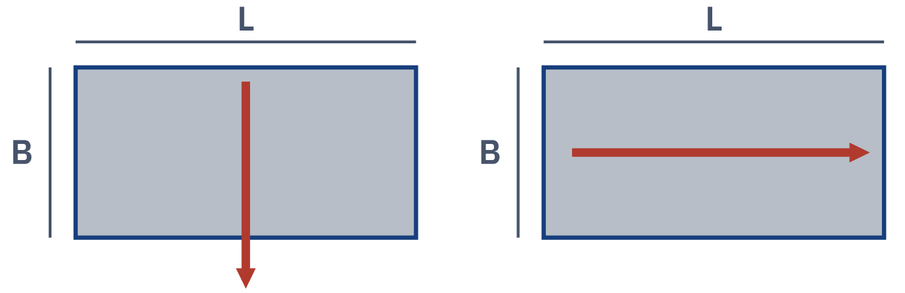
Презентация лекции по геотехнике · Фундаменты

Уравнение несущей способности Vesic

Лекция: коэффициенты, принятые Vesic, и его собственный вклад: показатель степени наклона, учитывающий форму фундамента и направление нагрузки, наклон подошвы и наклон поверхности грунта; по каждой теме — пример расчёта.

- Показатель наклона m
- Наклонная нагрузка
- Наклон подошвы
- Наклон поверхности грунта
- Совпадение с Meyerhof
- Примеры расчёта



Что мы изучим на этой лекции?

- Различение того, какие коэффициенты **уравнение Vesic** заимствует, а какие **принадлежат ему самому**
- Вычисление **показателя степени m** в коэффициентах наклона по отношению B/L фундамента и направлению нагрузки
- Определение **коэффициентов наклона** по фактическим нагрузкам h и v и проверка пределов сдвига
- Применение коэффициентов **наклона подошвы** и **наклона поверхности откоса** (формы Vesic); сравнение с коэффициентами Hansen
- Рассмотрение недренированной формы (φ = 0) и случаев с подземными водами
- Понимание того, что при отсутствии наклона нагрузки, подошвы и поверхности грунта уравнение сводится к **общему уравнению Meyerhof**

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 фундамента — начальная модель модуля: квадратный фундамент 1.2 m × 1.2 m в песке, D_f = 1 m, УГВ 0.5 m, c = 0, φ′ = 32°.

Принятые и собственные коэффициенты

ТЕОРИЯ

Уравнение Vesic имеет **ту же структуру**, что и уравнение Hansen: в каждом слагаемом поправки на форму, глубину заложения, наклон нагрузки, наклон подошвы и наклон поверхности:

$$\begin{aligned} q_u = {} & c\, N_c\, F_{cs} F_{cd}\, i_c b_c g_c \\ & + q\, N_q\, F_{qs} F_{qd}\, i_q b_q g_q \\ & + \tfrac{1}{2} \gamma B\, N_\gamma\, F_{\gamma s} F_{\gamma d}\, i_\gamma b_\gamma g_\gamma \end{aligned}$$

Vesic **не выводил всё заново**: он взял **коэффициенты формы по De Beer** и **коэффициенты глубины по Hansen** без изменений; N_γ — также его замкнутая формула: $N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \varphi$.

Собственный вклад: коэффициенты наклона нагрузки (показатель степени зависит от формы фундамента и направления нагрузки), а также коэффициенты наклона подошвы и наклона поверхности грунта.

При отсутствии наклона нагрузки, наклона подошвы и наклона поверхности грунта (значения модуля по умолчанию) i = b = g = 1, и уравнение **полностью совпадает с общим уравнением Meyerhof**.

ИСТОЧНИК КОЭФФИЦИЕНТОВ

Коэффициент	Источник
N_c, N_q	Prandtl, Reissner
N_γ	Vesic
F_s (форма)	De Beer
F_d (глубина)	Hansen
i (уклон)	**Vesic**
b (наклон подошвы)	**Vesic**
g (наклон поверхности грунта)	**Vesic**

Условие

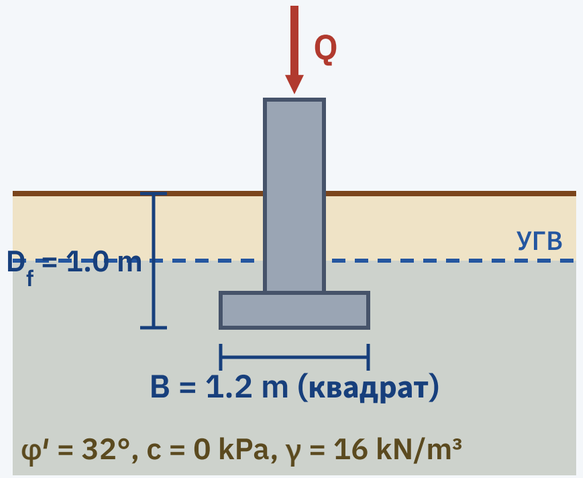
ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**квадратный фундамент, B = L = 1.2 m, глубина заложения D_f = 1.0 m**
Грунт	**песок:** $\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$
Удельный вес	$\gamma = 16$ kN/m^3 **(выше),** $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3 **(ниже УГВ)**
Нагрузка	**вертикальная, центральная**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить значения N_c, N_q, N_γ, а также F_{cs}, F_{qs}, $F_{\gamma s}$ и F_{qd}, F_{cd}.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Коэффициенты несущей способности (φ′ = 32°, tan 32° = 0.6249)

$$N_q = e^{\pi \tan 32^\circ} \tan^2(61^\circ) = 23.18 \qquad N_c = \frac{23.18 - 1}{0.6249} = 35.49$$

$$N_\gamma = 2(23.18 + 1)(0.6249) = \mathbf{30.21}$$

2 Коэффициенты формы (De Beer; B/L = 1)

$$F_{cs} = 1 + \frac{23.18}{35.49} = \mathbf{1.653} \qquad F_{qs} = 1 + \tan 32^\circ = \mathbf{1.625} \qquad F_{\gamma s} = 1 - 0.4 = \mathbf{0.600}$$

