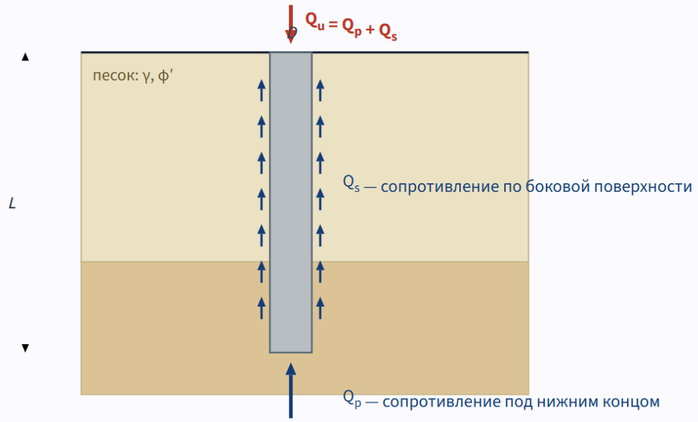
Презентация лекции по геотехнике · Свайные фундаменты

# Несущая способность сваи в песке

Лекция: сопротивление под нижним концом, сопротивление по боковой поверхности и критическая глубина. Теория каждого метода, затем пример расчёта.

Meyerhof (1976) | Vesic (1977) | Coyle и Castello (1981) | Примеры расчёта



Введение

# Что мы изучим на этой лекции?

Уметь объяснить, как свая передаёт нагрузку через **сопротивление под нижним концом** и **сопротивление по боковой поверхности**

Построение профиля **эффективного напряжения** в песке с учётом уровня воды

Расчёт сопротивления под нижним концом тремя методами: **Meyerhof**, **Vesic**, **Coyle и Castello**

Интерпретация сопротивления по боковой поверхности и роли **критической глубины** ($L'$)

Получение **допускаемой несущей способности** и совместная оценка результатов методов

ХОД ЛЕКЦИИ

Каждый метод излагается **в три шага**:

1 · **Теория**: как работает метод и почему именно так?

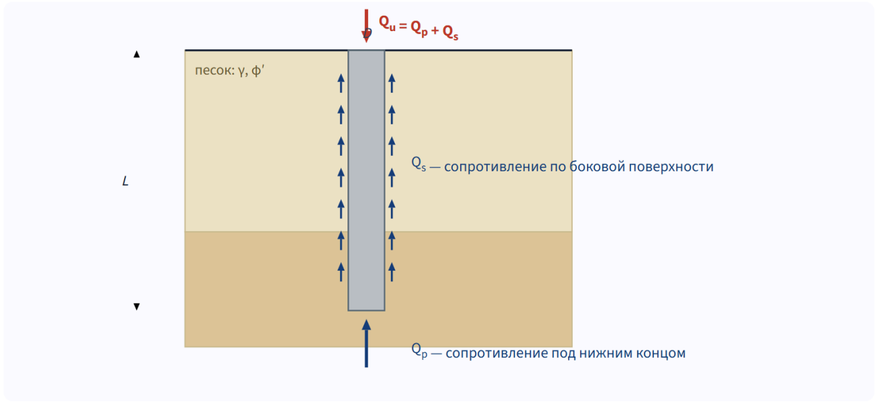
2 · **Условие**: дано и требуется определить

3 · **Решение**: пошагово, с числами

Все примеры выполняются для одной и той же сваи, что позволяет сравнивать методы между собой.

# Нагрузка передаётся двумя путями

ТЕОРИЯ




Свая передаёт нагрузку грунту **одновременно двумя путями**: грунт под нижним концом сваи сопротивляется за счёт **сопротивления под нижним концом** ($Q_p$), а песок вдоль боковой поверхности — за счёт **сопротивления по боковой поверхности** ($Q_s$).

$$Q_u = Q_p + Q_s \qquad Q_{all} = \frac{Q_u}{FS}$$

Сопротивление по боковой поверхности достигает полного значения при **малом** перемещении, а сопротивление под нижним концом — при **значительно большем** перемещении; обе составляющие не достигают максимума одновременно.

На этой лекции: **одиночная свая**, **песок** ($c' = 0$), забивная или буровая, постоянного сечения.

# В песке всё пропорционально эффективному напряжению

ТЕОРИЯ

В песке и **сопротивление под нижним концом**, и **удельное трение по боковой поверхности** пропорциональны эффективному вертикальному напряжению. Расчёт начинается с правильного определения значений $\sigma'_v$ по профилю.

$$\sigma'_v = \underbrace{\sum \gamma_i h_i}_{\text{выше УГВ}} + \underbrace{\sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w)\, h_i}_{\text{ниже УГВ}}$$

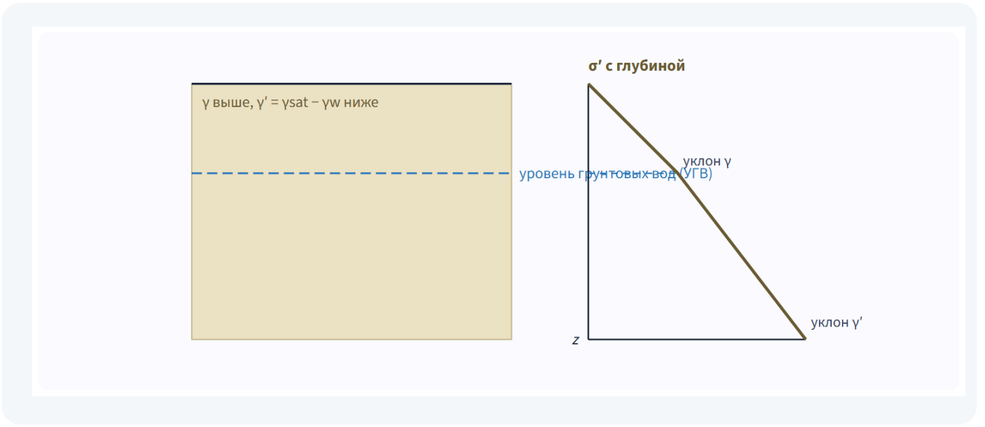
$\gamma$ : удельный вес влажного грунта (выше УГВ)

$\gamma_{sat}$ : удельный вес водонасыщенного грунта (ниже УГВ)

$\gamma_w = 9.81$ kN/m³ : удельный вес воды

УГВ: уровень грунтовых вод

> Ниже УГВ градиент напряжения **уменьшается**: $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$



# Условие

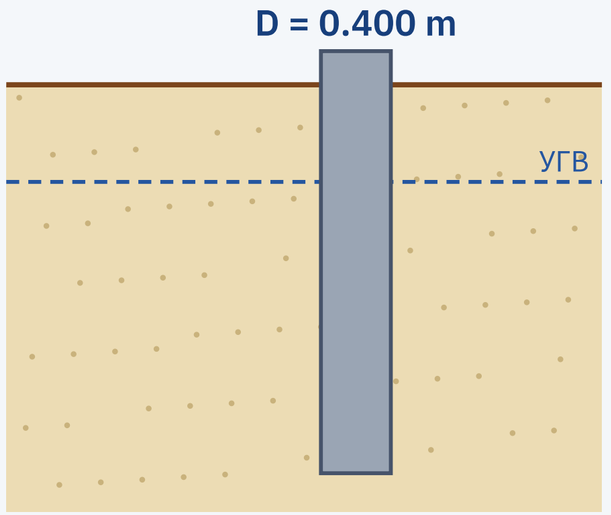
ПРИМЕР

**Дано**

| | |
|---|---|
| Песок, выше УГВ | $\gamma = 17$ kN/m$^3$ |
| Песок, ниже УГВ | $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m$^3$ |
| Глубина УГВ | **2.0 m** |
| Удельный вес воды | $\gamma_w = 9.81$ kN/m$^3$ |

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

**На глубине 8 m** определить полное вертикальное напряжение, поровое давление и **эффективное вертикальное напряжение**.



