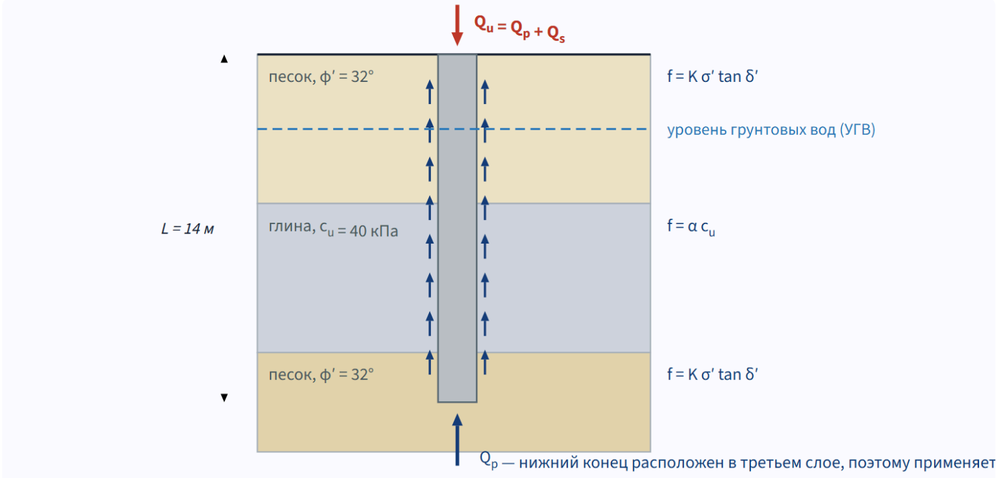
GeoTerva

Презентация лекции по геотехнике · Свайные фундаменты

Несущая способность сваи в слоистом грунте

Лекция: несущая способность сваи, проходящей через слои песка и глины. Какое правило и где применимо, как эффективное напряжение накапливается по слоям; по каждой теме — пример расчёта.

- Послойный расчёт
- Нижний конец: слой на уровне конца
- Правила для песка и глины
- Буровая свая
- Примеры расчёта



Что мы изучим на этой лекции?

Накопление эффективного напряжения по слоям; понимание того, как слой глины, хотя его собственная прочность на песок не передаётся, воздействует своим весом на лежащий ниже песок

Знание того, что **сопротивление под нижним концом** зависит только от слоя, в котором расположен нижний конец, и рассчитывается по правилу этого слоя

Применение правила K–δ **в слое песка** (критическая глубина L′ = 15D относится ко всей свае) и правил α, λ и β **в слое глины**

Суммирование сопротивления по боковой поверхности **по слоям**; интерпретация скачков трения на границах слоёв и влияния длины сваи

Понимание того, что у **буровой сваи** действует окно α* и что c_{ub} может определяться по нескольким слоям

ХОД ЛЕКЦИИ

Каждая тема излагается **в три шага**:

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

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

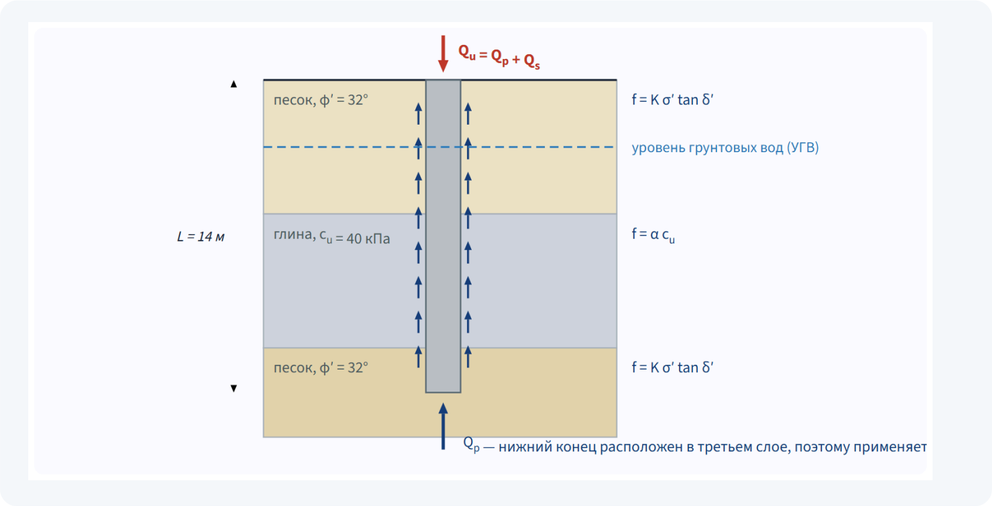
3 · **Решение**: пошагово, с числами

Большинство примеров выполняется для одной и той же сваи: диаметр 0.4 m, длина 14 m, свая проходит через профиль песок–глина–песок.

