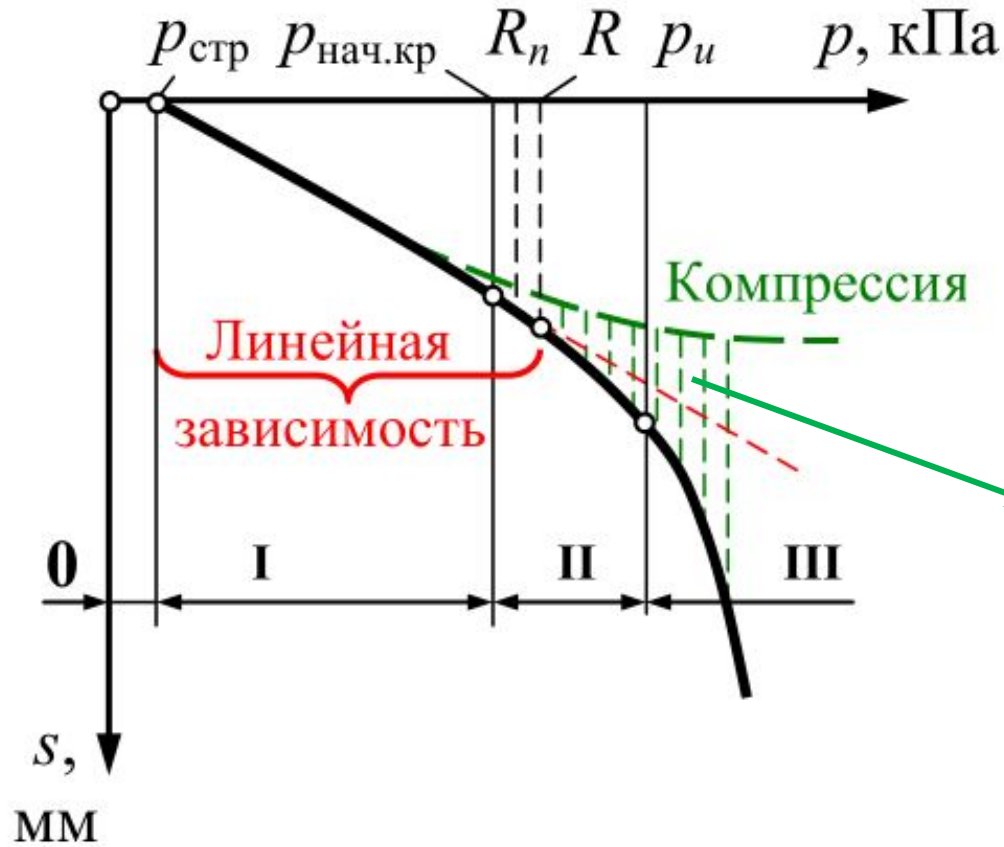


Лекция 6

Прочность и устойчивость грунтов.
Давление грунтов на подпорные
стены

Фазы напряжённого состояния грунта

График зависимости осадки от давления



Фазы напряженного состояния:

0 – фаза упругой работы

I – фаза уплотнения

II – фаза локальных сдвигов;

III – фаза выпора (потеря несущей способности)

- - - кривая осадки в компрессионном приборе

осадка за счет выпора грунта из-под подошвы

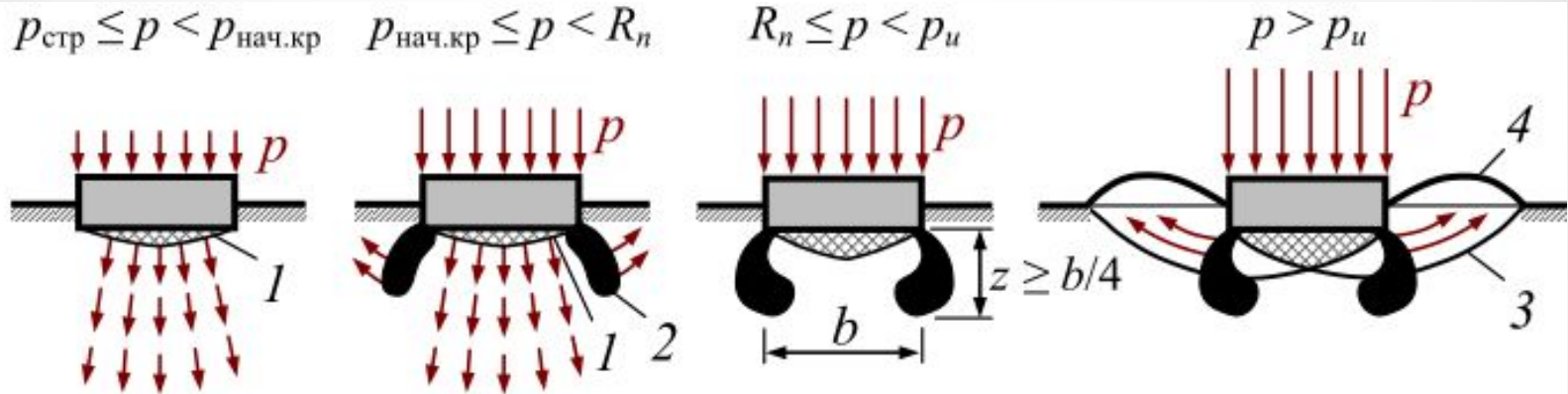
$$s_{0-R} = \frac{\sigma \cdot h}{E}$$

- Линейная зависимость «осадка-давление»

$$s_{>R} = f(\sigma, E)$$

- Нелинейная зависимость «осадка-давление»

Фазы напряжённого состояния грунта



Развитие деформаций в грунтах:

- 1- зона уплотнения,
- 2 – зона пластических деформаций;
- 3 – поверхность скольжения;
- 4 – валы (бугры) выпирания грунта.

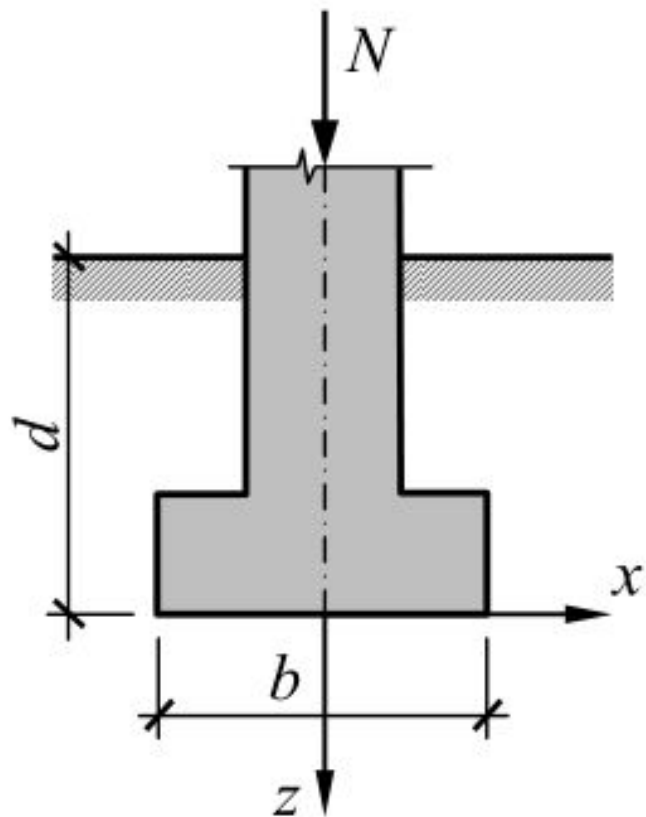
$p_{стр}$ - структурная прочность грунта

$p_{нач.кр}$ - начальное критическое давление на грунт

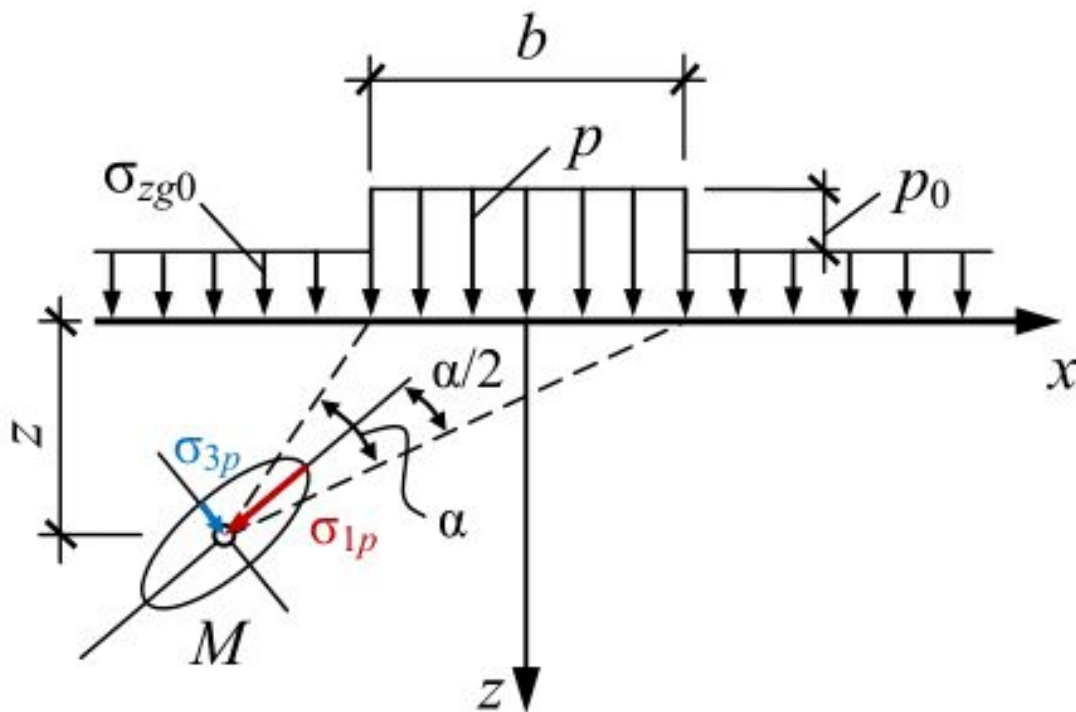
R_n - нормативное сопротивление грунта

p_u - предельное критическое давление на грунт

Критические нагрузки на грунты основания



Реальная схема



Расчетная схема

Критические нагрузки на грунты основания

Рассмотрим точку «М».

