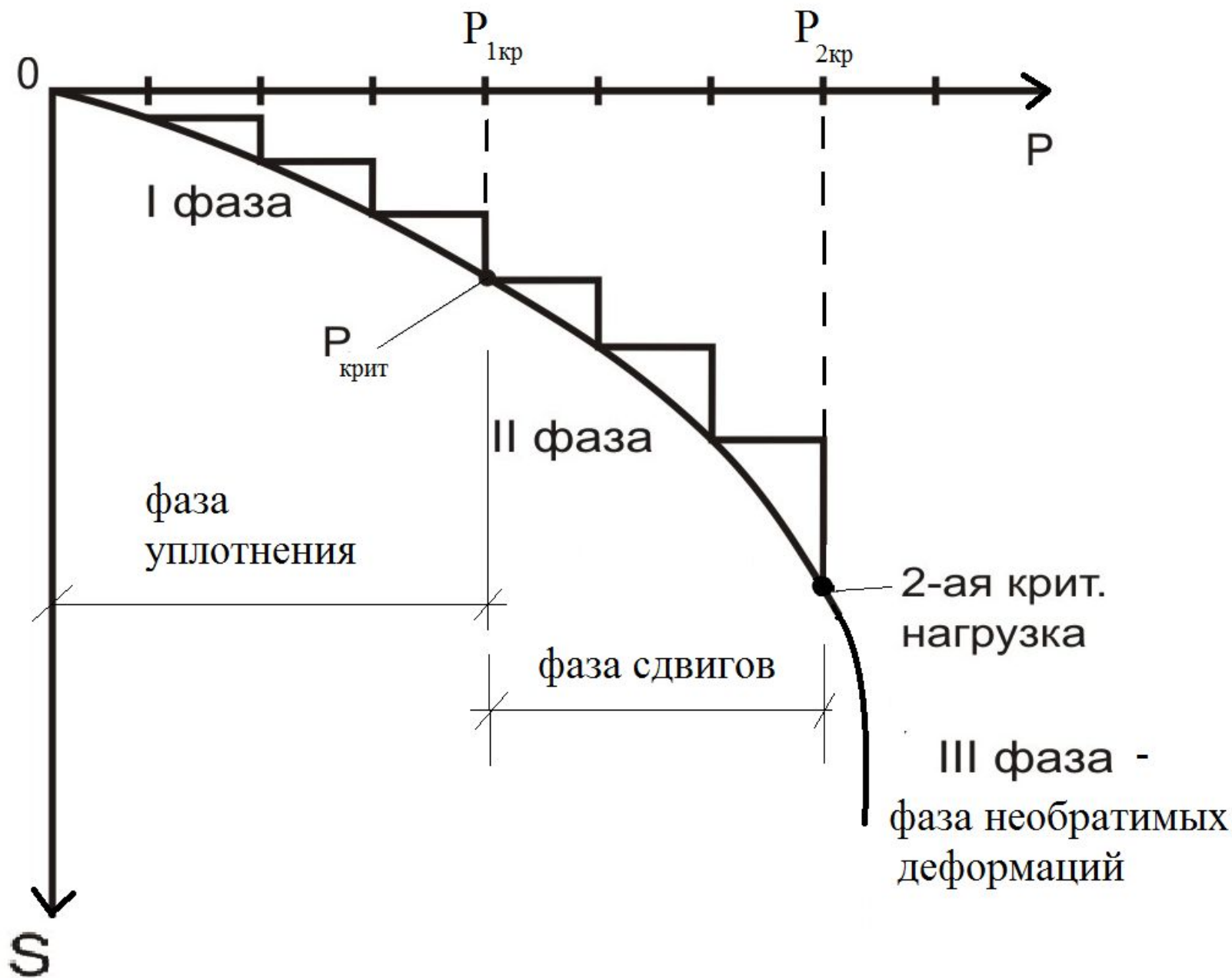
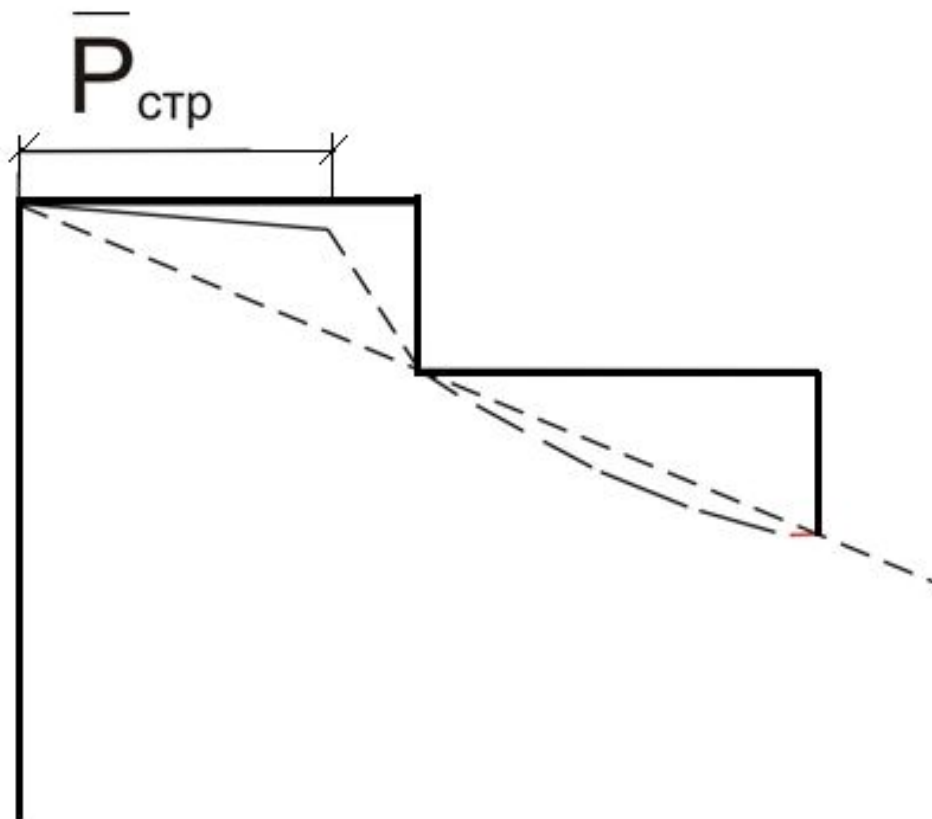


# Фазы напряженного состояния грунта

**Пределное напряженное состояние грунта в данной точке соответствует такому напряженному состоянию, при котором малейшее добавочное силовое воздействие нарушает существующее равновесие и приводит грунт в неустойчивое состояние: в массиве грунта возникают поверхности скольжения, разрывы, просадки и нарушается прочность между его частицами и их агрегатами.**

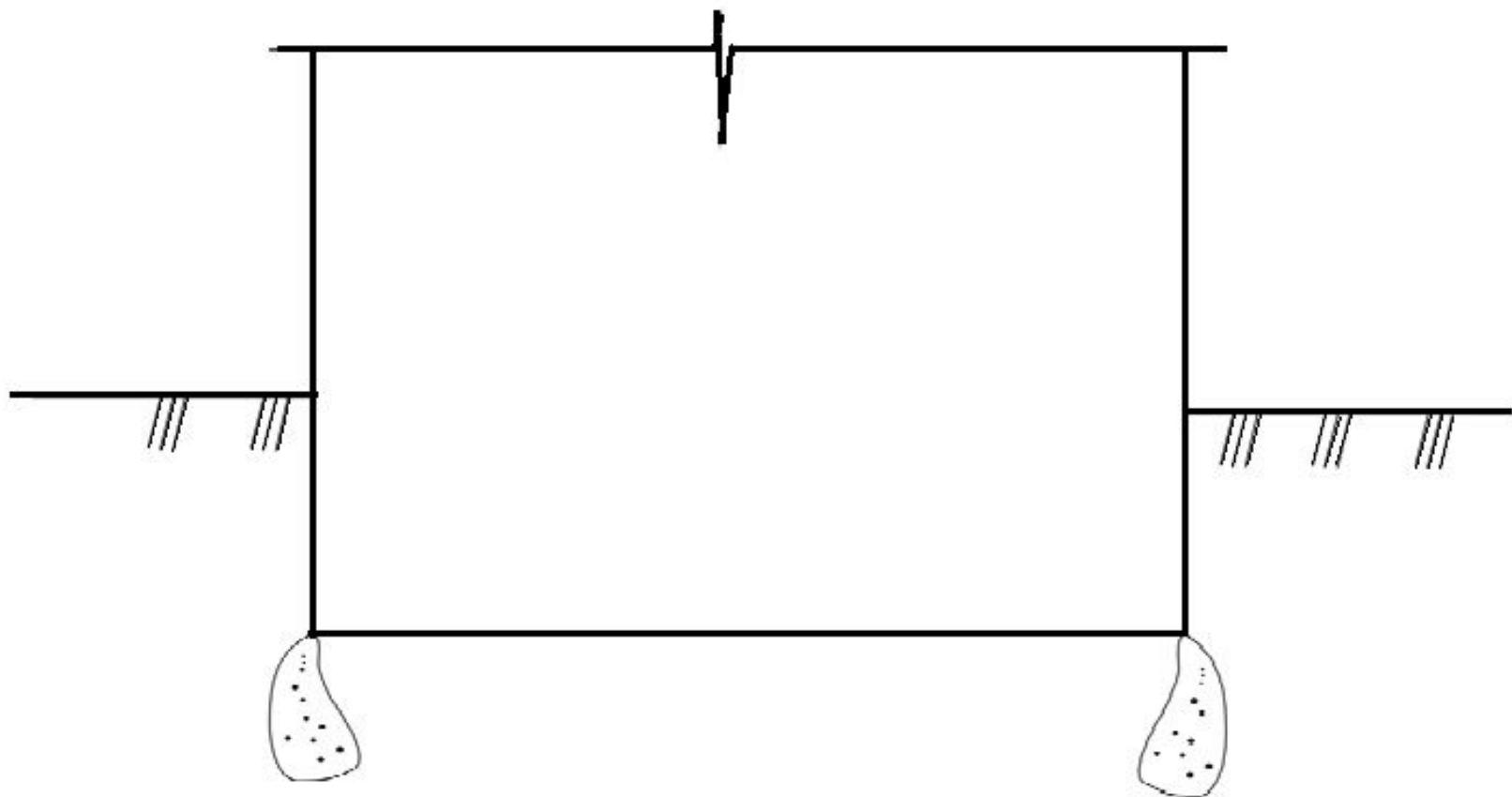




Первая фаза напряженного состояния называется фазой уплотнения.

Конец фазы уплотнения и начало образования зон сдвигов соответствует начальной критической нагрузке (или 1-ой критической нагрузке).

1<sup>ая</sup> критическая нагрузка – нагрузка, соответствующая началу возникновения в грунте зон сдвигов и окончанию фазы уплотнения, когда под краем нагрузки между касательными и нормальными напряжениями возникают соотношения, приводящие грунт (сначала у ребер подошвы фундаментов) в предельное напряженное состояние.



В конце фазы уплотнения (начале фазы сдвигов) непосредственно под штампом начинает формироваться жесткое ядро ограниченных смещений частиц, которое в дальнейшем расклинивает и разжимает грунт в стороны, обуславливая значительные с



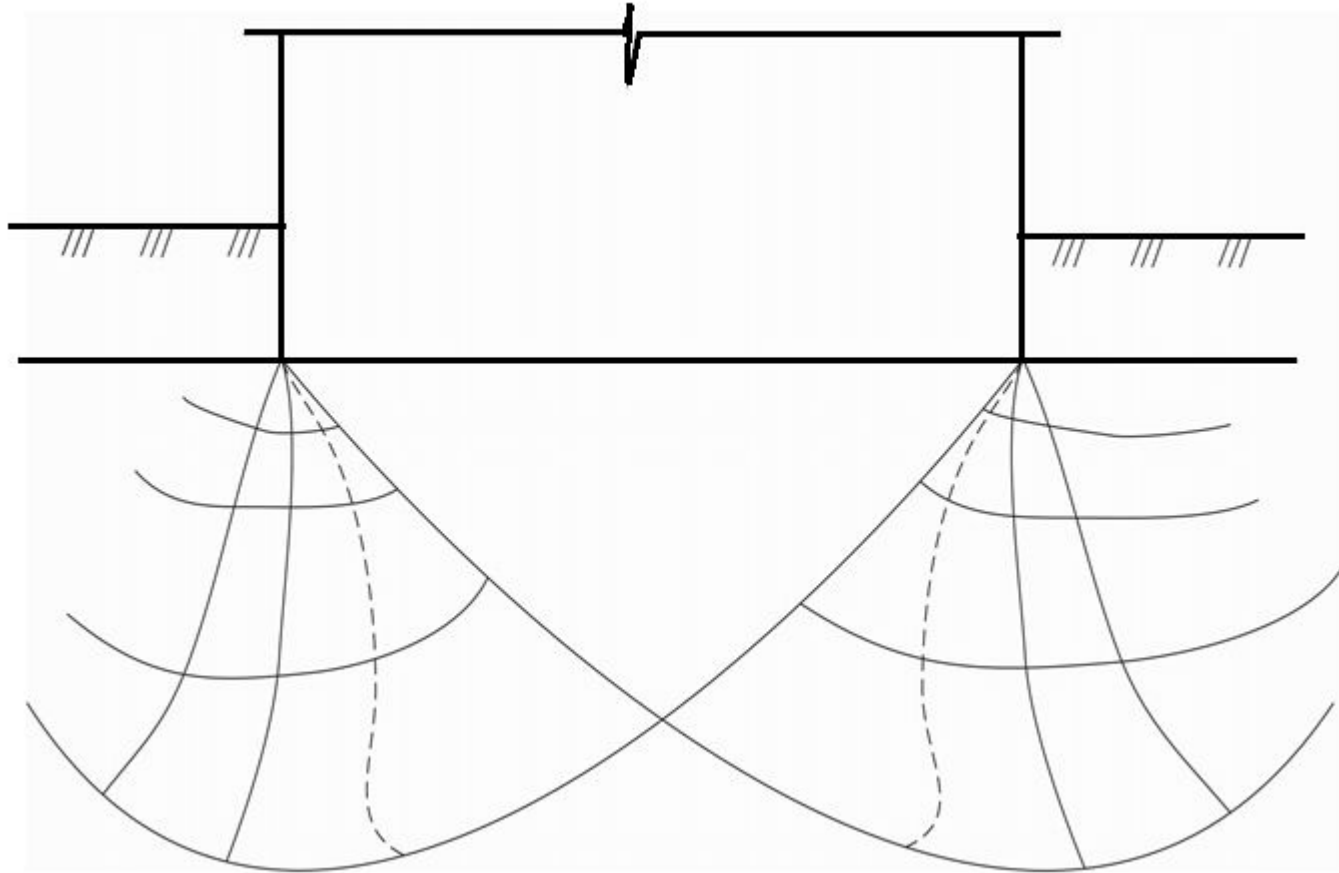
Рис. Форма жесткого ядра в сыпучем материале при вдавлении штампа (по опытам Биареза)

Ядро полностью сформировывается при достижении грунтом его максимальной несущей способности, после чего остается неизменным, но возникают добавочные пластические области ядра, которые меняя свое положение, как бы выискивают более слабые места в массиве грунта, в то время как жесткое ядро, оставаясь без изменения, внедряется в массив грунта.