# Решение

РЕШЕНИЕ

**1** Полное вертикальное напряжение (выше УГВ — удельный вес влажного грунта, ниже — водонасыщенного)

$$\sigma_v = 17(2) + 19.5(6) = 34 + 117 = \mathbf{151.0}\ \text{kPa}$$

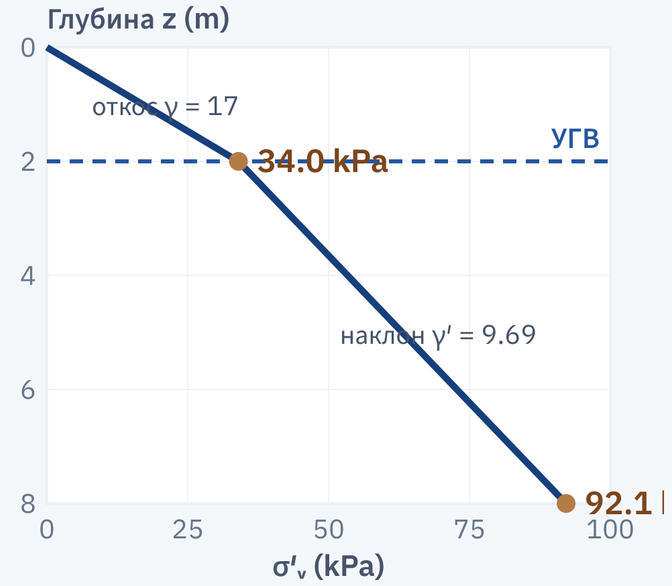
**2** Поровое давление (столб воды высотой 6 m ниже УГВ)

$$u = \gamma_w\, h_w = 9.81\,(6) = \mathbf{58.9}\ \text{kPa}$$

**3** Эффективное вертикальное напряжение

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = 151.0 - 58.9 = \mathbf{92.1}\ \text{kPa}$$

Тот же результат: $\sigma'_V = 17(2) + (19.5 - 9.81)(6) = \mathbf{92.1}$ **kPa**. Ниже УГВ эффективный удельный вес составляет 9.69 kN/m³.




Проверить решение в GeoTerva ↗

# Сопротивление под нижним концом: общее выражение

ТЕОРИЯ

Песок под нижним концом разрушается **по схеме потери несущей способности**, как под фундаментом; однако на глубине нижнего конца **бытовое напряжение** плотно обжимает песок.

В песке $c' = 0$, поэтому остаётся только член глубины (бытового давления). Так как диаметр сваи мал, член ширины ($0.5\gamma' D N_\gamma$) не учитывается:

$$q_p = \sigma'_v \, N_q^* \qquad Q_p = A_p \, q_p$$

$\sigma'_v$ : эффективное вертикальное напряжение на глубине нижнего конца

$N^*_q$ : коэффициент несущей способности для задачи о свае

$A_p$ : площадь нижнего конца сваи

### ОТКУДА БЕРЁТСЯ $N^*_q$? ТРИ ПОДХОДА

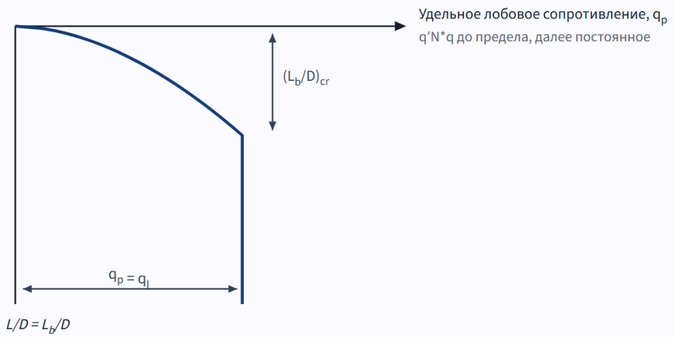
**Meyerhof (1976)**: $N^*_q$ зависит только от $\varphi'$; $q_p$ ограничивается **предельным значением**

**Vesic (1977)**: теория расширения полости; учитывается также **жёсткость** песка

**Coyle и Castello (1981)**: подобрано по 24 натурным испытаниям нагрузкой; $N^*_q$ зависит также от L/D

# Сопротивление под нижним концом не растёт бесконечно

ТЕОРИЯ




В однородном песке удельное сопротивление под нижним концом растёт с относительным заглублением и достигает **максимума** при $\mathbf{(L_b/D)_{cr}}$; далее остаётся постоянным ($q_l$).

**VESIC (1970) · ИСПЫТАНИЕ СВАИ НАГРУЗКОЙ НА РЕКЕ OGEECHEE (D = 0.457 m)**

| L (m) | L/D | $q_p$ (kN/m²) |
|---|---|---|
| 3.02 | 6.61 | 3 304 |
| 6.12 | 13.39 | 9 365 |
| 8.87 | 19.40 | 11 472 |
| 12.00 | 26.26 | 11 587 |
| 15.00 | 32.82 | 13 971 |

Наибольшее значение $q_p$ составляет примерно **12 000 kN/m²**

$(L/D)_{cr}$ приблизительно **16 – 18**

Для среднего $N_{60} \approx 30$: $4p_aN_{60} = 4(100)(30) = 12\,000$ kN/m²: **корреляция согласуется с измеренным плато**

# Meyerhof: N*q по φ′, с ограничением

ТЕОРИЯ

Meyerhof принимает $N^*_q$ только по **углу внутреннего трения** (по собственной номограмме, ниже). Вычисленное $q_p$ не может превышать **предельного значения**:

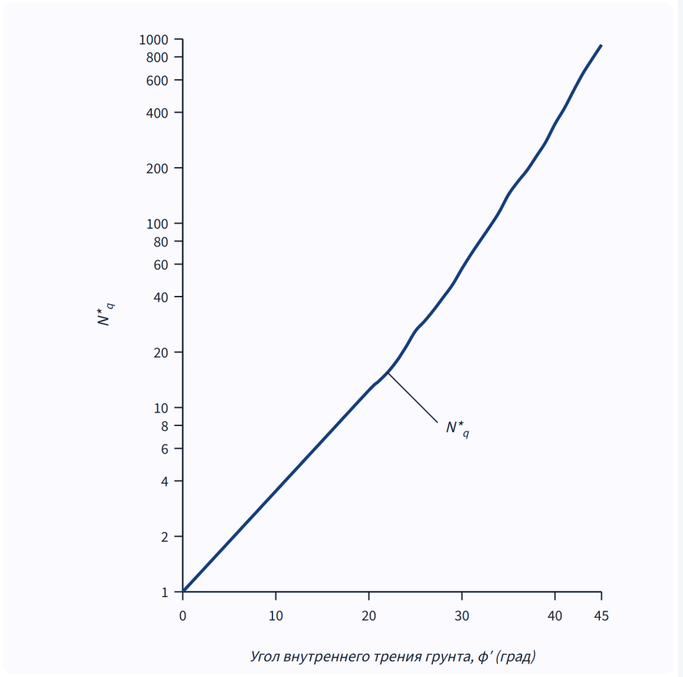
$$q_p = \sigma'_v N^*_q \leq q_l \qquad q_l = 0.5\, p_a\, N^*_q \tan\varphi'$$

$p_a$ = 100 kN/m² : атмосферное давление

φ′ : эффективный угол трения песка на уровне нижнего конца

### ЗНАЧЕНИЯ $N^*_q$ (ГРАФИК MEYERHOF; РЯД, ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ МОДУЛЕМ)

| φ′ (°) | 20 | 25 | 30 | 32 | 34 | 35 | 36 | 38 | 40 | 42 | 45 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $N^*_q$ | 12.4 | 26.0 | 56.7 | 81.0 | 115.0 | 143.0 | 168.0 | 231.0 | 346.0 | 525.0 | 930.0 |




Для φ′ = 35° $N^*_q$ = 143.0 и $q_l$ = 5,006 kPa; в песке с γ = 18 kN/m³ этот предел достигается на глубине около **1.9 m**