Эта лекция опирается на лекции **о сваях в песке** и **о сваях в глине**: правила мы изучили там, а здесь рассматриваем, какое из них где применимо.

Каждый слой работает по собственному закону

ТЕОРИЯ



Свая редко входит в один-единственный грунт. Профиль состоит из **нескольких слоёв**; каждый определяется как песок или глина, и к нему применяется **правило, соответствующее его материалу**. Несущая способность по-прежнему складывается из двух частей, но уже не считывается с одной формулы, а **строится по частям**:

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

Новой теории нет: правила для песка относятся к модулю для песка, правила для глины — к модулю для глины.

Новым является **порядок расчёта**: какое правило действует на каком участке боковой поверхности сваи и как эффективное напряжение накапливается от вышележащих слоёв.

Сопротивление под нижним концом определяется **одним слоем**, сопротивление по боковой поверхности — **суммой по всем слоям**.

Напряжение непрерывно, трение ступенчатое

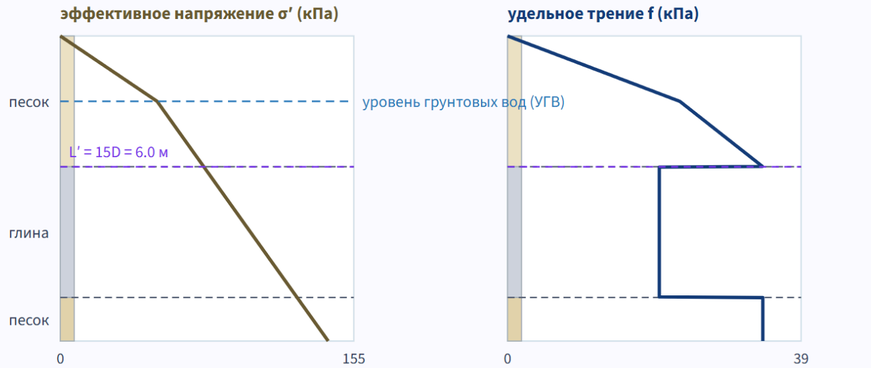
ТЕОРИЯ

Эффективное вертикальное напряжение связывает слои между собой: накапливается **вес каждого вышележащего слоя**; выше УГВ используется удельный вес влажного грунта, ниже — удельный вес грунта с учётом взвешивающего действия воды.

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

Слой глины не сообщает песку собственной прочности, но **своим весом** изменяет сопротивление нижележащего песка.

Трение же не является непрерывным: на границе песок–глина **меняется само правило**, и удельное трение может давать большой скачок. Этот скачок — не ошибка расчёта, а **характерная особенность** слоистого разреза.



Напряжения непрерывны по слоям; трение имеет скачки на границах слоев из-за изменения расчетного правила.

Условие

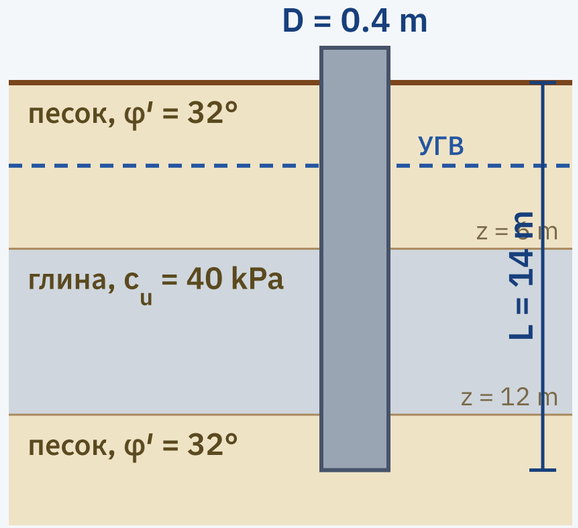
ПРИМЕР

Дано

Песок 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Глина (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
Песок 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Удельный вес	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(три слоя)**
Грунтовые воды	**на глубине 3.0 m**
Свая	**забивная, D = 0.4 m, L = 14 m**
Удельный вес воды	$\gamma_w = 9.81$ kN/m^3

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Найти эффективное вертикальное напряжение на глубинах **3, 6, 12 и 14 m** (14 m = нижний конец сваи).