При возникающем при этом предельным напряженным состоянии грунта преобладают боковые смещения частиц и формируются непрерывные поверхности скольжения, в результате чего толща грунта теряет устойчивость.



При дальнейшем увеличении нагрузки наступает вторая фаза - фаза сдвигов.



2<sup>ая</sup> критическая нагрузка – нагрузка, при которой под нагруженной поверхностью сформировываются сплошные области предельного равновесия, грунт приходит в неустойчивое состояние и полностью исчерпывается его несущая способность.

3 фаза – фаза недопустимых деформаций основания (пластическое или прогрессирующее течение, выпирание, просадка и др. недопустимых деформаций основания).

# Предельное напряженное состояние в точке для сыпучих и связных грунтов

При действии на поверхность грунта нагрузки в любой точке  $M$  для любой площадки  $mn$ , проведенной через эту точку под углом  $\alpha$ , возникнут нормальные и касательные напряжения.

К нормальным напряжениям следует отнести и силы связности, суммарно оцениваемые давлением связности  $p_e$ .

Тогда на площадку  $mn$  будут действовать нормальные напряжения  $\sigma_\alpha + p_e$  и касательные  $T_\alpha$

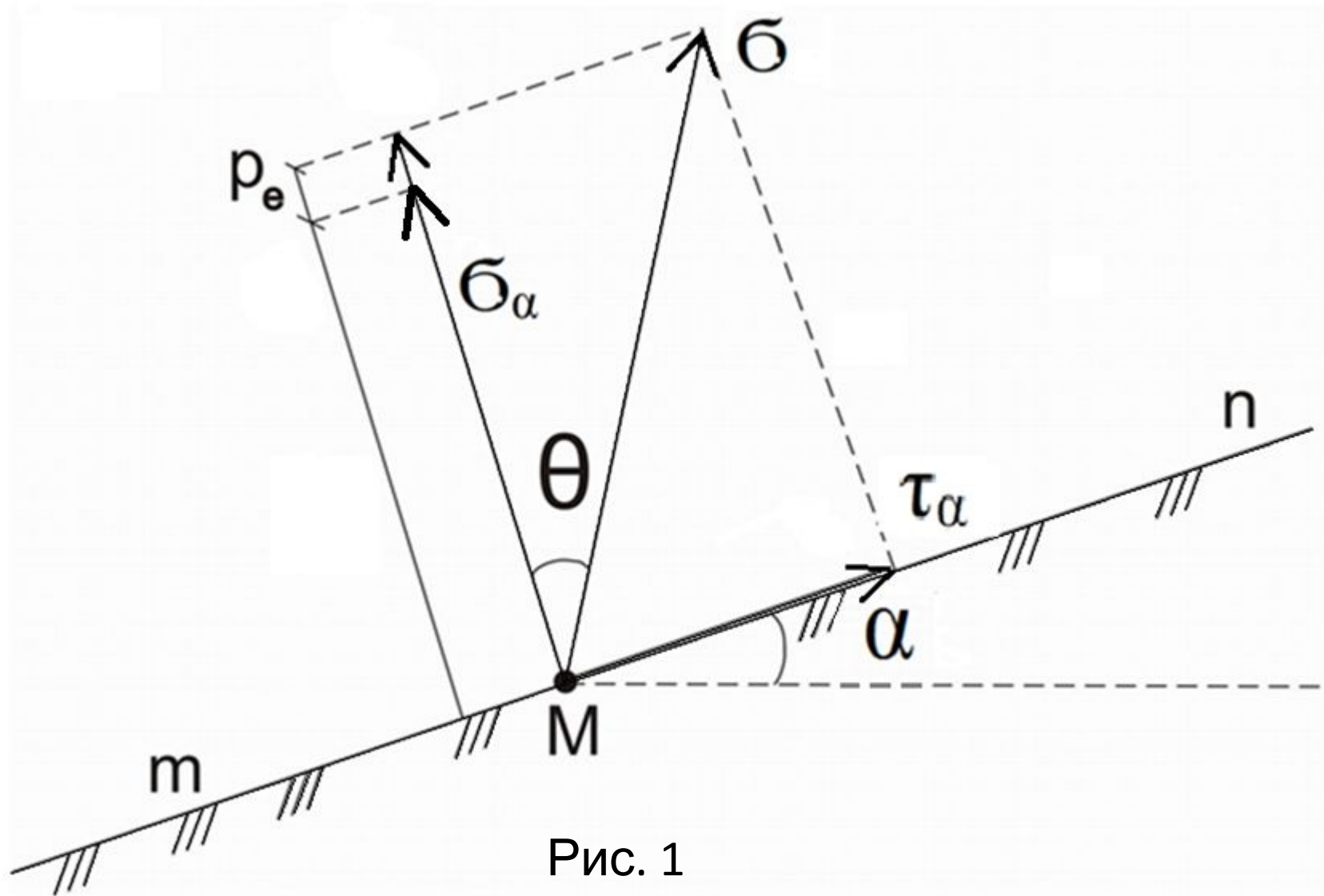


Рис. 1

При изменении угла  $\alpha$ , величины составляющих напряжений также будут меняться и, если касательные напряжения достигнут определенной доли от нормальных, то, как показывают опыты на сдвиг, произойдет скольжение одной части грунта относительно другой. Таким образом, условием предельного равновесия грунта в данной точке будет:

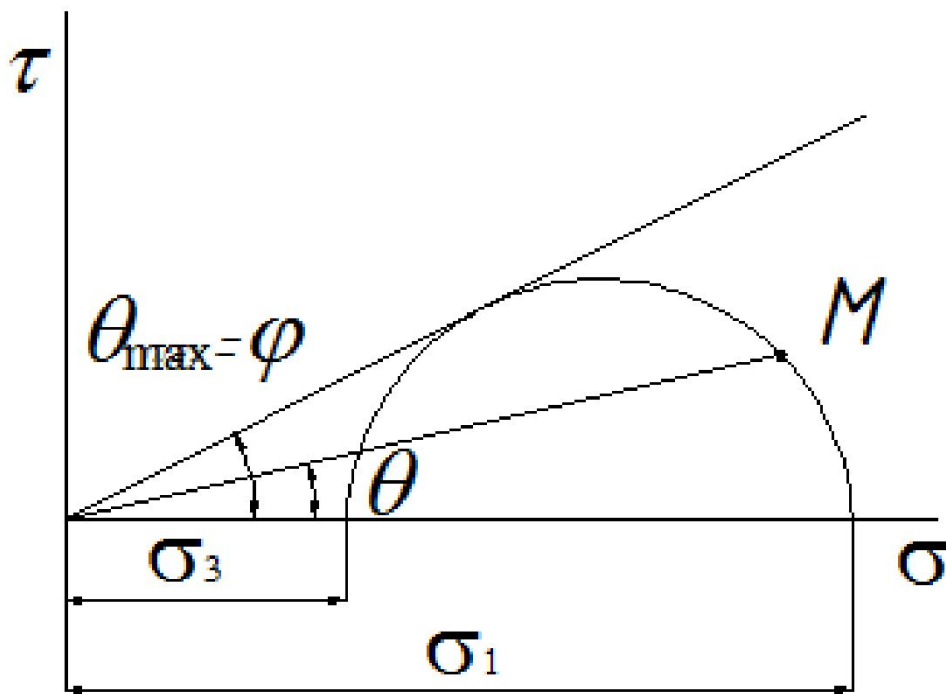
$$\tau_{\alpha} \leq f(\sigma_{\alpha} + p_e) \quad \text{или} \quad \frac{\tau_{\alpha}}{(\sigma_{\alpha} + p_e)} \leq f \quad (1)$$

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

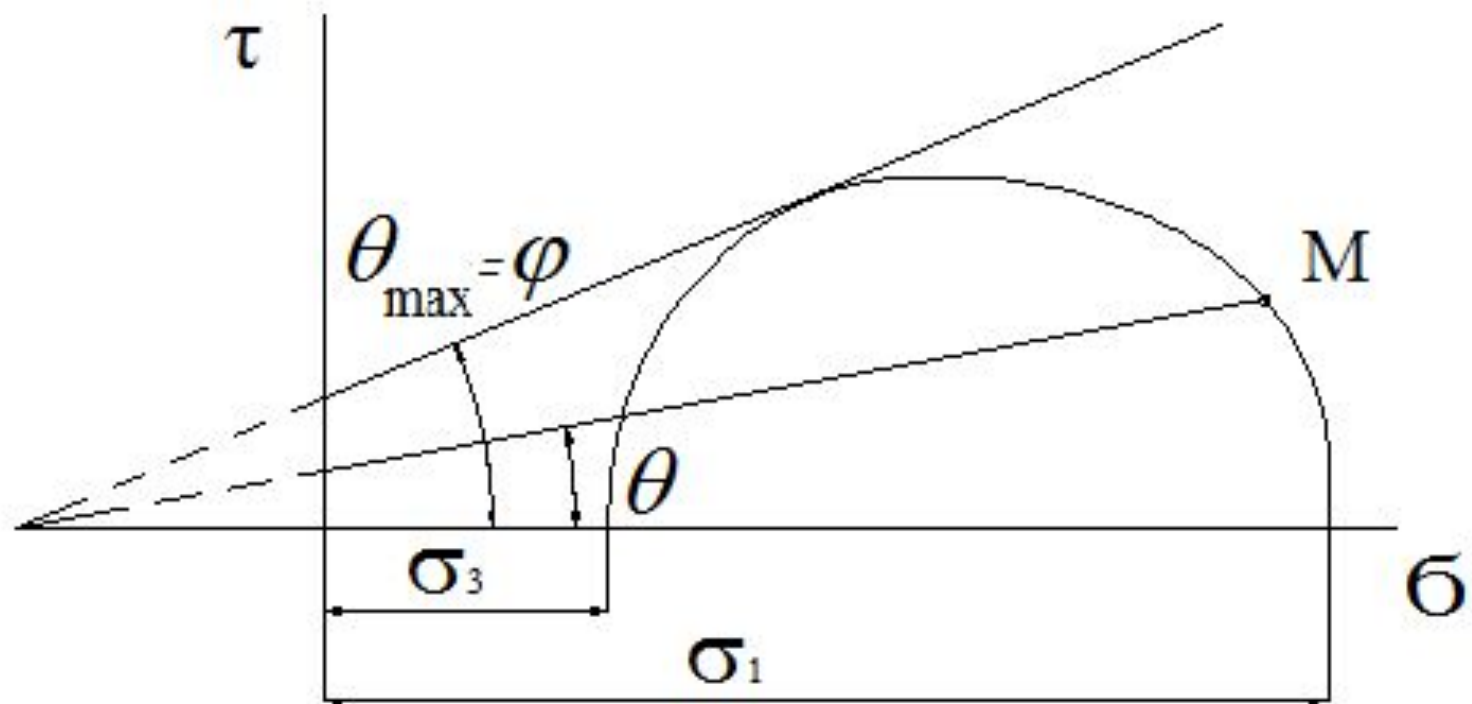
$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

(1) Условие Кулона

Если  $f$ - величина постоянная, то в предельном состоянии она представляет собой тангенс угла наклона прямолинейной огибающей кругов предельных напряжений, кругов Мора.



