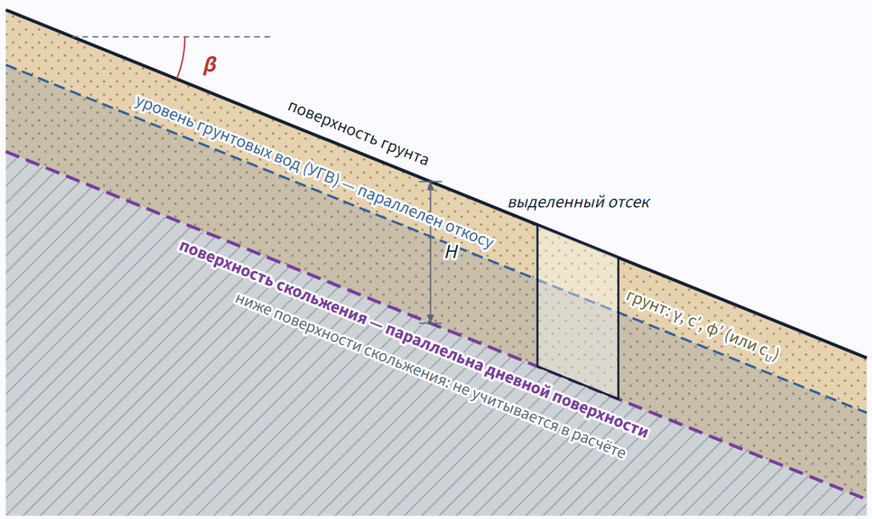
Презентация лекции по геотехнике · Устойчивость откосов и склонов

Устойчивость бесконечного откоса

Лекция: модель бесконечного откоса (поверхность скольжения параллельна поверхности); напряжения, коэффициент запаса, недренированная глина, вода, критический сейсмический коэффициент, критическая глубина и необходимый угол; по каждой теме — пример расчёта.



Бесконечный откос

Сопротивление сдвигу и FS

Вода · землетрясение

Критическая глубина · требуемый угол

Решается вручную

Что мы изучим на этой лекции?

Почему для неглубоких оползней используется модель **бесконечного откоса**: тонкий слой грунта, скользящий по плоскости, параллельной поверхности

Напряжения на плоскости от одной **полосы** ($\sigma = \sigma_v \cos^2\beta$, $\tau = \sigma_v \sin\beta \cos\beta$) и соотношение $\boldsymbol{\tau/\sigma = \tan\beta}$

Коэффициент запаса по **Mohr–Coulomb**: $FS = c'/(\gamma H \cos^2\beta \tan\beta) + \tan\varphi'/\tan\beta$; критическая глубина H_{cr}, требуемая глубина H_{req}, требуемый угол β_{req}

Влияние **недренированной глины** (c_u, $\varphi = 0$) и **воды**: уровень грунтовых вод (фильтрация параллельно откосу), коэффициент порового давления r_u

Коэффициент запаса при **псевдостатическом землетрясении** и **предельный коэффициент k_y** (горизонтальное ускорение, при котором масса начинает скользить)

ХОД ЛЕКЦИИ

Каждая тема излагается **в три шага**:

1 · **Теория**: в чём правило и почему оно таково?

2 · **Условие**: дано и требуется определить

3 · **Решение**: пошагово, с числами

Пример откоса: $\beta = 15°$, плоскость скольжения вертикально на глубине 6 m; грунт $\gamma = 17.8$ kN/m³ (водонасыщенный 19.5), $c' = 10$ kPa, $\varphi' = 20°$; поровое давление изначально отсутствует. Напряжения приведены на единицу площади плоскости, параллельной поверхности.

Отсек из массива

ТЕОРИЯ

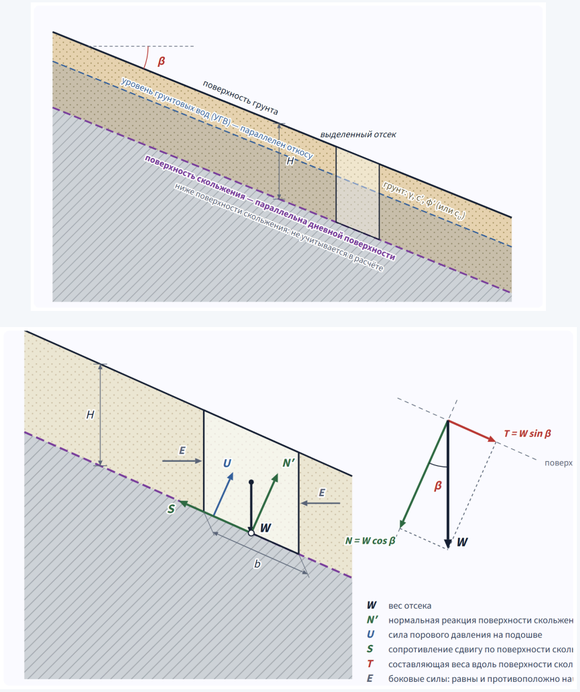
Многие оползни откосов являются поверхностными: тонкий слой грунта скользит по поверхности, параллельной поверхности откоса, на глубине нескольких метров; откос настолько длинный, что его концы почти не имеют значения (откос выемки или насыпи после влажного периода, естественный глинистый откос). **Бесконечный откос** — модель, созданная для этого случая: плоскость скольжения везде находится в одинаковом состоянии, поэтому один отсек массива представляет весь массив, а его равновесие записывается в несколько строк.