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 До УГВ (3 m): весь слой влажный, γ = 17

$$\sigma'(3) = 17(3) = \mathbf{51.0}\ \text{kPa}$$

2 6 m (граница песка и глины): ниже УГВ $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 18 - 9.81$

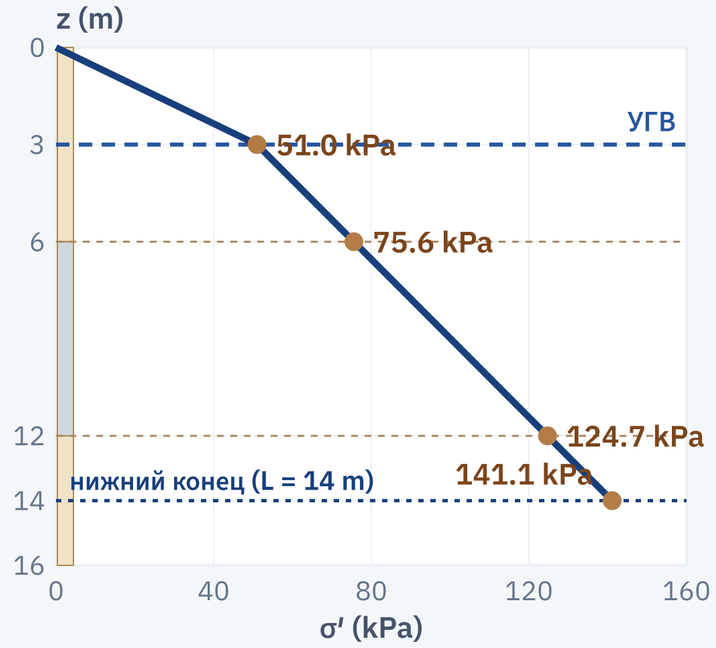
$$\sigma'(6) = 51.0 + (18 - 9.81)(3) = \mathbf{75.6}\ \text{kPa}$$

3 12 m (граница глина–песок): γ_{sat} глины также равен 18

$$\sigma'(12) = 75.6 + (18 - 9.81)(6) = \mathbf{124.7}\ \text{kPa}$$

4 14 m (нижний конец сваи)

$$\sigma'(14) = 124.7 + (18 - 9.81)(2) = \mathbf{141.1}\ \text{kPa}$$



Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

5 На каждом участке — площадь эпюры σ′ (трапеция); они дадут среднее напряжение при расчёте сопротивления по боковой поверхности

$$A_{0-6} = \tfrac{1}{2}(0 + 51.0)(3) + \tfrac{1}{2}(51.0 + 75.6)(3) = 266.4$$
$$A_{6-12} = \tfrac{1}{2}(75.6 + 124.7)(6) = 600.8$$
$$A_{12-14} = \tfrac{1}{2}(124.7 + 141.1)(2) = 265.8$$

σ′ **непрерывно по слоям**: на границе песка и глины скачка нет; наклон изменяется только на УГВ и при изменении γ′. Эти три площади будут использованы в Примерах 4 и 5 в качестве среднего σ̄′.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Нижний конец зависит только от своего слоя