для сыпучих грунтов



для СВЯЗНЫХ  
грунтов

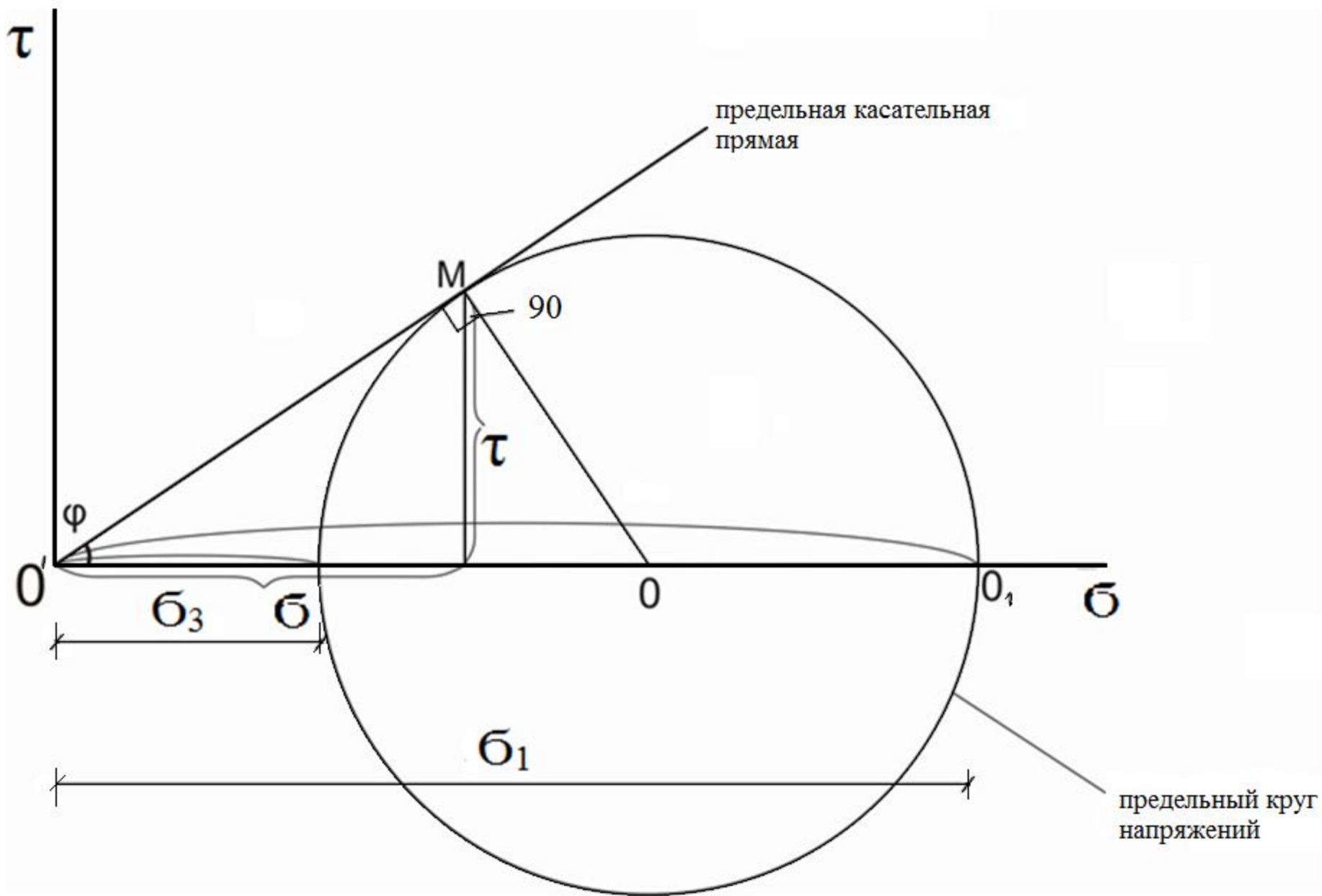
С другой стороны согласно рис.1,

$$\frac{\tau_{\alpha}}{(\sigma_{\alpha} + p_e)} = \operatorname{tg} \theta$$

Это отношение равно тангенсу угла отклонения  $\theta$ , т.е. угла, на который отклоняется полное напряжение для площадки Т от нормали к этой площадке. Т.к. через заданную точку можно провести множество площадок, то, очевидно, необходимо отыскать самую невыгодную площадку, для которой будет существовать максимальный угол отклонения  $\theta$

$$\operatorname{tg} \theta_{\max} \leq f^{\max.}$$





$\left. \begin{array}{l} \sigma_3 - \sigma_{\min} \\ \sigma_1 - \sigma_{\max} \end{array} \right\} d$ 
 на их разности как на  
 строится круг Мора

$$OO_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = r$$

Рассмотрим  $\Delta O'MO$  :  $O'O = \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$

$\sigma_1$  и  $\sigma_3$  - главные напряжения;

$\varphi$  - угол внутреннего трения грунта.

$$OM = OO_1 = r$$

$$\sin \varphi = \frac{OM}{O'O} = \frac{OO_1}{O'O} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)/2}{(\sigma_1 + \sigma_3)/2} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (2)$$

(формула 2)- условие предельного равновесия для сыпучих грунтов.

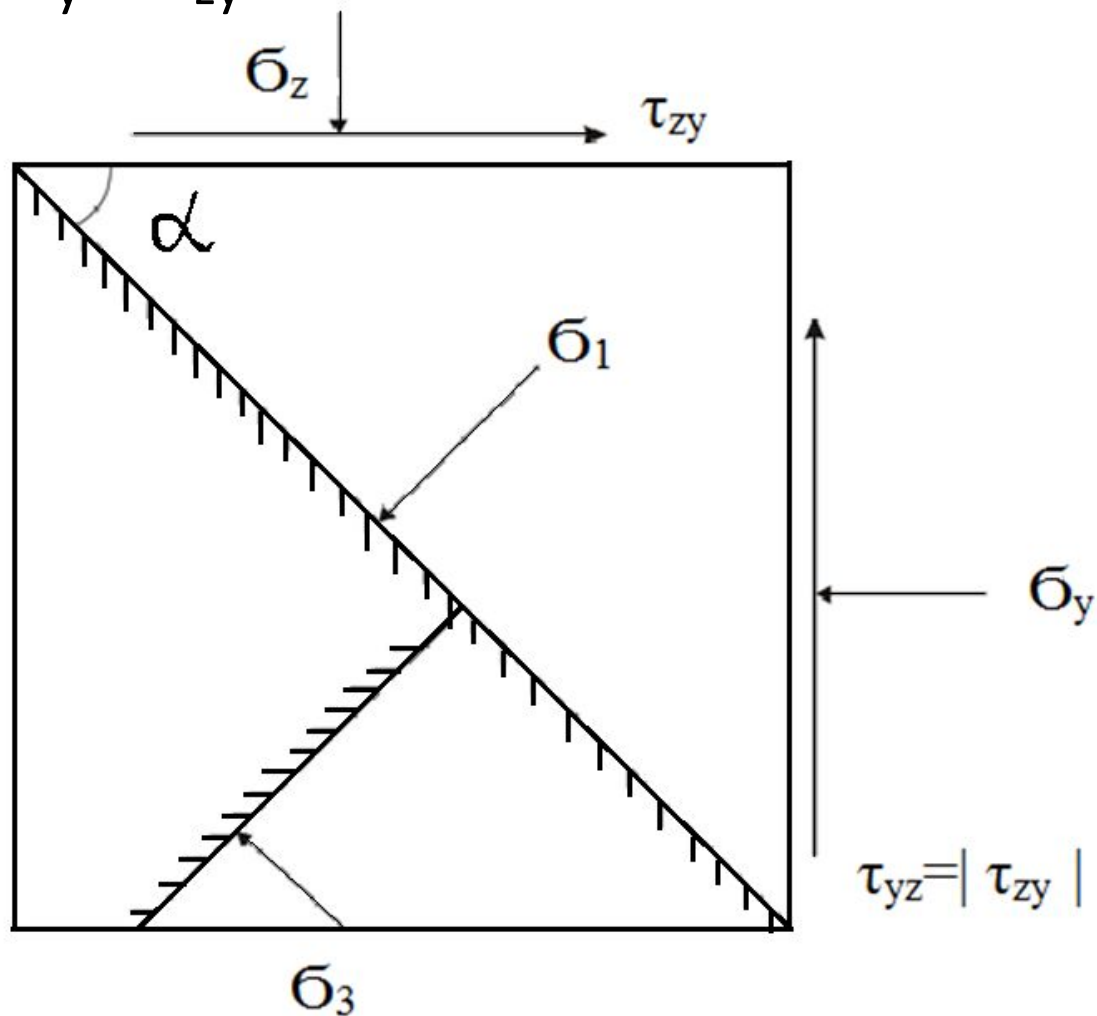
$$\sigma_3 = \sigma_1 (1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi) \quad \text{ил}$$

и

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ \mp \frac{\varphi}{2} \right)$$

Это выражение широко используются в теории давления грунтов на ограждение. Знак «-» соответствует активному давлению, а «+» пассивному сопротивлению сыпучих грунтов.

Условию предельного равновесия можно придать другой вид, выразив главные напряжения  $\sigma_1$   $\sigma_3$  через составляющие напряжений  $\sigma_z$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{zy}$ .



$\sigma_3 \perp$  площадке  $\sigma_1$

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{zy}^2}$$

$$\sin^2 \varphi = \frac{(\sigma_z - \sigma_y)^2 + 4\tau_{zy}^2}{(\sigma_z + \sigma_y)^2}$$

Для связного грунта:

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi}$$

$$\sin^2 \varphi = \frac{(\sigma_z - \sigma_y)^2 + 4\tau_{zy}^2}{(\sigma_z + \sigma_y + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi)^2}$$

# Расчет оснований по несущей способности.

(по I группе предельных состояний)

$$F \leq \gamma_c * F_u / \gamma_n ,$$

где F - расчетная нагрузка

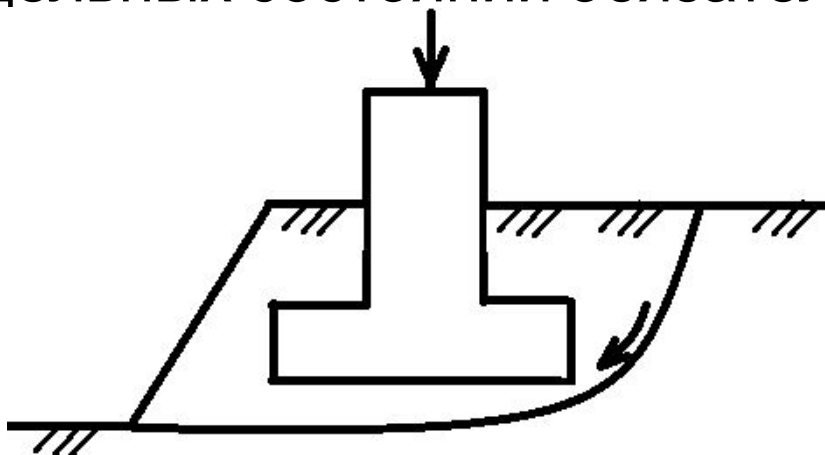
$F_u$  - сила предельного состояния

$\gamma_c$  – коэффициент надежности, принимаемый в зависимости от класса зданий

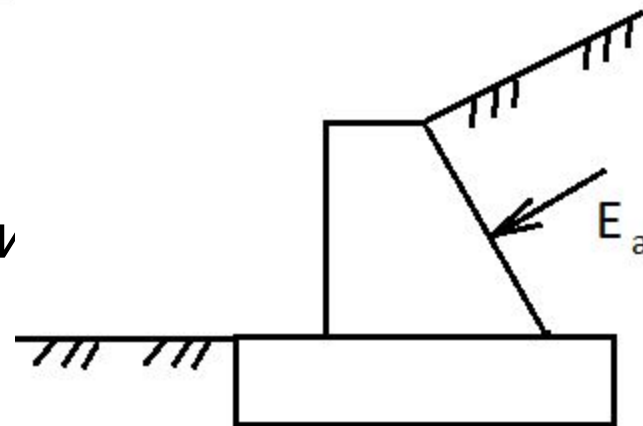
$\gamma_n$  - коэффициент условия работы, принимаемый в зависимости от вида грунта.

Расчет по I группе предельных состояний обязателен в следующих случаях:

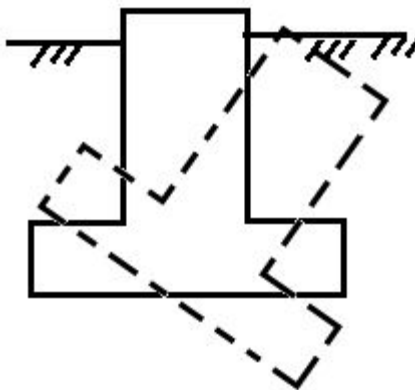
1. Если основание ограничено откосом.



2. Если на фундамент действуют постоянные горизонтальные нагрузки большой величины.



3. Когда фундамент находится на водонасыщенном, слабофильтрующем глинистом грунте.