Отсек: длина вдоль плоскости скольжения b, ширина вдоль откоса 1 m; плоскость находится на вертикальной глубине H от поверхности; боковые грани вертикальны и **взаимно уравновешиваются** (откос бесконечно длинный, грунт везде одинаков).

$$W = \gamma H b \cos\beta \qquad N = W\cos\beta \quad T = W\sin\beta$$

$$\sigma = \frac{N}{b} = \sigma_v \cos^2\beta \qquad \tau = \frac{T}{b} = \sigma_v \sin\beta\cos\beta \qquad \frac{\tau}{\sigma} = \tan\beta$$

В полосе без боковых граней напряжения на плоскости наклонены под углом откоса: τ/σ = tan β. Если над плоскостью два значения удельного веса (уровень воды), то $\sigma_V = \gamma(H - h_W) + \gamma_{sat} h_W$; уравнения остаются прежними.



Условие

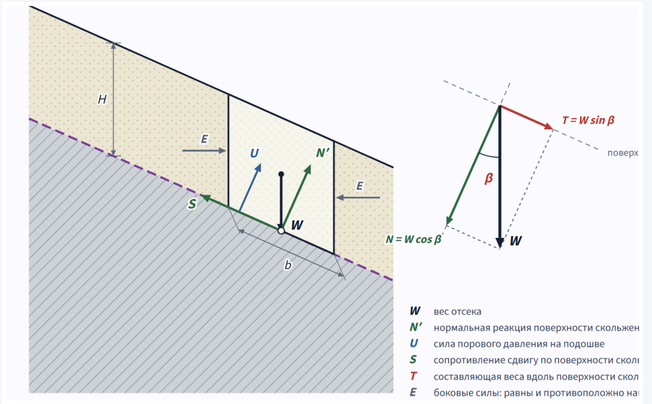
ПРИМЕР

Дано

Откос	$\beta = 15^\circ$; **вертикальная плоскость скольжения на глубине** $H = 6$ **m**
Грунт	$\gamma = 17.8$ **kN/m³; порового давления нет**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Вертикальное напряжение $\boldsymbol{\sigma_V}$, нормальное $\boldsymbol{\sigma}$ и касательное $\boldsymbol{\tau}$ напряжения на плоскости.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Вертикальное напряжение

$$\sigma_v = \gamma H = 17.8 \times 6 = \mathbf{106.80}\ \text{kPa}$$

2 Нормальное и касательное напряжения на плоскости

$$\sigma = \sigma_v \cos^2\beta = 106.80 \times 0.93301 = \mathbf{99.65}\ \text{kPa}$$

$$\tau = \sigma_v \sin\beta\cos\beta = 106.80 \times 0.25000 = \mathbf{26.70}\ \text{kPa} \qquad \frac{\tau}{\sigma} = 0.2679 = \tan 15^\circ\ \checkmark$$

На единицу площади плоскости действуют нормальное напряжение **σ = 99.65 kPa** и касательное напряжение **τ = 26.70 kPa**; отношение τ/σ = 0.2679 = tan 15°, т.е. напряжение наклонено так же, как откос.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Mohr–Coulomb, решение в замкнутой форме, критическая глубина

ТЕОРИЯ

Грунт на плоскости воспринимает сопротивление сдвигу τ_f: при дренированном расчёте — прочность по Mohr–Coulomb, зависящая от эффективного нормального напряжения ($\sigma' = \sigma - u$). Коэффициент запаса — это отношение прочности к напряжению: сцепление и трение уменьшаются на один и тот же коэффициент до тех пор, пока полоса не окажется в предельном равновесии:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan\varphi' \qquad FS = \frac{\tau_f}{\tau} \qquad \sigma' = \sigma - u$$

При отсутствии порового давления $\sigma' = \sigma$, а из напряжений получается **замкнутое решение**:

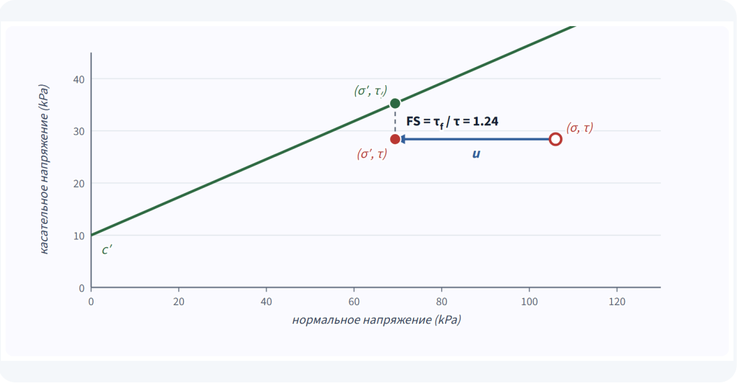
$$FS = \frac{c'}{\gamma H \cos^2\beta \, \tan\beta} + \frac{\tan\varphi'}{\tan\beta}$$

Несвязный грунт ($c' = 0$): $FS = \tan\varphi'/\tan\beta$; если откос положе φ', он устойчив на любой глубине.

Связный грунт: плоскость вблизи поверхности удерживается сцеплением (FS велик); с глубиной FS уменьшается и сводится к одному трению.