ТЕОРИЯ

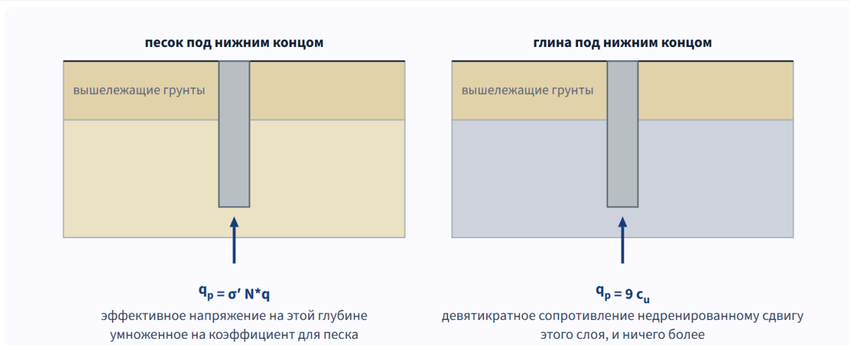
Сопротивление под нижним концом относится к **одному слою** — слою, в котором находится нижний конец сваи. Оно рассчитывается по материалу этого слоя; вышележащие слои влияют только через σ′ (**на песчаном конце**), а **на глинистом конце не влияют вовсе**.

песок: $Q_p = A_p\, q'\, N_q^* \le A_p\, q_l, \quad q_l = 0.5\, p_a N_q^* \tan\varphi'$

глина: $Q_p = A_p\, c_u\, N_c^*, \quad N_c^* = 9$ (Meyerhof)

Свая, нижний конец которой **точно совпадает с границей**, считается опирающейся на слой **ниже** границы.

Coyle–Castello — зависимость для **песка**; для нижнего конца в глине она не имеет смысла, и даже при её выборе остаётся действующим правило для глины.



У нижнего конца в песке определяющими являются σ′ и N^*_q; у нижнего конца в глине — только значение c_u этого слоя.

Условие

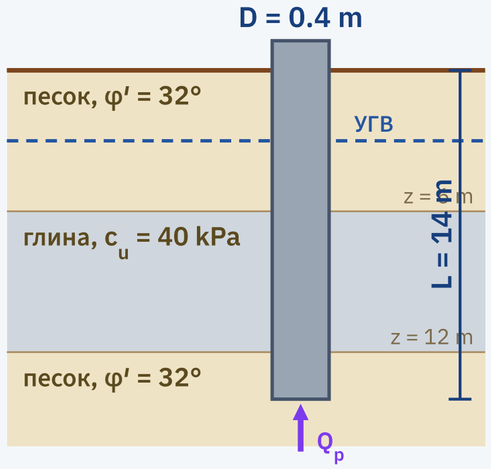
ПРИМЕР

Дано

Песок 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Глина (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
Песок 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Удельный вес	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(три слоя)**
Грунтовые воды	**на глубине 3.0 m**
Свая	**забивная, круглого сечения, D = 0.4 m, L = 14 m**
Метод по нижнему концу	**Meyerhof**
Атмосферное давление	$p_a = 100$ kPa
Эффективное напряжение на нижнем конце	$q' = \sigma'(14) = 141.1$ kPa **(Пример 1)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить, в каком слое находится нижний конец сваи, и найти **сопротивление под нижним концом** Q_p.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

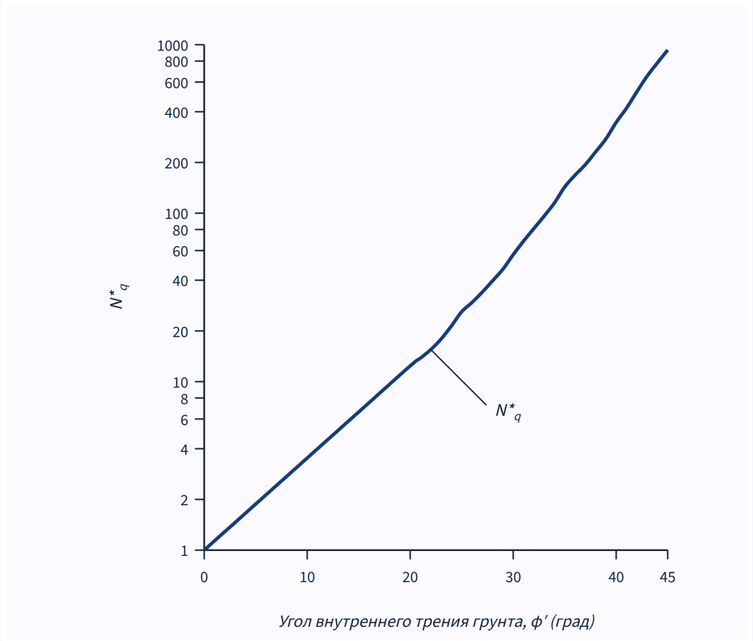
1 Слой у нижнего конца: L = 14 m, в песке на интервале 12–16 m → правило для песка (вышележащая глина нижнего конца не касается)