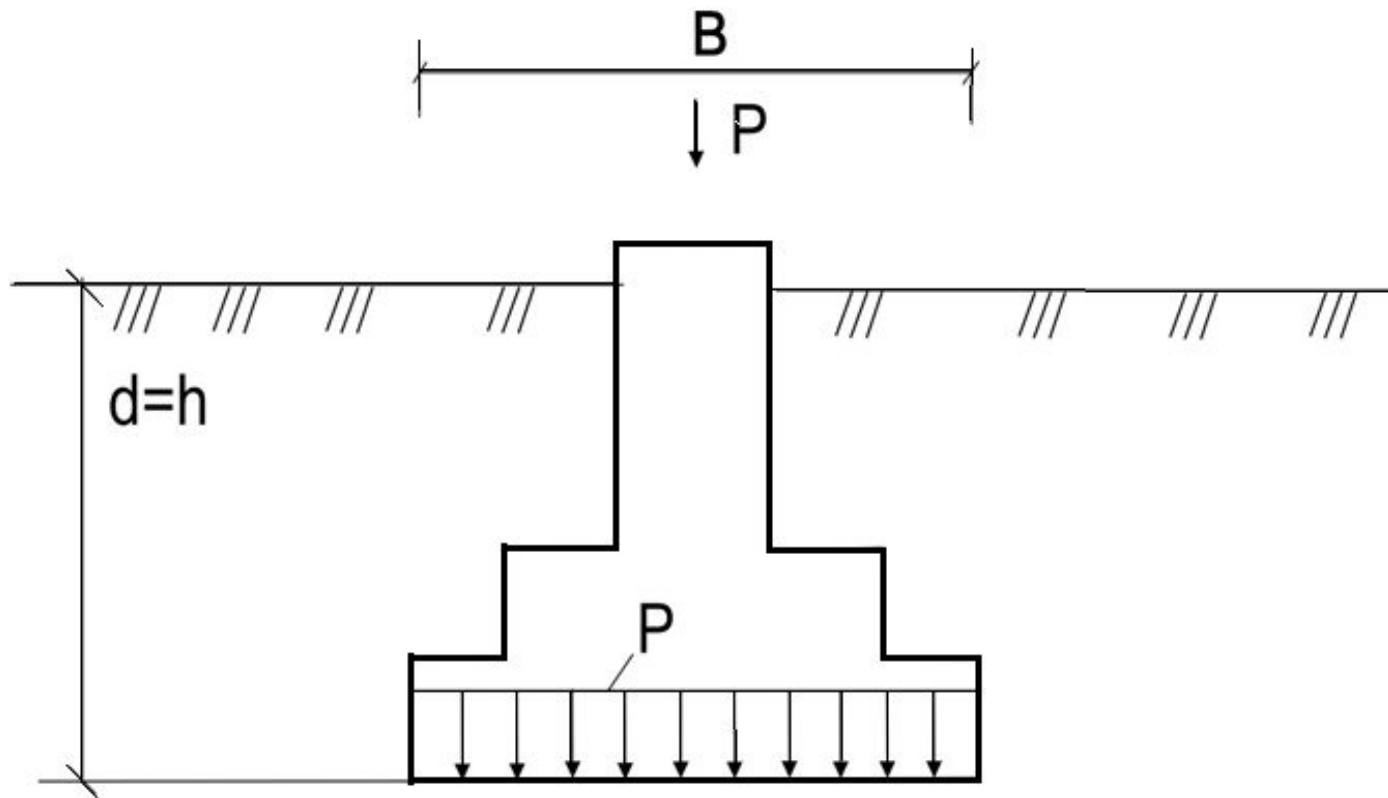


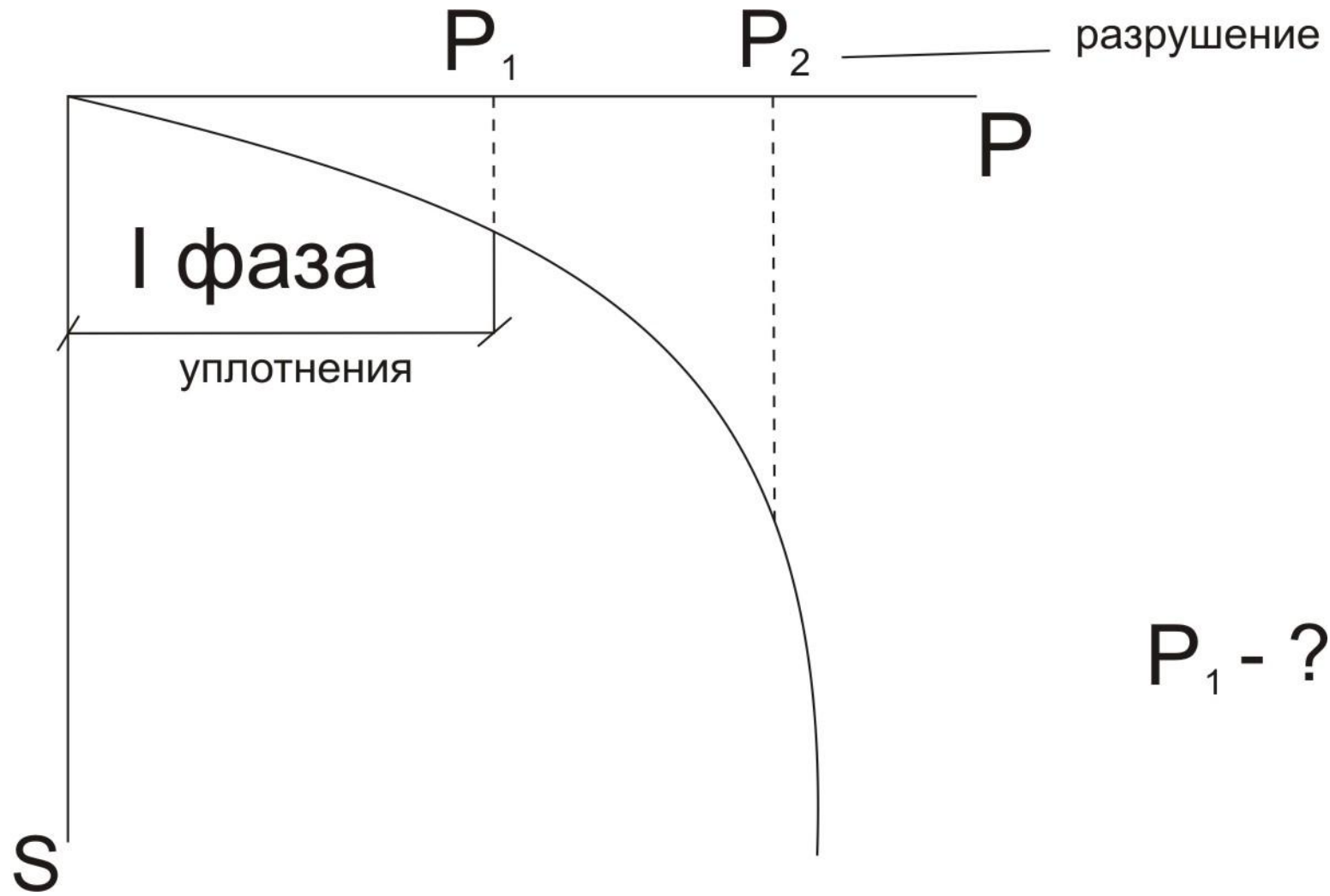
4. При возведении фундамента на скальном основании.

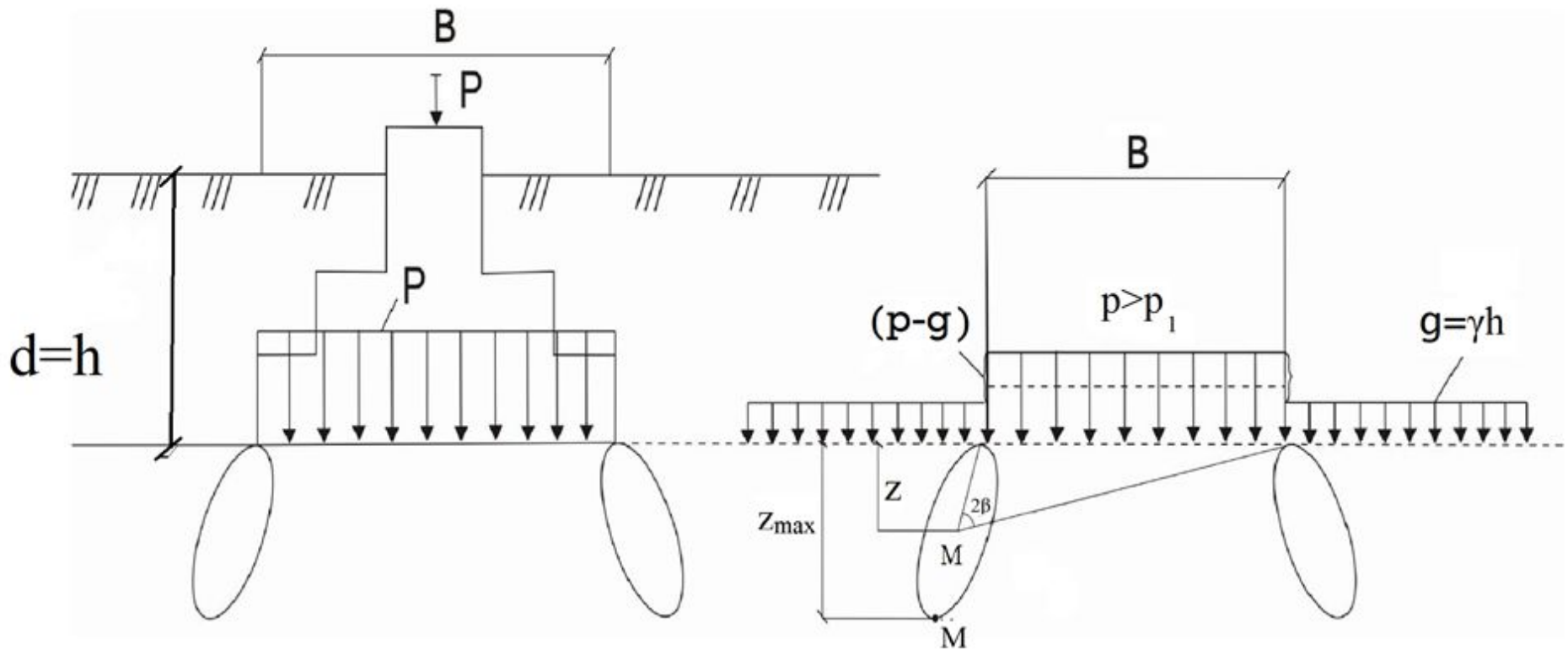
5. В соответствии с требованиями к железобетонным и бетонным конструкциям.

Критические нагрузки на  
грунт  
Расчетное  
сопротивление грунта  
основания

# Первая критическая нагрузка







$P$  – равномерно распределенная нагрузка

$g$  – боковая пригрузка ( $\gamma$  - плотность грунта,

$h = d$  – глубина залегания нагруженной поверхности).

$z$  - глубина расположения рассматриваемой точки ниже плотности приложения нагрузки.

Для зоны сдвигов в каждой точке выполняется условие предельного равновесия.

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi} = \sin \varphi \quad - \text{уравнение предельного равновесия}$$

$$\sigma_1 = \sigma_1^{c.b.} + \sigma_1^{(p-q)}$$

$$\sigma_3 = \sigma_3^{c.b.} + \sigma_3^{(p-g)}$$

$$\sigma_1 = \gamma(d + z)$$

$$\sigma_1^{c.b.} = \sigma_3^{c.b.} = \gamma(d + z)$$

$$\sigma_{1,3}^{(p-q)} = \frac{(p-q)}{\pi} (2\beta \pm \sin 2\beta)$$

$2\beta$  - УГОЛ ВИДИМОСТИ ИЗ ТОЧКИ  
М

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \gamma(d + z) + \frac{p-q}{\pi} (2\beta + \sin 2\beta) \\ \sigma_3 = \gamma(d + z) + \frac{p-q}{\pi} (2\beta - \sin 2\beta) \end{array} \right.$$

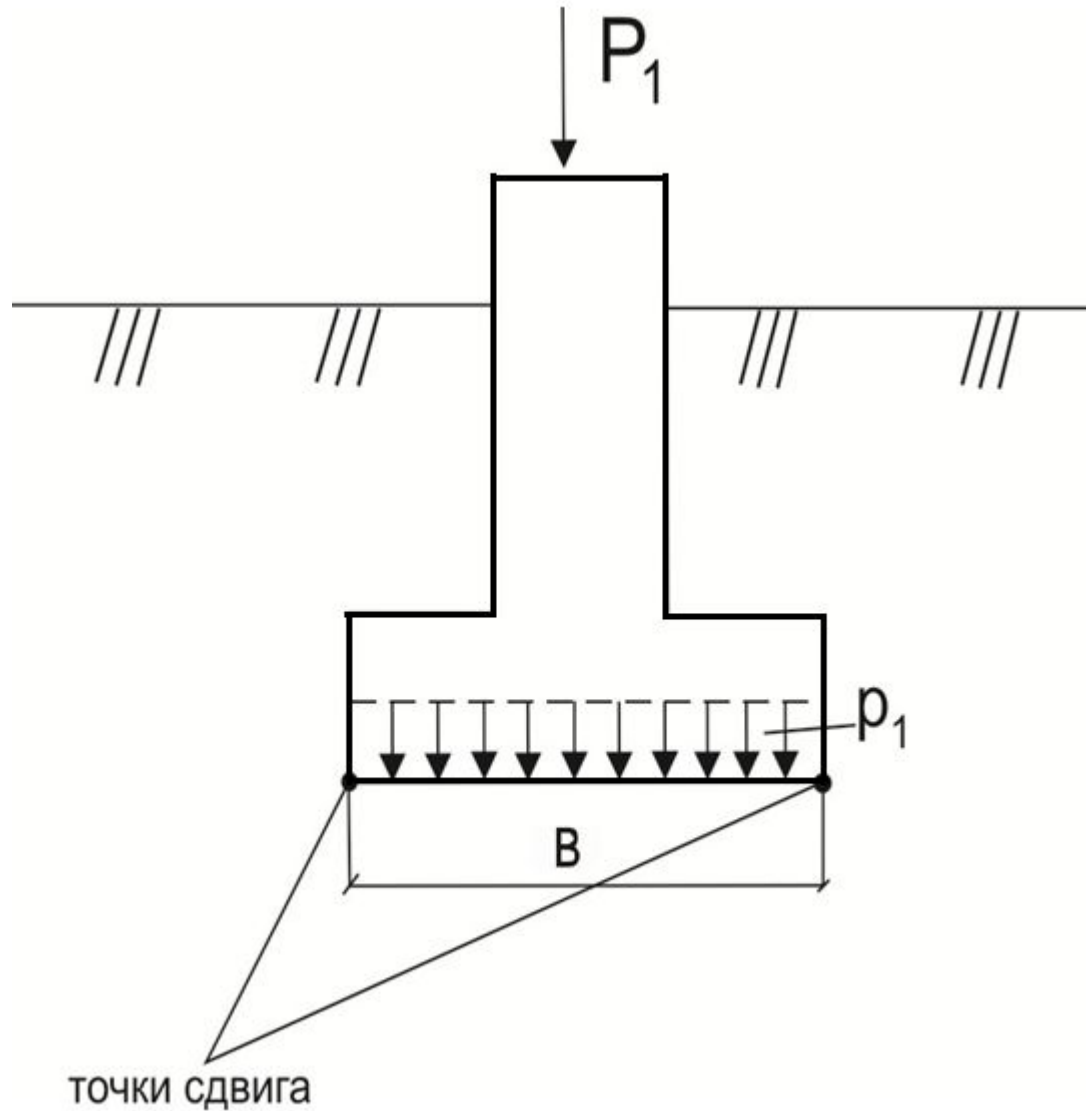
$$\frac{\frac{p-q}{\pi} (2 \sin 2\beta)}{2\gamma(d+z) + \frac{p-q}{\pi} (4\beta) + 2c \cdot ctg 4} = \sin \varphi$$

$$p_1 = \frac{\pi(\gamma d + c \cdot ctg \varphi)}{ctg \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma d \quad \begin{array}{l} \text{- формула} \\ \text{Пузыревского} \end{array}$$