Вертикальные и горизонтальные напряжения от собственного веса грунта:

$$\sigma_{1g} = \sigma_{zg0} + \gamma z = \gamma' d + \gamma z$$
$$\sigma_{3g} = \xi \sigma_{1g} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{1g}$$

Для упрощения: гидростатический закон распределения напряжений, т.е. $\xi = 1$:

$$\sigma_{3g} = \sigma_{1g} = \gamma' d + \gamma z$$

Максимальные и минимальные главные напряжения от полосовой нагрузки p_0 (формула Митчела):

$$\sigma_{1p} = \frac{p_0}{\pi} (\alpha + \sin \alpha)$$
$$\sigma_{3p} = \frac{p_0}{\pi} (\alpha - \sin \alpha)$$

Критические нагрузки на грунты основания

Полные напряжения в точке «М»:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{1g} + \sigma_{1p} = \gamma' d + \gamma z + \frac{P_0}{\pi} (\alpha + \sin \alpha) \\ \sigma_3 &= \sigma_{3g} + \sigma_{3p} = \gamma' d + \gamma z + \frac{P_0}{\pi} (\alpha - \sin \alpha) \end{aligned} \right\}$$

Условие возникновения предельного напряженного состояния грунта в точке «М»:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi} = \sin \varphi$$
$$\frac{P_0}{\pi} \sin \alpha - \sin \varphi \left(\frac{P_0}{\pi} \alpha + \gamma' d + \gamma z \right) = c \cdot \cos \varphi \quad (1)$$
$$z = \frac{P_0}{\pi \gamma} \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} - \alpha \right) - \frac{\gamma'}{\gamma} d - \frac{c}{\gamma} \operatorname{ctg} \varphi$$

Критические нагрузки на грунты основания

Уравнение (1) определяет глубину расположения областей предельного равновесия при произвольных значениях угла видимости α .

Максимальная глубина z_{max} ($\frac{dz}{d\alpha} = 0$)

$$\frac{dz}{d\alpha} = \frac{p_0}{\pi \gamma} \left(\frac{\cos \alpha}{\sin \varphi} - 1 \right) = 0$$

При $z = z_{max}$:

$$\cos \alpha = \sin \varphi$$

т.е.

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad \text{и} \quad \sin \alpha = \cos \varphi$$

Тогда z_{max} определяется:

$$z_{max} = \frac{p - \gamma' d}{\pi \gamma} \left(\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{\gamma'}{\gamma} d - \frac{c}{\gamma} \operatorname{ctg} \varphi$$

Критические нагрузки на грунты основания

Критическое давление на основание (области предельного равновесия развиваются на глубину z_{max}):

$$P_{кр} = \frac{\pi(\gamma z_{max} + \gamma' d + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi)}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \pi/2} + \gamma' d$$

Начальное критическое давление ($z_{max} = 0$), на глубине d :

$$\cos \alpha = \sin \varphi$$

т.е.

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad \text{и} \quad \sin \alpha = \cos \varphi$$

Тогда z_{max} определяется:

$$P_{нач.кр} = \frac{\pi(\gamma' d + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi)}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \pi/2} + \gamma' d$$

Критические нагрузки на грунты основания

Нормативное сопротивление грунта (области предельного равновесия развиваются на глубину $z_{max} = 0,25b$):

$$R_n = \frac{\pi(0,25\gamma b + \gamma' d + c \cdot \text{ctg } \varphi)}{\text{ctg } \varphi + \varphi - \pi/2} + \gamma' d$$

$$R_n = M_\gamma \gamma b + M_q \gamma' d + M_c c$$

M_γ, M_q, M_c - табличные коэффициенты, зависящие от φ

Расчетное сопротивление грунта (области предельного равновесия развиваются на глубину $z_{max} = 0,25b$, учитываются эмпирические коэффициенты):

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

R_n (строгое решение)
 Эмпирические коэффициенты
 $P_{нач.кр}$

Ф. 7
СНиП 2.02.03-83

Критические нагрузки на грунты основания

$$R = \frac{\gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2}}{k} \cdot [k_z \cdot M_\gamma \cdot b \cdot \gamma_{II} + M_q \cdot d \cdot \gamma'_{II} + M_c \cdot c]$$

Вычисление коэффициентов по формуле:

$$M_\gamma = \frac{\pi}{4(\operatorname{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2})}$$

$$M_q = \frac{\pi}{\operatorname{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + 1$$

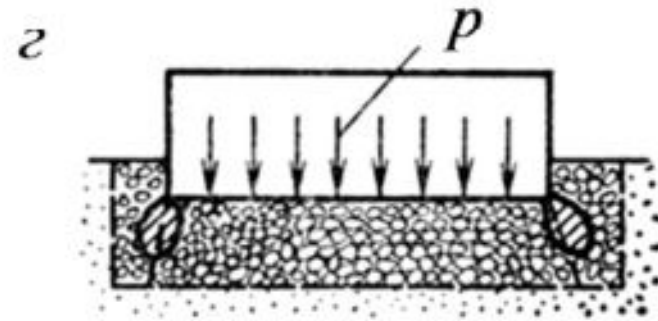
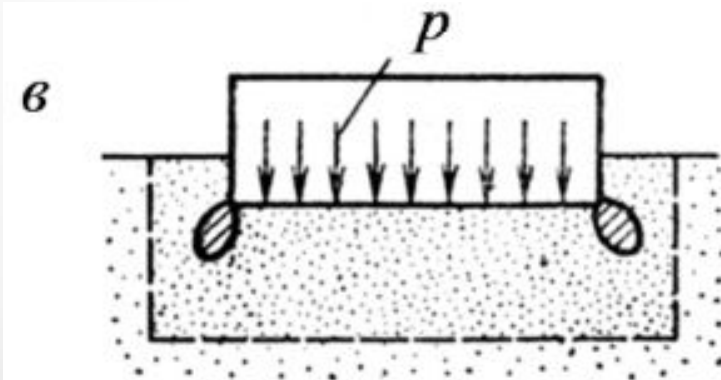
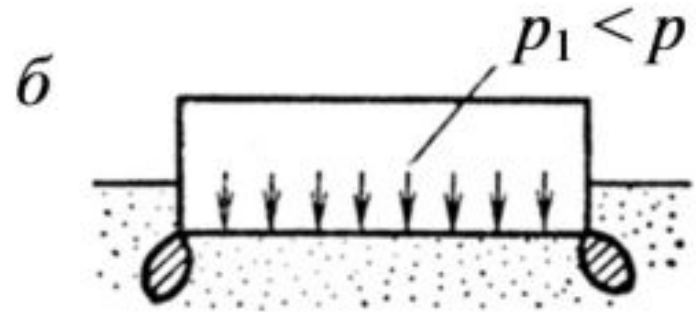
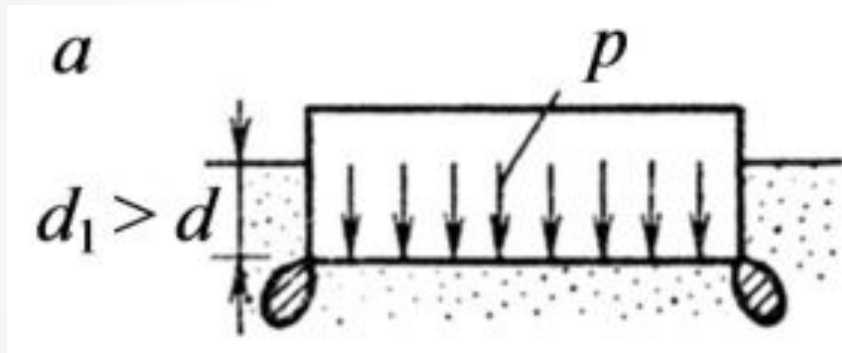
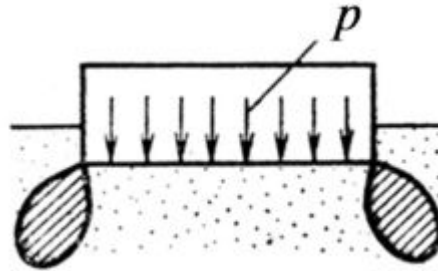
$$M_c = \frac{\pi \cdot \operatorname{ctg}\varphi}{\operatorname{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}}$$

γ_{c1}, γ_{c2} - коэффициенты условий работы грунта (зависят от вида грунта и жесткости здания)

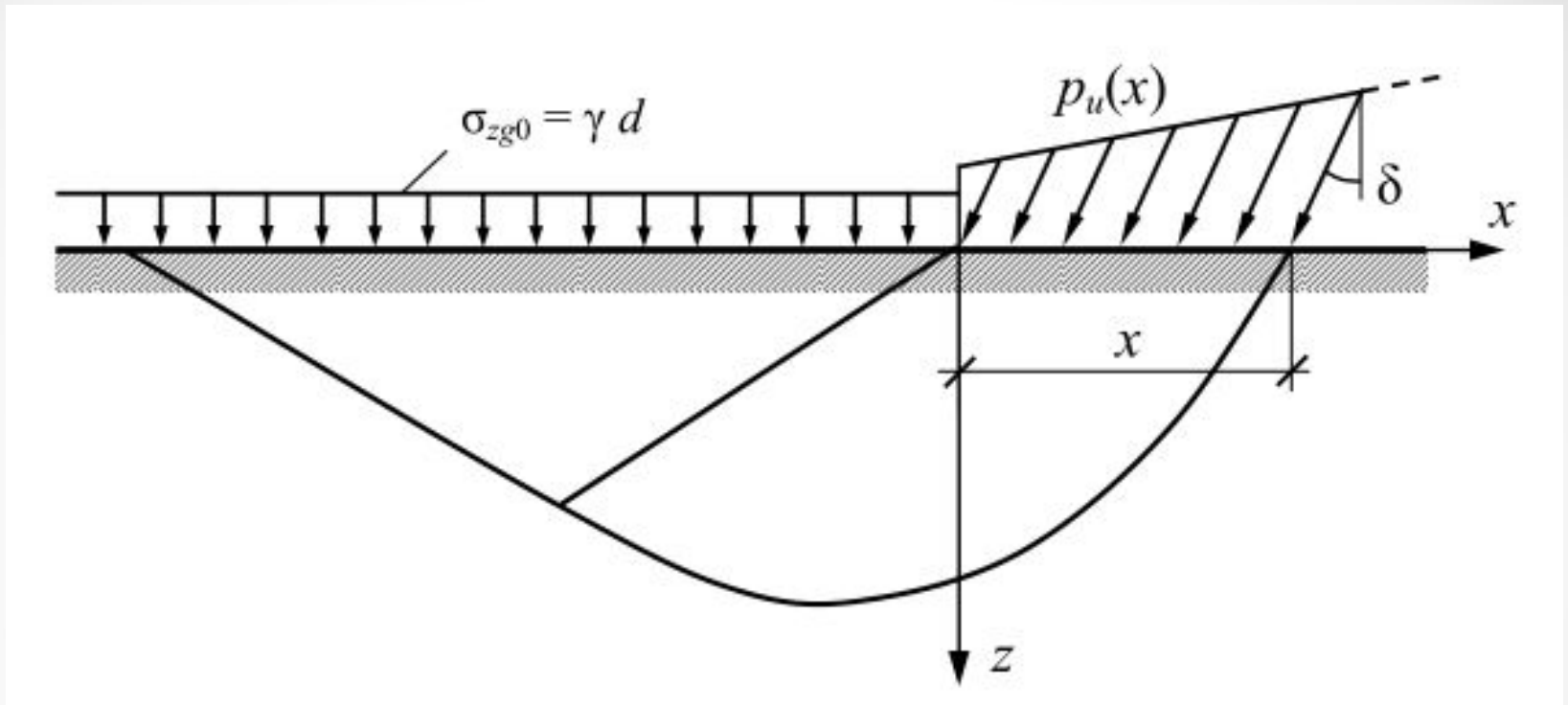
k - коэффициент, учитывающий способ получения физико-механических характеристик грунтов;