При $\beta > \varphi'$ существуют **критическая глубина**, при которой $FS = 1$, и **требуемая глубина**, при которой $FS = FS_{req}$; для несвязного грунта β_{req}: $\tan\beta_{req} = \tan\varphi'/FS_{req}$:

$$H_{cr} = \frac{c'}{\gamma} \frac{1}{\cos^2\beta(\tan\beta - \tan\varphi')} \qquad H_{req} = \frac{c'}{\gamma \cos^2\beta \, (FS_{req}\tan\beta - \tan\varphi')}$$



Условие

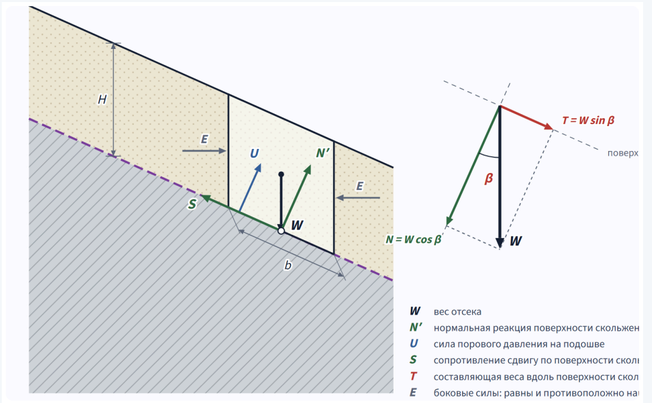
ПРИМЕР

Дано

Откос и грунт	**Пример 1:** $\beta = 15^\circ$, $H = 6$ **m,** $\gamma = 17.8$ **kN/m³;** $c' = 10$ **kPa,** $\varphi' = 20^\circ$**; порового давления нет**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

τ_f и **FS** плоскости; проверка по замкнутому решению.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Прочность и коэффициент запаса (при напряжениях из примера 1)

$$\tau_f = c' + \sigma \tan\varphi' = 10 + 99.65 \times 0.36397 = \mathbf{46.27}\ \text{kPa}$$

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{46.27}{26.70} = \mathbf{1.733}$$

2 Замкнутое решение (проверка)

$$FS = \frac{10}{17.8(6)(0.93301)(0.26795)} + \frac{0.36397}{0.26795} = 0.3745 + 1.3584 = \mathbf{1.7329}$$

Коэффициент запаса **1.733**. Слагаемое сцепления равно 0.3745, слагаемое трения tan 20°/tan 15° = 1.3584: сумма даёт то же число. Поскольку откос (15°) положе угла внутреннего трения (20°), устойчивость обеспечивается одним трением; сцепление увеличивает запас.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

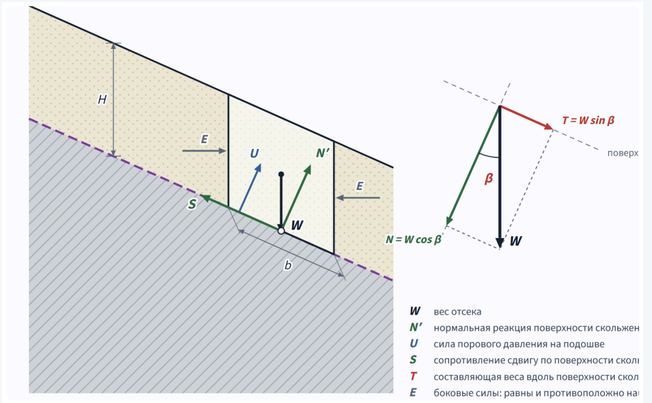
ПРИМЕР

Дано

Грунт	**Грунт из примера 2 ($c' = 10$ kPa, $\varphi' = 20°$, $\gamma = 17.8$ kN/m³)**
Требуется определить	**требуемый коэффициент запаса $FS_{req} = 2.0$; а также критическая глубина для более крутого откоса $\beta = 25°$**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

H_{req} (β = 15°); **β_{req}** (H = 6 m); **H_{cr}** для β = 25°.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Требуемая глубина (β = 15°; FS_{req} = 2)

$$H_{req} = \frac{c'}{\gamma \cos^2\beta (FS_{req}\tan\beta - \tan\varphi')} = \frac{10}{17.8(0.93301)(2(0.26795) - 0.36397)} = \mathbf{3.50}\ \text{m}$$

2 Требуемый угол (H = 6 m): корень уравнения FS(β) = 2; критическая глубина (β = 25°)

$$FS(\beta) = \frac{10}{106.8\cos^2\beta\tan\beta} + \frac{0.36397}{\tan\beta} = 2 \Rightarrow \beta_{req} = \mathbf{13.02}^\circ$$

$$H_{cr}(25^\circ) = \frac{10}{17.8(0.8214)(0.4663 - 0.3640)} = \mathbf{6.68}\ \text{m}$$

При FS = 2 плоскость может находиться на глубине не более **3.50 m**; на глубине 6 m для того же коэффициента запаса откос должен быть не круче **13.0°**. Поскольку β = 25° > φ′, существует критическая глубина, при которой FS снижается до 1: **6.68 m**. Для существующего откоса (β < φ′) критической глубины нет.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Полное напряжение: c_u и $\varphi = 0$