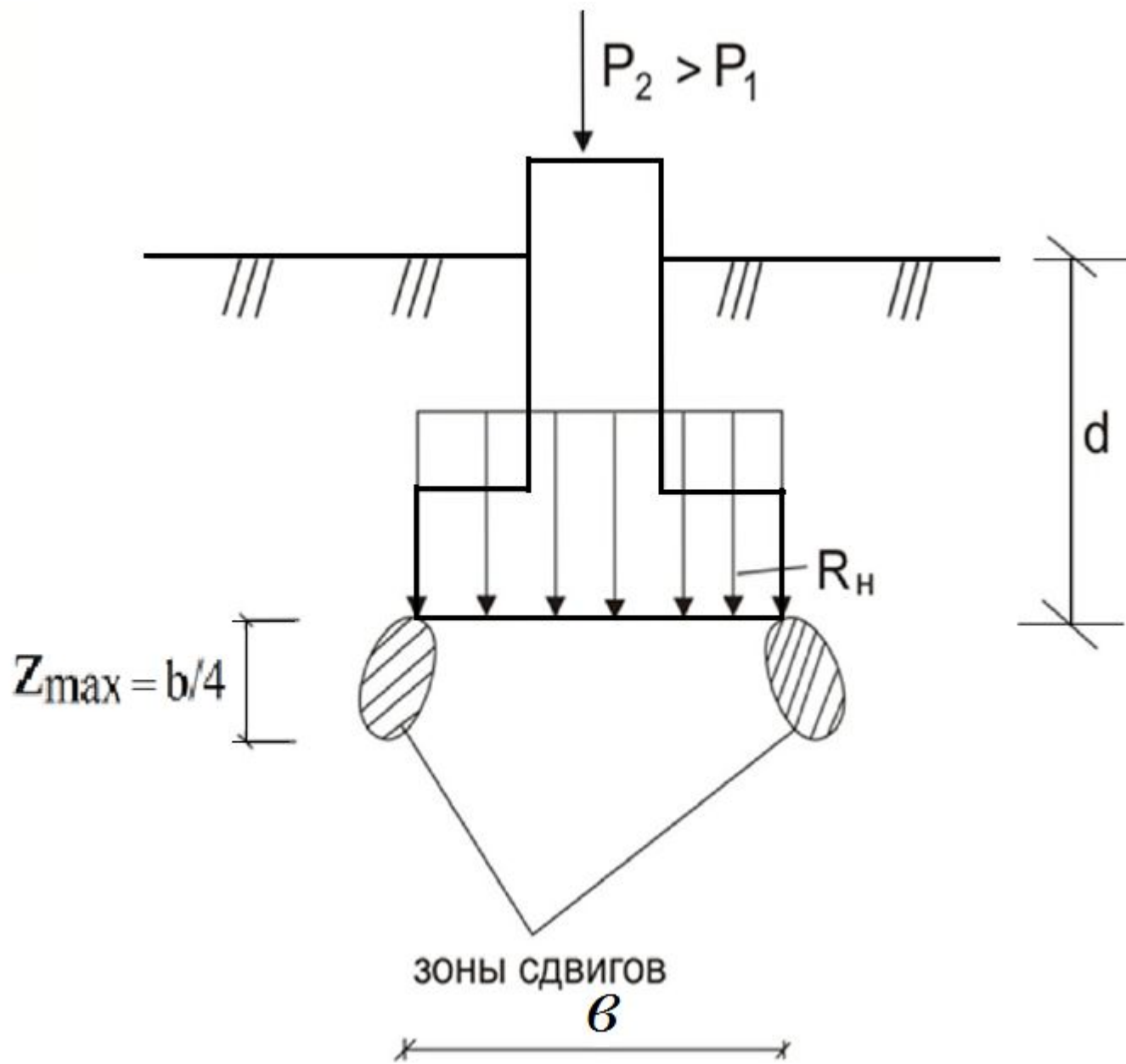


Нормативное давление на грунт.  
Расчетное давление грунта основания.

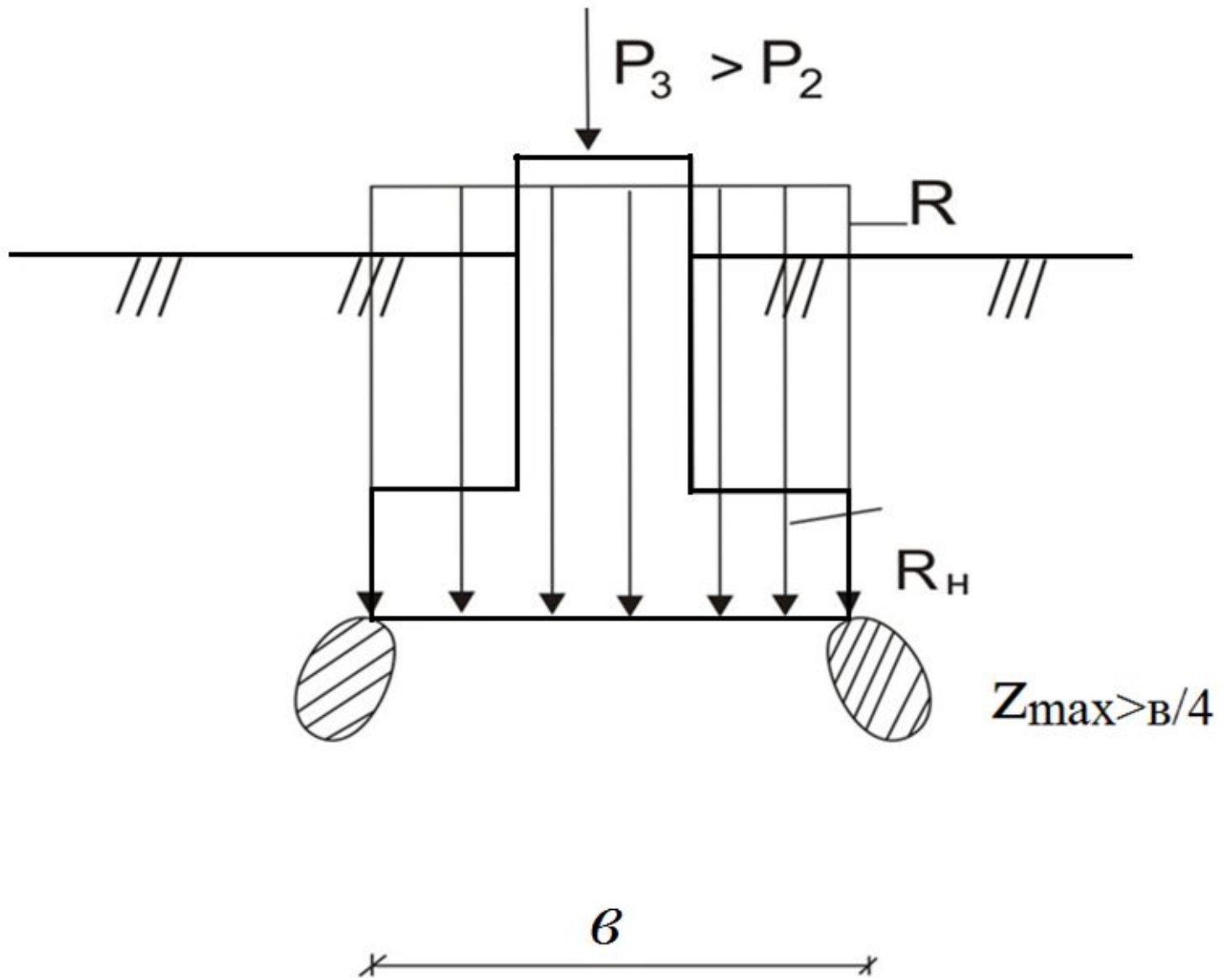
а)



б)



B)



В 1962 г. вышел первый СНиП.

СНиП 1962 г. -  $R^H$  - нормативное давление на грунт.

В 1975 г. СНиП другой –  $R$  – расчетное давление на грунт.

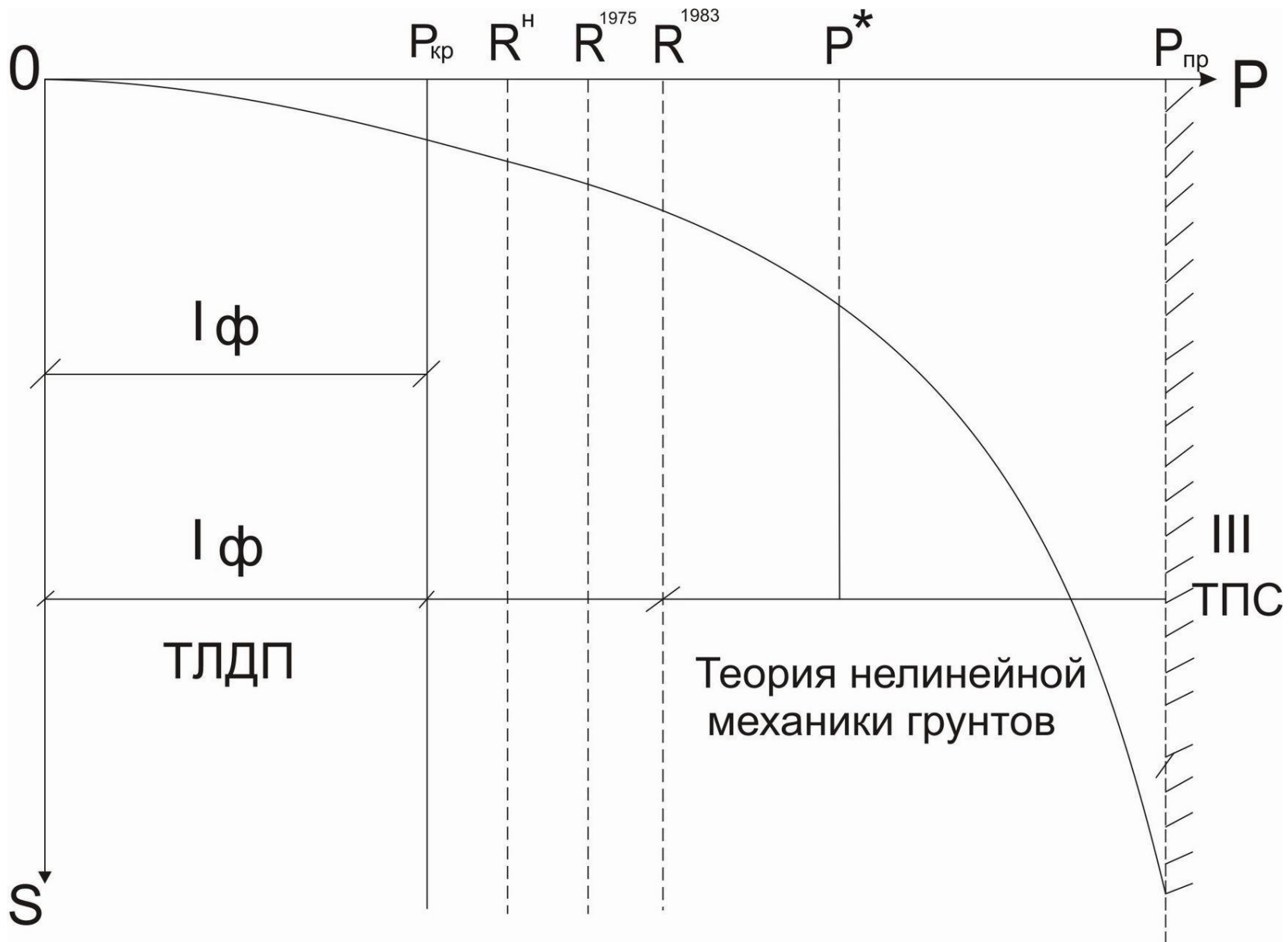
$$R^{1975} = \frac{m_1 m_2}{k_H} R^H$$

При наблюдениях увеличили давление за счет коэффициентов

$m_1$  – коэффициент, зависящий от вида грунтов основания;

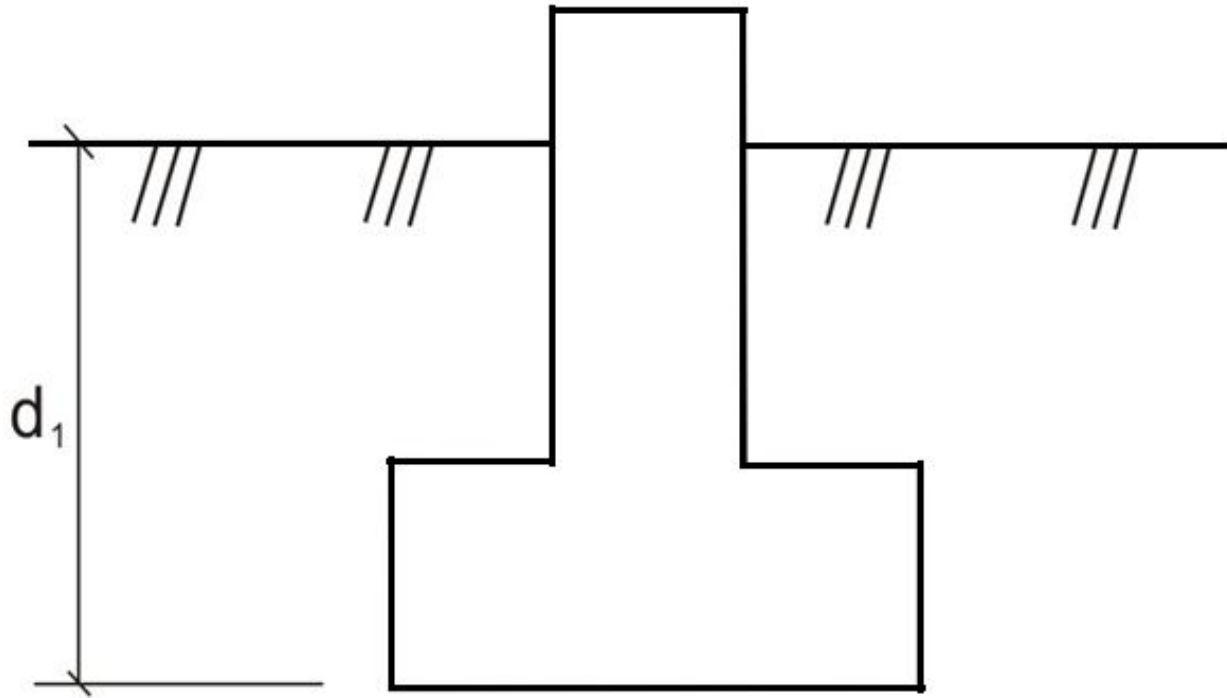
$m_2$  - коэффициент, зависящий от вида грунтов и конструктивной схемы здания (сооружения),