$$\varphi' = 32^\circ \qquad q' = \sigma'(14) = 141.1 \text{ kPa}$$

2 N^*_q по номограмме Meyerhof для φ′ = 32°; затем два значения рядом

$$N_q^* = 81$$
$$q' N_q^* = 141.1(81) = 11{,}428 \text{ kPa}$$
$$q_l = 0.5(100)(81)\tan 32^\circ = 2{,}531 \text{ kPa}$$

Значение N^*_q по номограмме (сбоку) равно 81; $q'N^*_q$ = 11,428 kPa, что намного больше предельного значения q_l = 2,531 kPa: **определяющим является предельное значение**.



Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Удельное сопротивление под нижним концом: меньшее из двух

$$q_p = \min(q' N_q^*;\ q_l) = \min(11{,}428;\ 2{,}531) = \mathbf{2{,}531}\ \text{kPa}$$

4 Площадь нижнего конца сваи и сопротивление под нижним концом

$$A_p = \frac{\pi (0.4)^2}{4} = 0.1257\ \text{m}^2 \qquad Q_p = A_p\, q_p = 0.1257(2{,}531) = \mathbf{318.0}\ \text{kN}$$

Сопротивление под нижним концом **318.0 kN**. Так как конец сваи находится в песке, действует правило для песка; поскольку предел достигнут, значение σ′ в данном примере результат не меняет.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

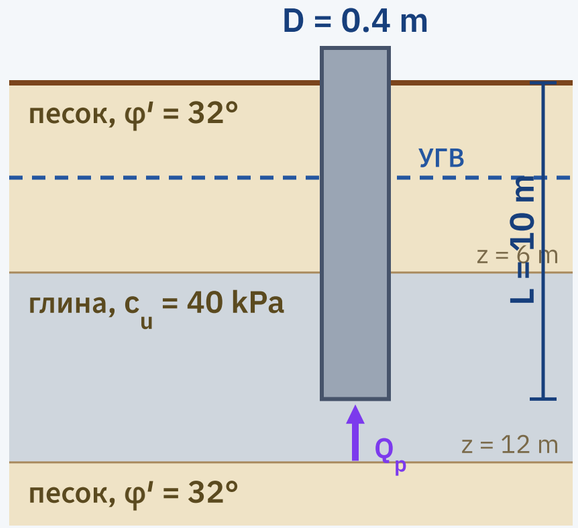
ПРИМЕР

Дано

Песок 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Глина (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
Песок 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Удельный вес	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(три слоя)**
Грунтовые воды	**на глубине 3.0 m**
Свая	**та же свая, но L = 10 m**
Методы для нижнего конца	**Meyerhof и Vesic**
Атмосферное давление	$p_a = 100$ kPa

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Если сваю укоротить до 10 m, определить, в каком слое остаётся нижний конец, и найти **сопротивление под нижним концом** двумя методами.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Слой у нижнего конца: L = 10 m, в глине на интервале 6–12 m → правило для глины (песок и σ′ в расчёт больше не входят)

$$c_u = 40 \text{ kPa} \qquad A_p = 0.1257 \text{ m}^2$$

2 Meyerhof: $N^*_c = 9$

$$q_p = 9\,c_u = 9(40) = 360 \text{ kPa} \qquad Q_p = 0.1257(360) = \mathbf{45.2} \text{ kN}$$

3 Vesic: $I_{rr} = I_r = 347(c_u/p_a) - 33$

$$I_{rr} = 347(0.4) - 33 = 105.8$$
$$N_c^* = \tfrac{4}{3}(\ln 105.8 + 1) + \tfrac{\pi}{2} + 1 = 10.12$$
$$q_p = 40(10.12) = 405 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; Q_p = 0.1257(405) = \mathbf{50.9} \text{ kN}$$

Для сваи с концом в песке Q_p составляло **318 kN**; при расположении конца в глине — **45 – 51 kN**: примерно в семь раз меньше. Удлинение той же сваи на 2 m с заглублением конца в песок резко увеличивает сопротивление под нижним концом.