# Meyerhof: пошаговый расчёт и смысл предела

ТЕОРИЯ

## ШАГИ РАСЧЁТА

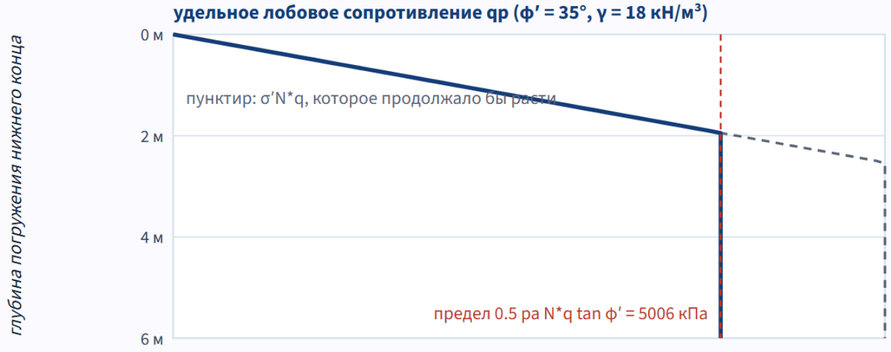
**1.** Рассчитать $\sigma'_v$ на уровне нижнего конца

**2.** Определить значение $N^*_q$ для $\varphi'$ по графику или таблице

**3.** $q_p = \sigma'_v N^*_q$

**4.** $q_l = 0.5\, p_a\, N^*_q \tan\varphi'$

**5.** $q_p = \min(\sigma'_v N^*_q, q_l)$ и $Q_p = A_p q_p$




Кривая следует прямой $\sigma' N^*_q$ **до тех пор, пока не станет определяющим предельное значение**; далее остаётся горизонтальной. Без предела $q_p$ неограниченно росло бы с глубиной, чего полевые испытания не показывают.

# Условие

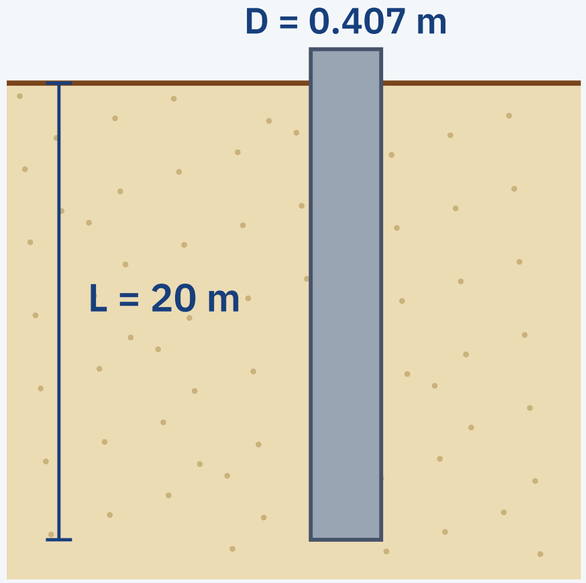
ПРИМЕР

**Дано**

| | |
|---|---|
| Свая | **железобетонная, забивная, квадратного сечения** |
| Размер сечения | **D = 0.407 m** |
| Длина | **L = 20 m** |
| Песок (однородный) | $\gamma = 18$ kN/m$^3$, $\varphi' = 35^\circ$ |
| Грунтовые воды | **нет** |

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить **сопротивление под нижним концом** сваи $Q_p$ по методу **Meyerhof (1976)**.



# Решение

РЕШЕНИЕ

**1** Площадь сечения и эффективное напряжение на нижнем конце

$$A_p = 0.407^2 = 0.1656\ \text{m}^2 \qquad \sigma'_v = \gamma L = 18(20) = 360\ \text{kPa}$$

**2** Значение N*q (φ′ = 35°, таблица Meyerhof) и σ′N*q

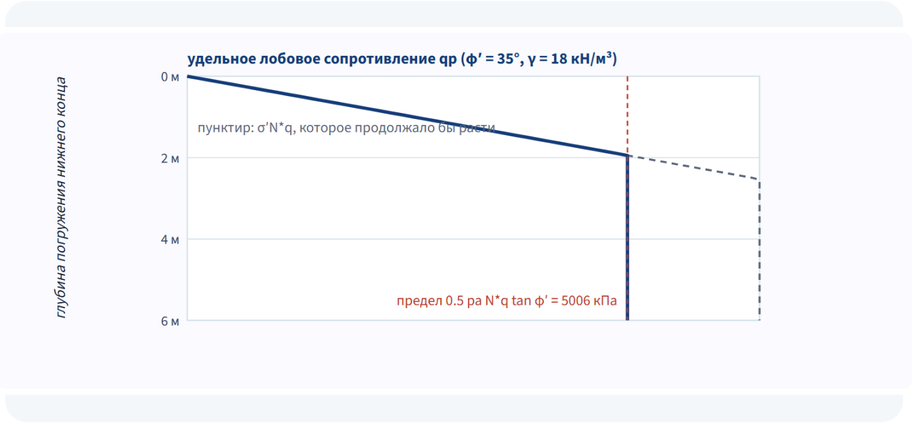
$$N_q^* = 143.0 \qquad \sigma'_v N_q^* = 360(143.0) = 51{,}480\ \text{kPa}$$

**3** Предельное значение

$$q_l = 0.5\, p_a N_q^* \tan\varphi' = 0.5(100)(143.0)\tan 35^\circ = 5{,}006\ \text{kPa}$$

**4** Удельное сопротивление под нижним концом: меньшее из двух значений; определяет ограничение

$$q_p = \min(51{,}480;\ 5{,}006) = \mathbf{5{,}006}\ \text{kPa}$$




$Q_p = A_p\, q_p = 0.1656 \times 5{,}006 =$ **829 kN**. Без ограничения получилось бы около 8,528 kN.

Проверить решение в GeoTerva ↗

# Vesic: песок под нижним концом расширяется, как полость

ТЕОРИЯ

Vesic выводит сопротивление под нижним концом **из теории расширения полости**: остриё расширяет полость в окружающем грунте; поэтому в ответе участвует не только **прочность** песка, но и его **жёсткость**.

$$Q_p = A_p \, \bar{\sigma}'_o \, N^*_\sigma$$

Здесь $\bar{\sigma}'_o$ — не **вертикальное**, а **среднее эффективное нормальное напряжение** на уровне нижнего конца:

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{1 + 2K_o}{3} \, q' \qquad K_o = 1 - \sin\varphi'$$

$K_o$: коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя

$q'$: эффективное вертикальное напряжение на уровне нижнего конца ($= \sigma'_v$)

### СВЯЗЬ С MEYERHOF

$$N^*_\sigma = \frac{3 \, N^*_q}{1 + 2K_o}$$

Вид уравнения такой же, как у Meyerhof; два метода различаются **тем, из чего получен коэффициент**, а не видом уравнения.

# Vesic: редуцированный индекс жёсткости

ТЕОРИЯ

$N^*_\sigma$ зависит от **приведённого индекса жёсткости** $I_{rr}$ песка и от $\varphi'$; $I_{rr}$ учитывает также изменение объёма в пластической зоне:

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r\,\Delta} \qquad I_r = \frac{E_s}{2(1+\mu_s)\,q'\tan\varphi'} = \frac{G_s}{q'\tan\varphi'}$$

$E_S$ : модуль упругости грунта, $\mu_S$ : коэффициент Пуассона, $G_S$ : модуль сдвига

$\Delta$ : средняя объёмная деформация в пластической зоне под нижним концом

### ПРАКТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ (CHEN И KULHAWY, 1994; 25° ≤ φ′ ≤ 45°)

$$\frac{E_s}{p_a} = m \qquad \mu_s = 0.1 + 0.3\,\frac{\varphi' - 25}{20} \qquad \Delta = 0.005\left(1 - \frac{\varphi' - 25}{20}\right)$$

### ЕДИНСТВЕННЫЙ ВХОДНОЙ ПАРАМЕТР: $m = E_s / p_a$

| Песок | m |
|---|---|
| рыхлый | 100 – 200 |
| средней плотности | 200 – 500 |
| плотный | 500 – 1000 |