3 Коэффициенты глубины заложения (Hansen; $D_f/B = 1.0/1.2 = 0.833 \le 1$)

$$F_{qd} = 1 + 2(0.6249)(0.2210)(0.833) = \mathbf{1.230} \qquad F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \varphi} = \mathbf{1.241}$$

Совпадают с коэффициентами в презентации Meyerhof: Vesic их не изменял.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Показатель степени, учитывающий форму фундамента и направление нагрузки

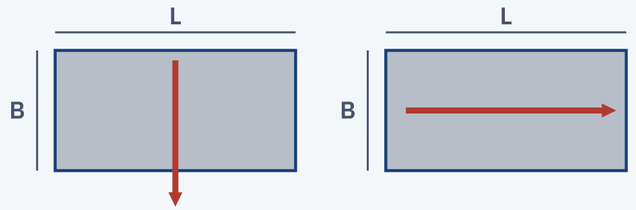
ТЕОРИЯ

В коэффициентах наклона нагрузки по Meyerhof показатель степени постоянен (2), по Hansen — также (5). По Vesic он зависит от **отношения B/L** фундамента и от того, **параллельно какой стороне** направлена горизонтальная нагрузка:

$$m_B = \frac{2 + B/L}{1 + B/L} \quad (h \parallel B) \qquad m_L = \frac{2 + L/B}{1 + L/B} \quad (h \parallel L)$$

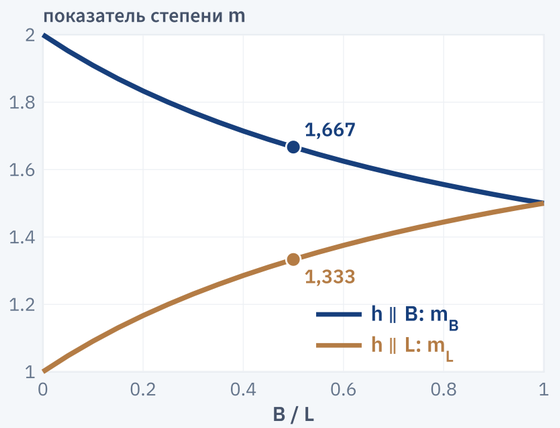
Ленточный фундамент (B/L → 0): $\mathbf{m_B = 2}$, $\mathbf{m_L = 1}$. Для квадратного фундамента оба направления одинаковы: m = 1.5.

Когда один и тот же прямоугольный фундамент нагружен в двух направлениях, m различается: **при нагрузке, параллельной короткой стороне, показатель больше**, и коэффициенты убывают быстрее. Ни один из прочих методов этого раздела такого различия не делает.



нагрузка параллельна B
$m = m_B = 1{,}667$

нагрузка параллельна L
$m = m_L = 1{,}333$



Условие

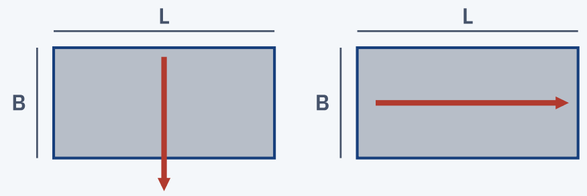
ПРИМЕР

Дано

Фундаменты	**(a) квадрат 1.2 × 1.2 m · (b) полоса · (c) прямоугольник 1.2 × 2.4 m (B/L = 0.5)**
Нагрузка	**горизонтальная составляющая, параллельная B, и параллельная L**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить значение **m** для каждого фундамента и каждого направления.



нагрузка параллельна B
$m = m_B = 1{,}667$

нагрузка параллельна L
$m = m_L = 1{,}333$

Решение

РЕШЕНИЕ

1 (a) Квадрат (B/L = 1) и (b) полоса (B/L → 0)

$$\text{(a)}: \; m = \frac{2+1}{1+1} = \mathbf{1.500} \;\; \text{(в двух направлениях)}$$

$$\text{(b)}: \; m_B = \frac{2+0}{1+0} = \mathbf{2.000}, \quad m_L = \mathbf{1.000}$$

2 (c) Прямоугольник 1.2 × 2.4 m (B/L = 0.5; L/B = 2)

$$m_B = \frac{2+0.5}{1+0.5} = \mathbf{1.667} \qquad m_L = \frac{2+2}{1+2} = \mathbf{1.333}$$

Для одного и того же прямоугольного фундамента при нагрузке, параллельной короткой стороне, m = 1.667, при параллельной длинной стороне — 1.333. Если нагрузка направлена вдоль короткой стороны, коэффициент наклона $(1 - x)^m$ убывает быстрее: это направление **более неблагоприятно**.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Vesic: $(1 - h/(v + c\cot\varphi))^m$

ТЕОРИЯ

h = H/A и v = V/A, в том же виде, что и у Hansen, — давления **одного и того же случая нагрузки** (v = q_{app}; при h > 0 требуется q_{app}):