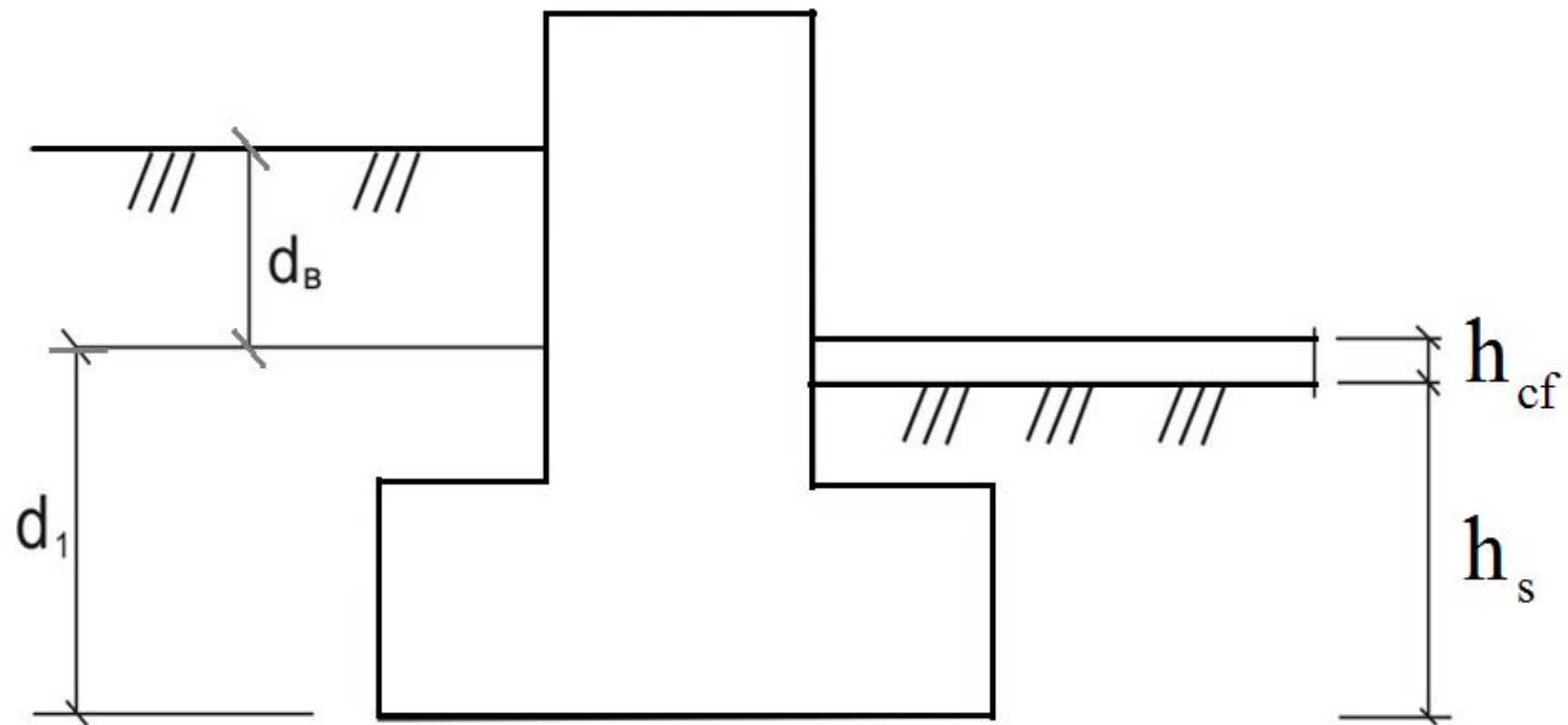
$k_H$  – коэффициент надежности;



$P^*$  - полного разрушения еще нет.

$$R = \frac{\gamma_{c1}\gamma_{c2}}{k} [M_{\gamma} k_z b \gamma_{II} + M_q d_1 \gamma'_{II} + (M_q - 1) d_6 \gamma'_{II} + M_c \cdot c_{II}]$$





## Коэффициенты условий работы:

$\gamma_{c1}$  - табличный коэффициент, зависящий от вида и состояния грунтов основания;

$\gamma_{c2}$  – коэффициент, зависящий от вида, состояния грунтов и конструктивной схемы здания (сооружения);

$k$  - коэффициент надежности, зависящий от способа определения прочностных характеристик грунтов;

$M_\gamma, M_q, M_c$  - табличные коэффициенты, зависящие от угла внутреннего трения основания  $\rightarrow f(\varphi_{II})$

$k_z$  – коэффициент, зависящий от ширины подошвы фундамента;



$\gamma_{II}$  - удельный вес грунта под подошвой фундамента;

$\gamma'_{II}$  - удельный вес грунта выше подошвы фундамента;

$d_1$  - для здания без подвала – это глубина заложения фундамента (расстояние от планировочной отметки до подошвы).

Для здания с подвалом:

$$d_1 = h_s + h_{cf} \frac{\gamma_{cf}}{\gamma'_{II}}$$

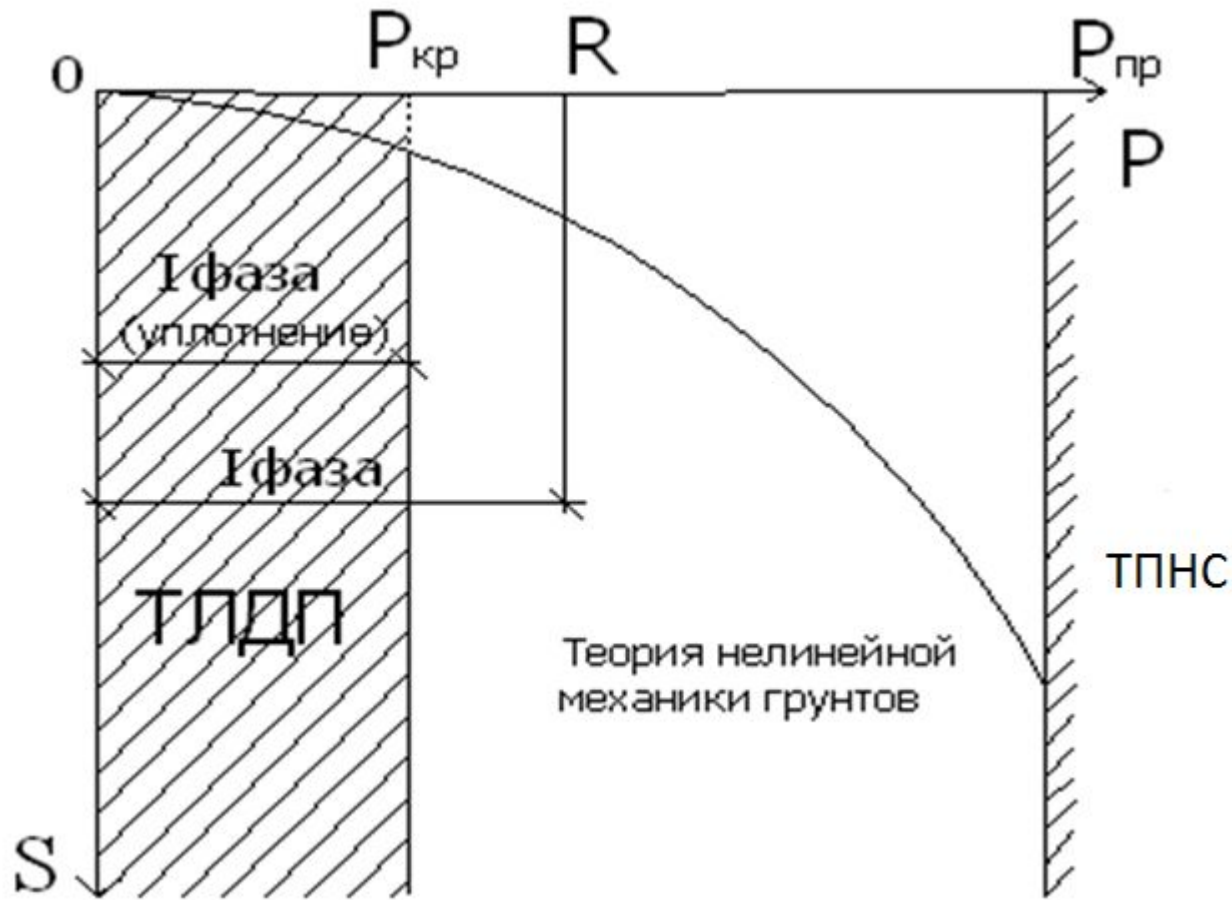
$h_s$  - толщина слоя грунта выше уровня подошвы фундамента со стороны подвала (пригрузка грунта);

$h_{cf}$  - толщина конструкции пола подвала;

$\gamma_{cf}$  - удельный вес материала пола подвала

$C_{II}$  - удельное сцепление грунта, расположенного под подошвой фундамента.

# Пределная нагрузка для сыпучих и связных грунтов

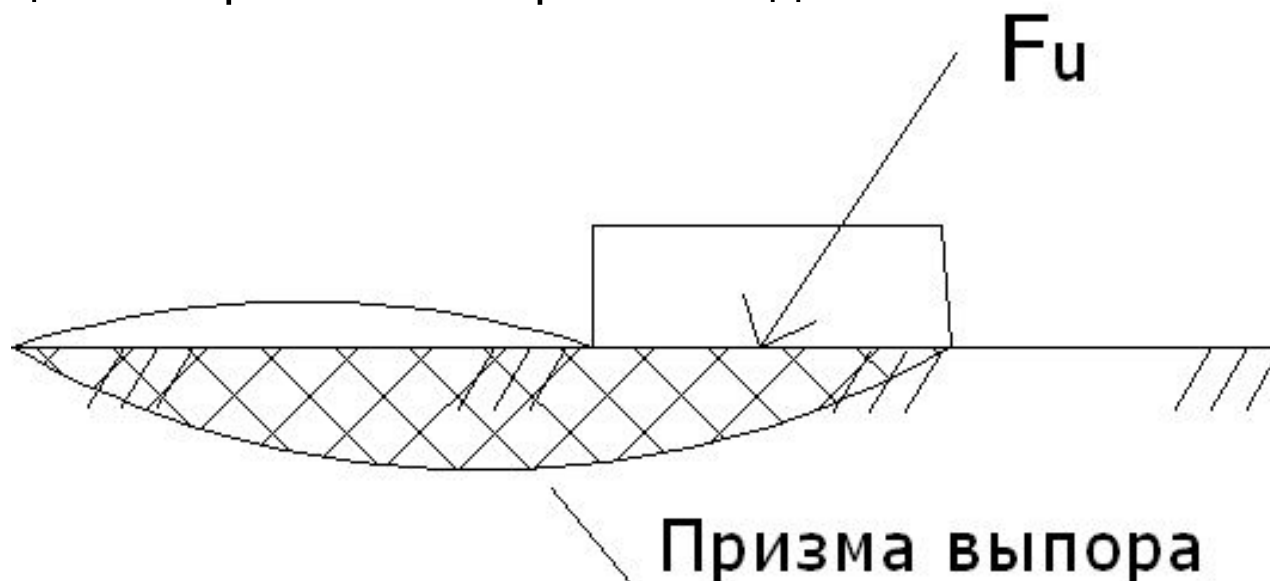


# Основы теории предельного напряжённого состояния (ТПНС)

Прямая задача: известна величина нагрузки, находим напряжённое состояние.

Обратная задача: зная напряжённое состояние, находим на внешней границе нагрузку.

В ТПНС чаще всего решается обратная задача.

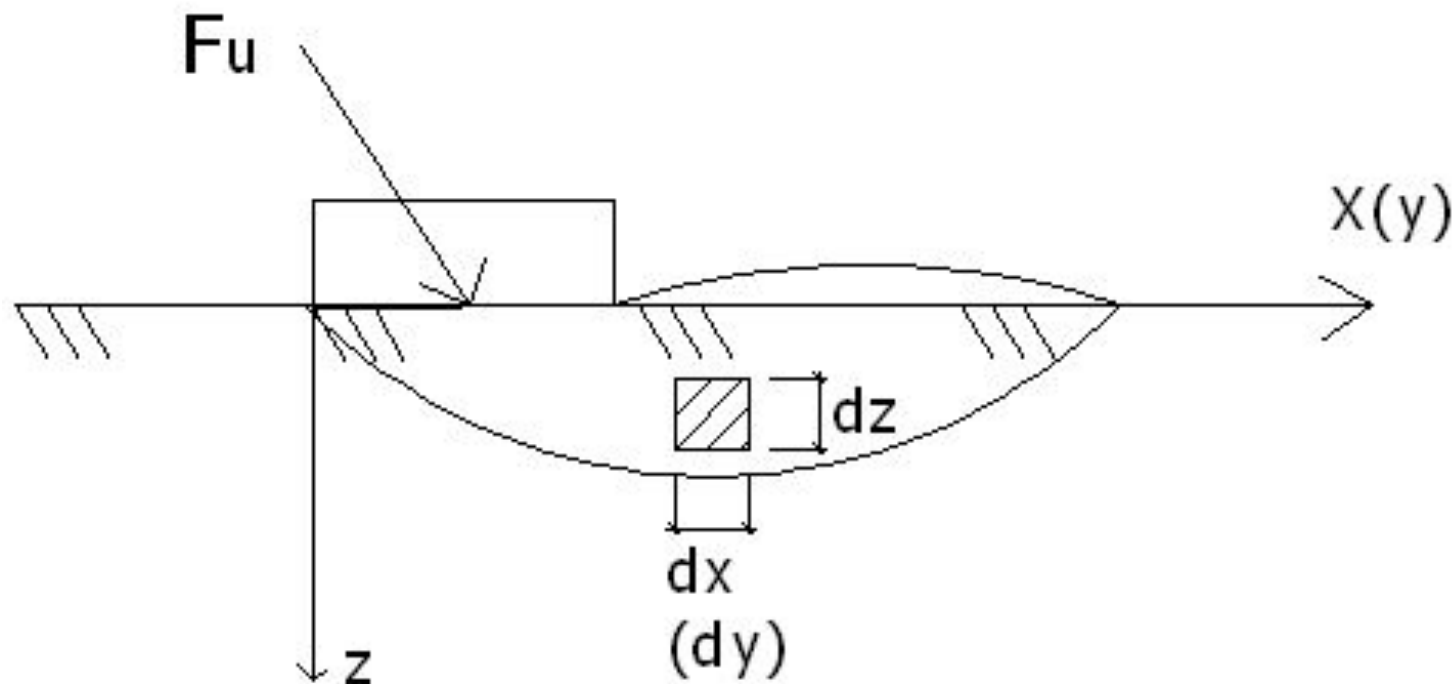


$F_u$  – предельная (разрушающая) нагрузка.