Индекс жёсткости, как правило, **75 – 150** (песок с относительной плотностью 50 – 80%)

При наличии CPT: $I_r = 300/F_r(\%)$ (механический конус), $170/F_r(\%)$ (электрический конус)

# Vesic: шаг за шагом

ТЕОРИЯ

## ШАГИ РАСЧЁТА

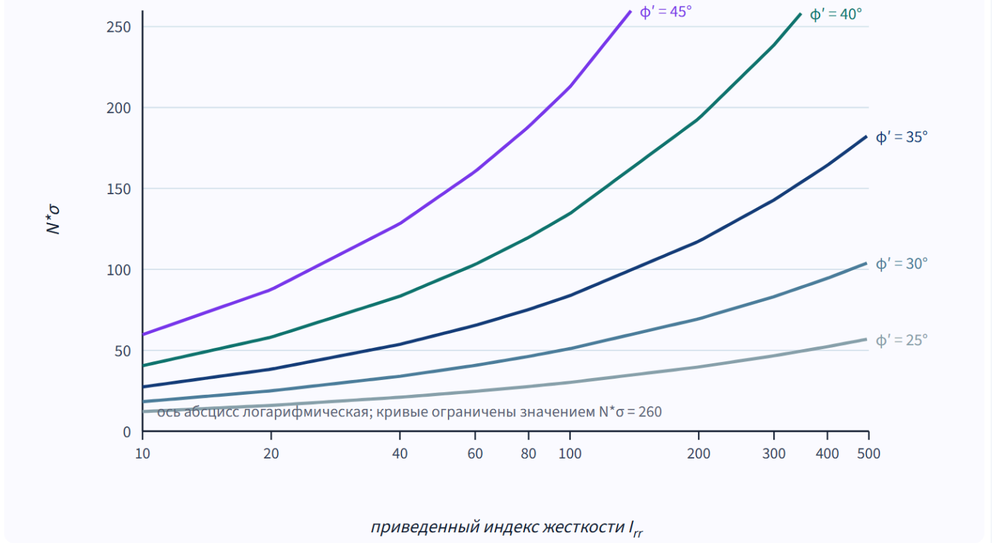
**1.** $K_o = 1 - \sin\varphi'$ и $\sigma'_o = (1 + 2K_o)q'/3$

**2.** $E_s = m \cdot p_a$, $\mu_s$, $I_r$

**3.** $\Delta$ и $I_{rr} = I_r/(1 + I_r\Delta)$

**4.** $N^*_\sigma$ по $\varphi'$ и $I_{rr}$ (из таблицы, логарифмическая интерполяция)

**5.** $q_p = \sigma'_o N^*_\sigma$ и $Q_p = A_p q_p$




Для каждого $\varphi'$ — своя кривая: **$N^*_\sigma$ растёт с ростом жёсткости**; плотный и жёсткий песок даёт гораздо большее сопротивление под нижним концом, чем рыхлый.

# Условие

ПРИМЕР

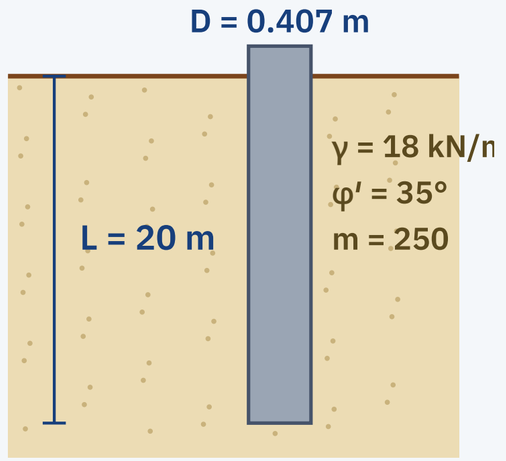
**Дано**

| | |
|---|---|
| Свая | **Как в примере 2: D = 0.407 m, L = 20 m** |
| Песок | $\gamma = 18$ kN/m$^3$, $\varphi' = 35^\circ$ |
| Грунтовые воды | **нет** |
| Отношение модулей упругости | $m = E_s/p_a = 250$ **(средней плотности – плотный)** |
| Атмосферное давление | $p_a = 100$ kPa |

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить **сопротивление под нижним концом** сваи $Q_p$ по методу **Vesic (1977)**.

Эффективное напряжение у нижнего конца:
q′ = 18(20) = 360 kPa



# Решение (1/3)

РЕШЕНИЕ

**1** Коэффициент давления покоя и среднее эффективное нормальное напряжение

$$K_o = 1 - \sin 35^\circ = 0.426 \qquad \bar{\sigma}'_o = \frac{1 + 2(0.426)}{3}(360) = \mathbf{222.3}\ \text{kPa}$$

**2** Свойства грунта

$$E_s = m\,p_a = 250(100) = 25{,}000\ \text{kPa} \quad \mu_s = 0.1 + 0.3\frac{35 - 25}{20} = 0.25$$

**3** Индекс жёсткости и объёмная относительная деформация

$$I_r = \frac{25{,}000}{2(1 + 0.25)(360)\tan 35^\circ} = \mathbf{39.7} \qquad \Delta = 0.005\left(1 - \frac{35 - 25}{20}\right)\frac{360}{100} = 0.0090$$

# Решение (2/3)

РЕШЕНИЕ

**4** Приведённый индекс жёсткости

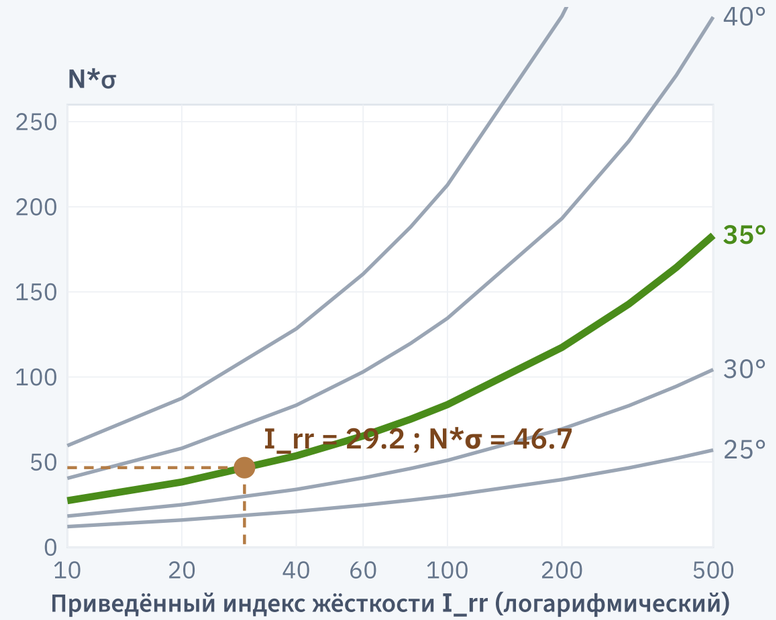
$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta} = \frac{39.7}{1 + (39.7)(0.0090)} = \mathbf{29.2}$$

**5** N*σ: в таблице строка φ′ = 35°, логарифмическая интерполяция между 20 и 40 для $I_{rr}$ = 29.2

$$N_\sigma^* = 38.32 + \frac{\log 29.2 - \log 20}{\log 40 - \log 20}(53.67 - 38.32)$$

$$= \mathbf{46.7}$$

На графике зелёная кривая — φ′ = 35°: в точке её пересечения с вертикальной линией $I_{rr}$ = 29.2 получаем **$N^*_\sigma \approx 46.7$**.



# Решение (3/3)

РЕШЕНИЕ

**6** Удельное сопротивление под нижним концом

$$q_p = \bar{\sigma}'_o N^*_\sigma = 222.3(46.7) = \mathbf{10{,}389}\ \text{kPa}$$

**7** Сопротивление под нижним концом

$$Q_p = A_p\, q_p = 0.1656(10{,}389) = \mathbf{1{,}721}\ \text{kN}$$

Для той же сваи: **Meyerhof: 829 kN**, **Vesic: 1,721 kN**. Поскольку Vesic учитывает жёсткость песка (m = 250), он даёт примерно в 2.1 раза больше ограниченного значения по Meyerhof.

