Презентация лекции по геотехнике · Устойчивость откосов и склонов

Устойчивость откосов: предельное равновесие (отсеки)

Лекция: метод отсеков предельного равновесия; подробное ручное решение для одной круглоцилиндрической поверхности скольжения и одного отсека, остальные отсеки и темы — в таблицах.

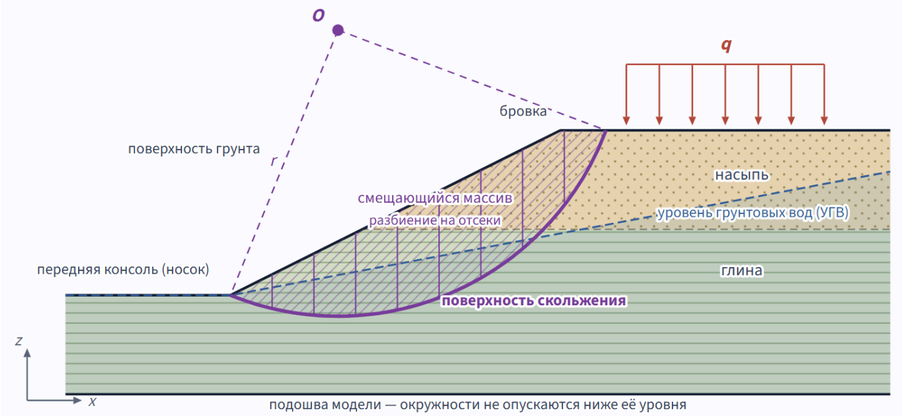
Метод отсеков

Обычный · Bishop · Spencer

Критическая дуга скольжения

Вода · нагрузка · землетрясение · трещина

Армирование · Hoek–Brown



Что мы изучим на этой лекции?

Идея **предельного равновесия**: масса над поверхностью скольжения — жёсткое тело, в котором прочность используется в одной и той же доле; **FS = прочность / требуемое напряжение**

Разбиение массы грунта на **отсеки**: вес W каждого отсека, наклон основания α, длина основания L, сила от давления воды U

Подробно решить **три метода** (обычный метод Fellenius, упрощённый метод Bishop, метод Spencer) на одной круглоцилиндрической поверхности скольжения и для **одного отсека**

Как тот же расчёт повторяется для **оставшихся 32 отсеков** и таблицы результатов; поиск критической окружности скольжения

Влияние воды, нагрузки, землетрясения, трещины отрыва, армирования (грунтовые нагели, анкеры, геосетки) и скального грунта (Hoek–Brown)

ХОД ЛЕКЦИИ

Сначала **теория**, затем **ручное решение** для одного круга и одного отсека:

1 · **Теория**: FS, отсек, три метода

2 · **Условие**: одна окружность, один отсек

3 · **Решение**: отсек 22 вручную; остальные — по **таблице**

Модель: откос 2:1 высотой 10 m; сверху насыпной грунт (γ = 18, c′ = 5, φ′ = 30°), снизу глина (γ = 17.5, c′ = 20, φ′ = 18°); воды, нагрузок и сейсмического воздействия нет. Силы приведены на метр длины сечения (kN/m).

Дренированные, недренированные, возрастающие с глубиной

ТЕОРИЯ

Прочность на сдвиг **дренированного** грунта задаётся огибающей Mohr–Coulomb через эффективное напряжение σ′ = σ − u и определяется параметрами c′ и φ′.

В водонасыщенной глине, нагружаемой быстрее, чем может произойти дренирование, прочность определяется **сопротивлением недренированному сдвигу** c_u, не зависящим от нормального напряжения, и принимается φ = 0; во многих природных глинах c_u линейно возрастает с глубиной.

Прочность отсека определяется на уровне середины его основания; для скальных пород применяется отдельный критерий, а выбор дренированного или недренированного режима относится к компетенции инженера и составляет первое допущение расчёта.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan\varphi' \qquad \sigma' = \sigma - u \qquad \text{(дренированный)}$$

$$\tau_f = c_u \ (\varphi = 0) \qquad c_u(z) = c_u + k\,(z_0 - z) \ \ (z < z_0) \qquad \text{(недренированные уc}$$



Прочность / требуемое напряжение; момент относительно центра окружности

ТЕОРИЯ

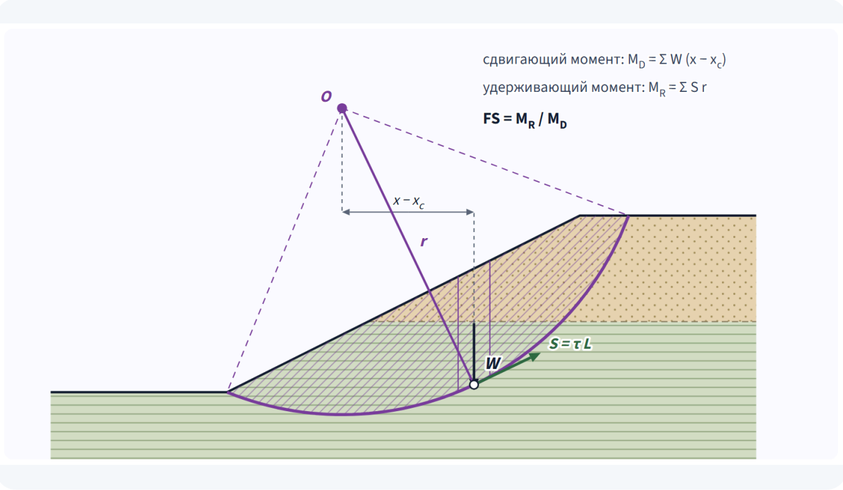
Коэффициент запаса (FS) — отношение прочности грунта на сдвиг к касательному напряжению, необходимому для равновесия; принимается, что он имеет одно и то же значение в каждой точке вдоль поверхности скольжения.

Для круговой поверхности определяющим является равновесие моментов относительно центра O; после деления моментов на радиус отношение записывается в виде FS = ΣR / ΣD, и обе суммы выражены в kN/m.

Три метода различаются тем, как находится эффективная нормальная сила (N′), действующая на основание каждого отсека: простой метод отсеков получает её только из веса, Bishop — из вертикального равновесия, а Spencer — из равновесия как сил, так и моментов.

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

$$FS = \frac{M_R}{M_D} = \frac{\sum R}{\sum D} \qquad R = cL + N' \tan\varphi' \qquad D = \frac{M_D}{r}$$



Геометрия, вес, силы по подошве

ТЕОРИЯ

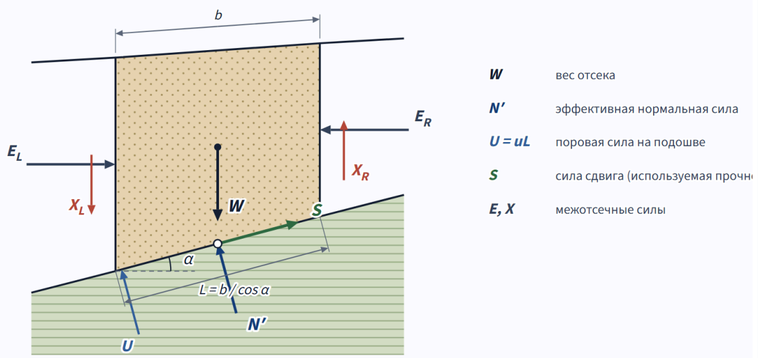
Масса между поверхностью скольжения и поверхностью грунта делится вертикальными линиями на отсеки по числу отсеков или по наибольшей ширине отсека.

Каждая значимая точка пересечения внутри массива является обязательной границей отсека; тем самым основание каждого отсека проходит через один грунт, и каждый отсек несёт нагрузку одного вида.

Угол наклона основания отсека α на вертикали, проходящей через его середину, принимается положительным со стороны гребня откоса от центра и отрицательным со стороны подошвы откоса.

Эффективная нормальная сила N′ = N − U; отрицательное N′ указывает на растяжение по основанию отсека, а в простом методе отсеков и методе Bishop N′ принимается равным нулю.

$$\sin\alpha = \frac{x_m - x_c}{r} \qquad L = \frac{b}{\cos\alpha} \qquad W = \sum_i b\, h_i\, \gamma_i \qquad N' = N - U\ ,\ U = uL$$



Межотсековые силы отсутствуют

ТЕОРИЯ

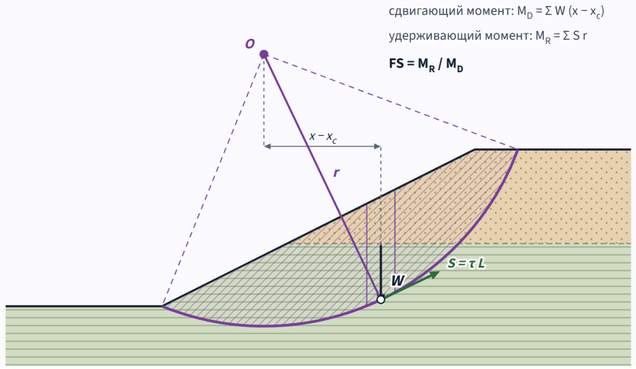
В методе **Fellenius** (шведском) силы взаимодействия между отсеками полностью не учитываются, и каждый отсек находится в равновесии только в направлении, перпендикулярном его основанию.

Это равновесие даёт нормальную силу через вес и нагрузки; коэффициент запаса получается из отношения моментов и в однородном грунте сводится к зависимости FS = Σ [c b / cos α + W cos α tan φ] / Σ W sin α.