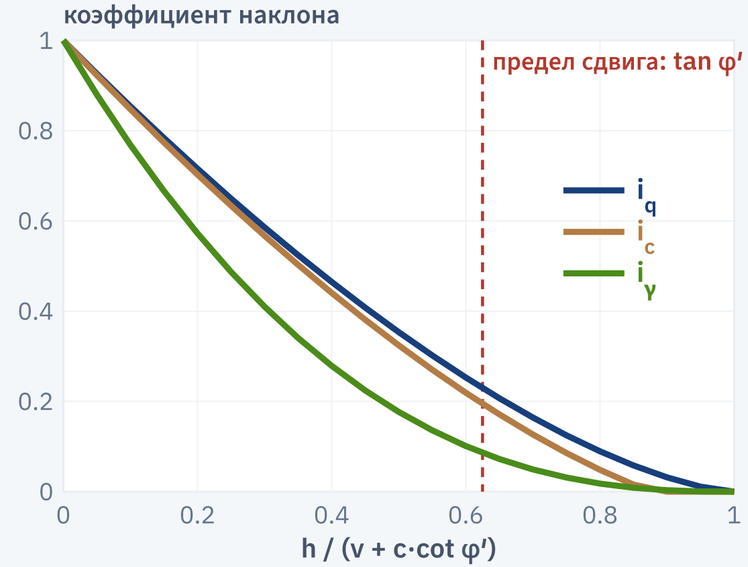
$$i_q = \left(1 - \frac{h}{v + c\cot\varphi}\right)^m \qquad i_\gamma = \left(1 - \frac{h}{v + c\cot\varphi}\right)^{m+1}$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1} \; (\geq 0)$$

$$\varphi = 0: \quad i_c = 1 - \frac{m\,h}{c\,N_c}, \qquad i_q = i_\gamma = 1$$

h > v tan φ + c: подошва сдвигается; модуль выдаёт предупреждение (сдвиг проверяется отдельно). **h ≥ v + c cot φ** (при φ = 0 — **h ≥ c**): модуль останавливается.

i_c не принимает отрицательных значений, оно удерживается равным нулю. На графике предел сдвига — линия h/(v + c cot φ) = tan φ.



Условие

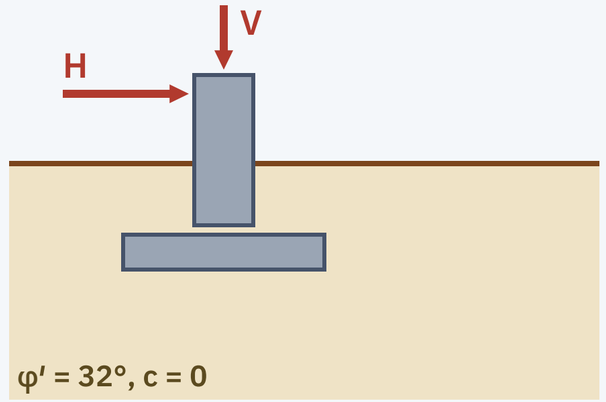
ПРИМЕР

Дано

Фундамент, грунт	**квадрат 1.2 × 1.2 m,** $\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$ **(модель модуля);** $N_q = 23.18$
Случай нагружения	$v = q_{apply} = 150$ kPa, $h = 30$ kPa **(ek: 60, 90, 120)**
Направление нагрузки	**квадратный фундамент: m = 1.5**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить коэффициенты i_q, i_c, i_γ и проверить предел сдвига.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Отношение (c = 0: v + c cot φ = v = 150 kPa)

$$x = \frac{h}{v + c\cot\varphi} = \frac{30}{150} = \mathbf{0.200} \qquad m = 1.5$$

2 Коэффициенты

$$i_q = (1 - 0.2)^{1.5} = \mathbf{0.716} \qquad i_\gamma = (1 - 0.2)^{2.5} = \mathbf{0.572}$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1} = 0.716 - \frac{0.284}{22.18} = \mathbf{0.703}$$

3 Граница скольжения

$$v\tan\varphi + c = 150(0.6249) = \mathbf{93.7}\ \text{kPa} \geq h = 30 \ \Rightarrow\ \text{без скольжения}$$

$$(h \geq v = 150\ \text{устойчив, если})$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

h (kPa)	h/(v + c cot φ)	i_c	i_q	i_γ	проверка на сдвиг
0	0.00	1.000	1.000	1.000	проходит
30	0.20	0.703	0.716	0.572	проходит
60	0.40	0.441	0.465	0.279	проходит
90	0.60	0.219	0.253	0.101	проходит
120	0.80	0.048	0.089	0.018	**предупреждение: h > 93.7**

h = 30 kPa (20 % от v) снижает член q на **28 %**, а член собственного веса — на **43 %**. Поскольку показатель степени равен m + 1, **член собственного веса всегда ослабляется сильнее**. При c = 5 kPa получилось бы v + c cot φ = 158.0 kPa и i_q = 0.729.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

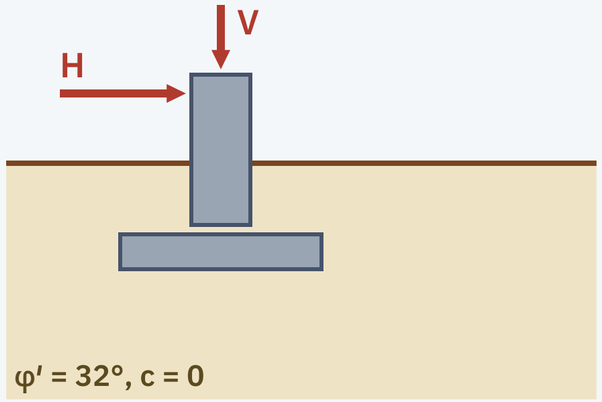
ПРИМЕР

Дано

Фундамент, грунт	**квадрат 1.2 m,** $\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$
Случай нагружения	$v = 150$ kPa, $h = 30$ kPa**: к вертикали** $\beta = \tan^{-1}(30/150) = 11.31^\circ$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить значения $\mathbf{i_q}$ и $\mathbf{i_\gamma}$ методами Meyerhof, Hansen и Vesic и сравнить их.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Meyerhof (с углом β), Hansen (x = h/v = 0.2) и Vesic (m = 1.5)