Проверить решение в GeoTerva ↗

# Coyle и Castello: эмпирический N*q

ТЕОРИЯ

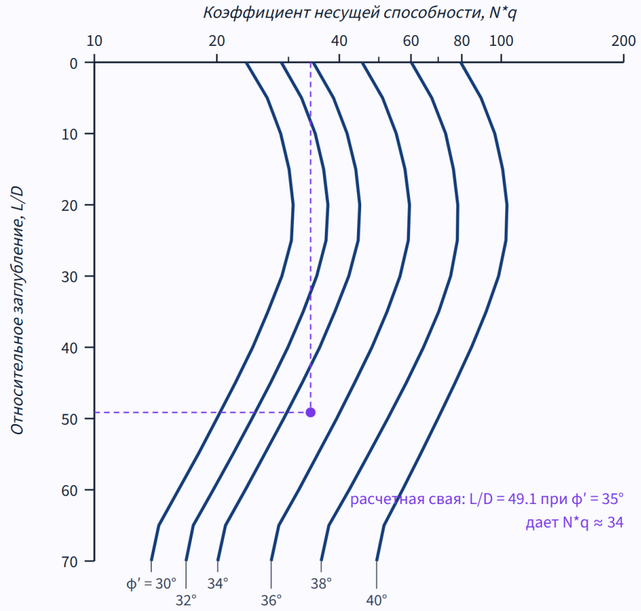
Coyle и Castello изучили **24 крупномасштабных полевых испытания забивных свай нагрузкой** и предложили для песка следующую зависимость:

$$Q_p = q' \, N_q^* \, A_p$$

q′ — эффективное вертикальное напряжение на уровне нижнего конца; $N^*_q$ помимо φ′ зависит и от **относительного заглубления L/D** (график — сбоку).

Коэффициент **намного меньше**, чем у Meyerhof: при φ′ = 35° и глубокой свае около **34** против **143** у Meyerhof. Причина в том, что он подогнан не под механизм разрушения, а под **измеренные значения несущей способности**.

Когда относительное заглубление превышает примерно 20, коэффициент **уменьшается**: более длинная свая того же диаметра получает меньшее $N^*_q$.



# Условие

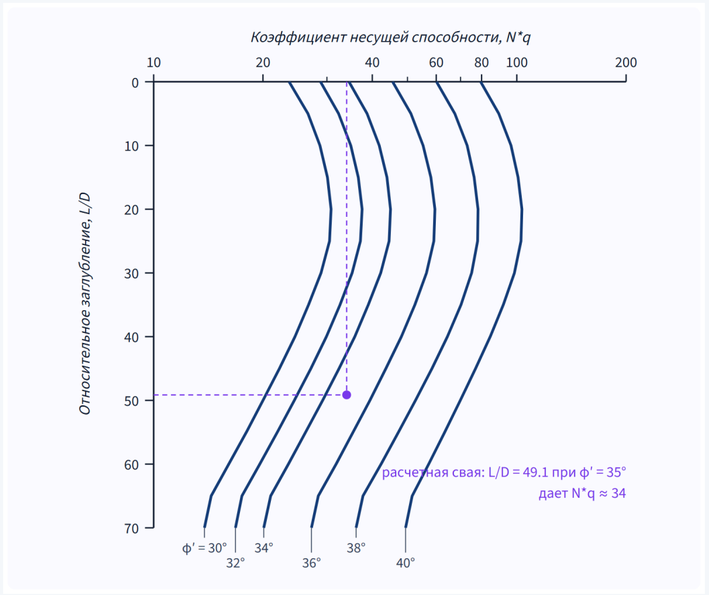
ПРИМЕР

## Дано

| | |
|---|---|
| Свая и песок | **Как в примере 2: L = 20 m, D = 0.407 m, φ′ = 35°, γ = 18 kN/m³** |
| Относительное заглубление | $L/D = 20/0.407 = 49.1$ |
| Коэффициент, считанный по номограмме | $N_q^* \approx 34$ **(Рис. 7; φ′ = 35°, L/D ≈ 49)** |

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Найти **сопротивление под нижним концом** $Q_p$ сваи по методу **Coyle и Castello (1981)**.



# Решение

РЕШЕНИЕ

**1** Эффективное напряжение на нижнем конце и коэффициент (по номограмме, приближённый отсчёт)

$$q' = \gamma L = 18(20) = 360 \text{ kPa} \qquad N_q^* \approx 34$$

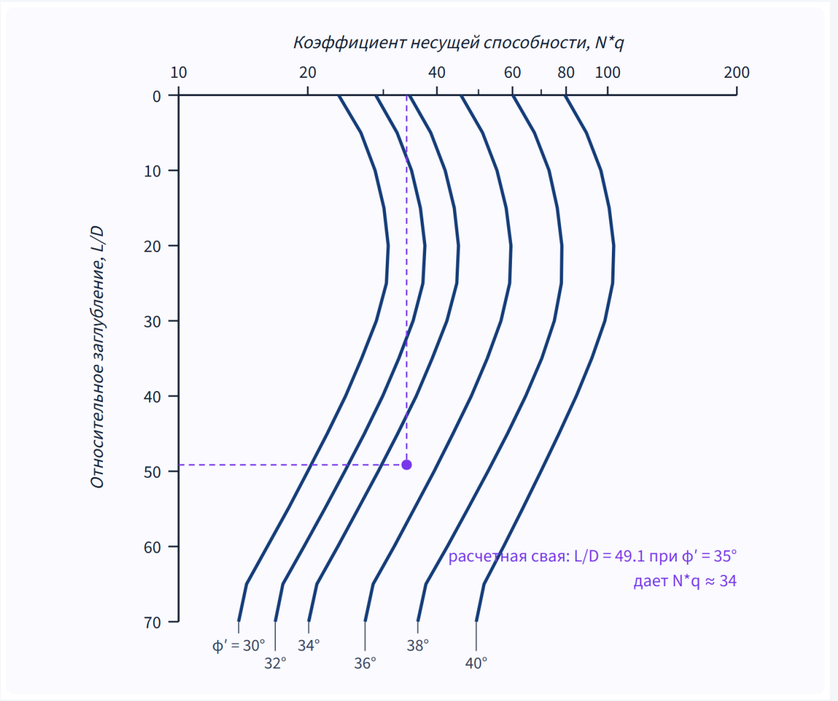
**2** Удельное сопротивление под нижним концом

$$q_p = q' N_q^* = 360(34) = 12{,}240 \text{ kPa}$$

**3** Сопротивление под нижним концом

$$Q_p = A_p q_p = 0.1656(12{,}240) = \mathbf{2{,}028} \text{ kN}$$

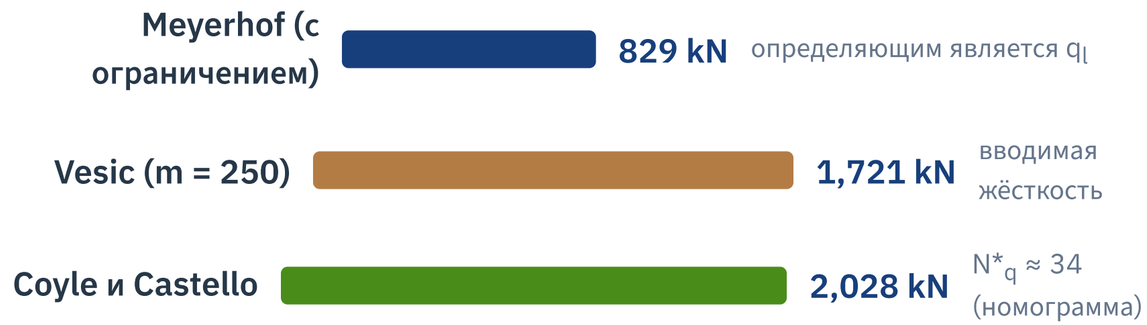
Значение $N^*_q$, снятое с графика, является приближённым; в зависимости от φ′ и L/D оно может изменяться на ±1 – 2 единицы. Результат — наибольшее из трёх методов: **2,028 kN**.