Метод прост, устойчив и идёт в запас; его погрешность растёт с глубиной окружности и поровым давлением, а для глубокой окружности он может давать результат заметно ниже, чем два других метода.

$$N' = W\cos\alpha - uL \qquad R = cL + N'\tan\varphi' \qquad D = W\sin\alpha$$

$$FS = \frac{\sum R}{\sum D} = \frac{\sum \left[cL + (W\cos\alpha - uL)\tan\varphi'\right]}{\sum W\sin\alpha}$$



Вертикальное равновесие каждого отсека; итерационное решение

ТЕОРИЯ

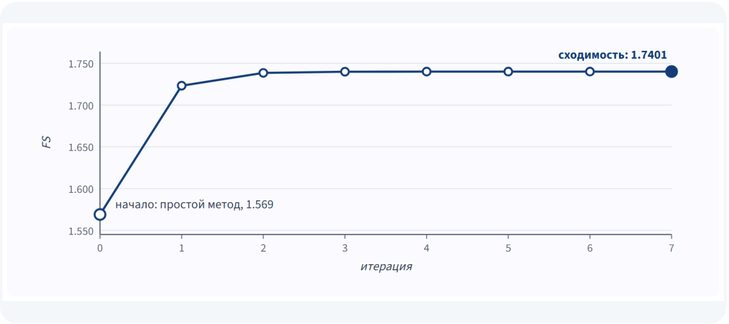
В упрощённом методе Bishop касательные силы между отсеками не учитываются, однако вертикальное равновесие каждого отсека соблюдается, а касательная сила по основанию принимается равной мобилизованному сопротивлению.

Так как FS входит в обе части уравнения, оно решается итерациями, начиная со значения по обычному методу отсеков; достаточно нескольких шагов.

Отрицательное **N′** принимается равным нулю, а $\mathbf{m_\alpha}$ не допускается опускаться ниже 0.2; это ограничение существенно в зоне подошвы откоса для глубоких круговых поверхностей скольжения.

$$N' = \frac{W - uL\cos\alpha - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha} \qquad m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$$

$$FS = \frac{\sum [cL + N'\tan\varphi']}{\sum D}$$



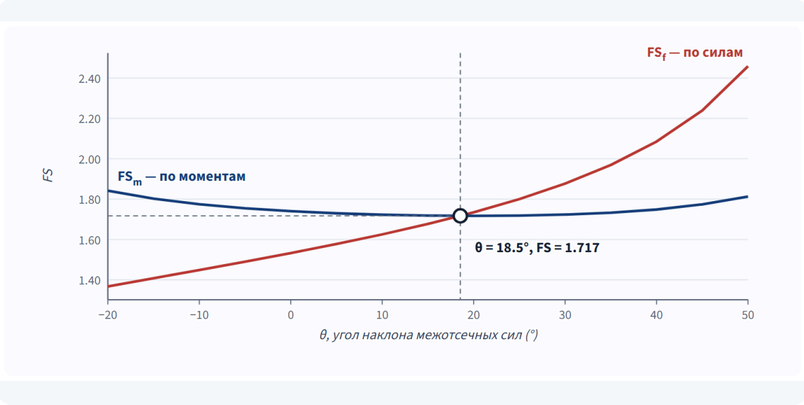
Равновесие сил и моментов; параллельные силы между отсеками

ТЕОРИЯ

Метод **Spencer** удовлетворяет как равновесию сил, так и равновесию моментов; силы между отсеками параллельны друг другу, а касательная сила составляет постоянную долю нормальной силы.

Поскольку боковые грани на двух концах массива свободны, ΣΔE = 0 даёт равновесие сил, и для каждого угла θ получается коэффициент запаса FS_f.

Моменты относительно центра окружности дают второе значение: $FS_m = \Sigma[c\,L + N' \tan\varphi] / \Sigma\,D$; $FS_f(\theta)$ и $FS_m(\theta)$ пересекаются при одном угле, и это определяет решение.



$$X = E\tan\theta \qquad \Delta E = \frac{cL + \tan\varphi'\,(W\cos\alpha - U) - FS\,W\sin\alpha}{FS(\cos\alpha + \tan\theta\sin\alpha) - \tan\varphi'(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha)}$$

$$N' = W\cos\alpha - U + \Delta E\,(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) \qquad \sum \Delta E = 0 \;\Rightarrow\; FS_f(\theta)$$

Что учитывается, чем пренебрегается

ТЕОРИЯ

Метод	Межотсековое усилие	Равновесие сил	Равновесие моментов	Поверхность	FS (та же окружность)
Обычный (Fellenius)	нет	только нормальная сила по основанию	✓	круг	**1.569**
Упрощённый метод Bishop	только нормальные (без касательных)	вертикальное — на отсек	✓	круг	**1.740**
Spencer	параллельно: X = E tanθ	горизонтальная + вертикальная	✓	каждая поверхность	**1.717**

Простой метод отсеков — метод по умолчанию, поддающийся проверке ручным расчётом и идущий в запас; его результат — наименьший из трёх методов.

Метод Bishop — обычный выбор для круглоцилиндрических поверхностей; его результат на круглой поверхности отличается от результата метода Spencer лишь на несколько процентов.

Метод Spencer удовлетворяет всем условиям равновесия и применяется для поверхностей скольжения некруговой формы; это наиболее трудоёмкий в вычислительном отношении метод, и для некоторых окружностей решение не найдено.

Условие

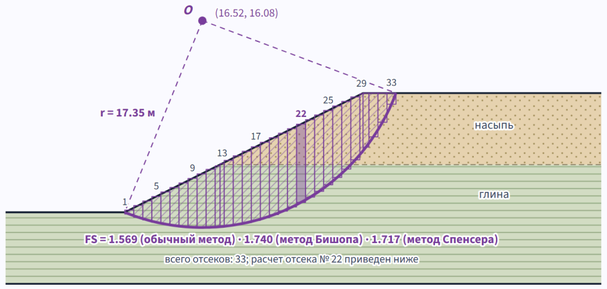
ПРИМЕР

Дано

Сечение	**поверхность грунта** $(0;0)$–$(10;0)$–$(30;10)$–$(50;10)$ **m; дно** $z=-6$ **m; выше** $z=4$ **m — насыпной грунт, ниже — глина**
Грунты	**насыпной грунт** $\gamma=18$ **kN/m³,** $c'=5$ **kPa,** $\varphi'=30^\circ$**; глина** $\gamma=17.5$ **kN/m³,** $c'=20$ **kPa,** $\varphi'=18^\circ$**; воды, нагрузки и землетрясения нет**
Круглоцилиндрическая поверхность скольжения	**центр** $x_c=16.52$ **m,** $z_c=16.08$ **m; радиус** $r=17.35$ **m (критическая окружность, см. найденную в результате поиска)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Точки x_a и x_b, в которых окружность пересекает грунт, её нижняя точка и **разбиение на отсеки**.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Пересечение окружности с поверхностью грунта: $(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2$

$$x_a = x_c - \sqrt{r^2 - (z_a - z_c)^2} = 16.518 - \sqrt{301.08 - (0 - 16.080)^2} = \mathbf{10.00}\ \text{m} \quad (z_a = 0)$$

$$x_b = x_c + \sqrt{r^2 - (z_b - z_c)^2} = 16.518 + \sqrt{301.08 - (10 - 16.080)^2} = \mathbf{32.77}\ \text{m} \quad (z_b = 10)$$

2 Самая низкая точка и разбиение на отсеки

$$z_{min} = z_c - r = 16.080 - 17.352 = -1.27\ \text{m} \ \ (> -6\ \text{m})$$

$$b = \frac{x_b - x_a}{30} = \frac{22.771}{30} = 0.759\ \text{m} \ \Rightarrow\ 30\ \text{отсек}$$

Окружность пересекает массив между x = 10.00 (подошва откоса) и 32.77 m (верх); границы при x = 10, 18 и 30 m добавляют ещё 3 отсека: **33 отсека**.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

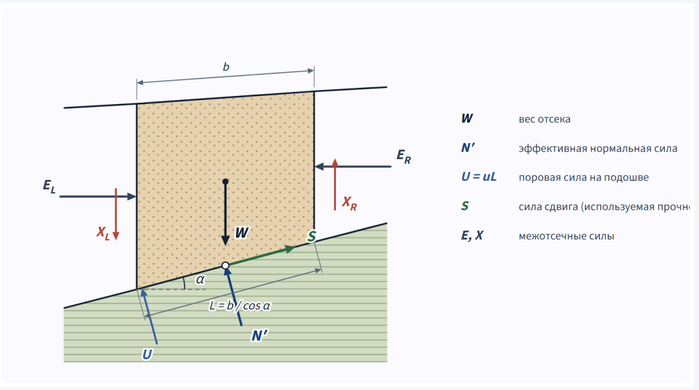
ПРИМЕР

Дано

Отсек	**Отсек 22 окружности из Примера 1: середина $x_m = 24.800$ m, ширина $b = 0.759$ m**
Грунт	**насыпной грунт $\gamma = 18$ kN/m³ ($z > 4$ m); глина $\gamma = 17.5$ kN/m³, $c' = 20$ kPa, $\varphi' = 18^\circ$ (подошва в глине); $u = 0$**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Значения **α**, **L**, **W** отсека; **N′**, **R** и **D** (обычный метод).



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Наклон и длина подошвы

$$\sin\alpha = \frac{x_m - x_c}{r} = \frac{24.800 - 16.518}{17.352} = 0.4773 \;\Rightarrow\; \alpha = \mathbf{28.51}^\circ,\ \cos\alpha = 0.8787$$

$$L = \frac{b}{\cos\alpha} = \frac{0.759}{0.8787} = \mathbf{0.864}\ \text{m}$$

2 Высота столба грунта и вес (насыпной грунт + глина)

$$z_{surface} = \frac{x_m - 10}{2} = 7.3998\ \text{m};\quad z_{base} = z_c - r\cos\alpha = 0.8327\ \text{m}$$

$$h_1 = 7.3998 - 4 = 3.3998\ \text{m (насыпь)};\quad h_2 = 4 - 0.8327 = 3.1673\ \text{m (глина)}$$

$$W = b\,(h_1\gamma_1 + h_2\gamma_2) = 0.7590(3.3998 \cdot 18 + 3.1673 \cdot 17.5) = \mathbf{88.52}\ \text{kN/m}$$

Отсек 22 — **самый тяжёлый отсек** (W = 88.52 kN/m); его основание наклонено под углом 28.5° и находится в глине (c′ = 20 kPa, φ′ = 18°).