$$\text{Meyerhof}: F_{;qi} = \left(1 - \frac{11.31}{90}\right)^2 = \mathbf{0.764}, \quad F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{11.31}{32}\right)^2 = \mathbf{0.418}$$

$$\text{Hansen}: i_{;q} = (1 - 0.5x)^5 = \mathbf{0.590}, \quad i_\gamma = (1 - 0.7x)^5 = \mathbf{0.470}$$

$$\text{Vesic}: i_{;q} = (1 - 0.2)^{1.5} = \mathbf{0.716}, \quad i_\gamma = (1 - 0.2)^{2.5} = \mathbf{0.572}$$

	i_q	i_γ
Meyerhof	0.764	0.418
Hansen	0.590	0.470
Vesic	**0.716**	**0.572**

Каждый коэффициент следует использовать вместе с соответствующими ему N_γ и коэффициентами формы. Значение i_q по Vesic близко к значению по Meyerhof, а i_γ — наибольшее из трёх.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Собственные коэффициенты Vesic

ТЕОРИЯ

Vesic (1975) предложил собственные коэффициенты также для наклона подошвы и наклона поверхности грунта. При φ > 0 коэффициент сцепления выводится из коэффициента пригрузки (η и ω в показателе степени — в радианах):

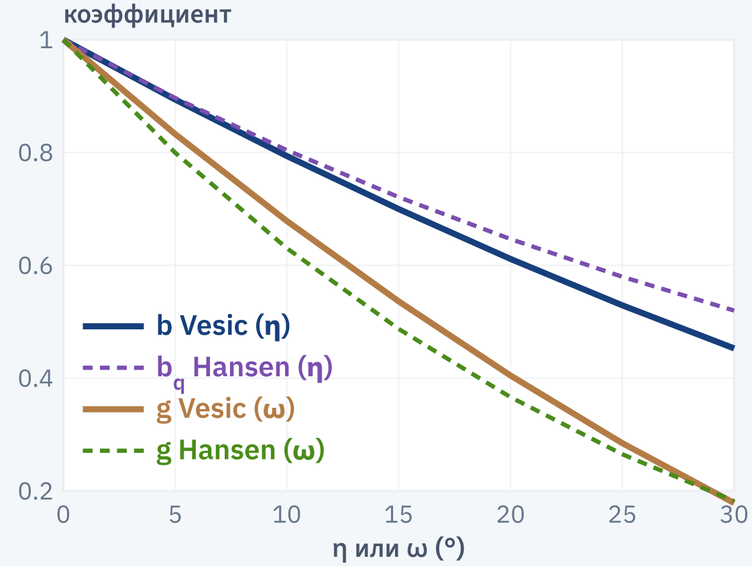
$$b_q = b_\gamma = (1 - \eta \tan\varphi)^2 \qquad g_q = g_\gamma = (1 - \tan\omega)^2$$

$$\varphi > 0: \quad b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_q - 1} \qquad g_c = g_q - \frac{1 - g_q}{N_q - 1}$$

$$\varphi = 0: \quad b_c = 1 - \frac{2\eta}{\pi + 2} \quad g_c = 1 - \frac{2\omega}{\pi + 2} \quad b_q = b_\gamma = 1$$

Коэффициенты b_q, b_γ по Hansen экспоненциальны ($e^{-2\eta \tan\varphi}$), а $g_q = (1 - 0.5 \tan\omega)^5$; при малых углах они близки, с ростом ω расходятся (график).

При ω > φ откос сам по себе не находится в равновесии: модуль останавливается. η и ω вводятся не более 45° ($(1 - \tan\omega)^2$ там обращается в нуль).



Условие

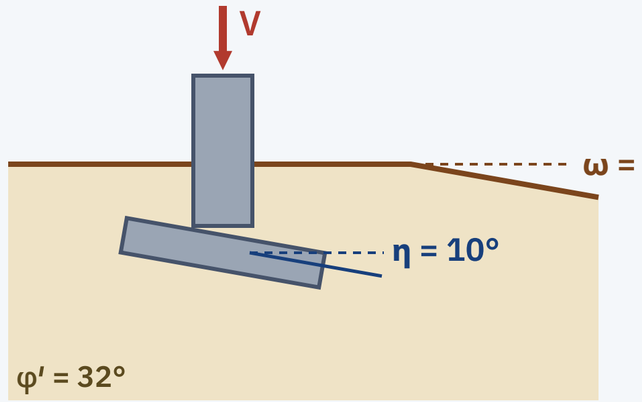
ПРИМЕР

Дано

Грунт	$\varphi' = 32^\circ,\ \tan\varphi = 0.6249,\ N_q = 23.18$
Наклон подошвы	**η = 10° (0.1745 rad)**
Наклон поверхности грунта	**ω = 10°**
Сравнение	**Коэффициенты Hansen**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить значения b_c, b_q, b_γ и g_c, g_q, g_γ по Vesic; сравнить их со значениями Hansen; записать формы для φ = 0.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Наклон подошвы η = 10° (Vesic)

$$b_q = b_\gamma = (1 - 0.1745 \cdot 0.6249)^2 = \mathbf{0.7938} \qquad b_c = 0.7938 - \frac{1 - 0.7938}{23.18 - 1} = \mathbf{0.7845}$$

2 Наклон поверхности грунта ω = 10° (tan 10° = 0.1763)

$$g_q = g_\gamma = (1 - 0.1763)^2 = \mathbf{0.6784} \qquad g_c = 0.6784 - \frac{1 - 0.6784}{23.18 - 1} = \mathbf{0.6639}$$