Проверить решение в GeoTerva ↗

# Три метода, одна и та же свая

ТЕОРИЯ




Поскольку методы опираются на **различные допущения**, результаты также расходятся. Диапазон — честный показатель того, насколько достоверно может быть известно сопротивление под нижним концом.

**Meyerhof**: из-за предельного значения **консервативен**

**Vesic**: плотность песка явно вводится через **m**

**Coyle–Castello**: основан на измеренных данных по забивным сваям; отсчёт по номограмме приближённый

**На практике** рассчитываются не менее двух методов, анализируется диапазон значений, и при отсутствии **испытания нагрузкой** или местного опыта выбирается значение, близкое к осторожной границе.

# Сопротивление по боковой поверхности: f = K σ′ tanδ′

ТЕОРИЯ

Сопротивление по боковой поверхности сваи — это суммарное удельное трение вдоль её боковой поверхности:

$$Q_s = \sum p\,\Delta L\,f$$

Удельное трение f записывается как функция глубины следующим образом (L′ — критическая глубина):

$$f = K\,\sigma'_o \tan\delta' \quad (0 \le z \le L')$$
$$f = f_{z=L'} \quad (L' \le z \le L)$$

p : периметр сечения сваи, ΔL : длина, на которой p и f принимаются постоянными

K : коэффициент эффективного бокового давления грунта, $\sigma'_o$ : эффективное вертикальное напряжение на данной глубине

δ′ : угол трения грунта о сваю (обычно 0.5φ′ – 0.8φ′)

### ЗНАЧЕНИЯ K (ПО ТИПУ СВАИ)

| Тип сваи | K |
|---|---|
| Буровая или с подмывом | ≈ Ko = 1 – sin φ′ |
| Забивная с малым вытеснением грунта | ≈ от Ko до 1.4Ko = 1.4(1 – sin φ′) |
| Забивная с большим вытеснением грунта | ≈ от Ko до 1.8Ko = 1.8(1 – sin φ′) |

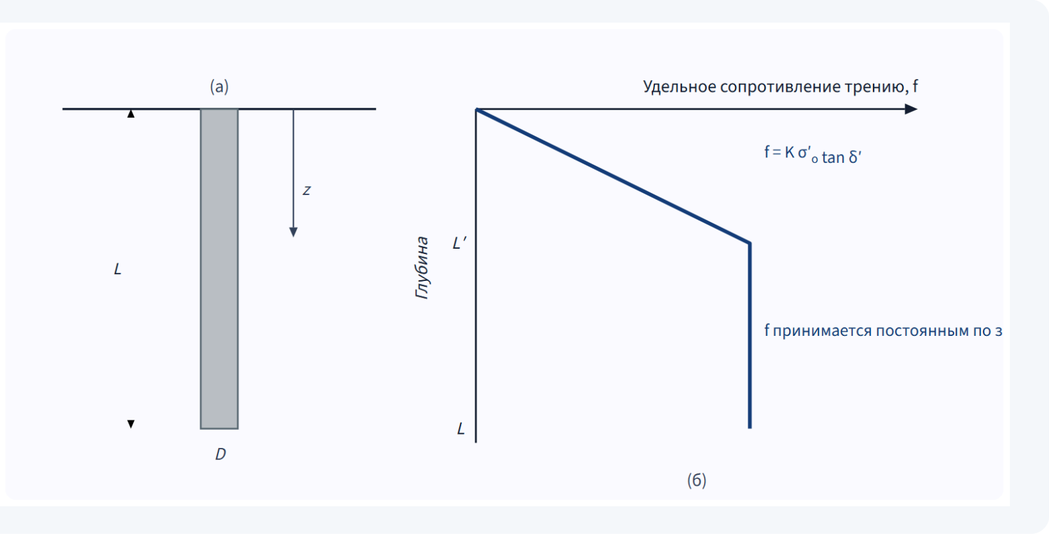
**Забивка** уплотняет песок вокруг сваи (примерно до 2.5D)

Свая с большим вытеснением грунта воспринимает большее трение, чем свая с малым вытеснением

**Буровые/погружаемые с подмывом** сваи дают меньшее трение, чем забивные

# Критическая глубина: почему трение не возрастает?

ТЕОРИЯ




Измеренное трение не растёт с глубиной **бесконечно**, как эффективное напряжение; оно растёт примерно до **критической глубины**, а затем остаётся постоянным.

$$L' \approx 15\,D$$

Обычное объяснение — **арочный эффект**: песок вокруг боковой поверхности не передаёт на сваю всё бытовое напряжение. Ниже L′ модуль **сохраняет эффективное напряжение равным его значению на глубине L′**; удельное трение остаётся постоянным до нижнего конца.

> Источник даёт для L′ значение 15D – 20D; консервативное значение — **15D**

# Условие

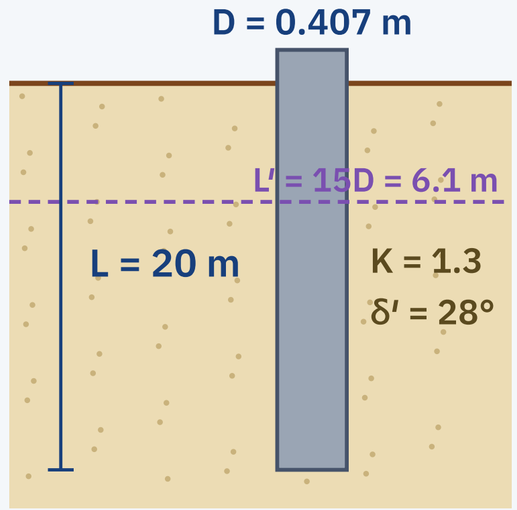
ПРИМЕР

## Дано

| | |
|---|---|
| Свая и песок | **Как в примере 2: L = 20 m, D = 0.407 m, γ = 18 kN/m³** |
| Периметр | $p = 4D = 4(0.407) = 1.628$ m |
| Коэффициенты | $K = 1.3$ **(забивная, с большим вытеснением грунта),** $\delta' = 28^\circ$ **(**$\approx 0.8\varphi'$**)** |

## ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

С учётом критической глубины (L′ = 15D) определить **сопротивление по боковой поверхности** $Q_s$ сваи.



# Решение

РЕШЕНИЕ

**1** Критическая глубина и напряжение на этой глубине

$$L' = 15D = 15(0.407) = \mathbf{6.105}\ \text{m} \qquad \sigma'(L') = 18(6.105) = 109.9\ \text{kPa}$$

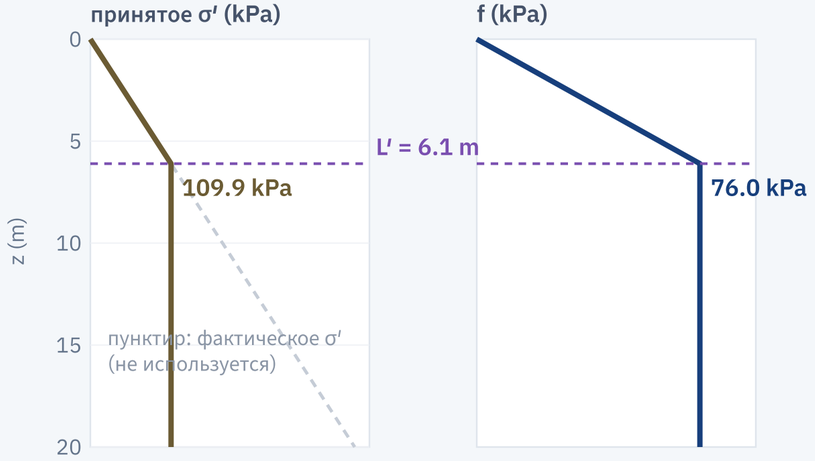
**2** L′ и удельное трение у нижнего конца (постоянное ниже L′)

$$f_{L'} = K\,\sigma'(L')\tan\delta' = 1.3(109.9)\tan 28^\circ = \mathbf{76.0}\ \text{kPa}$$