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Нормальная сила и сопротивление (u = 0)

$$N' = W\cos\alpha = 88.52 \times 0.8787 = \mathbf{77.79}\ \text{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = 20(0.864) + 77.79(0.3249) = 17.27 + 25.27 = \mathbf{42.55}\ \text{kN/m}$$

4 Сдвигающее воздействие

$$D = W\sin\alpha = 88.52 \times 0.4773 = \mathbf{42.25}\ \text{kN/m}$$

Отсек 22: **R = 42.55** kN/m, **D = 42.25** kN/m. Значения R и D каждого отсека находятся **одними и теми же тремя шагами**; коэффициент запаса равен отношению их сумм: **FS = ΣR/ΣD** (таблица на следующих страницах).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

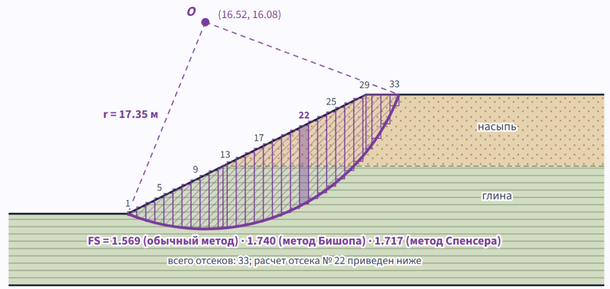
ПРИМЕР

Дано

Отсеки	**Окружность из Примера 1, 33 отсека; каждый отсек рассчитывается тремя шагами из Примера 2**
Метод	**Обычный метод (Fellenius): силы между отсеками отсутствуют**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Таблица всех отсеков: **W, N′, R, D** и их суммы; **FS = ΣR / ΣD**.



Решение (1/3)

РЕШЕНИЕ

No	x_m (m)	b (m)	α (°)	L (m)	W (kN/m)	c′ (kPa)	φ′ (°)	N′ (kN/m)	R (kN/m)	D (kN/m)
1	10.00	0.001	−22.1	0.001	0.00	20	18	0.00	0.03	−0.00
2	10.38	0.758	−20.7	0.810	4.49	20	18	4.20	17.57	−1.59
3	11.14	0.759	−18.1	0.798	13.08	20	18	12.43	20.01	−4.06
4	11.90	0.759	−15.4	0.787	21.15	20	18	20.39	22.37	−5.63
5	12.66	0.759	−12.9	0.779	28.74	20	18	28.02	24.67	−6.40
6	13.41	0.759	−10.3	0.771	35.84	20	18	35.27	26.89	−6.41
7	14.17	0.759	−7.8	0.766	42.49	20	18	42.10	29.00	−5.74
8	14.93	0.759	−5.2	0.762	48.68	20	18	48.47	30.99	−4.45
9	15.69	0.759	−2.7	0.760	54.42	20	18	54.36	32.86	−2.59
10	16.45	0.759	−0.2	0.759	59.72	20	18	59.72	34.59	−0.23
11	17.21	0.759	2.3	0.760	64.58	20	18	64.53	36.16	2.57
12	17.79	0.411	4.2	0.412	36.85	20	18	36.75	20.19	2.71
13	18.17	0.348	5.5	0.349	32.15	20	18	32.01	17.39	3.07
14	18.73	0.759	7.3	0.765	73.11	20	18	72.51	38.87	9.31
15	19.49	0.759	9.9	0.770	76.77	20	18	75.64	39.98	13.13
16	20.25	0.759	12.4	0.777	79.97	20	18	78.11	40.92	17.18
17	21.00	0.759	15.0	0.786	82.70	20	18	79.89	41.67	21.38

Решение (2/3)

РЕШЕНИЕ

No	x_m (m)	b (m)	α (°)	L (m)	W (kN/m)	c′ (kPa)	φ′ (°)	N′ (kN/m)	R (kN/m)	D (kN/m)
18	21.76	0.759	17.6	0.796	84.94	20	18	80.97	42.23	25.68
19	22.52	0.759	20.2	0.809	86.67	20	18	81.32	42.60	29.99
20	23.28	0.759	22.9	0.824	87.86	20	18	80.91	42.77	34.25
21	24.04	0.759	25.7	0.842	88.49	20	18	79.74	42.76	38.37
22	**24.80**	**0.759**	**28.5**	**0.864**	**88.52**	**20**	**18**	**77.79**	**42.55**	**42.25**
23	25.56	0.759	31.4	0.889	87.89	20	18	75.02	42.16	45.80
24	26.32	0.759	34.4	0.920	86.56	20	18	71.43	41.60	48.89
25	27.08	0.759	37.5	0.956	84.44	20	18	67.00	40.90	51.38
26	27.84	0.759	40.7	1.001	81.43	20	18	61.72	40.08	53.11
27	28.59	0.758	44.1	1.056	77.34	20	18	55.53	39.17	53.83
28	29.35	0.760	47.7	1.129	72.09	5	30	48.51	33.65	53.33
29	29.87	0.267	50.3	0.418	23.72	5	30	15.15	10.84	18.25
30	30.25	0.492	52.3	0.805	40.15	5	30	24.55	18.20	31.76
31	30.87	0.759	55.8	1.351	50.12	5	30	28.16	23.01	41.46
32	31.63	0.759	60.6	1.545	33.40	5	30	16.41	17.20	29.09
33	32.39	0.759	66.2	1.878	12.72	5	30	5.14	12.36	11.64
Σ					**1,841.11**			**1,613.77**	**1,006.25**	**641.34**

Решение (3/3)

РЕШЕНИЕ

1 Суммы и коэффициент запаса

$$\sum R = 1{,}006.25 \text{ kN/m} \qquad \sum D = 641.34 \text{ kN/m} \qquad \sum W = 1{,}841.1 \text{ kN/m}$$

$$FS = \frac{\sum R}{\sum D} = \frac{1{,}006.25}{641.34} = \mathbf{1.569}$$

Для этой окружности по обычному методу **FS = 1.569**. В отсеках со стороны носка (α < 0) основание наклонено против сдвига: D отрицательна и уменьшает ΣD. Отсек 22 — 22-я строка таблицы, и он совпадает со значениями, найденными вручную.

ΣR/ΣD: отношение **удерживающих** усилий к сдвигающим; при FS > 1 сдвиг по этой окружности не ожидается.

Обычный метод даёт наименьшее значение; Bishop и Spencer на том же круге дают более высокие значения (следующие примеры).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

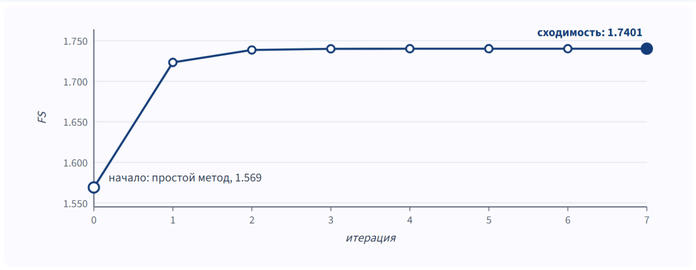
ПРИМЕР

Дано

Отсек и круг	**22-й отсек из примера 2 и окружность из примера 1; начальное значение — $FS_0 = 1.569$ из примера 3**
Метод	$N' = \dfrac{W - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha}$, $m_\alpha = \cos\alpha + \dfrac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$ **(u = 0)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Для отсека 22: **m_α**, **N′**, **R**; **итерация** и **FS** для всего круга.



Решение (1/4)

РЕШЕНИЕ

1 Первая итерация (FS_0 = значение обыкновенного метода = 1.5690)

$$m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS_0} = 0.8787 + \frac{0.4773(0.3249)}{1.5690} = 0.9776$$

$$N' = \frac{W - cL\sin\alpha/FS_0}{m_\alpha} = \frac{88.52 - 20(0.864)(0.4773)/1.5690}{0.9776} = 85.17\ \text{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 85.17(0.3249) = 44.95\ \text{kN/m}$$

Решение (2/4)

РЕШЕНИЕ

2 При значении после сходимости (FS = 1.7401)

$$m_\alpha = 0.8787 + \frac{0.4773(0.3249)}{1.7401} = \mathbf{0.9679}$$

$$N' = \frac{88.52 - 20(0.864)(0.4773)/1.7401}{0.9679} = \mathbf{86.56}\ \text{kN/m}$$

$$R = cL + N' \tan\varphi' = 20(0.864) + 86.56(0.3249) = \mathbf{45.40}\ \text{kN/m} \qquad D = 42.25\ \text{kN/m}$$

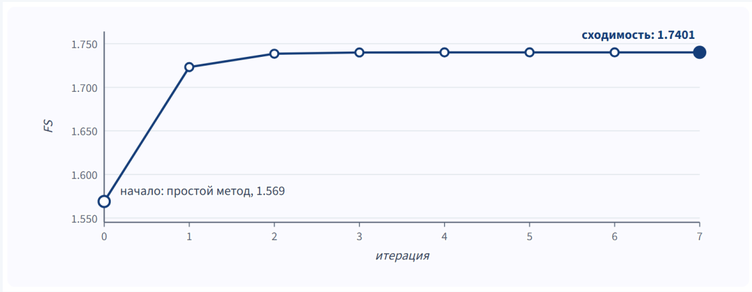
Нормальная сила отсека 22 возрастает с 77.79 в обычном методе до **86.56** kN/m (вертикальное равновесие между отсеками); сопротивление 42.55 → **45.40** kN/m. Те же шаги повторяются для 33 отсеков.

Решение (3/4)

РЕШЕНИЕ

2 На каждой итерации ΣR вычисляется заново, $FS_{k+1} = \Sigma R_k / \Sigma D$

Итерация k	FS_k	Разность
0 (обычный)	1.5690	
1	1.7232	0.1542
2	1.7385	0.0153
3	1.7399	0.0014
4	1.7401	0.0001
5	1.7401	0.0000
6	1.7401	0.0000
7	**1.7401**	0.0000



За 7 итераций **FS = 1.740**; ΣR = 1,115.97, ΣD = 641.34 kN/m. Это на 10.9 % выше, чем по обычному методу (1.569).