Проверить решение в GeoTerva ↗

K–δ: критическая глубина относится ко всей свае

ТЕОРИЯ

В слое песка боковая поверхность сопротивляется трением о горизонтальное эффективное напряжение. Каждый слой песка имеет **собственные** значения K и δ′:

$$f = K_i\,\sigma'\tan\delta_i' \;\; (z \le L') \qquad f = f_{z=L'} \;\; (z > L'),\;\; L' = 15D$$

L′ относится к **свае в целом**, а не к слою: ниже L′ значение σ′ сохраняется равным значению на глубине L′.

Глубоко расположенный слой песка независимо от положения его границы даёт **постоянное** по слою удельное трение.

Вариант: **Coyle–Castello**. Собственный коэффициент K слоя (по номограмме), δ′ = 0.8φ′ и среднее значение σ′ слоя; критической глубины нет, её роль выполняет среднее значение.

COYLE–CASTELLO (ПО СЛОЯМ)

$$f_i = K_i\,\bar{\sigma}_i'\tan(0.8\varphi_i')$$

$$Q_s = p\sum f_i\,\Delta L_i$$

В методе K–δ значение δ′ чаще всего принимается в пределах 0.75φ′ – 0.8φ′; в данной презентации используются **δ′ = 0.8φ′ = 25.6°** и **K = 1.0**.

Условие

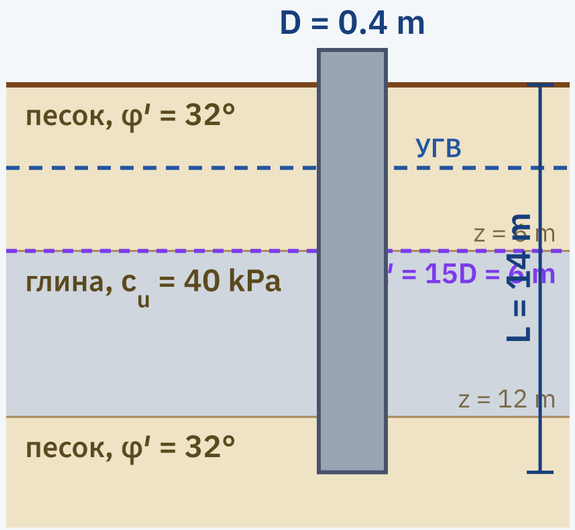
ПРИМЕР

Дано

Песок 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Глина (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
Песок 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Удельный вес	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(три слоя)**
Грунтовые воды	**на глубине 3.0 m**
Свая	**забивная, D = 0.4 m, L = 14 m**
Периметр	$p = \pi D = 1.257$ m
В слоях песка	$K = 1.0,\ \delta' = 0.8\varphi' = 25.6^\circ$ **(в модуле следует ввести эти значения; модуль открывается с K = 0.66 и δ′ = 24°)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Найти сопротивление по боковой поверхности **слоёв песка** (0–6 m и 12–14 m) методом K–δ. Критическая глубина L′ = 15D.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Критическая глубина (одна для всей сваи)

$$L' = \min(15D;\ L) = \min(15(0.4);\ 14) = \mathbf{6}\ \text{m} \qquad \sigma'(L') = 75.6\ \text{kPa (Пример 1)}$$

2 Песок 1 (0–6 m): слой целиком находится в пределах L′, ограничение предельным значением не применяется; среднее σ′ = площадь / толщина

$$\bar{\sigma}'_1 = \frac{266.4}{6} = 44.4\ \text{kPa}$$

3 Удельное трение и сопротивление

$$f_1 = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}'_1 = 1.0(0.4791)(44.4) = 21.3\ \text{kPa}$$

$$Q_{s1} = p\, f_1 H = 1.2566(21.3)(6) = \mathbf{160.4}\ \text{kN}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

4 Песок 2 (12–14 m): целиком ниже L′ → значение σ′ сохраняется равным значению на L′