ТЕОРИЯ

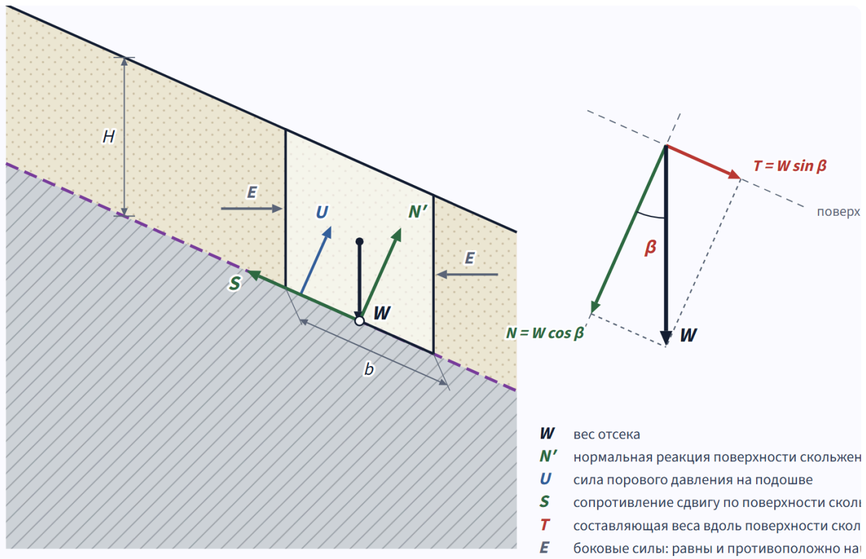
Водонасыщенная глина, нагружаемая или разрабатываемая слишком быстро для дренирования (кратковременное состояние выемки в мягкой глине), рассчитывается **по полным напряжениям** с c_u и $\varphi = 0$. Прочность не зависит от нормального напряжения; поровое давление не вводится:

$$FS = \frac{c_u}{\tau} = \frac{c_u}{\gamma H \sin\beta \cos\beta} = \frac{2c_u}{\gamma H \sin 2\beta}$$

$\tau = (\gamma H/2)\sin 2\beta$ наибольшее для откоса 45°; FS **обратно пропорционален** глубине: FS плоскости, расположенной вдвое глубже, вдвое меньше.

Глина, устойчивая в недренированном состоянии в краткосрочной перспективе, после дренирования может оказаться неустойчивой: в долгосрочной перспективе выполняется **дренированный расчёт** с поровым давлением от грунтовых вод и дренированными c', φ'.

$H_{cr} = c_u/(\gamma \sin\beta \cos\beta)$; $H_{req} = c_u/(FS_{req}\, \gamma \sin\beta \cos\beta)$; $\sin 2\beta_{req} = 2c_u/(FS_{req}\, \gamma\, H)$.



Условие

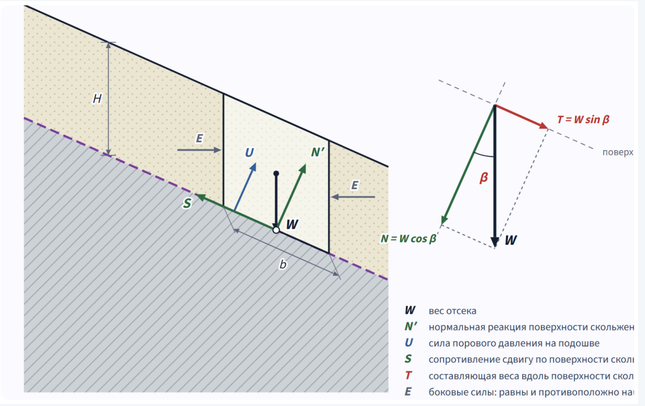
ПРИМЕР

Дано

Откос	$\beta = 15^\circ$, $H = 6$ m, $\gamma = 17.8$ kN/m³; **недренированная глина** $c_u = 40$ kPa ($\varphi = 0$)
Требуется определить	$FS_{req} = 2.0$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

FS, H_{cr}, H_{req}, β_{req}.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Коэффициент запаса и критическая глубина

$$FS = \frac{c_u}{\gamma H \sin\beta \cos\beta} = \frac{40}{17.8(6)(0.2500)} = \frac{40}{26.70} = \mathbf{1.498}$$

$$H_{cr} = \frac{c_u}{\gamma \sin\beta \cos\beta} = \frac{40}{17.8(0.2500)} = \mathbf{8.99}\ \text{m}$$

2 Требуемая глубина и угол ($FS_{req} = 2$)

$$H_{req} = \frac{c_u}{FS_{req}\,\gamma \sin\beta \cos\beta} = \frac{8.99}{2} = \mathbf{4.49}\ \text{m}$$

$$\sin 2\beta_{req} = \frac{2c_u}{FS_{req}\gamma H} = \frac{80}{2(106.8)} = 0.3745 \;\Rightarrow\; \beta_{req} = \mathbf{11.00}^\circ$$

При c_u = 40 kPa **FS = 1.50** (1.73 для дренированного случая). Для FS = 2 откос не круче **11.0°**; H_{cr} = 8.99 m.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Фильтрация параллельно откосу; коэффициент порового давления r_u