Решение (4/4)

РЕШЕНИЕ

No	α (°)	W	m_α	N′	R
1	−22.1	0.00	0.8566	0.01	0.03
2	−20.7	4.49	0.8693	8.95	19.11
3	−18.1	13.08	0.8928	17.83	21.76
4	−15.4	21.15	0.9141	25.78	24.12
5	−12.9	28.74	0.9333	32.92	26.27
6	−10.3	35.84	0.9505	39.38	28.22
7	−7.8	42.49	0.9656	45.23	30.02
8	−5.2	48.68	0.9788	50.55	31.67
9	−2.7	54.42	0.9900	55.39	33.20
10	−0.2	59.72	0.9993	59.80	34.61
11	2.3	64.58	1.0066	63.81	35.93
12	4.2	36.85	1.0110	36.10	19.98
13	5.5	32.15	1.0133	31.35	17.18
14	7.3	73.11	1.0156	70.88	38.34
15	9.9	76.77	1.0172	73.99	39.45
16	12.4	79.97	1.0168	76.77	40.49
17	15.0	82.70	1.0143	79.24	41.46
18	17.6	84.94	1.0097	81.39	42.37
19	20.2	86.67	1.0028	83.22	43.22
20	22.9	87.86	0.9937	84.71	44.01
21	25.7	88.49	0.9821	85.83	44.74
22	**28.5**	**88.52**	**0.9679**	**86.56**	**45.40**
23	31.4	87.89	0.9508	86.84	46.00
24	34.4	86.56	0.9307	86.59	46.53
25	37.5	84.44	0.9072	85.70	46.98
26	40.7	81.43	0.8798	84.02	47.33
27	44.1	77.34	0.8480	81.24	47.52
28	47.7	72.09	0.9183	75.89	49.46
29	50.3	23.72	0.8941	25.50	16.81
30	52.3	40.15	0.8741	43.83	29.33
31	55.8	50.12	0.8363	56.09	39.14
32	60.6	33.40	0.7803	37.85	29.58
33	66.2	12.72	0.7076	11.00	15.74
Σ		**1,841.11**			**1,115.97**

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

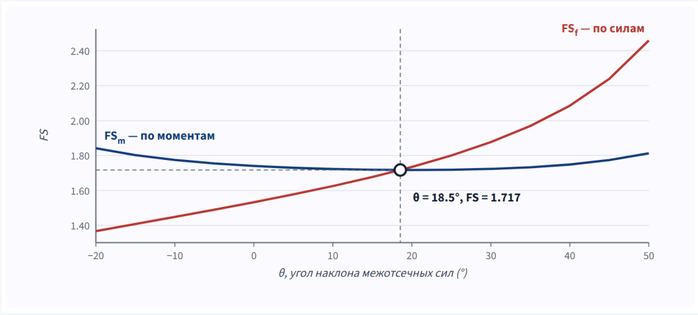
ПРИМЕР

Дано

Отсек и круг	**22-й отсек из примера 2, окружность из примера 1; силы между отсеками параллельны,** $X = E\tan\theta$
Угол решения	$\theta = 18.54^\circ$ **(угол, при котором пересекаются две приведённые ниже кривые),** $FS = 1.717$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Для отсека 22: **ΔE**, **N′**, **R**, **E** и **X**; кривые θ–FS и вся окружность.



Решение (1/4)

РЕШЕНИЕ

1 Разность нормальных сил отсека ΔE (θ = 18.54°, tan θ = 0.3354, FS = 1.717)

$$\text{запас} = cL + \tan\varphi' \, W\cos\alpha - FS\, W\sin\alpha = 17.275 + 25.274 - 72.542 = -29.99$$

$$\text{знаменатель}_1 = FS(\cos\alpha + \tan\theta\sin\alpha) = 1.7837$$

$$\text{знаменатель}_2 = -\tan\varphi'(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) = 0.0593$$

$$\Delta E = \frac{\text{запас}}{\text{знаменатель}_1 + \text{знаменатель}_2} = \frac{-29.99}{1.8430} = \mathbf{-16.27}\ \text{kN/m}$$

Решение (2/4)

РЕШЕНИЕ

2 Нормальная сила, сопротивление и межотсековые силы

$$N' = W\cos\alpha + \Delta E(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) = 77.786 + (-16.27)(-0.1826) = \mathbf{80.76}\ \text{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = \mathbf{43.51}\ \text{kN/m}$$

$$E_{foot} = 254.69\ \text{kN/m} \quad \Rightarrow \quad E_{top} = E_{foot} + \Delta E = 238.41\ \text{kN/m}$$

$$X_{foot} = E\tan\theta = \mathbf{85.42}$$

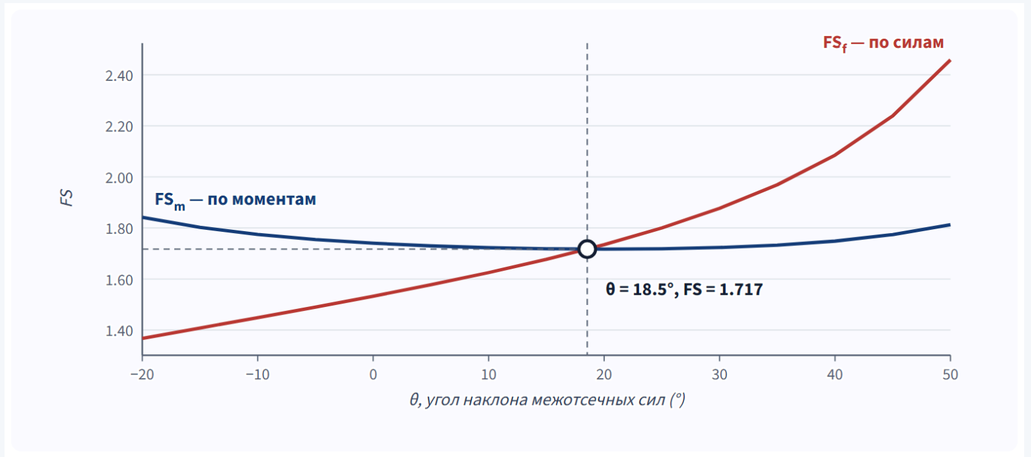
В методе Spencer нормальная сила на отсек 22 равна **80.76** kN/m (по обычному методу 77.79, по Bishop 86.56); межотсековое усилие, действующее в сторону носка откоса, E = 254.69 kN/m.

Решение (3/4)

РЕШЕНИЕ

3 FS_f ($\Sigma\Delta E = 0$) и FS_m (по моментам) для каждого θ; точка пересечения является решением

θ (°)	FS_m (момент)	FS_f (сила)
-20	1.842	1.367
-15	1.802	1.408
-10	1.774	1.449
-5	1.755	1.490
0	1.740	1.533
5	1.730	1.577
10	1.723	1.625
15	1.718	1.677
20	1.717	1.735
25	1.718	1.800
30	1.723	1.877
35	1.733	1.969
40	1.748	2.085
45	1.774	2.239
50	1.812	2.458
18.54	**1.717**	**1.717**



Решение (4/4)

РЕШЕНИЕ

No	ΔE	E (подошва)	N′	R
1	0.02	−0.00	0.02	0.03
2	17.12	0.02	15.62	21.28
3	21.59	17.14	26.01	24.42
4	24.46	38.73	34.81	27.06
5	26.08	63.19	42.35	29.33
6	26.67	89.27	48.84	31.30
7	26.41	115.94	54.44	33.01
8	25.43	142.35	59.29	34.51
9	23.87	167.78	63.49	35.83
10	21.80	191.65	67.12	36.99
11	19.32	213.45	70.24	38.01
12	9.30	232.78	39.17	20.97
13	7.19	242.08	33.72	17.95
14	13.38	249.26	75.26	39.76
15	10.03	262.64	77.24	40.50
16	6.48	272.67	78.84	41.16
17	2.77	279.15	80.07	41.73
18	−1.03	281.92	80.95	42.23
19	−4.89	280.89	81.47	42.65
20	−8.75	276.01	81.62	43.01
21	−12.57	267.25	81.39	43.29
22	**−16.27**	**254.69**	**80.76**	**43.51**
23	−19.80	238.41	79.67	43.67
24	−23.06	218.61	78.07	43.76
25	−25.94	195.55	75.88	43.79
26	−28.29	169.61	72.98	43.74
27	−29.89	141.32	69.14	43.59
28	−30.84	111.42	64.36	42.80
29	−11.02	80.59	21.27	14.37
30	−19.70	69.57	36.10	24.87
31	−26.62	49.87	45.17	32.83
32	−18.69	23.25	29.61	24.82
33	−4.56	4.56	8.70	14.41
Σ	0.00			**1,101.18**

θ = 18.54°; ΣR = 1,101.18, ΣD = 641.34 → **FS = 1.717**. E_{max} = 281.9 kN/m.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Вес, поровое давление, вода в откосе

ТЕОРИЯ

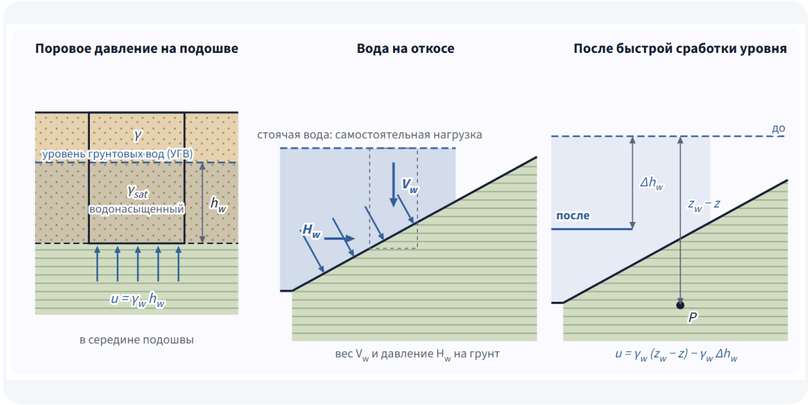
Вода учитывается в расчёте тремя способами: через вес водонасыщенного грунта, через поровое давление, уменьшающее сопротивление по подошве каждого отсека, и — там, где она находится на откосе, — как самостоятельная нагрузка.

Ниже уровня грунтовых вод поровое давление гидростатическое; поскольку фильтрация не анализируется, наклонный уровень грунтовых вод является приближением к гидродинамической сетке, и удельный вес грунта с учётом взвешивающего действия воды не применяется никогда.

Когда поровое давление известно как доля вышележащего давления, грунту задаётся коэффициент $\mathbf{r_u}$; это применимо к насыпи на этапе строительства или к насыпи на слабой глине.