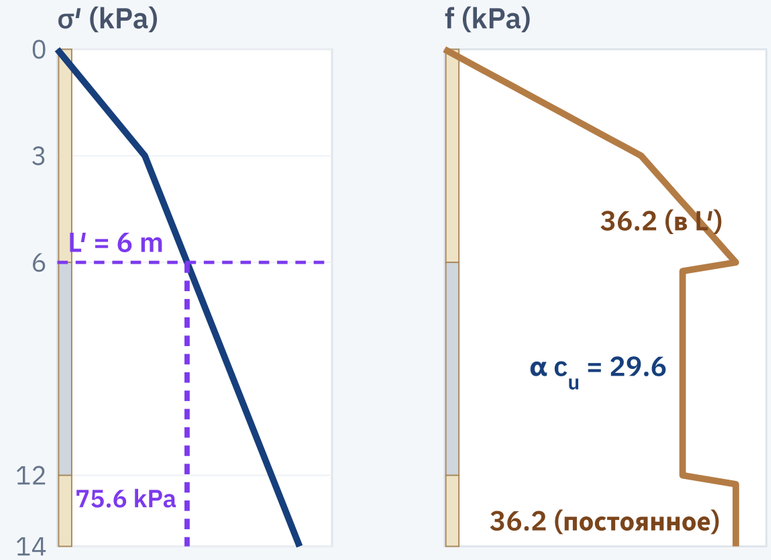
$$\sigma' = \sigma'(L') = 75.6 \text{ kPa}$$

$$f_3 = 1.0(0.4791)(75.6) = \mathbf{36.2} \text{ kPa}$$

5 Сопротивление (толщина 14 − 12 = 2 m)

$$Q_{s3} = p\, f_3 H = 1.2566(36.2)(2) = \mathbf{91.0} \text{ kN}$$

Без критической глубины на этом участке получилось бы σ′ = 132.9 kPa, f = 63.7 kPa и Q_{s3} = 160 kN. **Ограничение по L′** уменьшает вклад глубокого участка песка на **69 kN**.



Проверить решение в GeoTerva ↗

В глине каждый слой также выбирает свой метод

ТЕОРИЯ

В слое глины боковая поверхность сопротивляется за счёт **адгезии** или **эффективного напряжения**; все три способа, реализованные в модуле для глин, можно использовать для каждого слоя:

$$\alpha: \ f = \alpha_i c_{u,i} \qquad \lambda: \ f_i = \lambda\,(\bar{\sigma}'_i + 2c_{u,i}),\ \lambda = \lambda(L)$$

$$\beta: \ \beta_i = (1 - \sin\varphi'_{R,i})\tan\varphi'_{R,i}\sqrt{OCR_i}, \quad f_i = \beta_i \bar{\sigma}'_i$$

α: **не зависит** от глубины внутри слоя; трение постоянно по всему слою (равномерное).

λ и β восстанавливают эффективное напряжение; в зависимости от вышележащих слоёв они дают **ступенчатое изменение**.

ЧЕСТНОЕ ПРИМЕЧАНИЕ

Vijayvergiya и Focht определили λ как **единое среднее значение для всей заглублённой длины**. Применение его по отдельности к каждому слою глины в слоистом профиле (λ на длине L, среднее σ′ и c_u этого слоя) является **расширением метода, специфичным для данной программы**; модуль указывает это везде.

φ'_R и OCR **задаются**, а не определяются по корреляции из данных о грунте (модуль открывается со значениями 30° и 1).