k_z - коэффициент, учитывающий ширину подошвы фундамента

Мероприятия по снижению размеров областей пластических деформаций



Предельное критическое давление на грунт основания



Решение Соколовского (1952)

$$p_u = N_\gamma \gamma x + N_q \gamma' d + N_c c$$

$$N_\gamma, N_q \text{ и } N_c - f(\varphi, \delta)$$

Предельное критическое давление на грунт основания

$$p_u = N_\gamma \xi_\gamma b \gamma + N_q \xi_q \gamma' d + N_c \xi_c c$$

$$N_u = p_u b' l'$$

$$b' = b - 2e_b; \quad l' = l - 2e_l$$

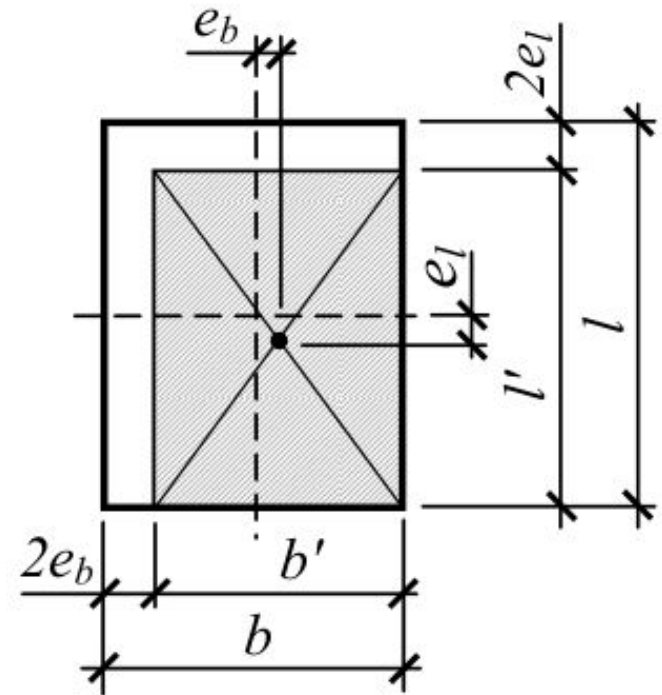
$$N_\gamma, N_q \text{ и } N_c - f(\varphi, \delta)$$

$$\xi_\gamma, \xi_q \text{ и } \xi_c - f(\eta)$$

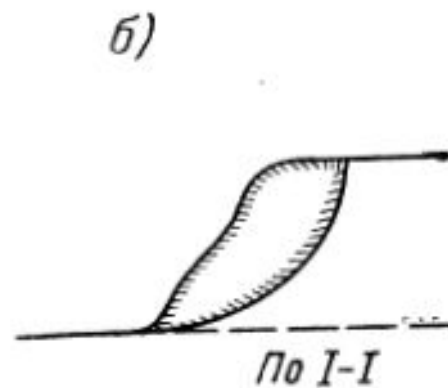
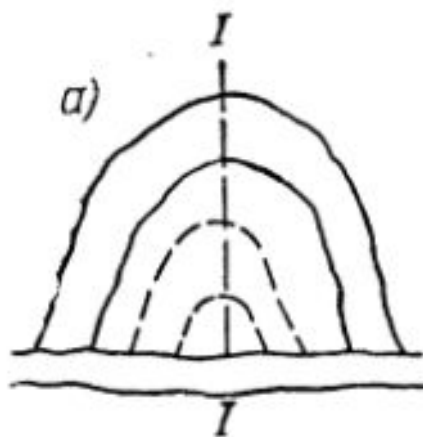
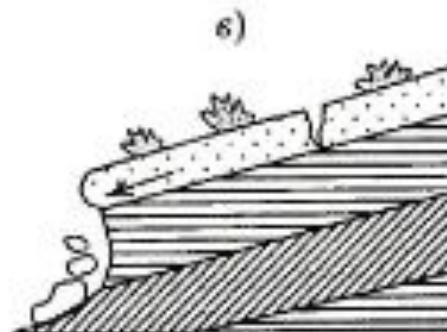
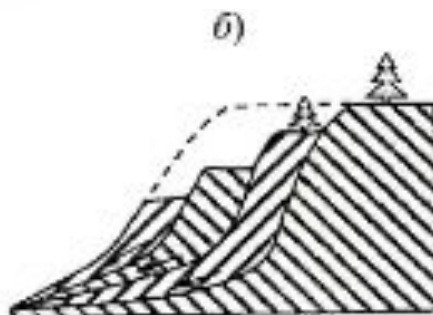
$$\xi_\gamma = 1 - 0,25/\eta$$

$$\xi_q = 1 + 1,5/\eta$$

$$\xi_c = 1 + 0,3/\eta$$



Устойчивость откосов и склонов.



Устойчивость откосов и склонов.



Устойчивость откосов и склонов.



Устойчивость откосов и склонов.



Устойчивость откосов и склонов.



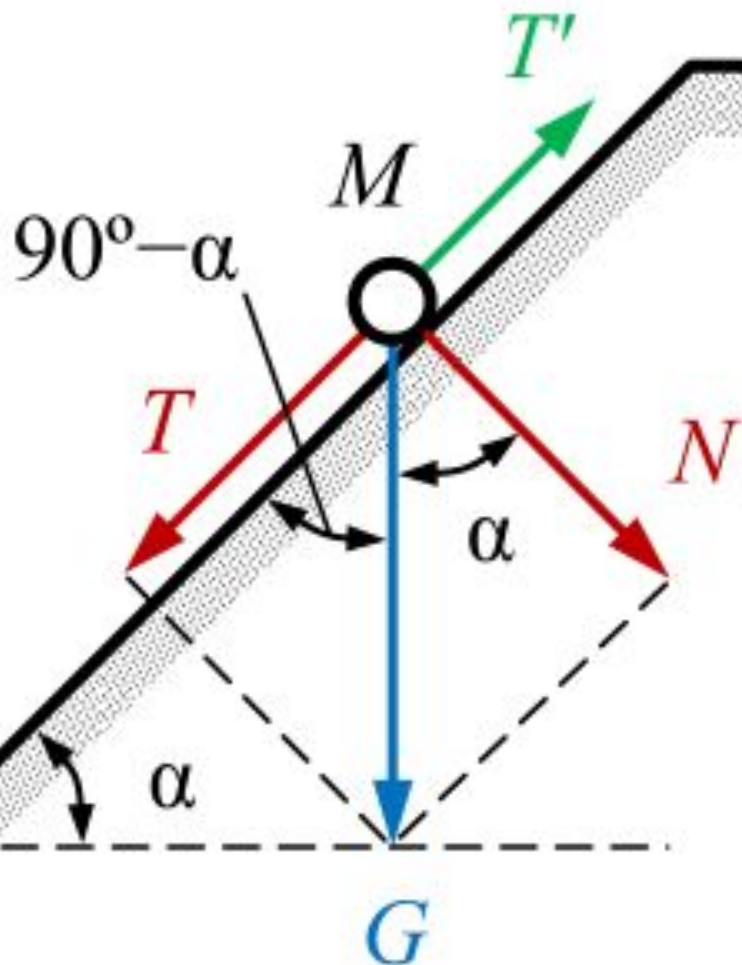
Устойчивость откосов и склонов.



Устойчивость откосов и склонов.

Устойчивость идеально сыпучего грунта ($\varphi > 0, c = 0$)

Рассматривается частица M на откосе.