**3** $Q_S$: площадь треугольника (0 – L′) + прямоугольника (L′ – L), умноженная на периметр

$$Q_s = p\left[\tfrac{1}{2}f_{L'}L' + f_{L'}(L - L')\right]$$
$$= 1.628\left[\tfrac{1}{2}(76.0)(6.10) + (76.0)(13.89)\right]$$

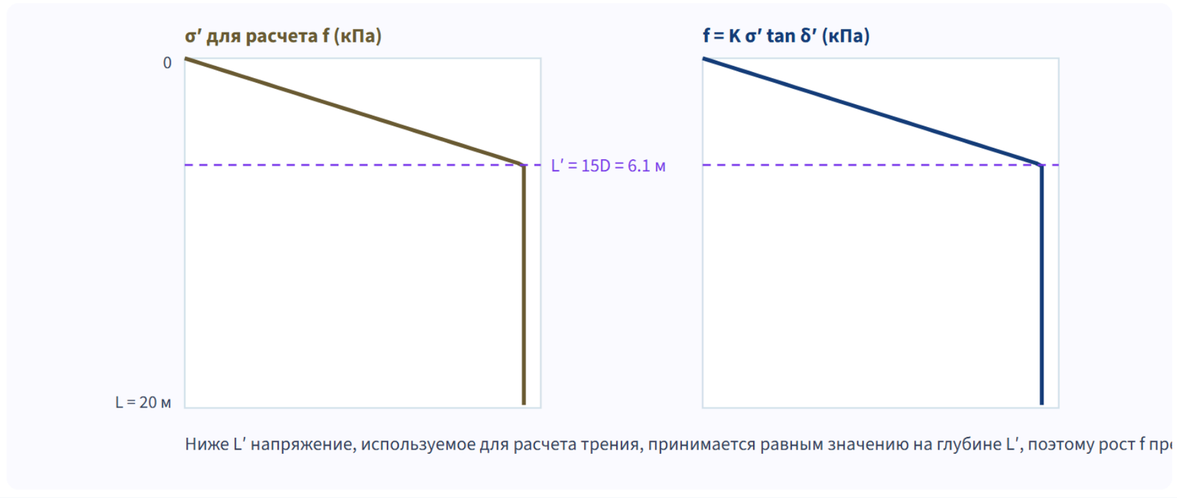
$Q_S$ = 1,628 [231.9 + 1,055.4] = **2,096 kN**.




Проверить решение в GeoTerva ↗

# Что произойдёт, если забыть о критической глубине?

ТЕОРИЯ




Рассчитаем ту же сваю **без учёта L′**, как если бы напряжение линейно росло до нижнего конца:

$$f_L = 1.3(360)\tan 28^\circ = 248.8 \text{ kPa}$$
$$Q_s = p\,\tfrac{1}{2} f_L L = 4{,}051 \text{ kN}$$

**2,096 kN** вместо **4,051 kN**: **превышение примерно на 93%**. Пренебрежение критической глубиной в длинной свае приводит к большой ошибке в небезопасную сторону.

# Coyle и Castello: по единому среднему напряжению

ТЕОРИЯ

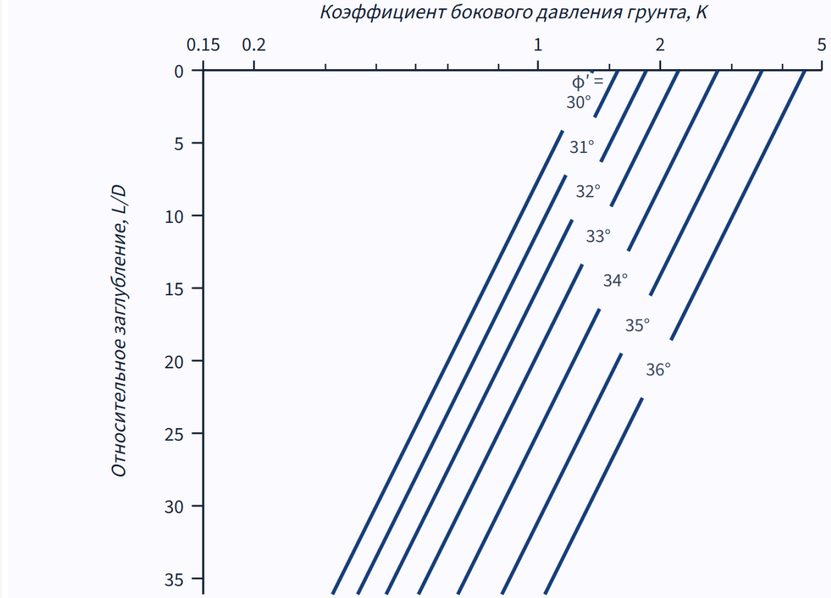
Coyle и Castello предложили вычислять сопротивление по боковой поверхности **за один шаг по среднему эффективному напряжению на заглублённой длине**:

$$Q_s = f_{av}\, p\, L = (K\, \bar{\sigma}'_o \tan\delta')\, p\, L$$
$$\delta' = 0.8\varphi'$$

K определяется по результатам испытаний и снимается с графика (рядом) по **L/D** и φ′.

**Отдельной критической глубины нет**: эту роль выполняет осреднение

Поэтому два метода по периметру могут давать **большие расхождения для длинных свай**



# Условие

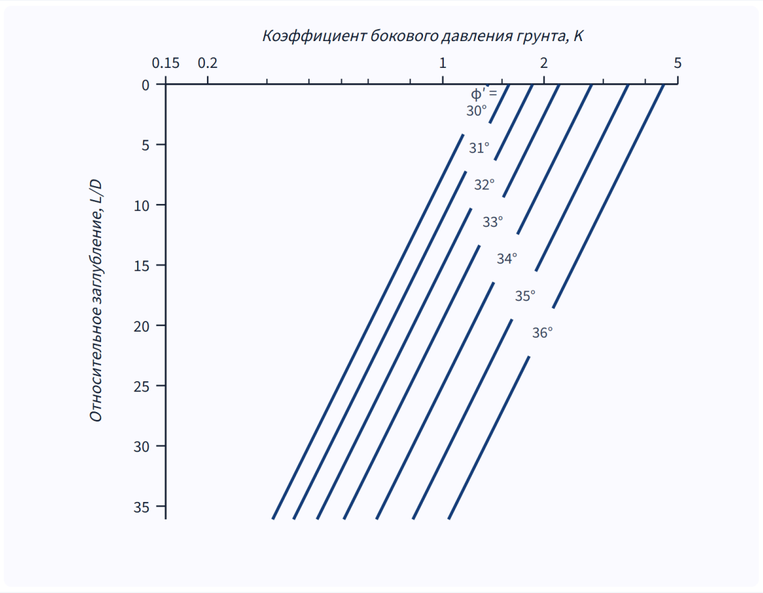
ПРИМЕР

**Дано**

| | |
|---|---|
| Свая и песок | **Как в примере 2: L = 20 m, D = 0.407 m, φ′ = 35°, γ = 18 kN/m³** |
| Коэффициент | $K \approx 0.41$ **(рис. 10; номограмма построена до L/D = 36, для L/D ≈ 49 кривая считывается путём продления; в модуле это значение вводится в поле K, модуль заполняет 0.48 по собственному считыванию номограммы)** |
| Угол трения | $\delta' = 0.8\varphi' = 0.8(35^\circ) = 28^\circ$ |

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить **сопротивление по боковой поверхности** $Q_s$ сваи по методу **Coyle и Castello (1981)**.