3 Формы при φ = 0 (для 10°)

$$b_c = 1 - \frac{2(0.1745)}{\pi + 2} = \mathbf{0.932} \qquad g_c = 1 - \frac{2(0.1745)}{\pi + 2} = \mathbf{0.932} \qquad b_q = b_\gamma = 1$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

	b_c	b_q	b_γ	g_c	$g_q = g_\gamma$
Vesic	0.784	0.794	0.794	0.664	0.678
Hansen	0.932	0.804	0.745	0.932	0.630

b_q и g_q в двух методах **близки** (0.794 и 0.804; 0.678 и 0.630), но **коэффициенты для сцепления существенно различаются**: значения b_c, g_c у Vesic выводятся из коэффициента для пригрузки (0.784 и 0.664), у Hansen они равны 1 – угол/147° (0.932). Для песка с c = 0 эта разница на результат не влияет.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Объединение уравнений и проверка

ТЕОРИЯ

Хотя шесть поправок могут показаться пугающими, **в обычном случае все они равны 1**: при значениях модуля по умолчанию (h = 0, η = 0, ω = 0) i = b = g = 1, и уравнение совпадает с общим уравнением Meyerhof. q_u — вертикальное давление в момент разрушения; модуль раздельно учитывает давление брутто и нетто:

$$q_{u,net} = q_u - q \qquad q_{all,g} = \frac{q_u}{FS} \qquad q_{all,n} = \frac{q_{u,net}}{FS}$$

Приложенное давление $q_{applied}$ — это **вертикальное давление брутто на подошве** для того же случая нагружения (V/A). Фундамент удовлетворяет требованиям при следующих условиях:

$$q_{apply} \le q_{all,g} \qquad FS_{\text{фактический}} = \frac{q_u}{q_{apply}} \qquad q_{apply} - q \le q_{all,n}$$

> Допустимая вертикальная нагрузка $Q_{all} = q_{all,g} \cdot A$. При h > 0 необходимо вводить $q_{applied}$.

КОГДА КОЭФФИЦИЕНТ РАВЕН 1?

Коэффициент	случай, когда значение равно 1
F_s	ленточный фундамент (B/L = 0)
F_d	D_f = 0 (подошва на поверхности)
i	h = 0 (вертикальная нагрузка)
b	η = 0 (горизонтальная подошва)
g	ω = 0 (горизонтальная поверхность)

Коэффициенты не меняются; меняются q и γ

ТЕОРИЯ

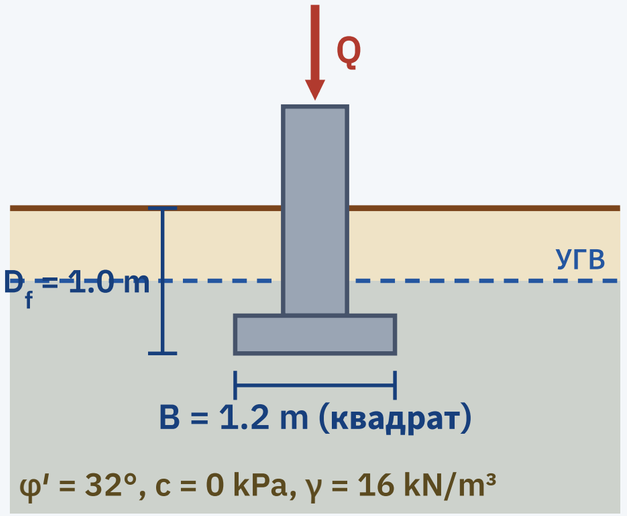
Грунтовые воды рассматриваются в **тех же двух случаях**, что и в других модулях этого раздела. Ниже УГВ удельный вес с учётом взвешивающего действия воды $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ ($\gamma_w = 9.81$). D_w — глубина грунтовых вод от поверхности:

I ($D_w \le D_f$): $q = \gamma D_w + \gamma'(D_f - D_w)$, $\gamma \to \gamma'$ (третье слагаемое)

III ($D_f < D_w \le D_f + B$): $q = \gamma D_f$, $\bar{\gamma} = \frac{1}{B}\left[\gamma D + \gamma'(B - D)\right]$, $D = D_w - D_f$

При $D_w = D_f$ принимается $q = \gamma D_f$, а в третьем слагаемом используется γ'.

Вода глубже B под подошвой **не влияет**. Вода входит только через **q и γ**; F, i, b, g остаются прежними.



Условие

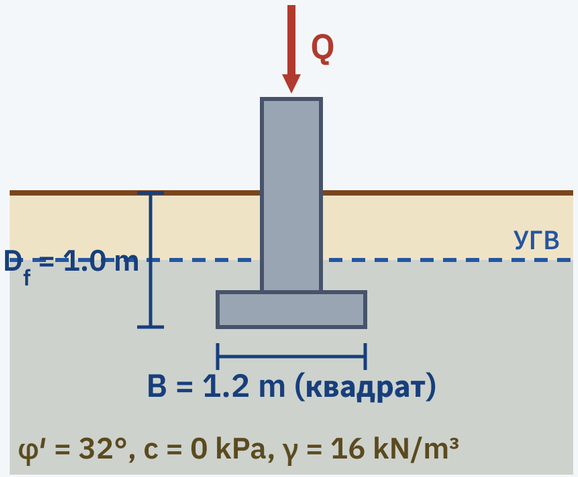
ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**квадратный фундамент, B = L = 1.2 m, глубина заложения D_f = 1.0 m**
Грунт	**песок:** $\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$
Удельный вес	$\gamma = 16$ kN/m^3 **(выше),** $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3 **(ниже УГВ)**
Грунтовые воды	**D_W = 0.5 m (случай I)**
Нагрузка	**вертикальная, центральная**
Безопасность	**FS = 3**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

q_u, брутто и нетто **q_{all}** и допустимая нагрузка **Q_{all}**; затем q_u для c = 5 kPa.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Коэффициенты (Пример 1: φ′ = 32°; B/L = 1; D_f/B = 0.833; h = η = ω = 0)

$$N_q = 23.18,\ N_\gamma = 30.21 \qquad F_{qs} = 1.625,\ F_{\gamma s} = 0.6,\ F_{qd} = 1.230 \qquad i = b = g = 1$$