$$T = G \cdot \sin \alpha$$

$$N = G \cdot \cos \alpha$$

$$T' = N \cdot f$$

$$T' = G \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

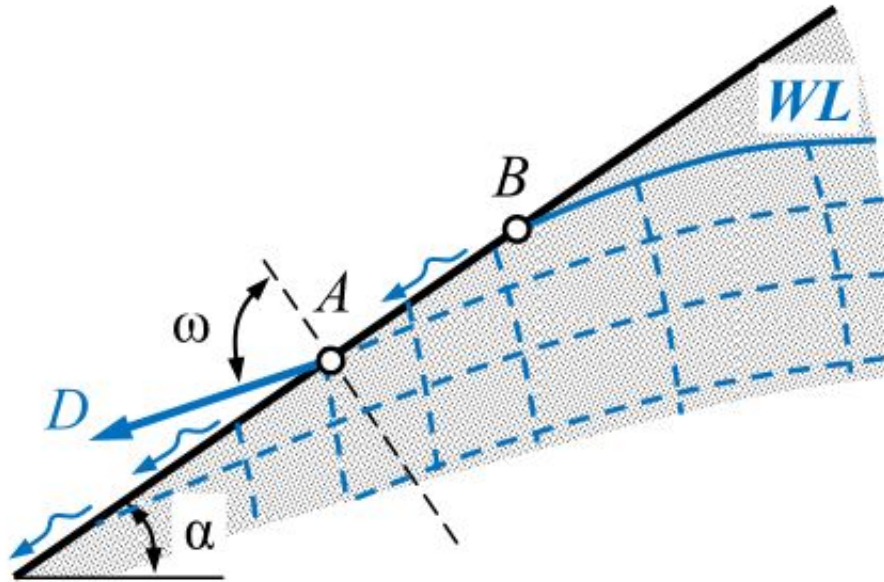
Условие устойчивости:

$$T \leq T'$$

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \operatorname{tg} \varphi$$

$$\alpha \leq \varphi$$

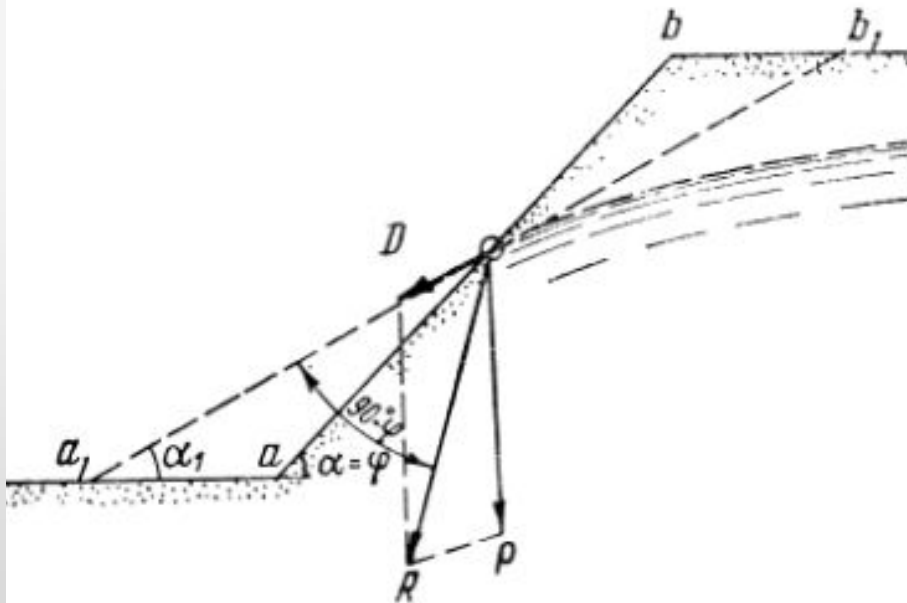
Устойчивость идеально сыпучего грунта ($\varphi > 0, c = 0$) при действии фильтрационных сил



WL – уровень грунтовых вод;
D – гидродинамическое давление

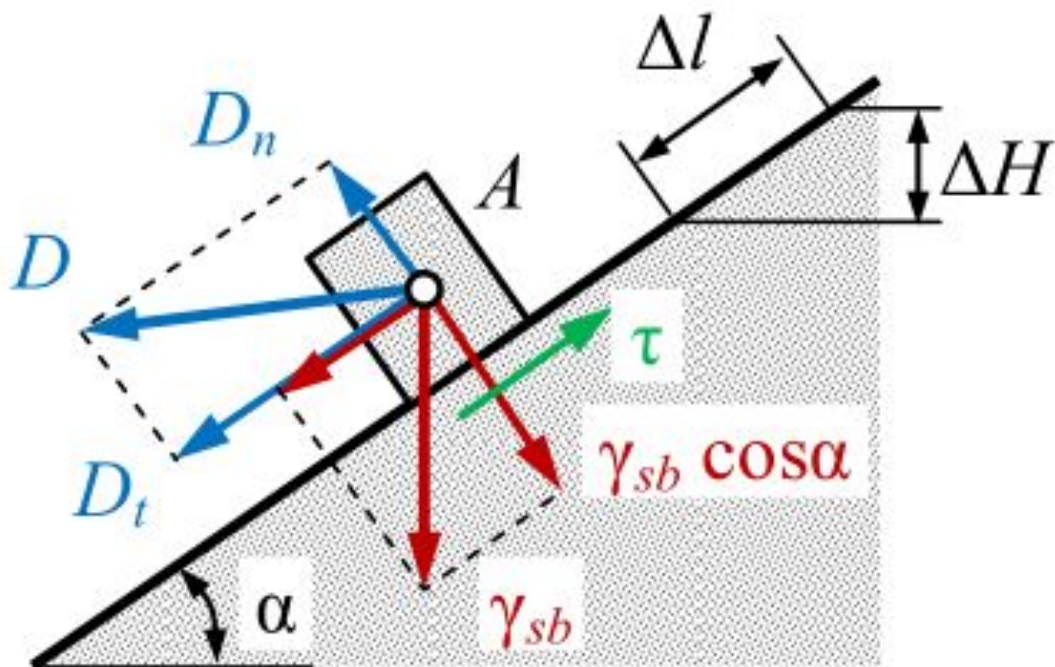
$$D = \gamma_w \cdot n \cdot I$$
$$I = \Delta H / \Delta l$$

Точки A и B – точки выхода фильтрационных потоков



В точке B $\omega = 90^\circ$

Устойчивость идеально сыпучего грунта ($\varphi > 0, c = 0$) при действии фильтрационных сил



Устойчивость откоса:

$$\tau \geq \gamma_{sb} \cdot \sin \alpha + D_t$$

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

$$\operatorname{tg} \varphi \geq \frac{\tau}{\sigma}$$

$$\operatorname{tg} \varphi \geq \frac{\gamma_{sb} \cdot \sin \alpha + D_t}{\gamma_{sb} \cdot \cos \alpha - D_n}$$

$$D_t = D \cdot \sin \omega$$

$$D_n = D \cdot \cos \omega$$

Условие устойчивости:

$$\eta = \frac{\gamma_w \cdot \operatorname{tg} \varphi}{(\gamma_{sb} + \gamma_w \cdot n) \cdot \operatorname{tg} \alpha}$$

$$\operatorname{tg} \varphi \geq \frac{(\gamma_{sb} + \gamma_w \cdot n) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(\gamma_{sb} - \gamma_w \cdot n \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \omega)}$$

Устойчивость идеально связного грунта ($\varphi=0$, $c>0$)

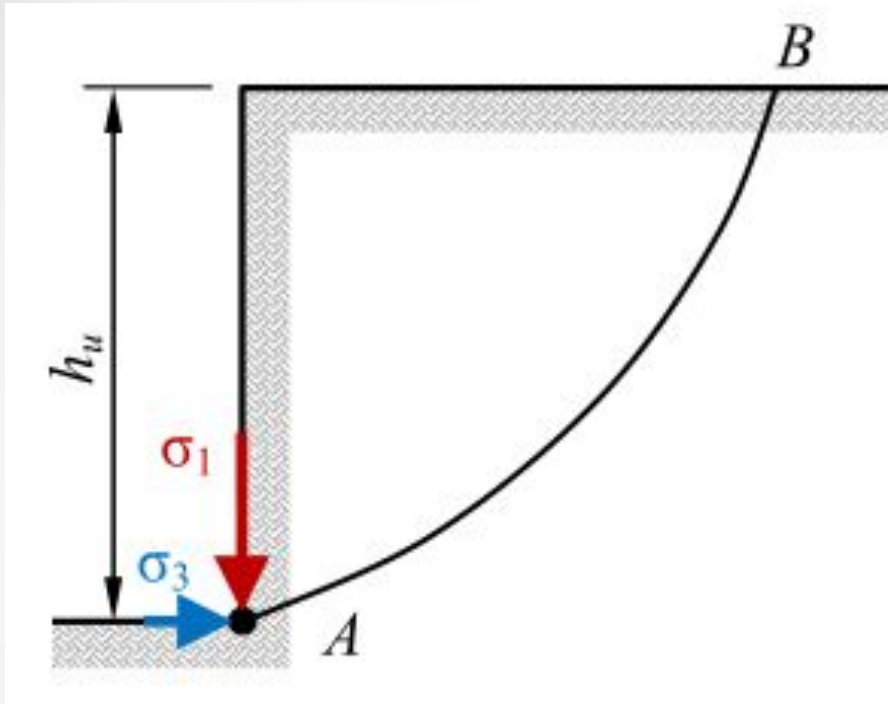
Устойчивость откоса:

$$\sigma_1 = \gamma \cdot h_u$$

$$\sigma_3 = 0$$

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

$$h_u = \frac{2 \cdot c}{\gamma}$$



Устойчивость идеально связного грунта ($\varphi > 0, c > 0$)

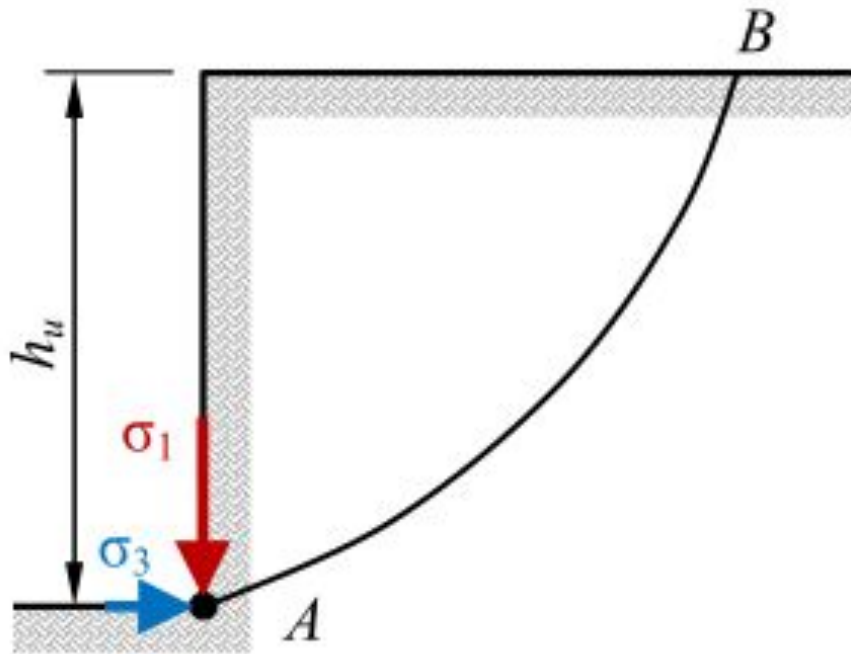
Устойчивость откоса:

$$\sigma_1 = \gamma \cdot h_u$$

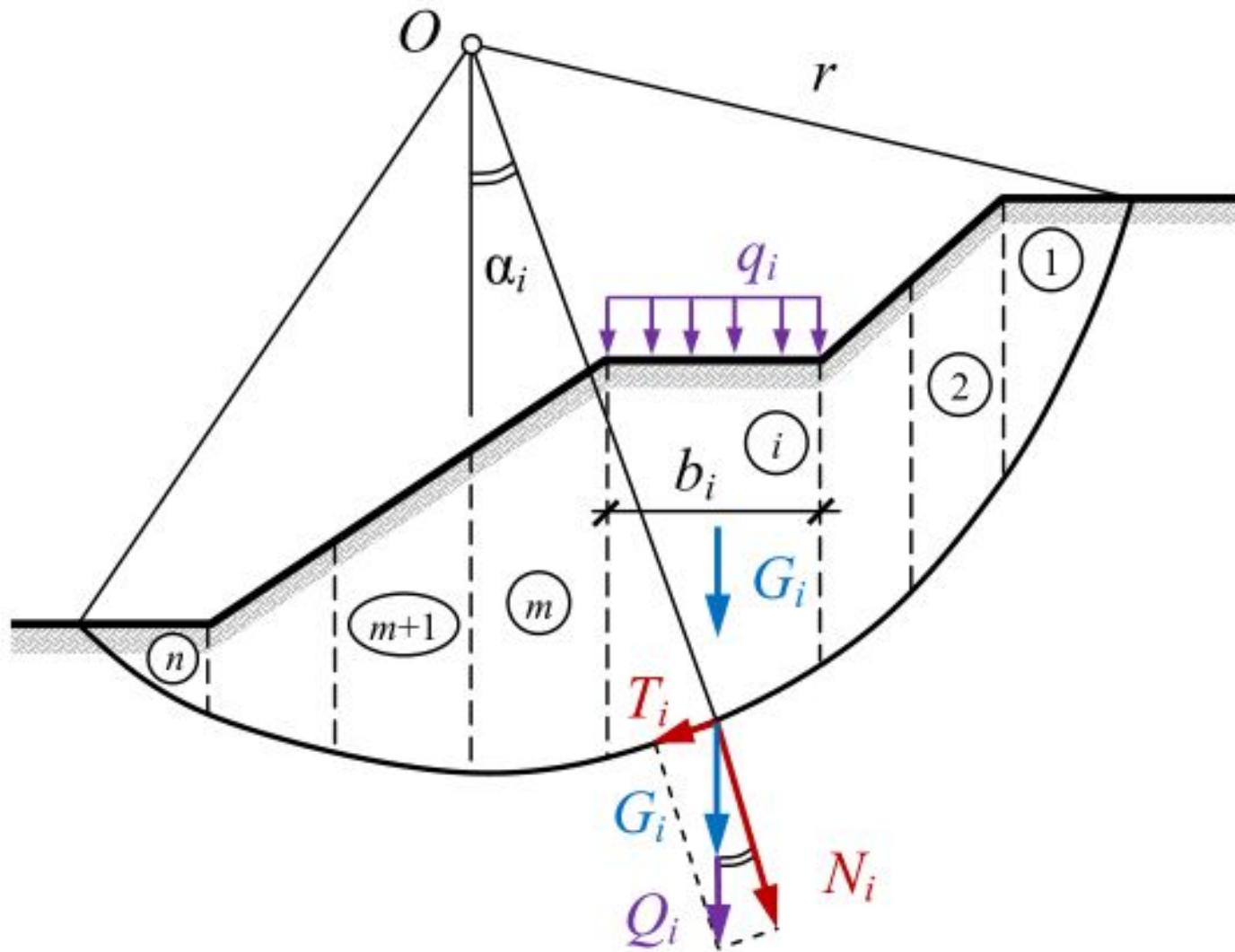
$$\sigma_3 = 0$$

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

$$h_u = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot (1 - \sin \varphi)}$$



Оценка устойчивости откосов методом круглоцилиндрических поверхностей



Оценка устойчивости откосов методом круглоцилиндрических поверхностей

$$Q_i = q_i b_i l, \quad \text{где } l = 1 \text{ м пог. откоса}$$

$$N_i = (Q_i + G_i) \cdot \cos \alpha_i$$

$$T_i = (Q_i + G_i) \cdot \sin \alpha_i$$

$$T'_i = N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i$$

$$l_i = b_i / \cos \alpha_i, \quad \text{где } l_i \text{ — длина подошвы } i\text{-го отсека}$$

Момент сдвигающих сил:

$$M_{sa} = r \sum_{i=1}^m T_i$$

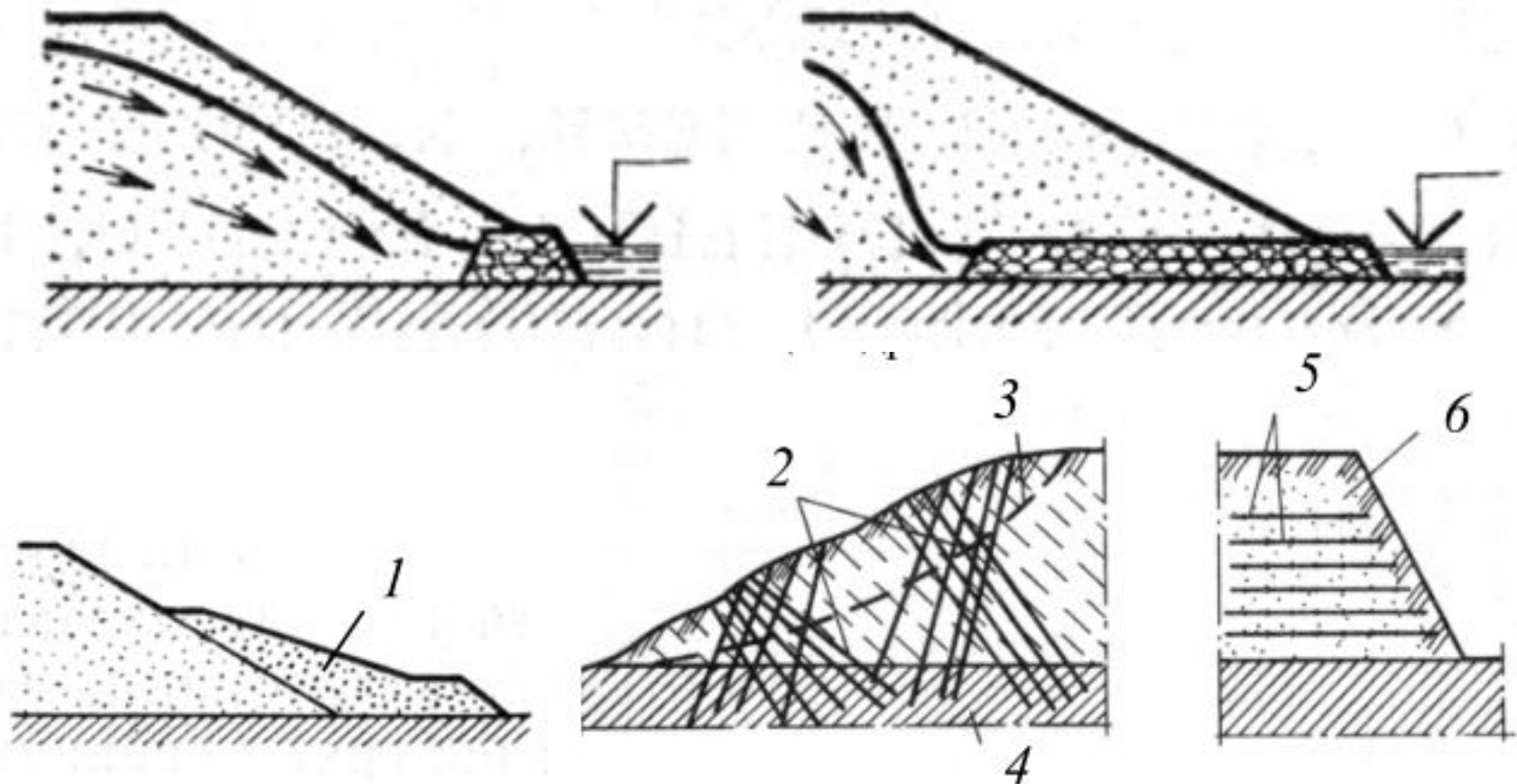
Момент удерживающих сил:

$$M_{sr} = r \sum_{i=1}^n T'_i + r \sum_{m+1}^n T_i$$

Коэффициент устойчивости:

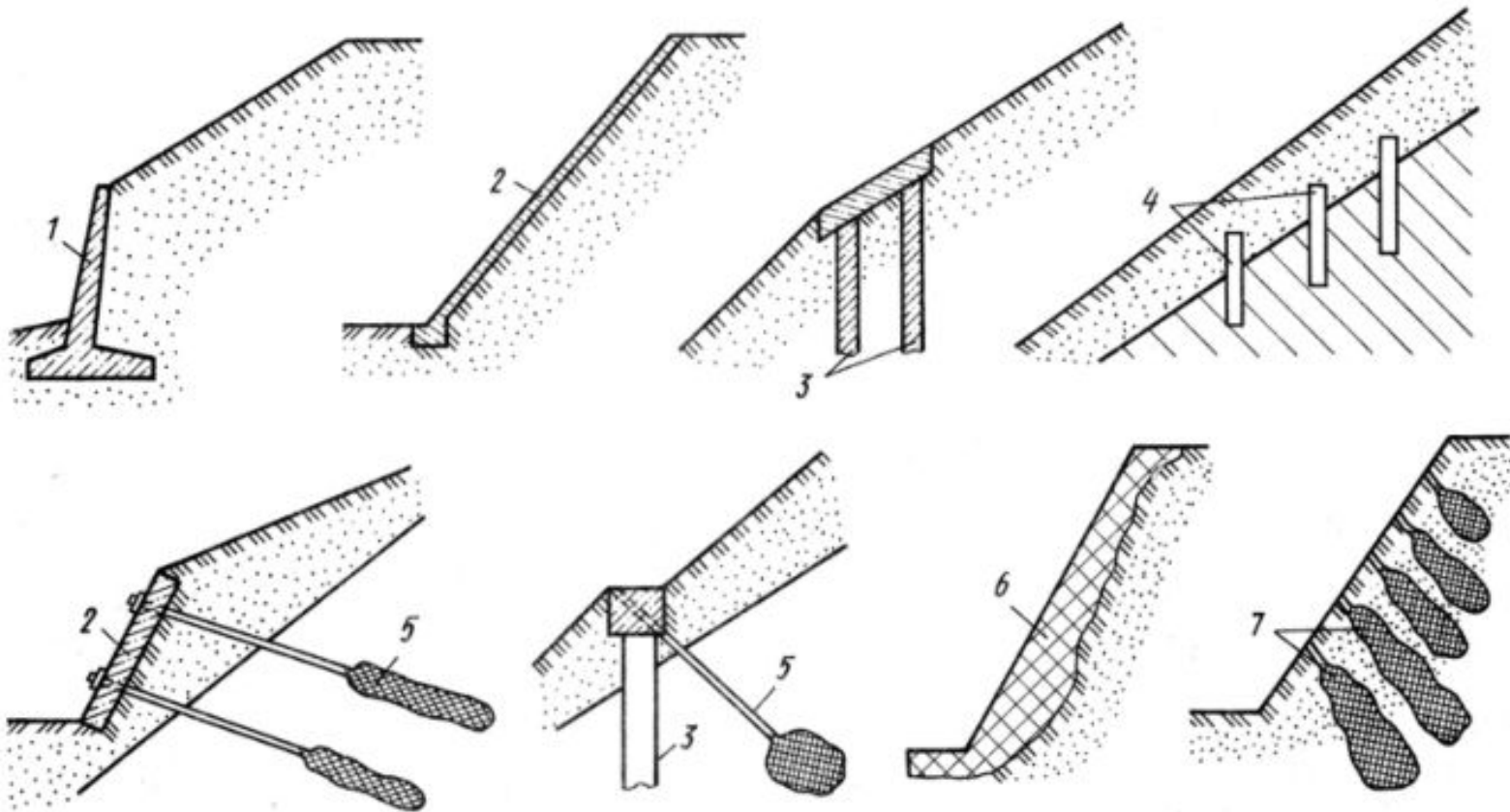
$$k_{st} = \frac{M_{sr}}{M_{sa}}$$

Способы обеспечения устойчивости откосов



1 – пригрузка низовой части откоса; 2 – армирующие стержневые элементы (сваи, нагели); 3 – поверхность скольжения; 4 – прочный грунт; 5 – армирующие сетки; 6 – насыпь

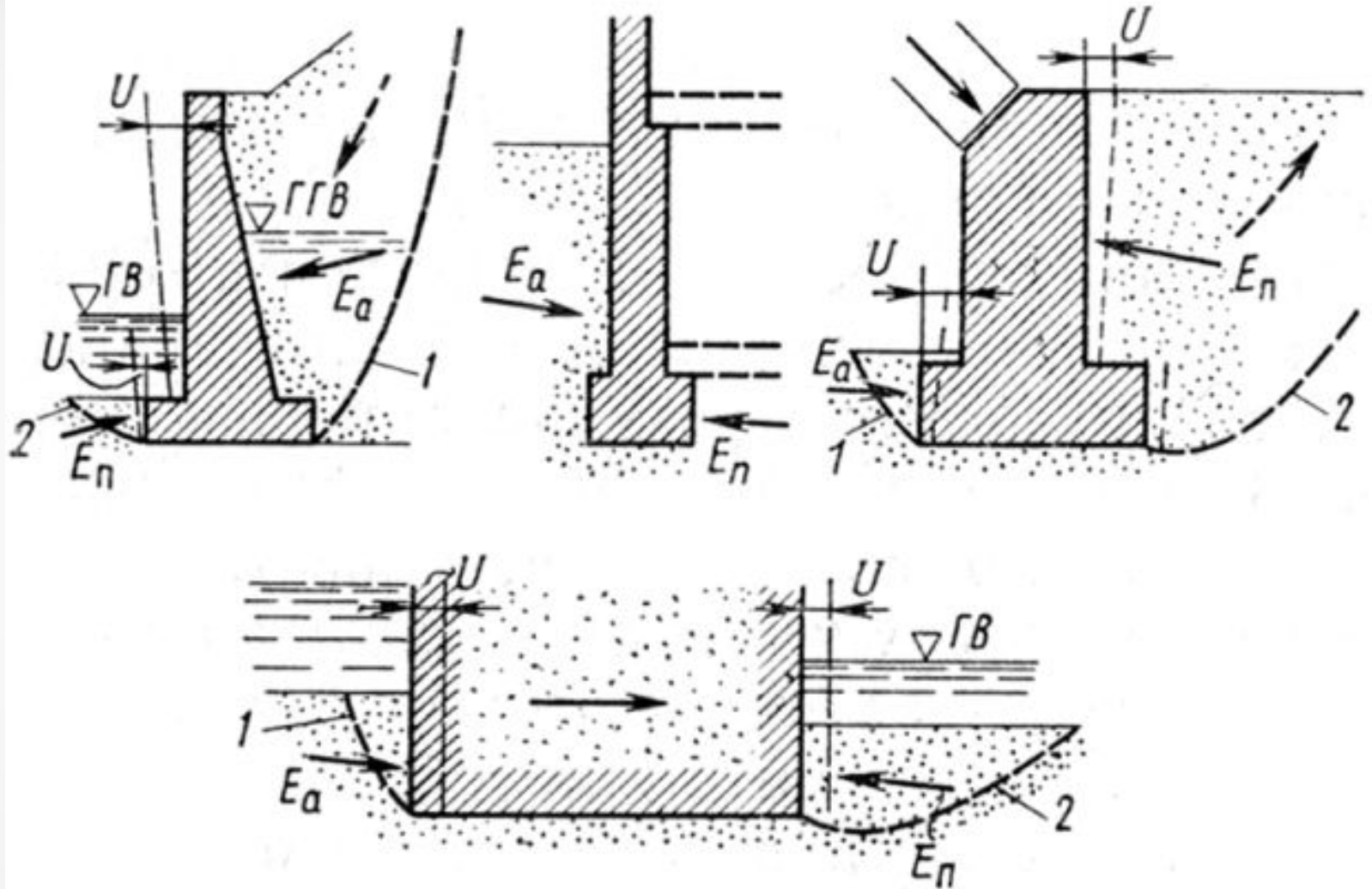
Способы обеспечения устойчивости откосов



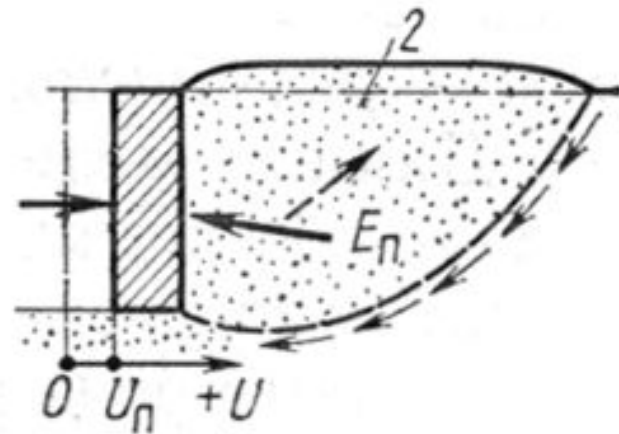
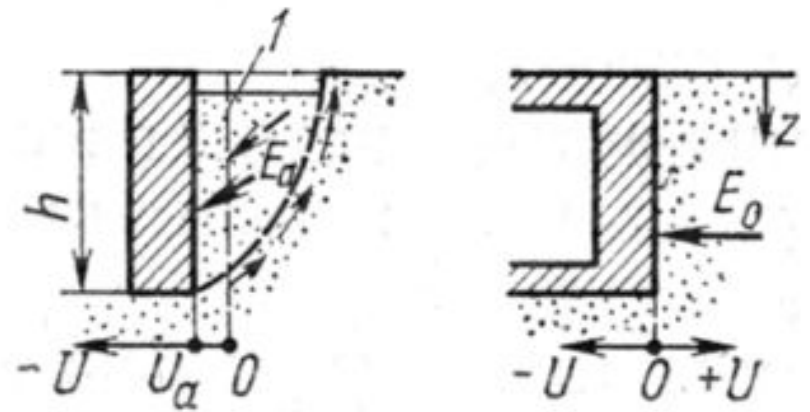
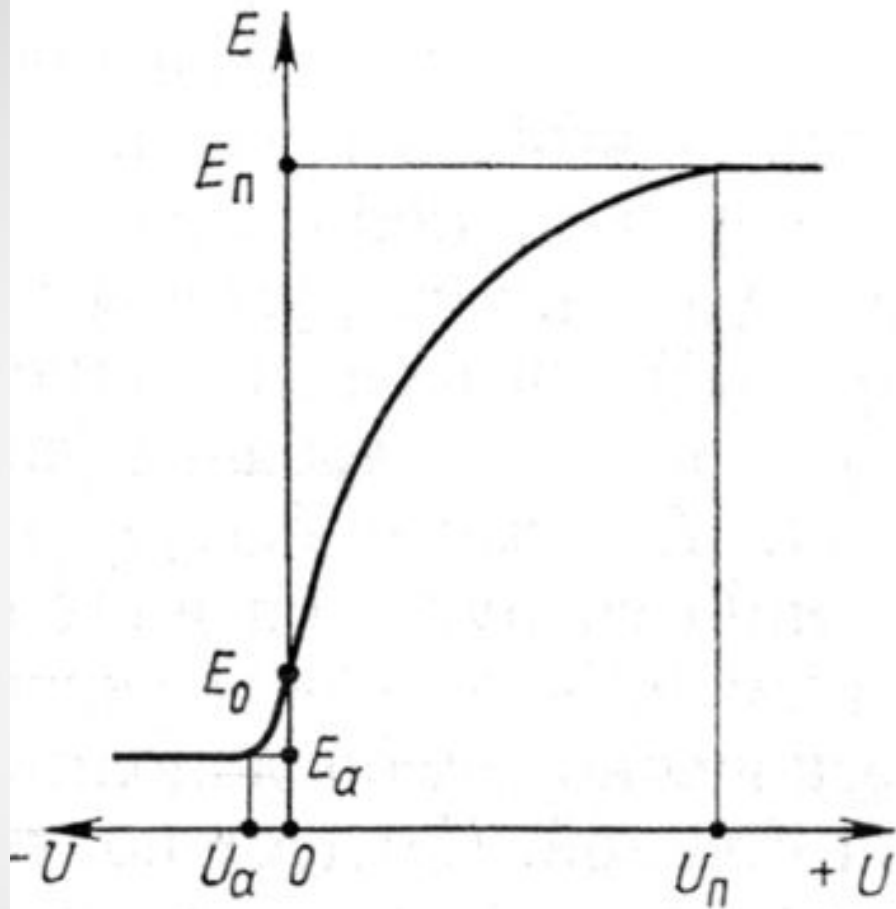
Меры по обеспечению устойчивости откосов:

- 1 – подпорная стена; 2 – плита; 3 – свая; 4 – шпонка; 5 – анкер;
6 – поверхностное закрепление; 7 – глубинное закрепление

Давление грунтов на подпорные стены



Давление грунтов на подпорные стены



Связь давления грунта E с величиной и направлением горизонтального смещения сооружения U

Давление грунтов в состоянии покоя.