## Предпосылки ТПНС:

1. В каждой точке призмы выпора наступило ПНС (состояние начала разрушения грунта)

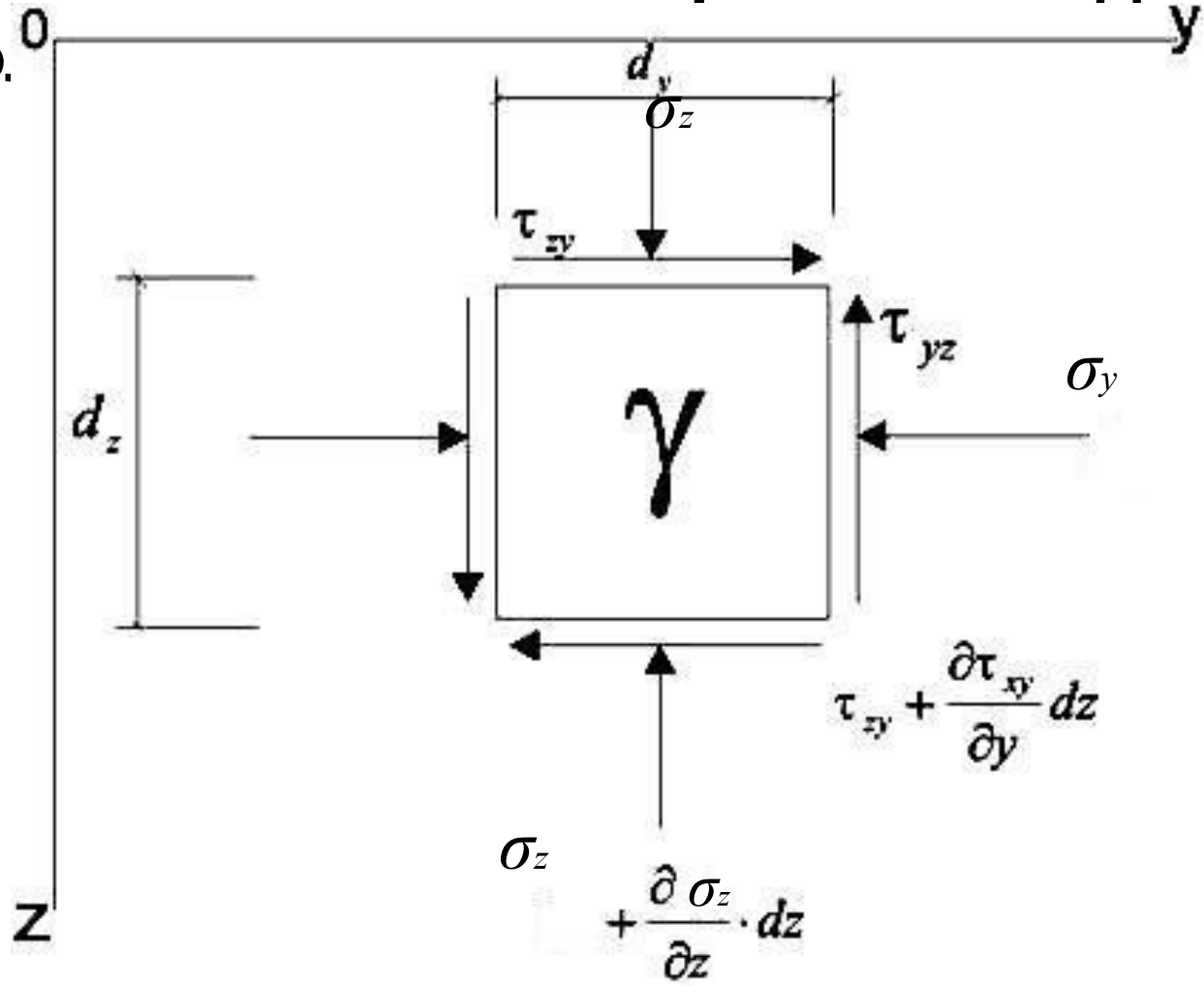
$$\tau = \underbrace{\sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c}_{-}$$



2. Грунт в пределах призмы выпора однороден.
3. Подошва фундаментной конструкции плоская.
4. ТПНС действует только для малозаглублённых фундаментов, когда поверхность скольжения выходит на поверхность грунтового массива с образованием призмы выпора.

нагрузки

1. Решение в строгом виде (В.В. Соко.



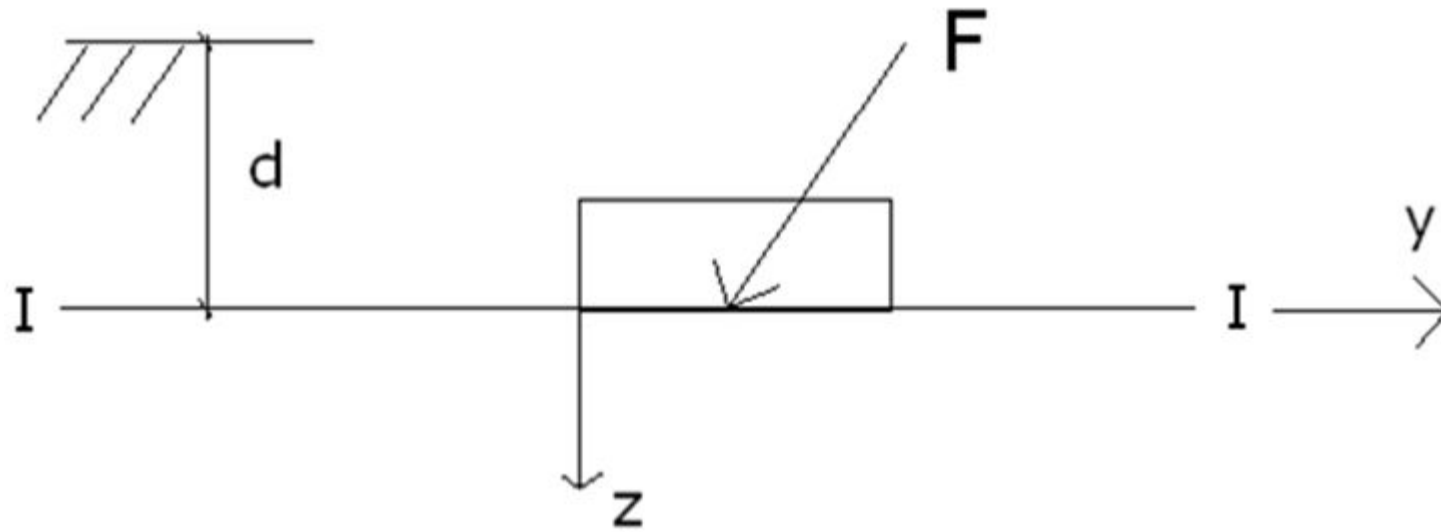
$$(*) \left\{ \begin{array}{l}
 \Sigma z = 0 \\
 \sigma_z - \sigma_z + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} dz + \tau_{yz} - \tau_{yz} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dz = \gamma \\
 \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = \gamma \\
 \Sigma y = 0 \\
 \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0 \\
 \frac{(\sigma_z - \sigma_y)^2 + 4\tau_{yz}^2}{(\sigma_z + \sigma_y + 2c \cdot ctg\varphi)^2} = \sin^2 \varphi
 \end{array} \right.$$

В результате строгого  
интегрирования системы (\*)  
мы получаем:

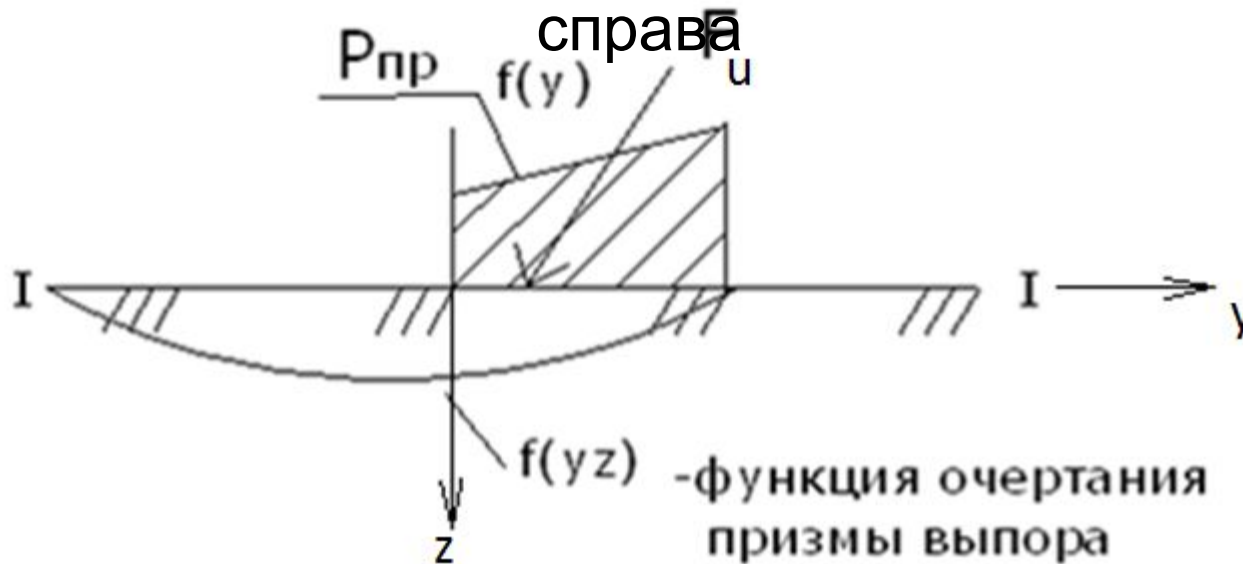
1. Функцию предельной нагрузки на загруженном участке;
2. Функцию очертаний призмы выпора.



Равнодействующая приложена в центре



Равнодействующая приложена  
справа



$f(y)$  – функции предельных давлений;

$f(y, z)$  – функции очертаний призмы выпора;

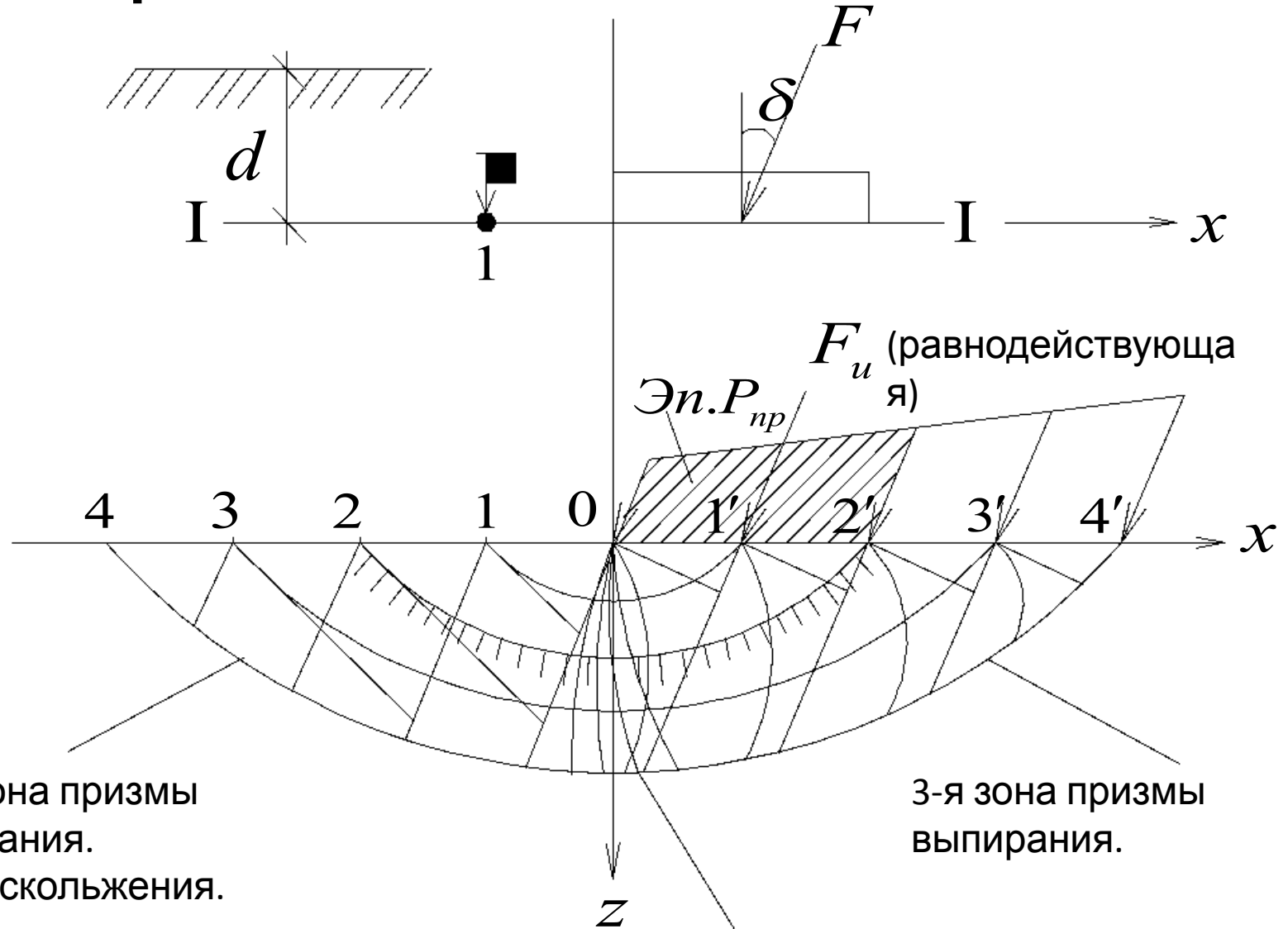
$F$  – расчётная нагрузка на основание;

$F_u$  – предельная (разрушающая) нагрузка.

$F \leq F_u$  - расчет оснований по I п.

с.