ТЕОРИЯ

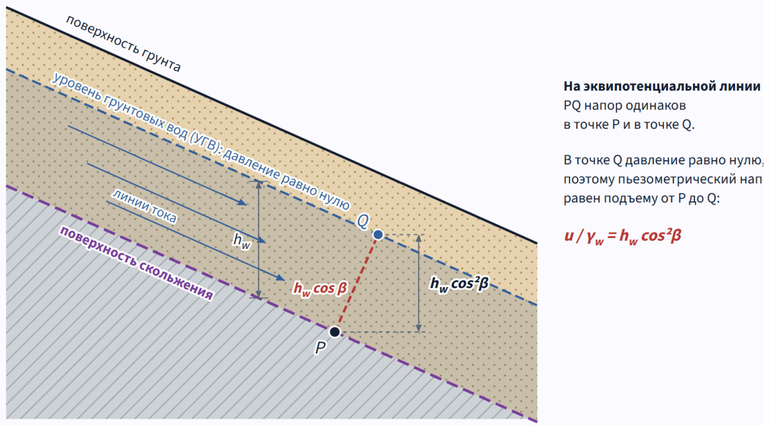
Вода, создавая поровое давление u, снижает эффективное напряжение и тем самым уменьшает прочность. Если уровень грунтовых вод (УГВ) расположен на глубине z_w от поверхности (по вертикали), то грунт выше него имеет удельный вес γ, а ниже — γ_{sat}; высота воды над плоскостью $h_w = H - z_w$. Если вода фильтруется параллельно поверхности, то эквипотенциальная линия, проходящая через точку P, перпендикулярна откосу; напор равен $h_w\cos^2\beta$:

$$u = \gamma_w h_w \cos^2\beta \qquad \sigma' = \sigma - u \qquad FS = \frac{c' + \sigma' \tan\varphi'}{\tau}$$

вода на поверхности: $FS = \dfrac{c'}{\gamma_{sat} H \cos^2\beta \tan\beta} + \dfrac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \dfrac{\tan\varphi'}{\tan\beta}$ $\qquad r_u = \dfrac{u}{\gamma H}$: $FS = \dfrac{c'}{\gamma H \cos^2\beta \tan\beta} + \left(1 - \dfrac{r_u}{\cos^2\beta}\right) \dfrac{\tan\varphi'}{\tan\beta}$

Для несвязного грунта при уровне воды на поверхности $FS = (\gamma'/\gamma_{sat}) \tan\varphi'/\tan\beta$: так как $\gamma'/\gamma_{sat} \approx ½$, песчаный откос, который в сухом состоянии стоит под углом, близким к φ′, при фильтрации требует откоса с вдвое меньшим тангенсом угла наклона.

Если поровое давление получено по пьезометру или гидродинамической сетке, отношение порового давления к весу грунта задаётся как r_u. Если получается σ′ ≤ 0 (вода приподнимает грунт над плоскостью), трение обнуляется, остаётся только сцепление, о чём сообщается.



На эквипотенциальной линии PQ напор одинаков в точке P и в точке Q.

В точке Q давление равно нулю, поэтому пьезометрический напор равен подъему от P до Q:

$u / \gamma_w = h_w \cos^2\beta$

Условие

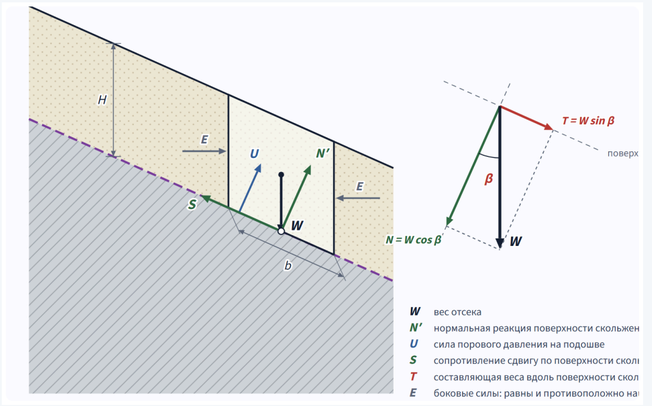
ПРИМЕР

Дано

Откос и грунт	**Откос из примера 2;** $\gamma = 17.8$ **(сухой),** $\gamma_{sat} = 19.5$ **kN/m³**
Водные условия	**(a) уровень воды на** $z_w = 2$ **m, фильтрация параллельно откосу; (b) вода на поверхности (**$z_w = 0$**); (c)** $r_u = 0.25$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

В каждом случае **u**, **σ′**, **τ_f** и **FS**; сравнение с FS для сухого грунта.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 (a) Уровень воды на глубине 2 m: $h_w = 6 - 2 = 4$ m

$$\sigma_v = 17.8(2) + 19.5(4) = 113.6 \text{ kPa}$$

$$\sigma = \sigma_v \cos^2\beta = 105.99 \text{ kPa} \quad \tau = \sigma_v \sin\beta\cos\beta = 28.40 \text{ kPa}$$

$$u = \gamma_w h_w \cos^2\beta = 9.81(4)(0.9330) = 36.61 \text{ kPa} \quad \sigma' = \sigma - u = 69.38 \text{ kPa}$$

$$FS = \frac{10 + 69.38(0.36397)}{28.40} = \frac{35.25}{28.40} = \mathbf{1.241}$$

При УГВ на глубине 2 m FS снижается с 1.73 для сухого случая до **1.24**: вода увеличивает и вес грунта (σ_V), и поровое давление (36.6 kPa).