2 Случай I: q = 16(0.5) + (19.5 – 9.81)(0.5); γ′ = 9.69 kN/m³ (в третьем слагаемом)

$$q = \mathbf{12.845}\ \text{kPa} \qquad \gamma' = \mathbf{9.69}\ \text{kN/m}^3$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Несущая способность (c = 0: слагаемое сцепления отсутствует)

$$q_u = (12.845)(23.18)(1.625)(1.230) + \tfrac{1}{2}(9.69)(1.2)(30.21)(0.6)$$
$$= 595.1 + 105.4 = \mathbf{700.46}\ \text{kPa}$$

4 Допускаемое давление и нагрузка (A = 1.2² = 1.44 m²)

$$q_{all,g} = \frac{700.46}{3} = \mathbf{233.49}\ \text{kPa} \qquad q_{all,n} = \frac{700.46 - 12.845}{3} = 229.20\ \text{kPa}$$

$$Q_{all} = 233.49(1.44) = \mathbf{336.2}\ \text{kN}$$

Значение q_u = **700.46 kPa**, найденное при тех же исходных данных (β = 0) по общему уравнению Meyerhof, показывает, что оба уравнения **полностью совпадают**. При c = 5 kPa слагаемое сцепления добавило бы 363.9 kPa, и q_u составило бы 1,064.3 kPa.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

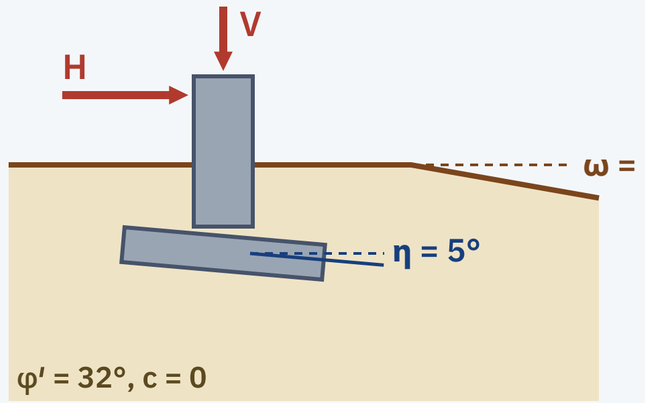
ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**квадратный фундамент, B = L = 1.2 m, глубина заложения D_f = 1.0 m**
Грунт	**песок:** $\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$
Удельный вес	$\gamma = 16$ kN/m^3 **(выше),** $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3 **(ниже УГВ)**
Грунтовые воды	**D_w = 0.5 m**
Случай нагружения	$v = q_{apply} = 90$ kPa, $h = 18$ kPa **(h ∥ B)**
Подошва, грунт	**η = 5°, ω = 10°**
Безопасность	**FS = 3**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Найти значения **q_u** и **q_{all}**; проверить, удовлетворяет ли фундамент условию при q_{app} = 90 kPa, а также выполнить проверку на сдвиг.



Решение (1/3)

РЕШЕНИЕ

1 Коэффициенты наклона (x = h/v = 18/90 = 0.2; m = 1.5)

$$i_q = (1 - 0.2)^{1.5} = \mathbf{0.716} \qquad i_\gamma = (1 - 0.2)^{2.5} = \mathbf{0.572} \qquad i_c = 0.703$$

2 Коэффициенты наклона подошвы и поверхности (η = 5° = 0.0873 rad; ω = 10°)

$$b_q = b_\gamma = (1 - 0.0873 \cdot 0.6249)^2 = \mathbf{0.894} \qquad b_c = 0.889$$

$$g_q = g_\gamma = (1 - \tan 10^\circ)^2 = \mathbf{0.678} \qquad g_c = 0.664$$

Решение (2/3)

РЕШЕНИЕ

3 Три слагаемых (c = 0; коэффициенты F, как в примере 6)

$$q \text{ слагаемое} = (12.845)(23.18)(1.625)(1.230)(0.716)(0.894)(0.678) = 258.2$$

$$\gamma \text{ слагаемое} = \tfrac{1}{2}(9.69)(1.2)(30.21)(0.6)(0.572)(0.894)(0.678) = 36.6$$

4 Несущая способность и допускаемое давление

$$q_u = 258.2 + 36.6 = \mathbf{294.8}\ \text{kPa} \qquad q_{all,g} = \frac{294.8}{3} = \mathbf{98.3}\ \text{kPa}$$

Решение (3/3)

РЕШЕНИЕ

5 Проверка (q_{appl} = 90 kPa)