# Решение

РЕШЕНИЕ

**1** Среднее эффективное напряжение по длине сваи (однородный песок, УГВ отсутствует)

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{\gamma L}{2} = \frac{18(20)}{2} = \mathbf{180}\ \text{kPa}$$

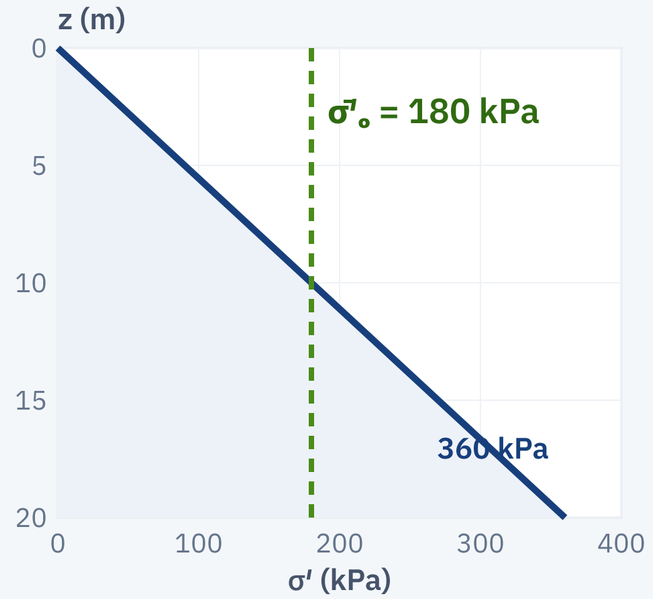
**2** Среднее удельное трение по боковой поверхности

$$f_{av} = K\,\bar{\sigma}'_o \tan\delta' = 0.41(180)\tan 28^\circ = \mathbf{39.2}\ \text{kPa}$$

**3** Сопротивление по боковой поверхности

$$Q_s = f_{av}\,p\,L = 39.2(1.628)(20) = \mathbf{1{,}278}\ \text{kN}$$

Метод K–δ′ (с L′) даёт **2,096 kN**, Coyle–Castello — **1,278 kN**: для этой длинной сваи разница между ними составляет около 64%.




Проверить решение в GeoTerva ↗

# Сумма с единым коэффициентом запаса

ТЕОРИЯ

Предельная несущая способность равна сумме двух составляющих; допускаемая несущая способность находится применением **единого коэффициента запаса ко всей этой сумме**:

$$Q_{all} = \frac{Q_p + Q_s}{FS}$$

Для одиночной сваи обычно **FS = 2.5 – 4**

Если грунт известен лишь по нескольким скважинам или несущая способность определяется главным образом **нижним концом**, выбирается верхняя граница

Методы для нижнего конца и боковой поверхности могут выбираться **независимо** друг от друга; результаты интерпретируются совместно

# Условие

ПРИМЕР

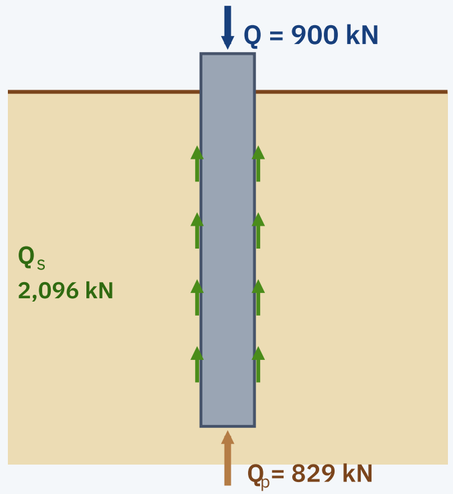
**Дано**

| | |
|---|---|
| Сопротивление под нижним концом | **$Q_p$ = 829 kN (Meyerhof, Пример 2)** |
| Сопротивление по боковой поверхности | **$Q_s$ = 2,096 kN (K–δ′, пример 5)** |
| Коэффициент запаса | **FS = 3** |
| Рабочая нагрузка на сваю | **Q = 900 kN** |

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Чему равна **допускаемая несущая способность** сваи $Q_{all}$?

**Достаточна** ли рабочая нагрузка?



# Решение

РЕШЕНИЕ

**1** Предельная несущая способность

$$Q_u = Q_p + Q_s = 829 + 2{,}096 = \mathbf{2{,}925}\ \text{kN}$$

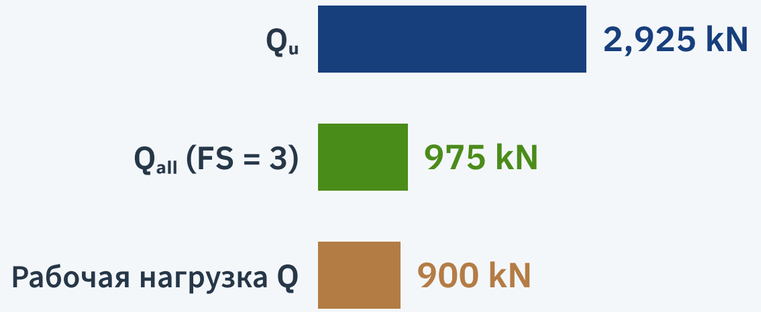
**2** Допускаемая несущая способность

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{2{,}925}{3} = \mathbf{975}\ \text{kN}$$

**3** Проверка

$$Q = 900\ \text{kN} \ \leq \ Q_{all} = 975\ \text{kN} \quad \Rightarrow \quad \text{достаточно}$$

Коэффициент использования $Q$ / $Q_{all}$ = 900 / 975 = **0.92**.




Проверить решение в GeoTerva ↗

# Та же свая: $Q_u$ и $Q_{all}$ (FS = 3)

ТЕОРИЯ

$Q_u$ · $Q_{all}$ (kN)

| | $Q_s$: K–δ′ (c L′) **2,096 kN** | $Q_s$: Coyle–Castello **1,278 kN** |
|---|---|---|
| $Q_p$: **Meyerhof** 829 kN | 2,925 · **975** | 2,107 · **702** |
| $Q_p$: **Vesic** 1,721 kN | 3,817 · **1,272** | 2,999 · **1,000** |
| $Q_p$: **Coyle–Castello** 2,028 kN | 4,123 · **1,374** | 3,305 · **1,102** |

Для двадцатиметровой сваи два метода для боковой поверхности и три метода для нижнего конца дают шесть различных значений $Q_u$: **2,107 – 4,123 kN**. Выбор сочетания — это **инженерное решение**.

**Интерпретировать** диапазон, а не опираться на одно число

Сопротивление по боковой поверхности — большая часть суммарного: решающим является выбор **критической глубины**

По возможности проверить **испытанием сваи нагрузкой**

Резюме

# Главное

$Q_u = Q_p + Q_s$; в песке обе составляющие зависят от **эффективного напряжения**

**Meyerhof**: $N^*_q$ по $\varphi'$, $q_p$ ограничено ($q_l = 0.5 p_a N^*_q \tan\varphi'$)

**Vesic**: $\sigma'_o N^*_\sigma$; учитывается жёсткость песка (m, $I_{rr}$)

**Coyle и Castello**: $N^*_q(\varphi', L/D)$ и $K(\varphi', L/D)$, подобранные по измеренным значениям несущей способности

Трение по боковой поверхности: $f = K\sigma'\tan\delta'$, постоянно ниже **$L' \approx 15D$**

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$, $FS = 2.5 – 4$

# Список литературы

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning; эта страница основана на данном источнике.

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), 197–228.

Vesic, A.S. (1977). Design of Pile Foundations. NCHRP Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board.

Coyle, H.M. and Castello, R.R. (1981). New design correlations for piles in sand. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(GT7), 965–986.

**ПРИМЕЧАНИЕ**

Рисунки в этой презентации взяты со страницы теории GeoTerva; все числовые примеры получены с помощью собственной расчётной библиотеки модуля, и модуль даёт те же значения.

GeoTerva

Геотехнические расчёты онлайн

# От теории к практике

Пошагово рассчитать в GeoTerva пример сваи из этой презентации: числа совпадают.

Открыть модуль →

Страница теории →

**Открыть на телефоне**
Для пробных модулей регистрация не требуется.