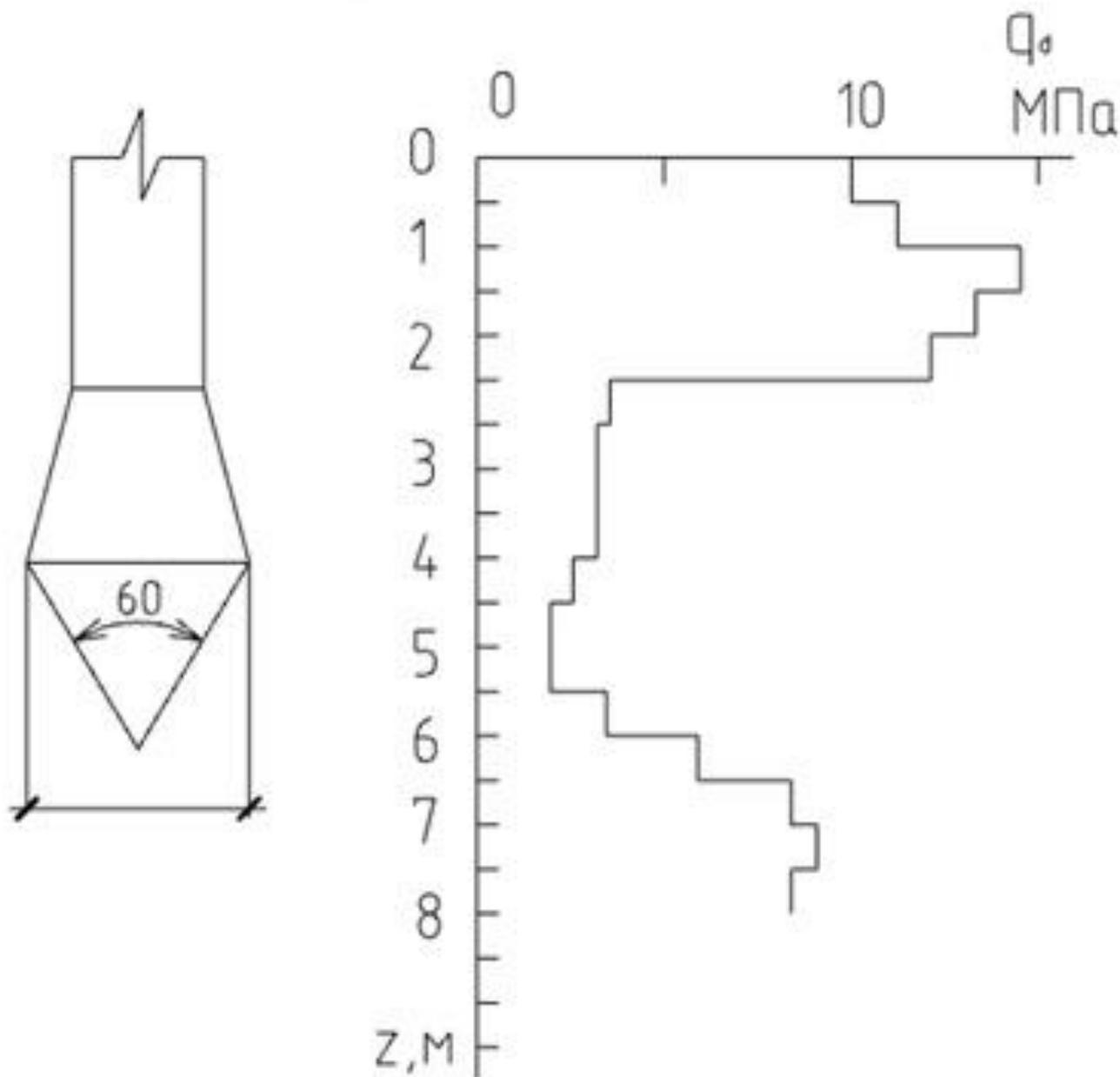
$$E = 3q_s - \text{для песчаных грунтов}$$

$$E = 7q_s - \text{для суглинков и глин}$$

$$\text{tg} \varphi = 0.045 q_s + 0.26$$

$$c = 0.011 q_s + 0.125$$

## Динамическое зондирование



$$q_d = \zeta \frac{An}{h}$$

$$E = mq_d$$

<i>m</i>	<i>Песок природного сложения</i>	
<i>14...16</i>	<i>Гравелистый Крупный Средней крупности</i>	
<i>10...12</i> <i>6...8</i>	<i>Мелкий</i>	$S_r \leq 0.5$ $S_r > 0.8$
<i>8...10</i> <i>5-6</i> <i>3-4</i>	<i>Пылеватый</i>	$S_r \leq 0.5$ $0.5 < S_r \leq 0.8$ $S_r > 0.8$
<i>6</i>	<i>Суглинки и глины</i>	

*A – удельная энергия зондирования, определяемая в зависимости от типа установки, Н/см*

*p – количество ударов молота*

*h - глубина погружения зонда, см*

*$\zeta$  - коэффициент, учитывающий потерю энергии при ударе молота о наковальню*

*q – удельное сопротивление погружению конуса*