# Приближенный метод Соколовского

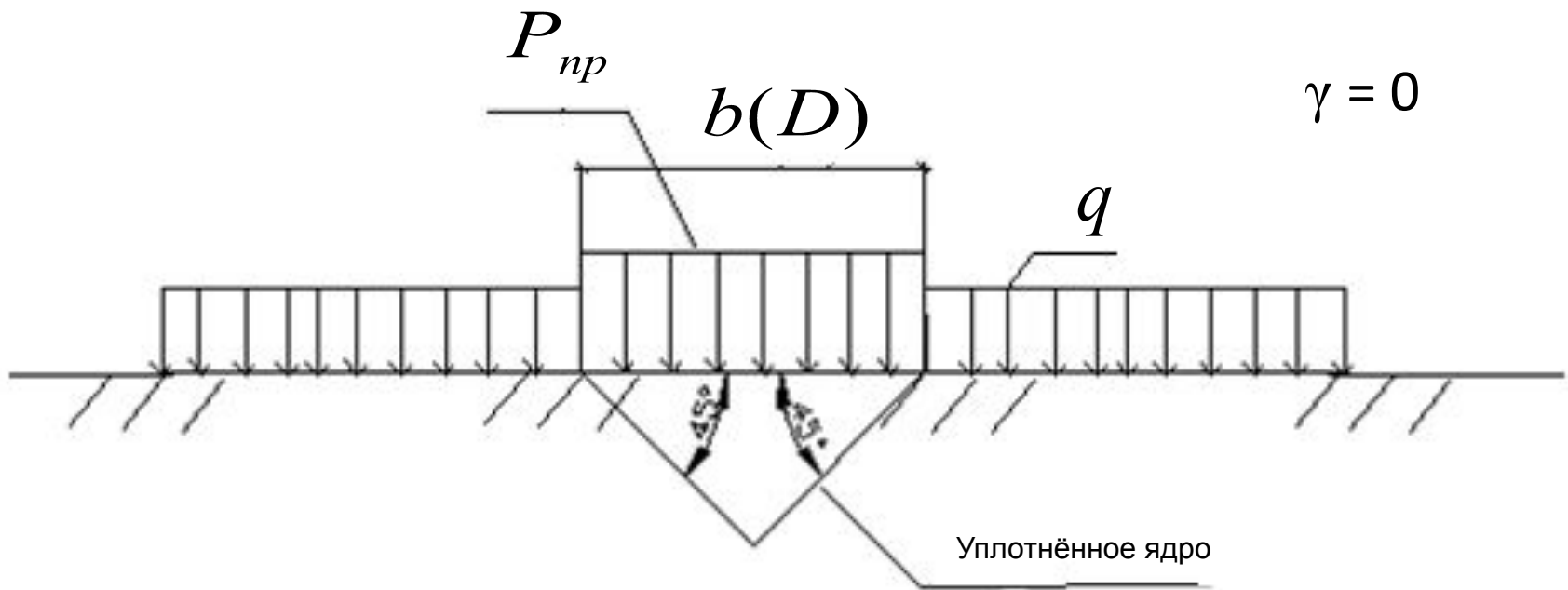


1-ая зона призмы выпирания.  
Сетка скольжения.

3-я зона призмы выпирания.

2-ая зона призмы выпирания .  
Веер, логарифмическая спираль.

# Метод В.Г.Березанцева



# Решение для осесимметричной нагрузки В.Г.Березанцева

При полосовой нагрузке:

$$P_{u.st} = N_{\gamma.st} \gamma \cdot b / 2 + N_{q.st} \gamma' d + N_{c.st} \cdot c;$$

$$\left[ P_{np} = \left( N_{\gamma} \frac{\gamma \cdot b}{2} + N_q \cdot \gamma' d + N_c \cdot c \right) \right]$$

При круглом фундаменте:

$$P_{u.c} = N_{\gamma.c} \gamma \cdot D / 2 + N_{q.c} \gamma' d + N_{c.c} \cdot c$$

где  $N$  с соответствующими индексами – табличные коэффициенты несущей способности, принимаемые в зависимости от угла внутреннего трения  $\varphi$ ;

$\gamma$  и  $\gamma'$  – средний удельный вес грунта соответственно ниже и выше подошвы фундамента;

$b$  – ширина ленточного фундамента;

$D$  – диаметр круглого фундамента;

$d$  – глубина заложения подошвы фундамента;

$c$  – удельное сцепление грунта.

Для идеально связных ( $\varphi = 0, c \neq 0$ ) по Прандтлю:

$$P_{u.st} = 5,14c + \gamma' d$$

При круглом фундаменте по А.Ю.Ишлинскому:

$$P_{u.st} = 5,7c + \gamma' d$$

Для сыпучих грунтов (В.Г.Березанцев):

Плоская задача - 
$$P_{u.st} = A_n \cdot \gamma \cdot b$$

Пространственная  
задача -

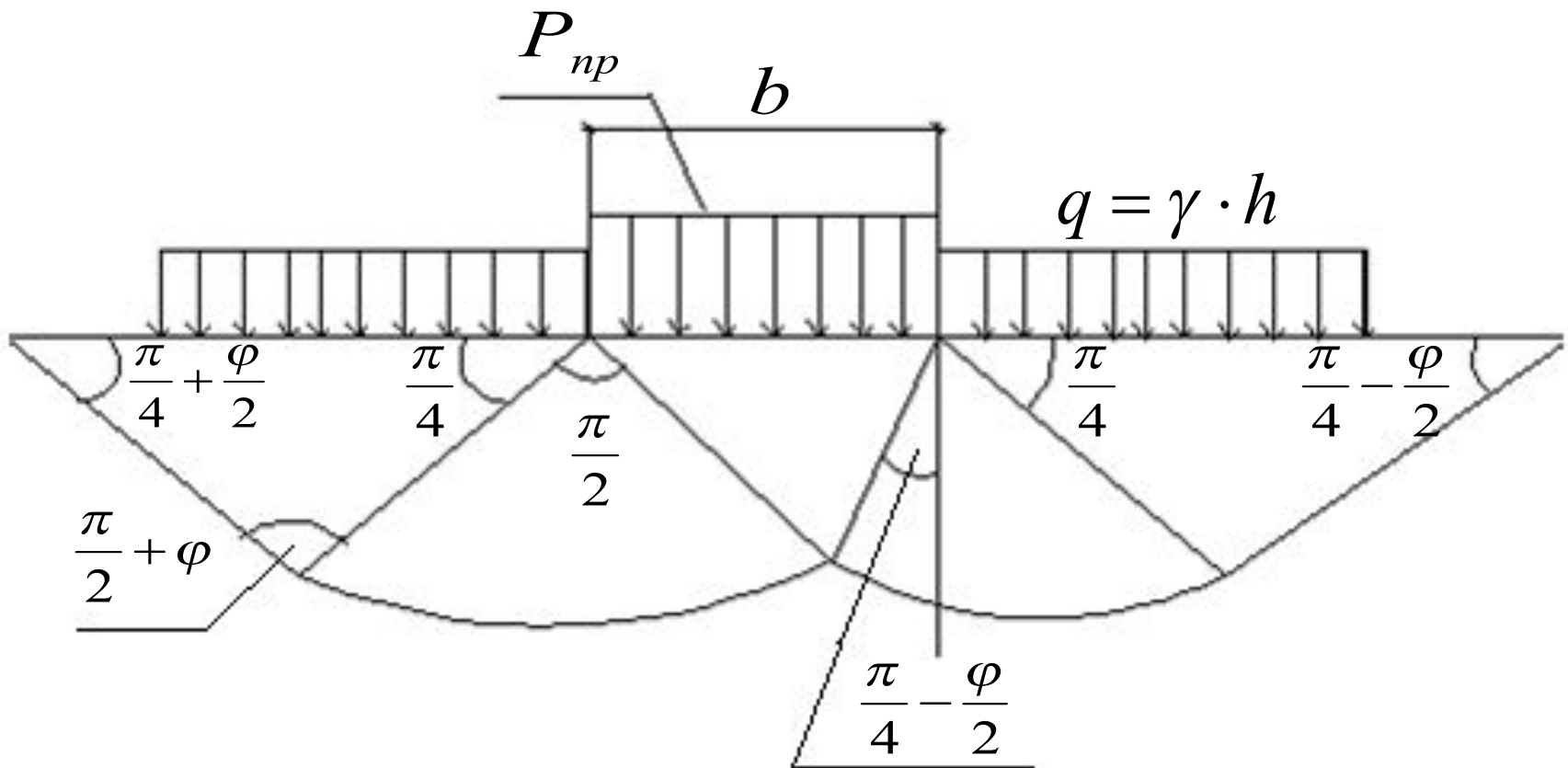
$$P_{k.st} = A_k \cdot \gamma \cdot b_1$$

где  $A_n$  и  $A_k$  – обобщенные коэффициенты несущей способности для сыпучих грунтов, определяемые по номограммам как функции угла  $\varphi$  и относительной глубины заложения фундамента  $h/b$ .

круглой  $2b_1 = b$  – ширина стороны квадратной или диаметр площади подошвы фундамента.

# Метод Прандтля

Прандтль рассматривает невесомую среду  $\gamma = 0$ .





Формула

Прандтля:

$$P_{np} = (q + c \cdot ctg\varphi) \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot e^{\pi \cdot tg\varphi} - c \cdot ctg\varphi$$

$q$  – интенсивность нагрузки собственного веса фундамента;

$c$  и  $\phi$  – прочностные характеристики грунта под подошвой фундамента.

Формула Березанцева:

$$P_{np} = N_{\gamma} \gamma \cdot b / 2 + N_q \gamma' d + N_c \cdot c$$

$$P_{np} = N_{\gamma} \gamma \cdot D / 2 + N_q \gamma' d + N_c \cdot c$$

$N_{\gamma}$   
 $N_q$   
 $N_c$  } - табличные коэффициенты, зависящие от угла  
внутреннего трения грунта  $\rightarrow f(\varphi)$ ;

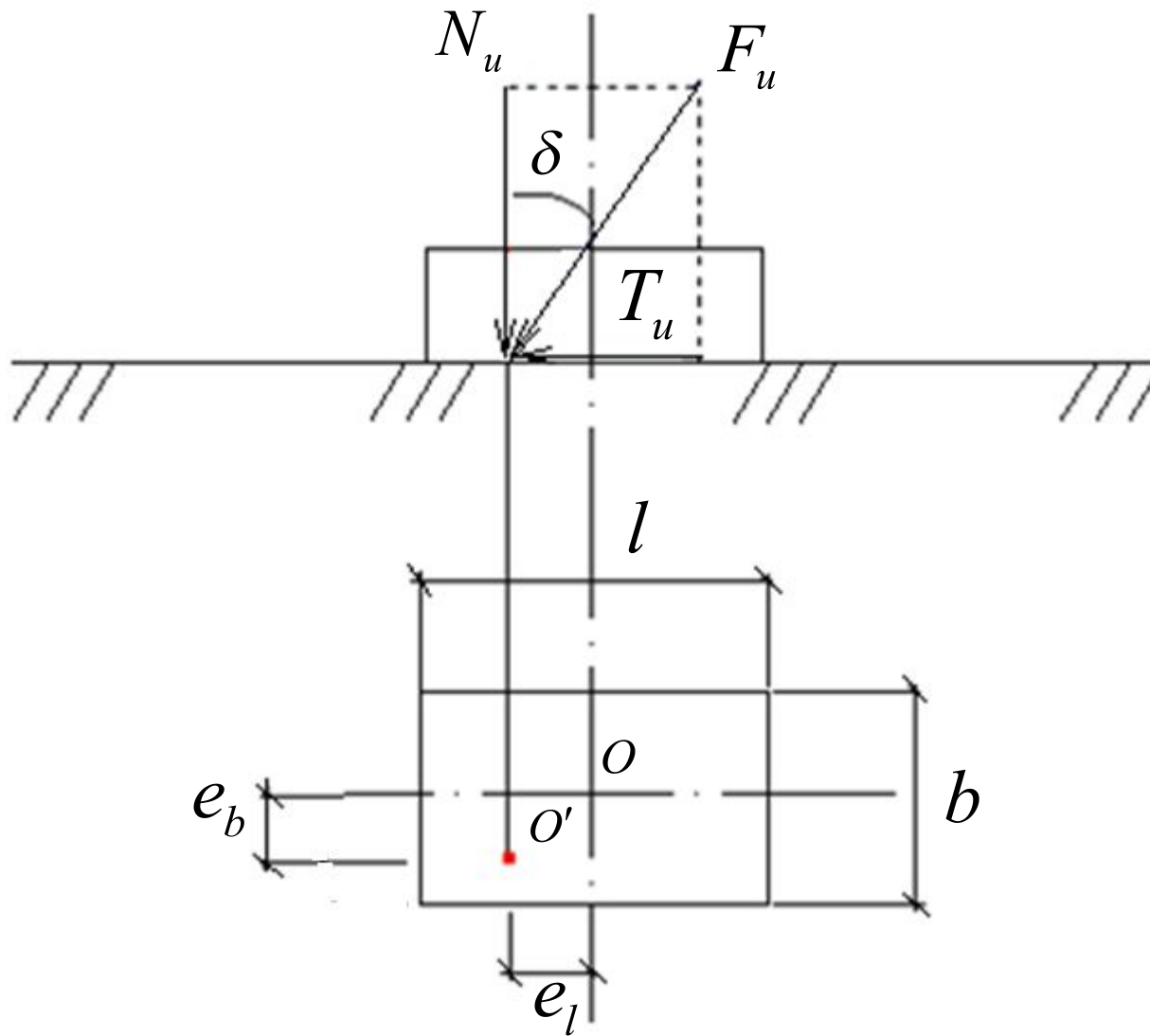
$\gamma$  и  $\gamma'$  - средний удельный вес грунта ниже и выше подошвы  
фундамента соответственно;

$D$  – диаметр круглого фундамента.

**Метод Голушкевича С.С.  
(графоаналитический)**

$\gamma \neq 0$

# Метод СНиП 2.02.01 – 83\* (Основания зданий и сооружений)





$F_u$  - предельное (разрушающее) значение равнодействующей всех сил, приложенных к основанию;

$N_u$  – её вертикальная составляющая;

$T_u$  – горизонтальная составляющая;

$\delta$  - угол наклона равнодействующей к вертикали;

$O'$  – точка приложения равнодействующей;

$e_l$  – эксцентриситет приложения равнодействующей в направлении размера подошвы  $l$ ;

$e_b$  – то же, в направлении стороны  $b$ .

$b'$  ]  
 $l'$  ] — приведённые размеры подошвы.

$b' = b - 2e_b$  ]  
 $l' = l - 2e_l$  ] — ядро сечения.

$$N_u = b'l'(N_\gamma \xi_\gamma b' \gamma_1 + N_q \xi_q \gamma_1' d + N_c \xi_c c_1)$$

$N_\gamma$   
 $N_q$   
 $N_c$

-табличные коэффициенты, зависящие от  $\varphi, \delta \rightarrow f(\varphi, \delta)$ ;

$\xi_\gamma$   
 $\xi_q$   
 $\xi_c$

-табличные коэффициенты, зависящие от соотношения размеров  $\rightarrow f(b, l)$  или  $(b', l')$ ;

$d$  - глубина заложения подошвы фундамента.