Активное давление

Состояние покоя: $U=0$

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z = \xi \sigma_z$$

Активное давление: $U < 0$

Уравнение предельного равновесия сыпучего грунта ($c = 0$):

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

или

$$\sigma_3 = \sigma_1 \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$$

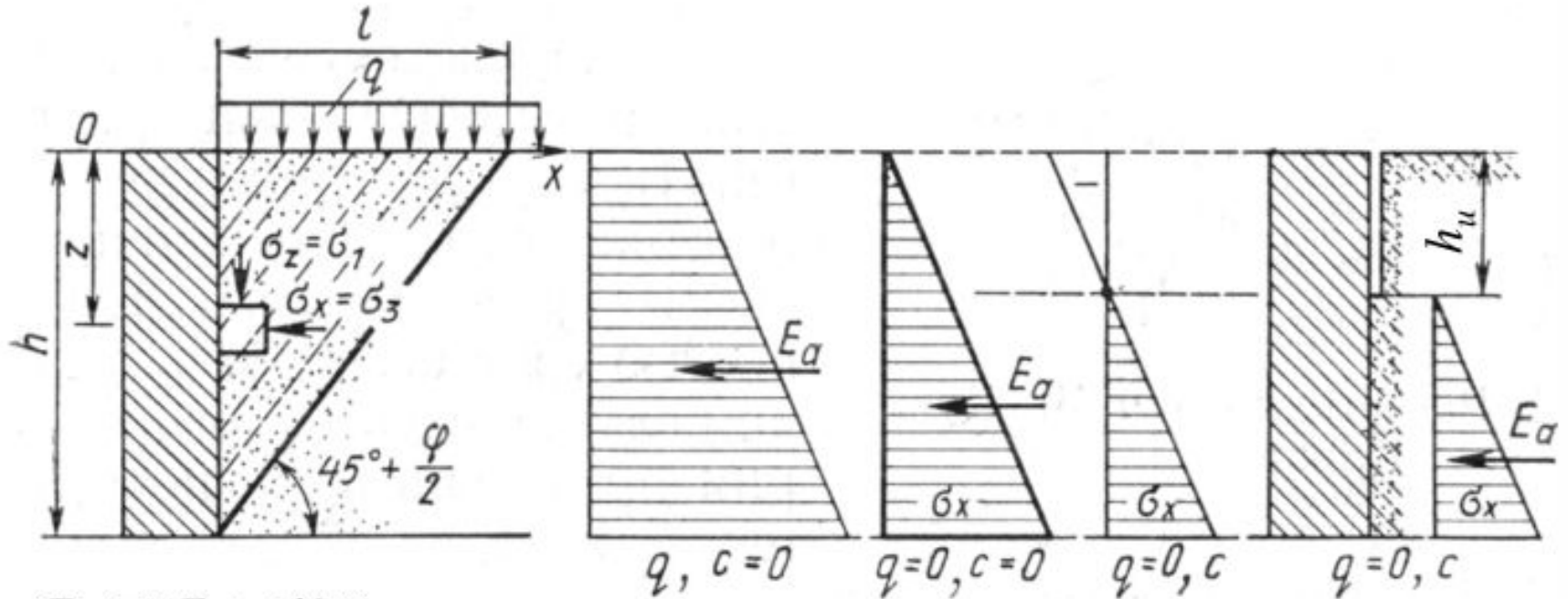
Уравнение предельного равновесия связного грунта ($c \neq 0$):

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

или

$$\sigma_3 = \sigma_1 \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2) - 2c \cdot \operatorname{tg}(45^\circ - \varphi/2)$$

Активное давление



$$\sigma_z = \sigma_1 = \gamma z$$

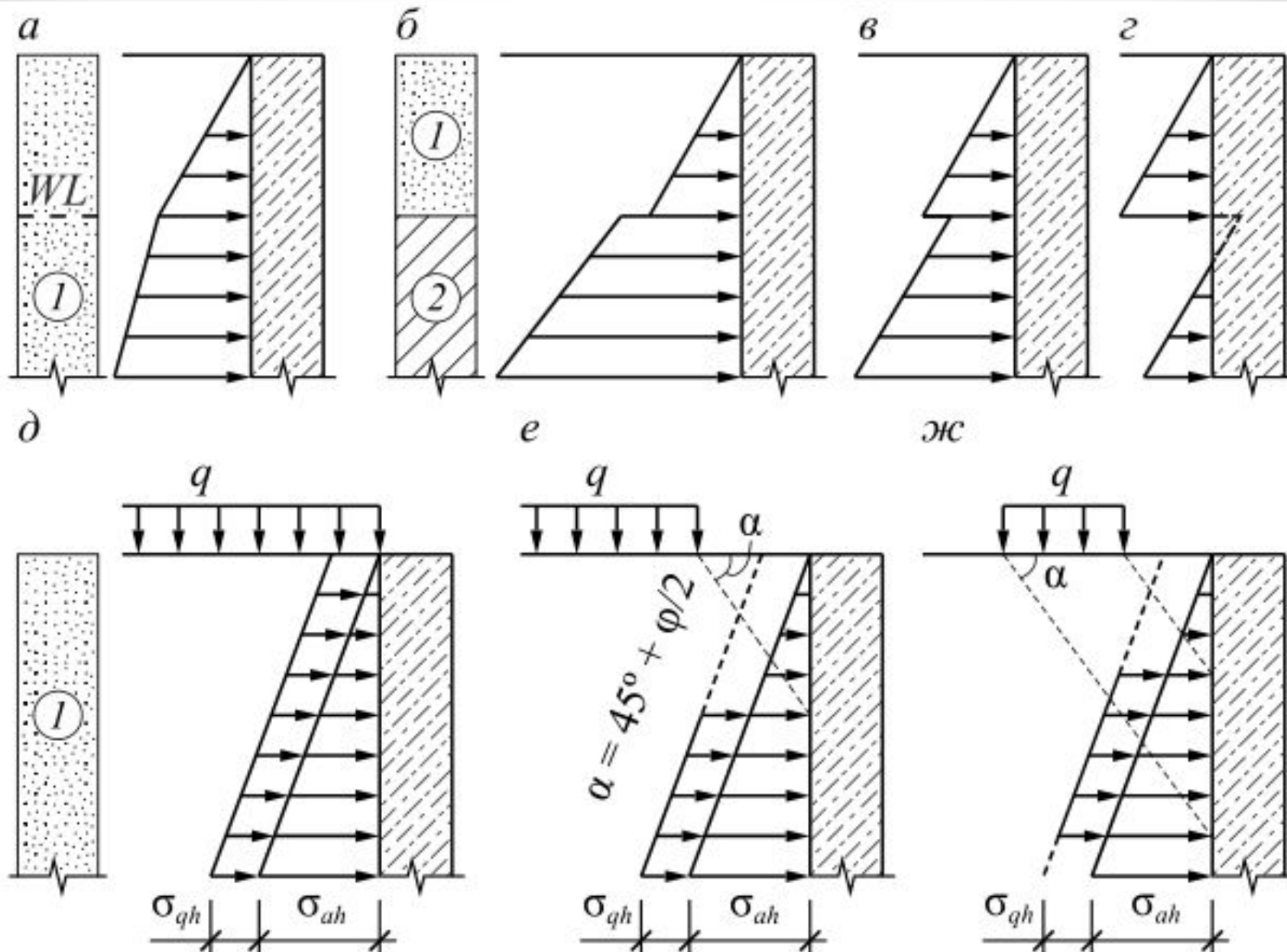
$$\sigma_x = \sigma_3 = \sigma_a$$

Сыпучий грунт: $\sigma_a = \gamma z \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$

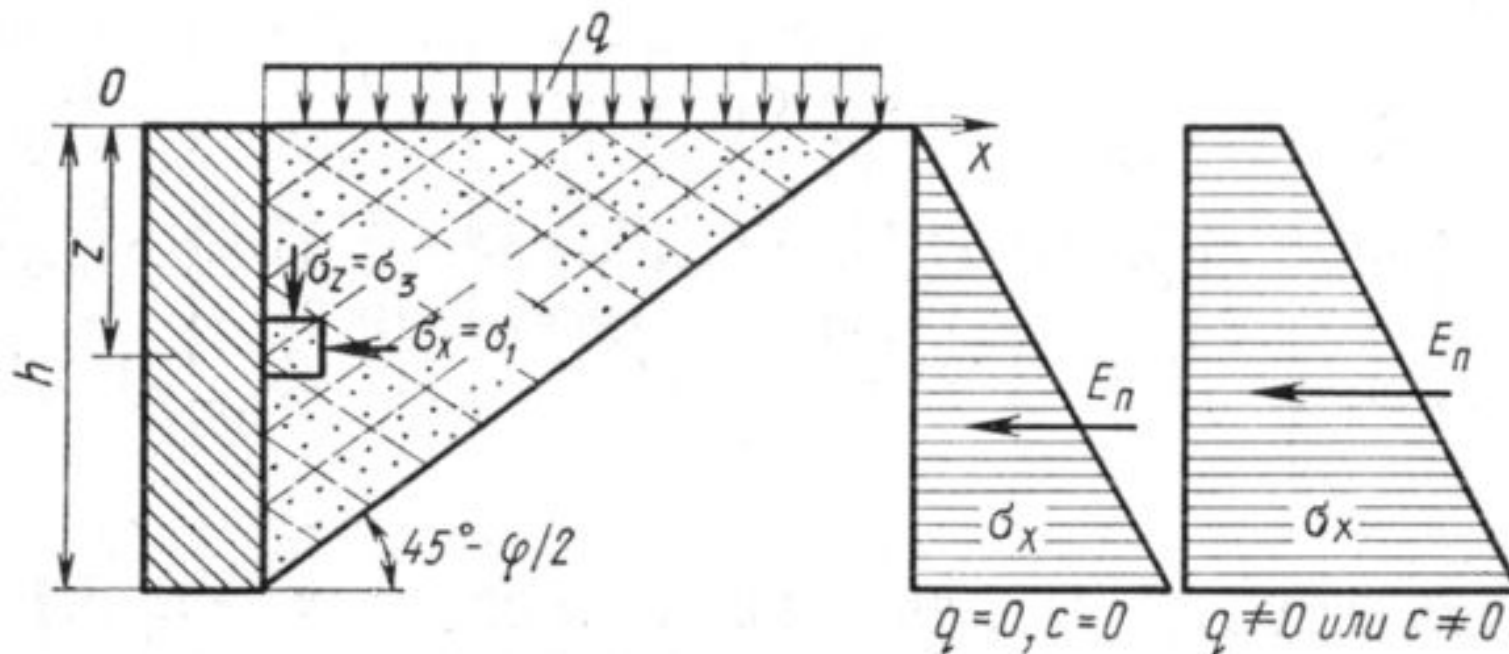
Связный грунт: $\sigma_a = \gamma z \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2) - 2c \cdot \operatorname{tg}(45^\circ - \varphi/2)$