Так как вода перед откосом может отводиться, при её быстром понижении опора исчезает, поровое давление сохраняется, и коэффициент запаса соответствует наименьшему значению сразу после понижения уровня воды.

$$u = \gamma_w h_w \qquad u = r_u \frac{W}{b} \qquad H_w = \frac{\gamma_w}{2}\left[(z_w - z_L)^2 - (z_w - z_R)^2\right]$$



Условие

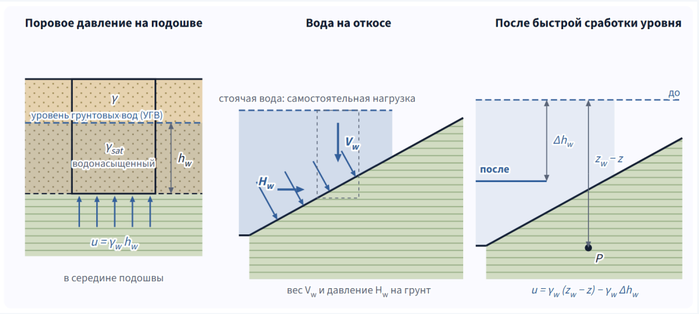
ПРИМЕР

Дано

Линия уровня воды	$(0;0)$–$(20;2.5)$–$(50;7)$ **m, гидростатическое давление;** $\gamma_w = 9.81$ **kN/m³; удельный вес водонасыщенного грунта: насыпной грунт 20, глина 19.5 kN/m³**
Отсек	**тот же круг; отсек на** $x_m = 24.800$ **m (с водой это 24-й отсек, а не 33-й)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Для отсека **z_w, h_w, u, U**; новые **W, N′, R, D**; для всего круга **FS**.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Высота воды и поровое давление

$$z_w = 2.5 + \frac{24.800 - 20}{30}(4.5) = 3.2199 \text{ m}$$

$$h_w = z_w - z_{base} = 3.2199 - 0.8327 = \mathbf{2.3872} \text{ m}$$

$$u = \gamma_w h_w = 9.81(2.3872) = \mathbf{23.42} \text{ kPa} \qquad U = uL = 23.42(0.864) = \mathbf{20.23} \text{ kN/m}$$

2 Вес: влажный выше уровня воды, водонасыщенный ниже

$$W = b\left[h_1\gamma_1 + h_{dry}\gamma_{moist} + h_w\gamma_{sat}\right]$$

$$W = 0.7590[3.3998(18) + 0.7801(17.5) + 2.3872(19.5)] = \mathbf{92.14} \text{ kN/m}$$

Вода одновременно увеличивает вес с 88.52 kN/m в сухом состоянии до **92.14** kN/m и создаёт на подошве силу давления воды **U = 20.23** kN/m.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Эффективная нормальная сила, сопротивление, сдвигающее воздействие (отсек 22)

$$N' = W\cos\alpha - U = 92.14(0.8787) - 20.23 = \mathbf{60.74}\ \text{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 60.74(0.3249) = \mathbf{37.01}\ \text{kN/m} \qquad D = W\sin\alpha = \mathbf{43.98}\ \text{kN/m}$$

4 Весь круг (36 отсеков, тот же круг) и сравнение с сухим случаем

Метод	ΣU	ΣR	ΣD	FS (с водой)	FS (без воды)
Обычный	476.94	879.96	655.41	**1.343**	1.569
Bishop	476.94	981.07	655.41	**1.497**	1.740
Spencer	476.94	970.22	655.41	**1.480**	1.717

Для той же окружности вода снижает FS с 1.569 до **1.343** (обычный метод); если критическую окружность искать заново с учётом линии воды, она становится более мелкой, и значения составляют **1.255 / 1.568 / 1.564** (обычный метод / Bishop / Spencer).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Полосовая и сосредоточенная нагрузки; вертикальная, перпендикулярная, наклонная

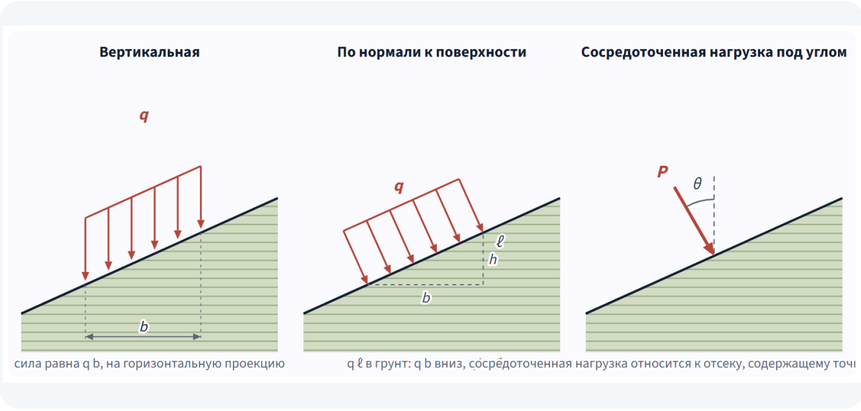
ТЕОРИЯ

Вертикальная или наклонная полосовая нагрузка берётся по её горизонтальной проекции, и сила на участке горизонтальной шириной b равна q b.

Нагрузка, действующая перпендикулярно поверхности, берётся по длине поверхности; сила на участке длиной ℓ равна q ℓ, её вертикальная составляющая — q b, горизонтальная — q h.

Каждый отсек воспринимает часть нагрузки, приходящуюся между его границами, распределённую пропорционально горизонтальной ширине, а сосредоточенная нагрузка относится к отсеку, содержащему точку её приложения.

$$F = q\,b \qquad F_n = q\,\ell \;\Rightarrow\; F_z = q\,b,\; F_x = q\,h \qquad P_x = P\sin\theta,\; P_z = P\cos\theta$$



Силы инерции в центре тяжести отсека

ТЕОРИЯ

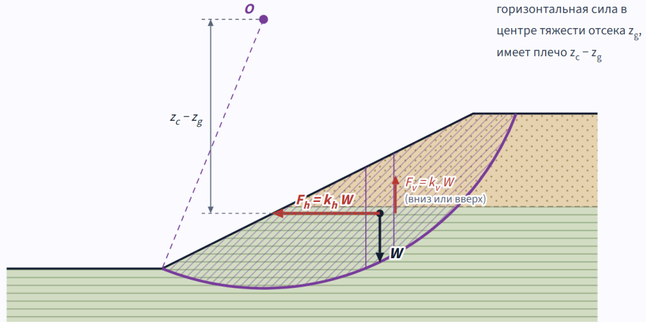
При **псевдостатическом** подходе сейсмическое воздействие представляется постоянным ускорением, приложенным к сползающей массе и выражаемым долей от g.

В каждом отсеке силы инерции массы грунта ($\mathbf{W_{soil}}$) прикладываются в центре тяжести ($\mathbf{z_g}$), определяемом по влажной и водонасыщенной частям грунта внутри отсека, поскольку вода, скопившаяся над отсеком, эту силу не воспринимает.

В режиме критического случая проверяются оба горизонтальных и оба вертикальных направления, и принимается наименьший коэффициент запаса; коэффициенты задаются пользователем, а статический и **псевдостатический** FS приводятся в отчёте вместе.

$$F_h = k_h W_{soil} \qquad F_v = k_v W_{soil}$$

$$N = (W + F_v)\cos\alpha \mp F_h \sin\alpha \qquad D = (W + F_v)\sin\alpha + F_h \frac{z_c - z_g}{r}$$



Условие

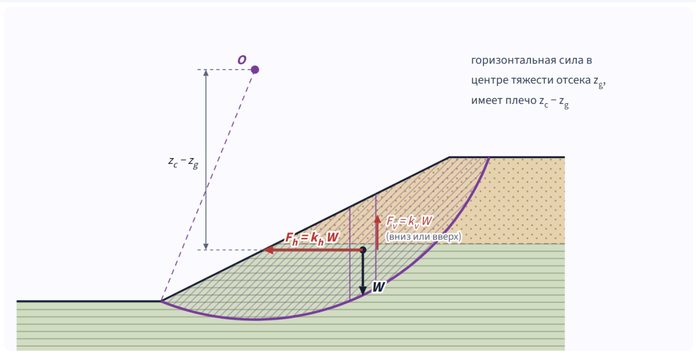
ПРИМЕР

Дано

Землетрясение	$k_h = 0.15$, $k_v = 0$; **горизонтальная сила направлена в сторону подошвы откоса (критическое направление)**
Отсек и круг	**Отсек 22 и окружность из Примера 2; центр тяжести нужен для плеча момента z_g**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Для отсека 22: **F_h, N', R, D**; для всей окружности **$FS_{earthquake}$** тремя методами.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Сила инерции и плечо момента

$$F_h = k_h W = 0.15(88.52) = \mathbf{13.28}\ \text{kN/m}$$

$$z_g = \sum W_i z_{g,i}/W = (46.45(5.700) + 42.07(2.416))/88.52 = 4.139\ \text{m}$$

$$\text{плечо момента} = (z_c - z_g)/r = (16.080 - 4.139)/17.352 = 0.6882$$

2 Нормальная сила, сопротивление, сдвигающее воздействие

$$N' = W\cos\alpha - F_h \sin\alpha = 77.79 - 6.34 = \mathbf{71.45}\ \text{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 71.45(0.3249) = \mathbf{40.49}\ \text{kN/m}$$

$$D = W\sin\alpha + F_h\,\frac{z_c - z_g}{r} = 42.25 + 13.28(0.6882) = \mathbf{51.39}\ \text{kN/m}$$

Сдвигающее воздействие: 42.25 → **51.39** kN/m (+22%), сопротивление: 42.55 → **40.49** kN/m: горизонтальная сила уменьшает нормальную силу и добавляет сдвигающий момент.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Три метода на одном и том же круге (k_h = 0.15, k_v = 0)

Метод	ΣR	ΣD	FS (статика)	FS (землетрясение)
Обычный	967.97	840.48	1.569	**1.152**
Bishop	1,083.01	840.48	1.740	**1.289**
Spencer	1,069.09	840.48	1.717	**1.272**

k_h = 0.15 снижает FS примерно на 27 % (обычный 1.569 → **1.152**). При землетрясении изменяется и критическая окружность: для модели на странице (k_h = 0.15, k_v = 0.05, критические направления) результат поиска составляет 1.138 / 1.265 / 1.250.