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

2 Сводка по трём водным условиям (те же уравнения)

Состояние	σ_v (kPa)	σ (kPa)	τ (kPa)	u (kPa)	σ' (kPa)	τ_f (kPa)	FS
Сухой	106.8	99.65	26.70	0.00	99.65	46.27	**1.733**
(a) z_w = 2 m	113.6	105.99	28.40	36.61	69.38	35.25	**1.241**
(b) вода на поверхности	117.0	109.16	29.25	54.92	54.25	29.74	**1.017**
(c) r_u = 0.25	106.8	99.65	26.70	26.70	72.95	36.55	**1.369**

Когда вода на поверхности, FS = **1.02**, почти на пределе; при r_u = 0.25 — **1.37**. Откос, имеющий достаточный запас в сухом состоянии, во влажном состоянии запаса не имеет вовсе: модуль наряду с результатом показывает FS для сухого состояния и для воды на поверхности.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Горизонтальная и вертикальная силы; коэффициент текучести k_y

ТЕОРИЯ

Сотрясение заменяется постоянным ускорением (долей g), приложенным к массе над плоскостью. Полоса, помимо веса W, воспринимает горизонтальную силу $\mathbf{k_h W}$ вниз по откосу и вертикальную силу $\mathbf{k_V W}$ вверх/вниз; k_h и k_V — коэффициенты, задаваемые инженером (модуль не берёт их из норм). На единицу площади W/A = $\sigma_V \cos\beta$:

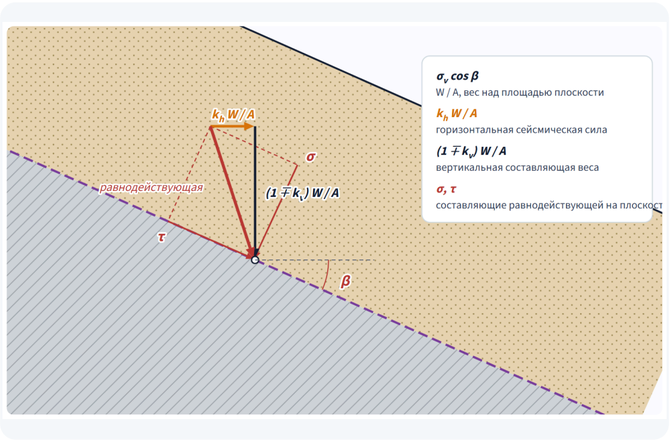
$$\sigma = \sigma_v \cos\beta\,[(1 \mp k_v)\cos\beta - k_h \sin\beta] \qquad \tau = \sigma_v \cos\beta\,[(1 \mp k_v)\sin\beta + k_h \cos\beta]$$

Поровое давление принимается статическим (добавка от сотрясения не вводится): σ′ = σ − u; $FS_{eq} = \tau_f/\tau$ с новыми σ и τ. Горизонтальная сила уменьшает нормальное напряжение и увеличивает касательное.

Проверяются оба направления вертикальной силы и принимается то, которое даёт **меньший FS**: в грунте с трением это, как правило, направление вверх (оно облегчает массу и уменьшает нормальное напряжение); в глине при расчёте по полным напряжениям, поскольку c_u не зависит от нормального напряжения, — направление вниз, увеличивающее касательное напряжение.

Коэффициент текучести k_y: горизонтальный коэффициент, при котором $FS_{eq} = 1$. Для сухого несвязного грунта при $k_V = 0$: $k_y = \tan(\varphi' - \beta)$; в остальных случаях находится увеличением k_h от нуля. Сотрясение, не превышающее $k_y g$, не приводит массу в движение; превышающее — приводит (насколько она сместится — это анализ скользящего блока, в модуле его нет).

$$k_y = \frac{\tan\varphi' - \tan\beta}{1 + \tan\varphi' \tan\beta} = \tan(\varphi' - \beta)$$



Условие

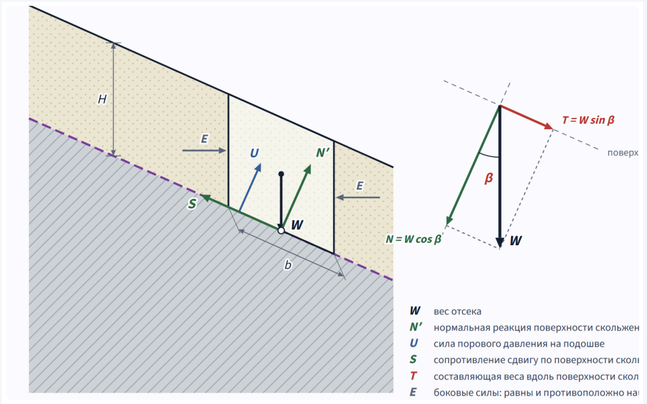
ПРИМЕР

Дано

Откос и грунт	**Сухой откос из примера 2 ($c' = 10$ kPa, $\varphi' = 20°$, $\beta = 15°$, $H = 6$ m)**
Землетрясение	**$k_h = 0.15$, $k_v = 0.05$ (проверяются два направления); а также для сухого песка $\varphi' = 32°$, $\beta = 25°$**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

σ, **τ**, **FS_{eq}** (критическое направление); таблица $FS(k_h)$ и **k_y**; k_y в сухом песке.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Критическое направление: вертикальная сила вверх (k_v = +0.05 разгружает)

$$\sigma = \sigma_v \cos\beta\,[0.95\cos\beta - 0.15\sin\beta] = 103.16\,[0.8788] = 90.66 \text{ kPa}$$

$$\tau = \sigma_v \cos\beta\,[0.95\sin\beta + 0.15\cos\beta] = 103.16\,[0.3908] = 40.31 \text{ kPa}$$

$$FS_{eq} = \frac{10 + 90.66(0.36397)}{40.31} = \frac{43.00}{40.31} = \mathbf{1.067} \qquad (k_v \text{ ниже: } 1.085)$$

Определяющей является вертикальная сила, направленная вверх: FS_{eq} = **1.067** (при направлении вниз 1.085).