При нагрузке на поверхности: $\sigma_z = \sigma_1 = \gamma z + q$; $\sigma_{a,q} = q \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$

Виды эпюр активного давления



Пассивное давление



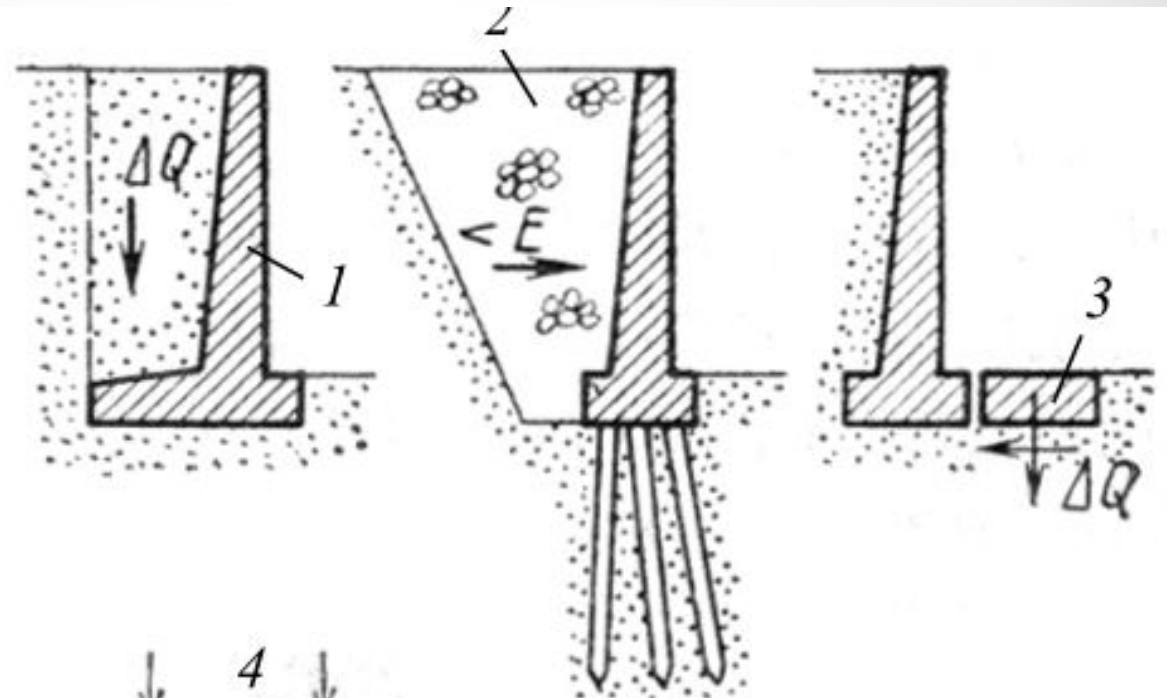
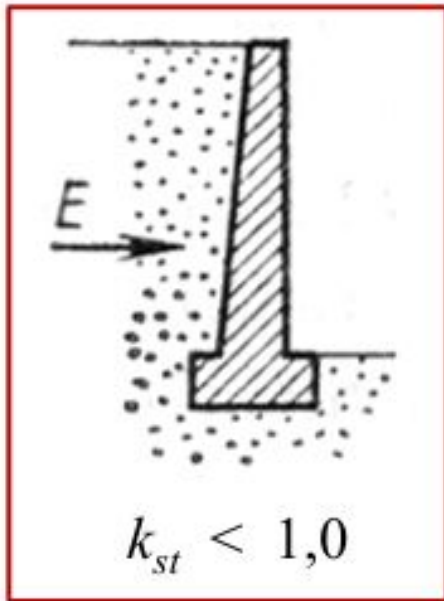
$$\sigma_x = \sigma_1 = \sigma_{\Pi}$$

$$\sigma_z = \sigma_3 = \gamma z$$

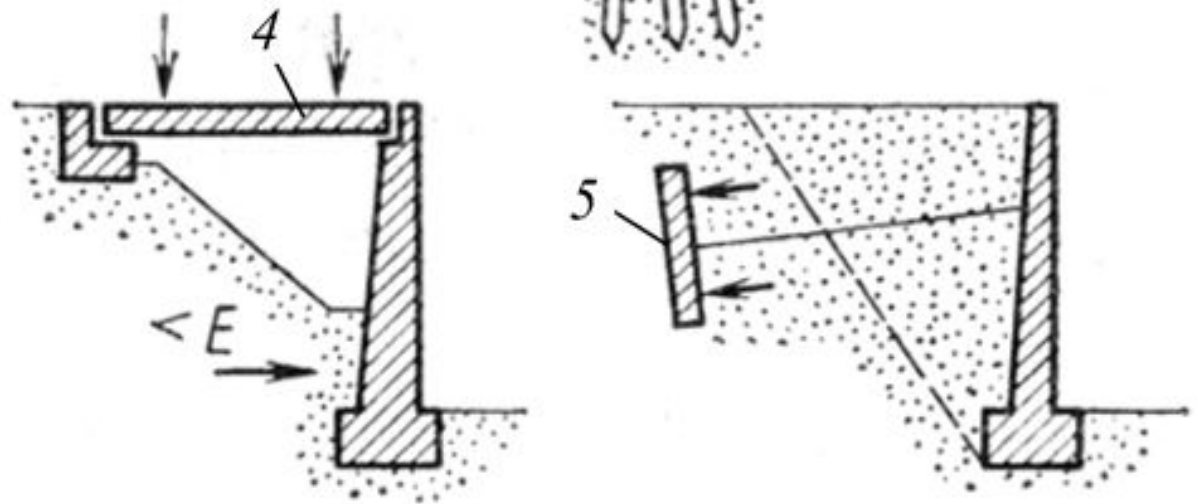
$$\sigma_1 = \sigma_3 \operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \cdot \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi/2)$$

$$\sigma_{\Pi} = \gamma z \operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \cdot \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi/2)$$

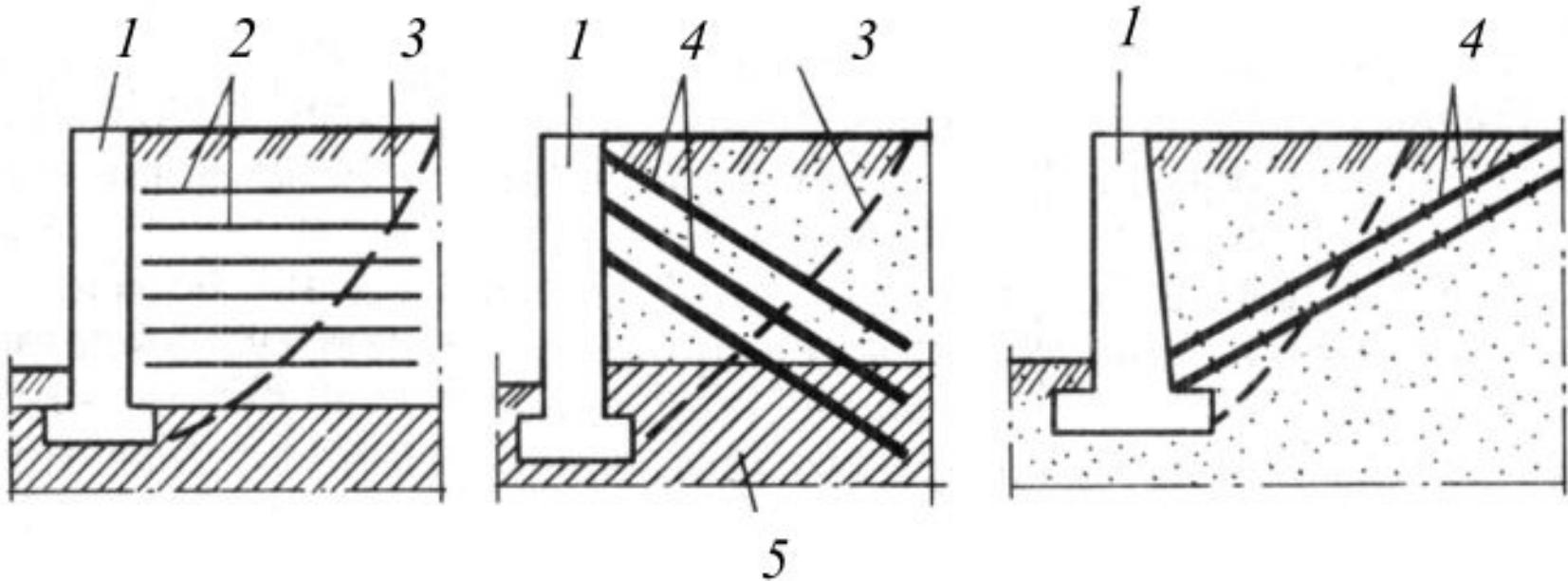
Способы повышения устойчивости подпорных стен



1 – уголковая стена (с развитой подошвой);
2 – засыпка грунтом с большим ϕ ; 3 – упор;
4 – разгрузочная плита; 5 – анкерная плита



Способы повышения устойчивости подпорных стен



Способы повышения устойчивости подпорных стен:

- 1 – подпорная стенка; 2 – армирующие элементы в виде сеток;
3 – поверхность скольжения; 4 – стержневые армирующие
элементы (сваи, нагели); 5 – прочный грунт