Проверить решение в GeoTerva ↗

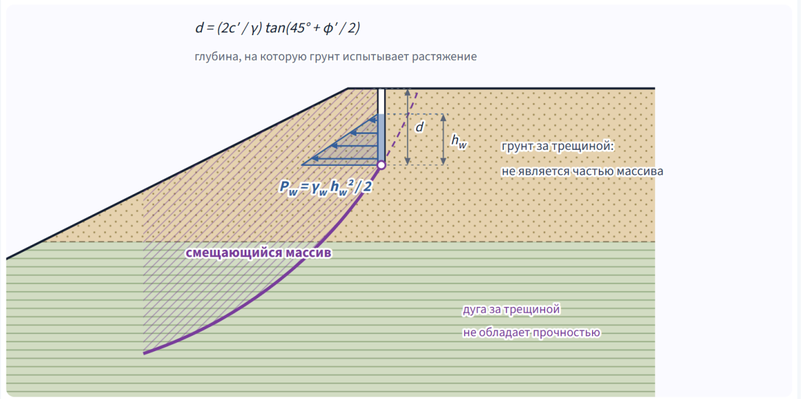
Вода на глубине и в трещине

ТЕОРИЯ

Глубина трещины отрыва находится как d = 2c′/γ·tan(45° + φ′/2); в недренированном случае эта глубина равна $2c_u/\gamma$.

Когда трещина действует, поверхность скольжения заканчивается в точке, где глубина сдвигающейся массы равна глубине трещины; грунт за трещиной в состав сдвигающейся массы не входит, а часть дуги, оставшаяся внутри трещины, сопротивления не создаёт.

Вода, стоящая в трещине до высоты h_W, создаёт давление гидростатической силой; заполненная водой трещина снижает коэффициент запаса, и это обстоятельство чаще упускается из виду.



$$d = \frac{2c'}{\gamma}\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) \qquad d = \frac{2c_u}{\gamma}$$

$$P_w = \frac{\gamma_w h_w^2}{2} \qquad z_f = z_{base} + \frac{h_w}{3} \qquad D_{crack} = \frac{P_w\,(z_c - z_f)}{r}$$

Условие

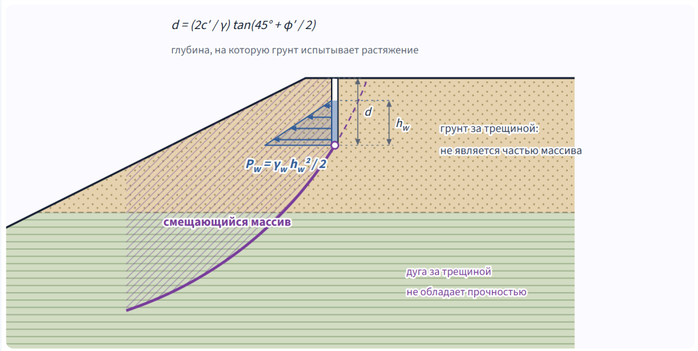
ПРИМЕР

Дано

Трещина	**сверху — вертикальная трещина на глубине $d = 2$ m (начальное значение модели); два случая: сухая и заполненная водой ($h_w = 2$ m)**
Круг	**Окружность из примера 1; оканчивается на дне трещины**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Положение **x** трещины; **P_w**, **z_f**, **D_{crack}**; **FS** тремя методами.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Положение трещины: она заканчивается там, где круг опускается до отметки z = 10 − 2 = 8 m

$$x = x_c + \sqrt{r^2 - (8 - z_c)^2} = 16.518 + \sqrt{301.08 - (8 - 16.080)^2} = \mathbf{31.87}\ \text{m}$$

2 Вода в трещине (h_w = 2 m): сила и момент

$$P_w = \frac{\gamma_w h_w^2}{2} = \frac{9.81(2)^2}{2} = \mathbf{19.62}\ \text{kN/m} \qquad z_f = 8 + \frac{2}{3} = 8.667\ \text{m}$$

$$D_{crack} = \frac{P_w(z_c - z_f)}{r} = \frac{19.62(16.080 - 8.667)}{17.352} = \mathbf{8.38}\ \text{kN/m}$$

Глубина по Rankine составляет 0.96 m в насыпном грунте и 3.15 m в глине; модуль принимает глубину трещины равной значению, введённому инженером (здесь 2 m). Заполненная водой трещина добавляет к ΣD **8.38** kN/m.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Без трещины, сухая трещина и трещина, заполненная водой (та же окружность; при наличии трещины 34 отсека)

Метод	FS без трещины	ΣR	ΣD (без воды)	FS, сухая трещина	ΣD (с водой)	FS, заполненная водой трещина
Обычный	1.569	991.18	625.52	**1.585**	633.91	**1.564**
Bishop	1.740	1,096.39	625.52	**1.753**	633.91	**1.727**
Spencer	1.717	1,083.00	625.52	**1.731**	633.91	**1.702**

Сухая трещина изменяет FS очень слабо (сдвигающая масса выше и сопротивление по дуге уходят вместе: 1.569 → 1.585); **трещина, заполненная водой**, его снижает (1.564). Вода в трещине — наиболее часто забываемый случай.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Сетка центров, радиусы, уточнение

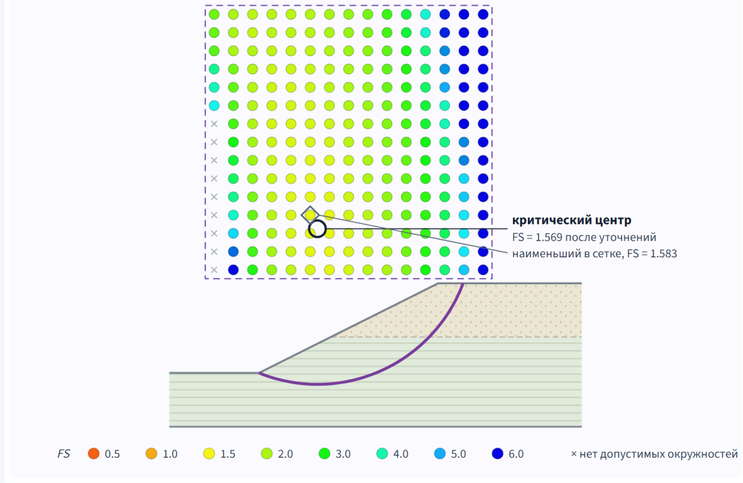
ТЕОРИЯ

Поиск критической окружности выполняется на сетке центров $n_x \times n_z$ точек, размещённой над откосом, и для каждого центра перебирается набор равноотстоящих радиусов.

Каждая окружность разбивается на отсеки и рассчитывается, а наименьший коэффициент запаса, найденный для каждого центра, сохраняется вместе с соответствующим радиусом; в модели примера расчёта проверено 4650 окружностей при сетке центров 15 × 15 и 12 радиусах.

$$FS(x_c, z_c) = \min_j FS(x_c, z_c, r_j) \qquad FS_{crit} = \min_{x_c, z_c} FS(x_c, z_c)$$

Модель с решением	Значение
Сетка ($n_x \times n_z \times$ радиус)	15 × 15 × 12
Пробная / принятая окружность	4,650 / 3,487
Наименьшее значение по сетке	FS = 1.583
После уточнения	**FS = 1.569**
Критическая окружность	x_c = 16.52, z_c = 16.08, r = 17.35 m



Ломаная линия, только Spencer

ТЕОРИЯ

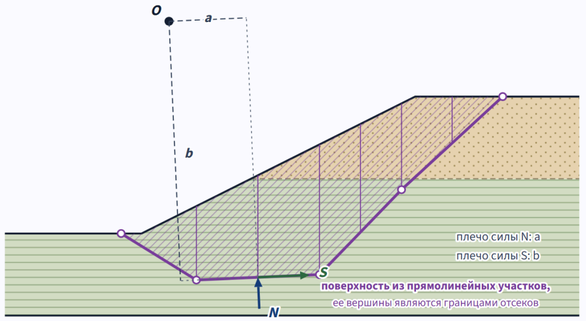
Некруглая поверхность может следовать слабому слою с призмами, спускающимися от бровки откоса и поднимающимися к его подошве, и представляет собой полигональную поверхность с обоими концами на поверхности грунта.

Для составной ломаной поверхности скольжения уравнение моментов записывается относительно точки O, выбранной над нижней кромкой массы; плечо N равно a, плечо S равно b.

Поверхность с наименьшим коэффициентом запаса ищется как ломаная линия из n звеньев; перемещение сохраняется лишь тогда, когда поверхность остаётся допустимой, а ограничение выпуклости предотвращает смещение к зигзагообразным поверхностям.

$$a = (X - X_O)\cos\alpha - (z - z_O)\sin\alpha \qquad b = (X - X_O)\sin\alpha + (z - z_O)\cos\alpha$$

$$\sum [Na + Sb] - \sum V(X - X_O) - \sum A(z_A - z_O) + M_{reinforcement} + M_{crack} = 0$$



Вклад пассивного и активного элементов в FS

ТЕОРИЯ

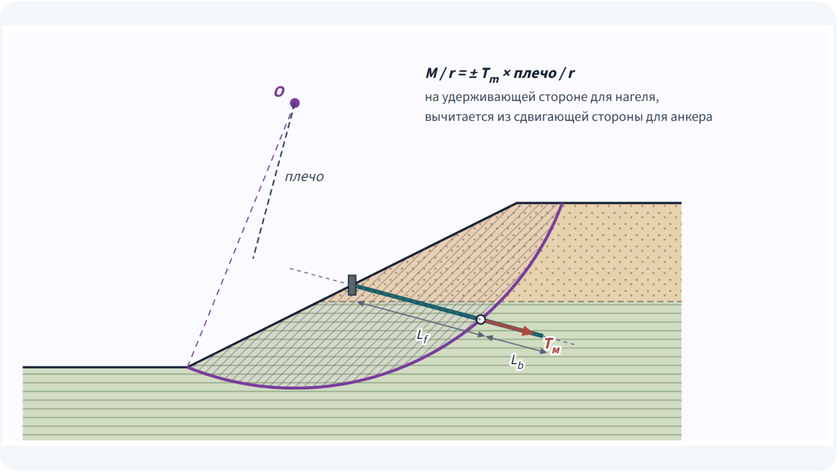
Армирующий элемент — это линия, пересекающая поверхность скольжения; длина участка перед поверхностью скольжения до точки пересечения с дугой обозначается L_f, а длина участка заделки за этой точкой — L_b.