$$q_{apply} = 90 \le q_{all,g} = 98.3 \;\Rightarrow\; \textbf{выполняется}$$

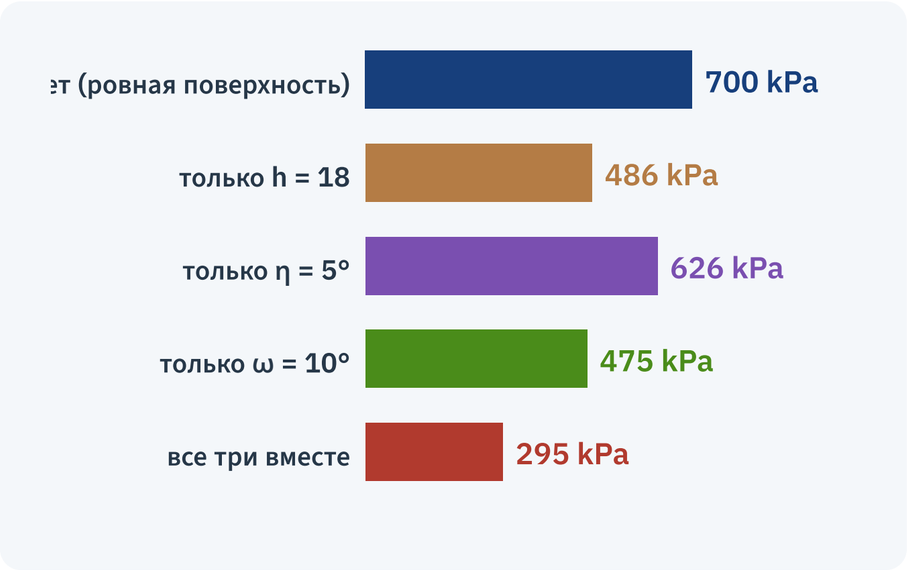
$$FS_{\text{фактический}} = \frac{294.8}{90} = \mathbf{3.28} \ge 3$$

$$q_{apply} - q = 77.2 \le q_{all,n} = 94.0 \;\Rightarrow\; \textbf{выполняется}$$

6 Граница скольжения

$$h = 18 \le v \tan\varphi = 56.2 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; \text{без скольжения}$$

Значение q_u = 700 kPa в модели без наклонов при этом сочетании нагрузок снижается до **295 kPa** (на 58%). По отдельности: наклон поверхности грунта −32%, горизонтальная нагрузка −31%, наклон подошвы −11%. Фундамент удовлетворяет требованиям во всех трёх случаях (FS = 3.28).



Проверить решение в GeoTerva ↗

φ = 0: собственные формы коэффициентов сцепления

ТЕОРИЯ

При φ = 0 получаем $N_c = 5.14$, $N_q = 1$, $N_\gamma = 0$; член собственного веса исчезает, а член пригрузки сводится к q g_q. В этом модуле член сцепления остаётся **мультипликативным** (в отличие от аддитивной формы Hansen):

$$q_u = c\,N_c\,F_{cs}F_{cd}\,i_c\,b_c\,g_c + q\,g_q$$

Формы коэффициентов сцепления при φ = 0 приведены в таблице: для наклона нагрузки $\mathbf{i_c = 1 - m\,h/(c\,N_c)}$, для наклона подошвы и поверхности грунта **1 − 2·угол/(π + 2)** (угол в радианах).

Если **h ≥ c**, подошва сдвигается, и модуль прекращает расчёт. При φ = 0 $F_{cs} = 1 + (B/L)/5.14$ ($N_q/N_c = 1/5.14$) и $F_{cd} = 1 + 0.4\,k$.

СЛУЧАИ φ = 0

Коэффициент	Значение
N_c	5.14
F_{cs}	1 + (B/L)/5.14
F_{cd}	1 + 0.4 k
i_c	1 − m h/(c N_c)
b_c	1 − 2η/(π + 2)
g_c	1 − 2ω/(π + 2)
g_q	(1 − tan ω)²

Условие

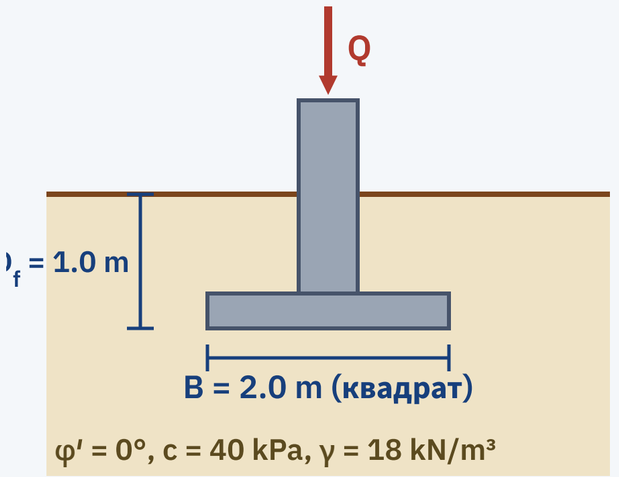
ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**квадратный B = L = 2 m, D_f = 1 m**
Грунт	**глина:** $\varphi = 0,\ c_u = 40$ kPa, $\gamma = 18$ kN/m^3**; грунтовых вод нет**
Случаи	**(a) вертикальная нагрузка · (b)** $v = 100,\ h = 10$ kPa **· (c)** $h = 10$ **и** $\eta = \omega = 10^\circ$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить значение q_u для каждого случая.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 (a) Вертикальная нагрузка: F_{cs} = 1 + 1/5.14; F_{cd} = 1 + 0.4(0.5); q = 18 kPa

$$q_u = 40(5.14)(1.195)(1.200) + 18 = 294.72 + 18 = \mathbf{312.72}\ \text{kPa}$$

2 (b) h = 10 kPa, c = 40 (m = 1.5)

$$i_c = 1 - \frac{1.5(10)}{40(5.14)} = \mathbf{0.927} \;\Rightarrow\; q_u = 273.22 + 18 = \mathbf{291.22}\ \text{kPa}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 (c) h = 10, η = ω = 10°: $b_c = g_c = 1 - 2(0.1745)/(\pi + 2) = 0.932$; $g_q = (1 - \tan 10°)^2$

$$q_u = 40(5.14)(1.195)(1.200)(0.927)(0.932)(0.932) + 18(0.678) = 237.4 + 12.2 = \mathbf{249.6}\ \text{kPa}$$