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

2 FS(k_h) и коэффициент текучести (где FS = 1)

k_h	σ (kPa)	τ (kPa)	τ_f (kPa)	FS_{eq}
0.00	94.66	25.36	44.45	**1.753**
0.05	93.33	30.35	43.97	**1.449**
0.10	91.99	35.33	43.48	**1.231**
0.15	90.66	40.31	43.00	**1.067**
0.1746	90.00	42.76	42.76	**1.000**
0.20	89.32	45.29	42.51	**0.939**

Землетрясение снижает FS с 1.73 до **1.07** (определяющей является вертикальная сила, направленная вверх). **k_y = 0.175**: если k_h превышает это значение, масса начинает скользить. Для сухого песка (φ′ = 32°, β = 25°) k_y = tan 7° = 0.1228.

Проверить решение в GeoTerva ↗

FS; H_{req}, β_{req}, H_{cr}

ТЕОРИЯ

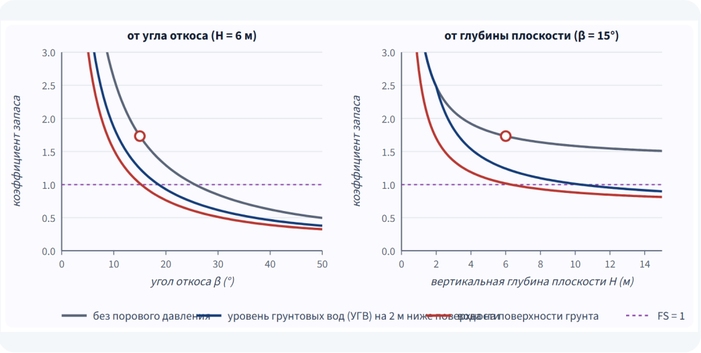
FS в зависимости от уклона: FS равномерно убывает с ростом β; расстояние между кривыми показывает, какую часть запаса отнимает вода; угол, при котором кривая пересекает FS_{req}, равен β_{req}.

FS в зависимости от глубины: кривая для связного грунта снижается от большого значения на поверхности до уровня, определяемого трением; точка пересечения с FS = 1 даёт критическую глубину. УГВ оставляет отметку на глубине, где вода впервые достигает плоскости; выше неё следует кривая для сухого грунта.

FS в зависимости от воды: возрастает с углублением уровня грунтовых вод и снижается с ростом r_u; показывает, насколько сильно дренированный откос зависит от трудно определимого порового давления.

В сейсмическом случае на каждом графике добавляется вторая (оранжевая) линия; пятый график зависимости FS от k_h даёт k_y в точке пересечения с FS = 1.

Вкладка результатов, помимо FS и сравнения с требуемым значением, выдаёт следующее: **H_{req}** (первая глубина, на которой FS снижается до FS_{req}; если не снижается — «нет предела»), **β_{req}** (наибольший угол, при котором FS_{req} ещё обеспечивается при увеличении угла от пологого), **H_{cr}**, два предельных положения воды (нет порового давления / вода на поверхности), а при землетрясении — FS_{eq}, k_y.



Условие

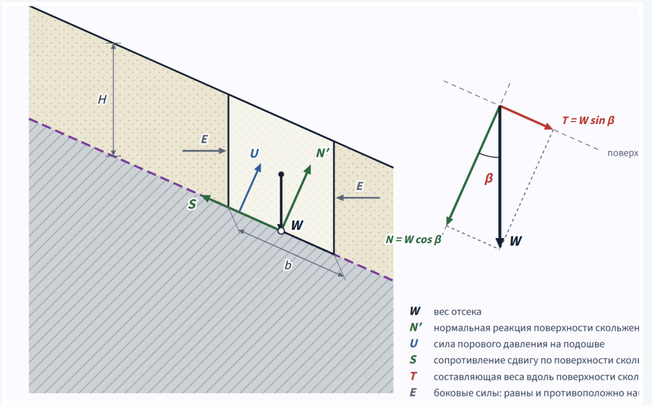
ПРИМЕР

Дано

Грунт	**Грунт из примера 2 ($c' = 10$ kPa, $\varphi' = 20°$, $\gamma = 17.8$, $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m³)**
Таблица	**Значения FS для $\beta = 10,\ 15,\ 20,\ 25,\ 30°$ и $H = 2,\ 4,\ 6,\ 8$ m в сухом грунте и при УГВ на $z_w = 2$ m (по решению в замкнутой форме)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Таблица $FS_{dry}(\beta, H)$; для УГВ при H = 6 m; начиная с какого угла FS < 1?