Момент пассивного элемента (грунтового гвоздя, геосетки) добавляется к удерживающей стороне; поскольку активный элемент (анкер) воспринимает нагрузку до начала движения, его момент вычитается со стороны сдвигающих сил.

При той же силе активный элемент повышает коэффициент запаса больше, чем пассивный; сила принята одинаковой для статического и псевдостатического случаев.

$$\frac{M}{r} = \pm\frac{(x_P - x_c)F_z - (z_P - z_c)F_x}{r}$$

$$FS = \frac{\sum R + \sum M_{passive}/r}{\sum D - \sum M_{active}/r}$$



Наименьшее из трёх значений

ТЕОРИЯ

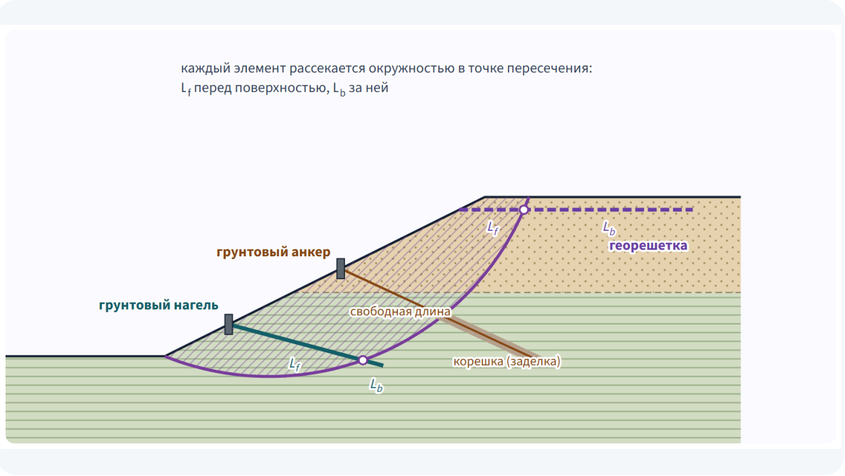
Усилие растяжения грунтового гвоздя $T = \min[T_t, q_u \pi D_h L_b, q_u \pi D_h L_f + T_h]$ есть наименьшее из трёх значений.

Грунтовый гвоздь — пассивный элемент: он включается в работу по мере смещения массива грунта, а усилие в гвозде, отнесённое к шагу Sh, выражается как $T_m = T/S_h$.

Гвоздь, головка которого находится вне круга скольжения или конец которого находится внутри сползающего массива, для этого круга усилия не воспринимает.

В свободной длине сцепление не возникает; анкер удерживается корнем, а усилие, которое анкер передаёт, пересекая круглоцилиндрическую поверхность скольжения, равно наименьшему из трёх значений: **$T = \min[P, T_t, q_u \pi D_h L_b]$**.

Анкер — активный элемент: усилие в тяге существует ещё до смещения массива грунта, и в уравнениях Spencer анкер задаётся как известная сила; поэтому она не делится на **FS**.



гвоздь: $T = \min\left[T_t,\ q_u \pi D_h L_b,\ q_u \pi D_h L_f + T_h\right] \qquad T_m = \dfrac{T}{S_h}$

анкер: $T = \min\left[P,\ T_t,\ q_u \pi D_h L_b\right] \qquad T_m = \dfrac{T}{S_h}$

Расчётная прочность, выдергивание, соединение

ТЕОРИЯ

Геосетка определяется своей длиной L, долговременной расчётной прочностью на 1 m сечения T_d, коэффициентом взаимодействия грунта с геосеткой C_i и прочностью соединения T_c при её присоединении к лицевой облицовке.

Сопротивление выдергиванию на метр длины обусловлено трением по обеим поверхностям под действием эффективного бытового напряжения σ'_v; георешётка — пассивный элемент и работает в плоскости полотна.

σ'_v получается из веса грунта над плитой — ниже уровня грунтовых вод с удельным весом водонасыщенного грунта — за вычетом порового давления; нагрузки на поверхности не учитываются, что идёт в запас надёжности.

$$p = 2\,C_i\,\sigma'_v\,\tan\varphi' \qquad T_m = \min\left[T_d,\ \int_{L_b} p\,dl,\ \int_{L_f} p\,dl + T_c\right]$$



Условие

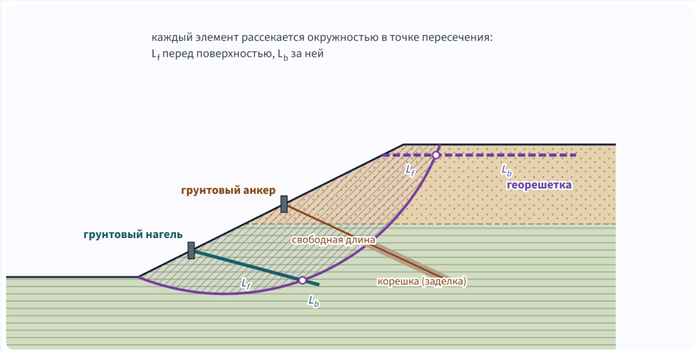
ПРИМЕР

Дано

Гвозди	**четыре нагеля, головы на $x = 14, 18, 22, 26$ m (на поверхности), наклон 15°, $L = 14$ m; $T_t = 250$ kN, $q_u = 120$ kPa, $D_h = 120$ mm, $S_h = 1.5$ m**
Круг	**окружность, найденная при поиске в модели с грунтовыми гвоздями: центр $(18.29;\ 13.90)$, $r = 18.18$ m**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Для каждого грунтового гвоздя **L_f**, **L_b**, **T** и **T_m**; вклад в момент; **FS**.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Прочность сцепления (на единицу длины) и гвоздь N3

$$q_u \pi D_h = 120\pi(0.120) = \mathbf{45.239}\ \text{kN/m}$$

$$L_f = 11.282\ \text{m},\ L_b = 2.718\ \text{m} \qquad P(32.90;\ 3.08)$$

$$T = \min[250,\ 45.239(2.718) = 122.94,\ 45.239(11.282) = 510.4] = \mathbf{122.94}\ \text{kN}$$

$$T_m = \frac{T}{S_h} = \frac{122.94}{1.5} = \mathbf{81.96}\ \text{kN/m}$$

2 Момент силы относительно центра окружности

$$F_x = T_m \cos 15^\circ = 79.17,\quad F_z = -T_m \sin 15^\circ = -21.21\ \text{kN/m}$$

$$\frac{M}{r} = \frac{(x_P - x_c)F_z - (z_P - z_c)F_x}{r} = \frac{(14.606)(-21.21) - (-10.822)(79.17)}{18.178} = \mathbf{30.09}\ \text{kN/m}$$

Нагель N3 воспринимает нагрузку **81.96** kN/m, удерживающую массу; его момент добавляет к ΣR 30.09 kN/m (пассивный элемент).

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Усилия в четырёх гвоздях (тот же метод)

Гвоздь	L_f (m)	L_b (m)	T (kN)	Определяющий	T_m (kN/m)	M/r (kN/m)
N1	–	–	0	нижний конец внутри массива: нагрузку не воспринимает	0	0
N2	13.13	0.87	39.32	выдергивание в тыльной части	26.21	13.90
N3	11.28	2.72	122.94	выдергивание в тыльной части	81.96	30.09
N4	8.82	5.18	234.18	выдергивание в тыльной части	156.12	31.82

4 Модель с грунтовыми гвоздями: FS на окружности, найденной поиском

Метод	Без нагелей (начальный котлован)	Закреплённый гвоздями
Обычный	1.569	**1.753**
Bishop	1.740	**2.018**
Spencer	1.717	**2.031**

Грунтовые гвозди увеличивают FS примерно на 12% (обычный метод 1.569 → 1.753; Bishop 1.740 → 2.018).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Криволинейная огибающая прочности и её касательная в основании каждого отсека

ТЕОРИЯ

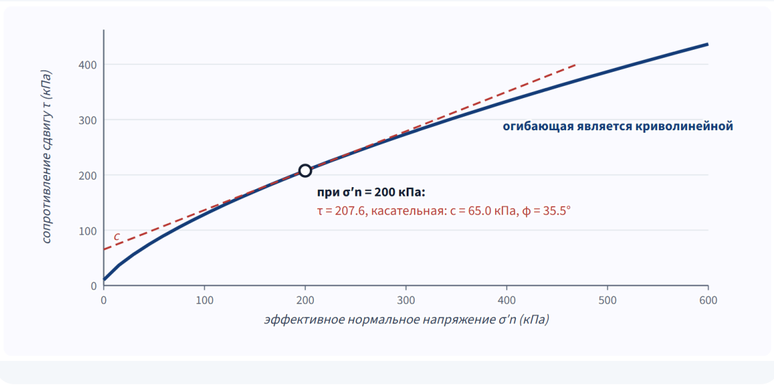
В обобщённом критерии Hoek–Brown скальный массив задаётся параметрами σ_{ci}, GSI, m_i и D; для ненарушенного массива принимается D = 0, при интенсивном взрывании или разуплотнении — D = 1.