Состояние	c $N_c F_{cs} F_{cd} \cdot (i\ b\ g)$	q g_q	q_u (kPa)
(a) вертикальный	294.7	18.0	**312.7**
(b) h = 10	273.2	18.0	**291.2**
(c) h, η, ω	237.4	12.2	**249.6**

Одна лишь нагрузка h = 10 kPa снижает несущую способность на 7%, а совместно с h наклон подошвы и поверхности грунта снижают её на 20%. Аддитивная форма Hansen для того же вертикального случая даёт 305.84 kPa (презентация по Hansen): два метода различаются менее чем на 2%.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

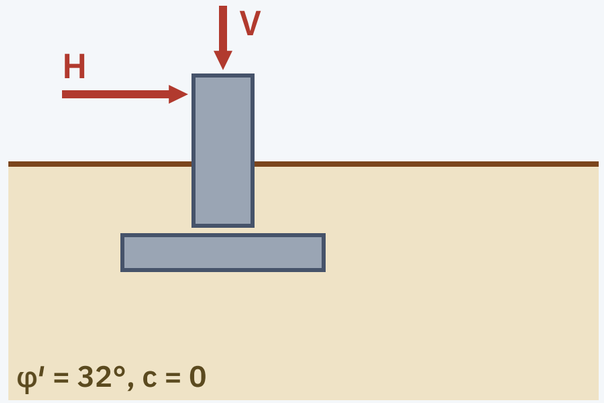
ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**квадратный фундамент, B = L = 1.2 m, глубина заложения D_f = 1.0 m**
Грунт	**песок:** $\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$
Удельный вес	$\gamma = 16$ kN/m^3 **(выше),** $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3 **(ниже УГВ)**
Грунтовые воды	**D_w = 0.5 m**
Случай нагружения	$v = 150$ kPa, $h = 30$ kPa**; для Meyerhof** $\beta = 11.31^\circ$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Сравнить по слагаемым значения q_u по двум уравнениям для вертикальной нагрузки и для данной наклонной нагрузки.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

Вертикальная нагрузка	Vesic	Meyerhof
слагаемое q	595.1	595.1
слагаемое γ	105.4	105.4
q_u (kPa)	**700.46**	**700.46**

При отсутствии наклона нагрузки, подошвы и поверхности грунта уравнение Vesic **полностью совпадает** с общим уравнением Meyerhof (700.46 kPa): расхождение у Vesic начинается только в случаях с наклоном. Это собственный путь проверки модуля.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

Наклонная нагрузка	Vesic (m = 1.5)	Meyerhof (β = 11.31°)
i_q / F_{qi}	0.716	0.764
i_γ / $F_{\gamma i}$	0.572	0.418
слагаемое q	425.8	454.9
слагаемое γ	60.3	44.1
q_u (kPa)	**486.1**	**499.0**



При наклонной нагрузке разница невелика: **2.6%** (у Vesic ниже). $F_{\gamma i}$ по Meyerhof снижает сильнее, F_{qi} — слабее; поскольку слагаемое q преобладает, результаты близки.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Резюме

Главное

Уравнение Vesic имеет ту же структуру, что и уравнение Hansen; оно принимает без изменений коэффициенты **формы по De Beer** и **глубины по Hansen**, а также $N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\varphi$

Собственный вклад: показатель наклона m, коэффициенты наклона подошвы b и наклона поверхности откоса g

Наклон: $i_q = (1 - h/(v + c\cot\varphi))^m$, $i_\gamma = (\ldots)^{m+1}$; $m = (2 + B/L)/(1 + B/L)$ ($h \parallel B$) или $(2 + L/B)/(1 + L/B)$ ($h \parallel L$); для ленточного фундамента $m_B = 2$, $m_L = 1$

Наклон подошвы $b_q = b_\gamma = (1 - \eta\tan\varphi)^2$; **наклон поверхности грунта** $g_q = g_\gamma = (1 - \tan\omega)^2$; при $\varphi > 0$ коэффициенты b_c, g_c находятся через коэффициент пригрузки, при $\varphi = 0$ равны $1 - 2\cdot$угол$/(\pi + 2)$

Ограничения: $h > v\tan\varphi + c$ — предупреждение о сдвиге; $h \geq v + c\cot\varphi$ (при $\varphi = 0$: $h \geq c$) — остановка; $\omega > \varphi$ — остановка

При $i = b = g = 1$ уравнение превращается в **общее уравнение Meyerhof**; **уровень грунтовых вод** изменяет только q и γ

Проверка: $q_{app} \leq q_{all,g}$, FS_{actual} и нетто; коэффициенты каждого метода используются вместе с его собственным N_γ

Список литературы

Полное уравнение несущей способности Везича — с показателем степени наклона нагрузки, зависящим от B/L, и его собственными коэффициентами наклона подошвы — приводится по работе Vesic, A.S., "Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1973, с аналогичным изложением в стандартных геотехнических справочниках (наряду со смежным уравнением Хансена — см. модуль Hansen в этом разделе). Замкнутое выражение Nγ, используемое во всём этом разделе, принадлежит Везичу, как изложено в Das, B.M., Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed., Cengage Learning, 2018 (Глава 16); коэффициенты глубины приняты по Хансену в изложении Das, B.M., Principles of Foundation Engineering, 8th ed., Cengage Learning, 2016 (Таблица 4.3). В тексте данной страницы «источник» обозначает первую из этих двух книг, а «второй источник» — вторую.

ПРИМЕЧАНИЕ

Все числовые примеры получены с помощью собственной библиотеки расчётов модуля; модуль даёт те же значения.

GeoTerva

Геотехнические расчёты онлайн

От теории к практике

Рассчитать фундамент из примера этой презентации в GeoTerva шаг за шагом: модуль открывается с этой моделью.

Открыть модуль →

Страница теории →

Открыть на телефоне
Для пробных модулей регистрация не требуется.