Решение

РЕШЕНИЕ

1 FS = c′/(γH cos²β tan β) + tan φ′/tan β (сухой откос); при наличии уровня воды — по напряжениям (жирным шрифтом: FS < 1)

β (°)	H = 2 m	H = 4 m	H = 6 m	H = 8 m	H = 6, вода z_w = 2 m
10	3.707	2.885	2.612	2.475	1.866
15	2.482	1.920	1.733	1.639	1.241
20	1.874	1.437	1.291	1.219	**0.928**
25	1.514	1.147	1.025	**0.964**	**0.741**
30	1.279	**0.955**	**0.847**	**0.793**	**0.616**

FS закономерно уменьшается с увеличением угла и с глубиной (вклад сцепления). Начиная с β = 20° и H = 8 m даже сухой откос приближается к пределу; уровень грунтовых вод на z_w = 2 m при H = 6 m снижает FS **ниже 1** начиная с 20° (0.62 при 30°). Поэтому определяются β_{req} и H_{req}.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Допущения модели

ТЕОРИЯ

Модель: бесконечно длинный откос: поверхность грунта плоская, поверхность скольжения параллельна ей на вертикальной глубине H; концы массива роли не играют; условия всюду одинаковы; двумерная задача, 1 m вдоль откоса.

Грунт: над плоскостью один грунт (заданные прочность и удельный вес); слои, грунт, изменяющийся вдоль откоса или с глубиной, и прочность, возрастающая с глубиной, в этой модели не рассматриваются; для контакта со слабым слоем можно использовать свойства этого слоя либо модуль «Устойчивость откосов и склонов».

Вода: уровень воды, фильтрующейся параллельно откосу ($u = \gamma_w h_w \cos^2\beta$), или r_u; поровое давление не вычисляется по осадкам или проницаемости. **Прочность**: Mohr–Coulomb в эффективных напряжениях или c_u; при $\sigma' \leq 0$ трение равно нулю. Остаточная прочность, прогрессирующее разрушение и влияние корней не учитываются.

Землетрясение: только псевдостатический расчёт; сотрясение не добавляет порового давления; усиление колебаний, продолжительность, остаточное поровое давление в рыхлом водонасыщенном грунте и остаточные перемещения не анализируются; коэффициенты назначает инженер.

Не учитываются: пригрузка, трещина отрыва, армирование, стена в нижней части откоса. FS — значение для одной плоскости на одной глубине; более слабая плоскость, не параллельная поверхности, не отыскивается. Если откос короток по сравнению с глубиной либо грунт или вода изменяются вдоль откоса, существенны концевые эффекты: используется модуль «Устойчивость откосов и склонов».

Резюме

Главное

Полоса: $\sigma = \sigma_v \cos^2\beta$, $\tau = \sigma_v \sin\beta \cos\beta$, $\tau/\sigma = \tan\beta$ (в примере $\sigma = 99.65$, $\tau = 26.70$ kPa)

FS = $(c' + \sigma' \tan\varphi')/\tau = c'/(\gamma H \cos^2\beta \tan\beta) + \tan\varphi'/\tan\beta$ = **1.733**; $H_{req} = 3.50$ m ($FS_{req} = 2$), $\beta_{req} = 13.0°$; при $\beta > \varphi'$ существует H_{cr}

Недренированная глина: $FS = c_u/(\gamma H \sin\beta \cos\beta) = 1.50$; обратно пропорционален глубине

Вода: $u = \gamma_w h_w \cos^2\beta$; FS 1.73 → 1.24 ($z_w = 2$ m) → 1.02 (на поверхности); $r_u = 0.25$ → 1.37

Землетрясение: горизонтальная $k_h W$ и вертикальная $k_v W$; принимается наиболее неблагоприятное направление (вверх); FS 1.73 → 1.07; $\mathbf{k_y = 0.175}$; для сухого несвязного грунта $\tan(\varphi' - \beta)$

Ограничение: одна плоскость, бесконечный откос; если важны концы или слои, используется модуль «Устойчивость откосов» (отсеки)

Список литературы

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage Learning, Boston. Chapter 15, Slope Stability: the infinite slope in Sections 15.2–15.4.

Skempton, A.W. and DeLory, F.A. (1957). Stability of natural slopes in London Clay. Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, 2, 378–381.

Bishop, A.W. and Morgenstern, N.R. (1960). Stability coefficients for earth slopes. Géotechnique, 10(4), 129–150.

Duncan, J.M., Wright, S.G. and Brandon, T.L. (2014). Soil Strength and Slope Stability, 2nd ed. Wiley, Hoboken.

Newmark, N.M. (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments. Géotechnique, 15(2), 139–160.

ПРИМЕЧАНИЕ

Все численные примеры получены с помощью собственного расчётного ядра модуля; модуль даёт те же значения. Пример расчёта на странице модуля — также этот откос (β = 15°, H = 6 m, γ = 17.8, c′ = 10 kPa, φ′ = 20°).

GeoTerva

Геотехнические расчёты онлайн

От теории к практике

Введите в GeoTerva собственный угол откоса, глубину плоскости, прочность грунта (дренированную или недренированную), воду и сейсмические коэффициенты; модуль одновременно выдаёт напряжения, коэффициент запаса, критическую и требуемую глубину, требуемый угол, коэффициент текучести и графики.

Открыть модуль →

Страница теории →

Открыть на телефоне
Для пробных модулей регистрация не требуется.