Поскольку прочность на сдвиг по основанию отсека зависит от нормального напряжения, криволинейная огибающая переводится в плоскость τ–σ′n с помощью соотношений Balmer; касательная к ней в основании даёт значения ci и φi.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}\left(m_b\frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

$$m_b = m_i\, e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \qquad s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \qquad a = \frac{1}{2} + \frac{e^{-GSI/15} - e^{-20/3}}{6}$$

$$d = \frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} \qquad \sin\varphi_i = \frac{d-1}{d+1} \qquad c_i = \tau - \sigma_n' \tan\varphi_i$$



Условие

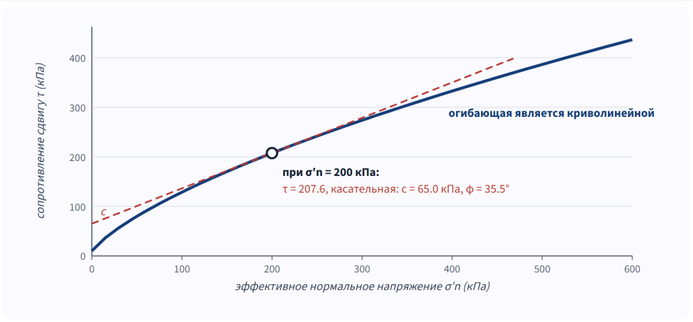
ПРИМЕР

Дано

Скальный массив	$\sigma_{ci} = 5$ **MPa,** $GSI = 30$**,** $m_i = 8$**,** $D = 0$
Подошва	**эффективное нормальное напряжение** $\sigma_n' = 200$ **kPa**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

m_b, s, a; при этом напряжении **τ**, **φ_i** и **c_i**.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Константы скального массива

$$m_b = 8\,e^{(30-100)/28} = 0.6567 \qquad s = e^{(30-100)/9} = 0.000419$$

$$a = 0.5 + \frac{e^{-2} - e^{-20/3}}{6} = 0.5223$$

2 При σ'_n = 200 kPa σ'_3 = 93.05 kPa (находится итерациями)

$$d = 1 + a\,m_b \left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a-1} = 3.767$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a} = 602.9 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}\,\frac{d-1}{d+1} = 200.0 \text{ kPa} \;\checkmark$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Сопротивление сдвигу и эквивалентные параметры Mohr–Coulomb

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3')\frac{\sqrt{d}}{d+1} = \mathbf{207.6}\ \text{kPa}$$

$$\varphi_i = \arcsin\frac{d-1}{d+1} = \mathbf{35.48}^\circ \qquad c_i = \tau - \sigma_n' \tan\varphi_i = 207.6 - 200(0.7128) = \mathbf{65.0}\ \text{kPa}$$

На этой подошве отсека скальный грунт ведёт себя по Mohr–Coulomb с **c_i = 65.0 kPa, φ_i = 35.5°** (τ = 207.6 kPa); при изменении напряжения эти значения тоже меняются: каждый отсек использует собственные c и φ.

Проверить решение в GeoTerva ↗

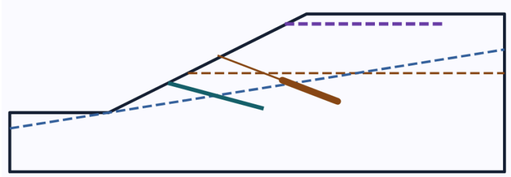
Считывание по названиям слоёв

ТЕОРИЯ

Названия слоёв DXF-разреза считываются без учёта регистра, пробелов, дефисов и знаков подчёркивания; слой **EXTERNAL** задаёт поверхность грунта, две боковые стороны и основание одной замкнутой полилинией.

MATERIAL — линии между грунтами; линия, заканчивающаяся внутри разреза, продлевается вдоль поверхности грунта, и каждой области между двумя границами назначается отдельный грунт.

WATER TABLE — линия уровня грунтовых вод; **NAIL**, **ANCHOR** и **GEOGRID** — армирующие элементы, а удельный вес, прочность, несущая способность, нагрузка и сейсмическое воздействие, не показанные на чертеже, вводятся на вкладке «Модель».

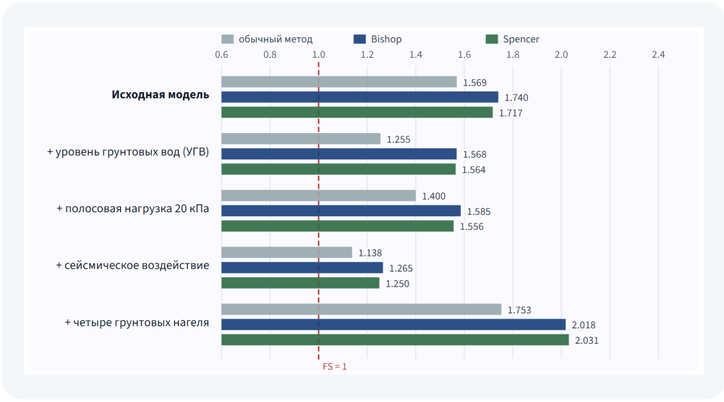


чертеж в слоях с именами, принятыми в модуле

Таблица результатов

Одно и то же сечение, пять моделей, три метода

Модель (добавляется элемент, поиск окружности выполняется заново)	Центр (x_c; z_c)	r (m)	Отсек	Обычный	Bishop	Spencer
Начальная модель (статика)	16.52; 16.08	17.35	33	**1.569**	**1.740**	**1.717**
+ УГВ, повышающийся в глубь откоса	17.12; 11.45	16.85	36	**1.255**	**1.568**	**1.564**
+ полосовая нагрузка 20 kPa, x = 25 – 32 m	16.25; 15.44	16.66	35	**1.400**	**1.585**	**1.556**
+ землетрясение, kh 0.15, kv 0.05 (критический случай)	16.72; 17.45	18.70	34	**1.138**	**1.265**	**1.250**
+ четыре грунтовых гвоздя длиной 14 m	18.29; 13.90	18.18	34	**1.753**	**2.018**	**2.031**



Обычный метод всегда даёт наименьшее значение; Bishop и Spencer близки друг к другу (для круга разница составляет несколько процентов).

Вода и землетрясение снижают FS сильнее всего (1.255 и 1.138, по обычному методу); четыре нагеля повышают FS до 1.753. С нагелями по методам Bishop и Spencer получается более 2.0.

Допущения модели и то, что она не учитывает

Модель принимает плоскую деформацию: один метр бесконечно длинного откоса, одинаковую прочность во всех направлениях (за исключением изотропного критерия для скального грунта) и жёсткую массу грунта до начала движения.

Для **воды** используется либо гидростатическое давление ниже заданной линии, либо доля r_u от давления вышележащего грунта; фильтрационный расчёт не выполняется, а при быстром снижении уровня принимается $\bar{B} = 1$ (мгновенное снижение).

Для **отсеков** все величины принимаются по средней вертикали отсека, отрицательная эффективная нормальная сила принимается равной нулю; сейсмическое воздействие учитывается псевдостатическими коэффициентами, а инерция воды, накапливающейся на поверхности, не учитывается.

Метод **Spencer** принимает силы между отсеками параллельными друг другу и действующими под одним углом для всей массы; равновесие моментов выполняется во всех трёх методах, равновесие сил — только в методе Spencer.

Поиск находит поверхность с наименьшим коэффициентом запаса вблизи начальных поверхностей; не доказано, что она наименьшая среди всех поверхностей.

ЧТО НЕ ВЫПОЛНЯЕТСЯ ПРОГРАММОЙ

- Трёхмерные эффекты (край оползня, ширина откоса)
- Деформация, прогрессирующее разрушение, деформационное разупрочнение
- Фильтрация и консолидация: поровое давление задаётся, а не рассчитывается
- Динамический расчёт (Newmark): псевдостатический расчёт является проверкой
- Положение: FS задаётся; достаточное значение определяют инженер и технические условия

Резюме

Главное

FS = ΣR/ΣD; R = cL + N′ tan φ′, D = W sin α (момент относительно центра круга). Три метода различаются только тем, как определяется **N′**

Отсек 22 (пример): α = 28.51°, L = 0.864, W = 88.52 → по обычному методу N′ = 77.79, R = 42.55, D = 42.25; по Bishop N′ = 86.56, R = 45.40; по Spencer N′ = 80.76, R = 43.51 kN/m

Та же окружность: **1.569 (обычный метод) · 1.740 (Bishop) · 1.717 (Spencer)**; критическая окружность найдена перебором 4650 окружностей на сетке 15 × 15 × 12

Вода: $u = \gamma_w h_w$ уменьшает N′; **землетрясение**: F_h уменьшает нормальную составляющую и добавляет момент; **вода в трещине** добавляет к ΣD момент P_w

Армирование: пассивное (грунтовые гвозди, геосетка) относится к удерживающей стороне, активное (анкер) вычитается из сдвигающей; **Hoek–Brown**: касательные c_i, φ_i на каждом основании отсека

Список литературы

Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. Transactions of the 2nd Congress on Large Dams, Washington, 4, 445–463.

Bishop, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique, 5(1), 7–17.

Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. Géotechnique, 17(1), 11–26.

Morgenstern, N.R. and Price, V.E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique, 15(1), 79–93.

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

Terzaghi, K. (1950). Mechanism of landslides. In Application of Geology to Engineering Practice (Berkey Volume), Geological Society of America, 83–123.

Rankine, W.J.M. (1857). On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 147, 9–27.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). Hoek–Brown failure criterion — 2002 edition. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, 1, 267–273.

Balmer, G. (1952). A general analytical solution for Mohr's envelope. Proceedings ASTM, 52, 1260–1271.

Lazarte, C.A., Robinson, H., Gómez, J.E., Baxter, A., Cadden, A. and Berg, R. (2015). Soil Nail Walls — Reference Manual. Geotechnical Engineering Circular No. 7, FHWA-NHI-14-007.

Sabatini, P.J., Pass, D.G. and Bachus, R.C. (1999). Ground Anchors and Anchored Systems. Geotechnical Engineering Circular No. 4, FHWA-IF-99-015.

Berg, R.R., Christopher, B.R. and Samtani, N.C. (2009). Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes. Geotechnical Engineering Circular No. 11, FHWA-NHI-10-024.

ПРИМЕЧАНИЕ

Все численные примеры получены с помощью собственных расчётных библиотек модуля; модуль даёт те же значения. Модель примера расчёта на странице модуля — также этот разрез (откос 2:1 высотой 10 m, глина над насыпным грунтом).

GeoTerva

Геотехнические расчёты онлайн

От теории к практике

Собственный разрез можно начертить или считать из DXF; задаются грунты, вода, нагрузки, сейсмическое воздействие и армирование. Модуль ищет критическую дугу скольжения и выдаёт коэффициенты запаса по трём методам, таблицы отсеков, пошаговое решение и отчёт.

Открыть модуль →

Страница теории →

Открыть на телефоне
Для пробных модулей регистрация не требуется.