Условие

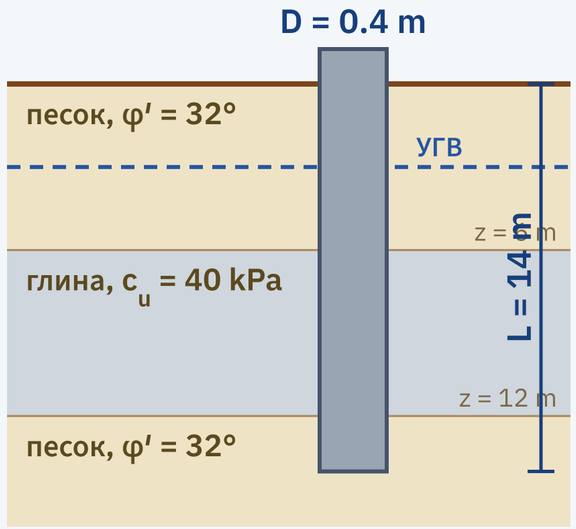
ПРИМЕР

Дано

Песок 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Глина (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
Песок 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Удельный вес	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(три слоя)**
Грунтовые воды	**на глубине 3.0 m**
Свая	**забивная, D = 0.4 m, L = 14 m, p = 1.257 m**
Среднее σ′ глины	$\bar{\sigma}'_2 = A_{6-12}/6 = 100.1$ kPa **(Пример 1)**
для β	$\varphi'_R = 30^\circ,\ OCR = 1$
для α	$p_a = 100$ kPa**, α из таблицы**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить сопротивление по боковой поверхности слоя глины (6–12 m) методами **α, λ и β**.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Метод α: α по таблице для $c_u/p_a = 0.4$

$$\alpha = 0.74 \quad f = \alpha c_u = 0.74(40) = 29.6 \text{ kPa} \quad Q_s = 1.2566(29.6)(6) = \mathbf{223.2} \text{ kN}$$

2 Метод λ: λ по таблице в зависимости от **длины сваи** (L = 14 m) ($\lambda_{10} = 0.245$; $\lambda_{15} = 0.200$)

$$\lambda = 0.209$$

$$f = \lambda(\bar{\sigma}_2' + 2c_u) = 0.209(100.1 + 2(40)) = 37.6 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(37.6)(6) = \mathbf{283.9} \text{ kN}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

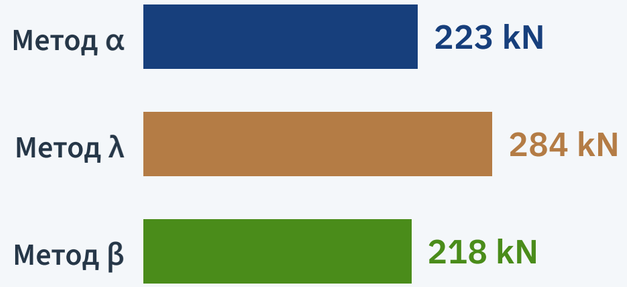
3 Метод β: $\varphi'_R = 30°$, OCR = 1

$$\beta = (1 - \sin 30^\circ)\tan 30^\circ = 0.289$$

$$f = \beta \bar{\sigma}'_2 = 0.289(100.1) = 28.9 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(28.9)(6) = \mathbf{218.0} \text{ kN}$$

Три метода для одного и того же слоя глины дают **223**, **284** и **218 kN**: α и β близки друг к другу, λ примерно на 27% выше. Различие обусловлено допущениями, на которых основаны методы; применение λ для каждого слоя отдельно — дополнительное расширение.



Проверить решение в GeoTerva ↗

Один интеграл по длине сваи

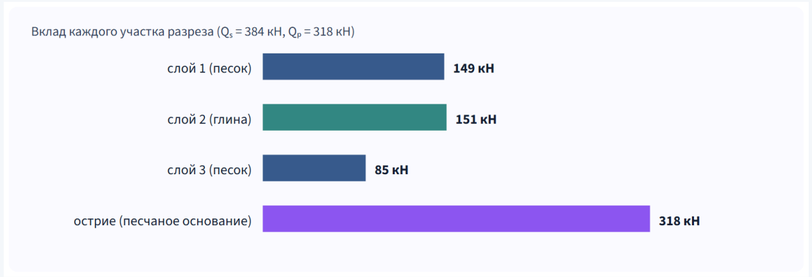
ТЕОРИЯ

Сопротивление по боковой поверхности — это интеграл трения вдоль сваи, умноженный на периметр. Расчёт выполняется численно; граница может находиться **где угодно**, и свая, заканчивающаяся посередине слоя, не требует особого случая:

$$Q_s = p \int_0^L f(z)\,dz \;\approx\; p \sum f_i\,\Delta z_i$$

При таком рассмотрении слоистость перестаёт быть проблемой и превращается в **проектный вопрос**: **какая часть** профиля несёт сваю?

Как изменится несущая способность, если сваю удлинить за следующую границу или укоротить?



Вклад каждого участка сваи из примера (Q_S = 475 kN, Q_p = 318 kN).

Условие

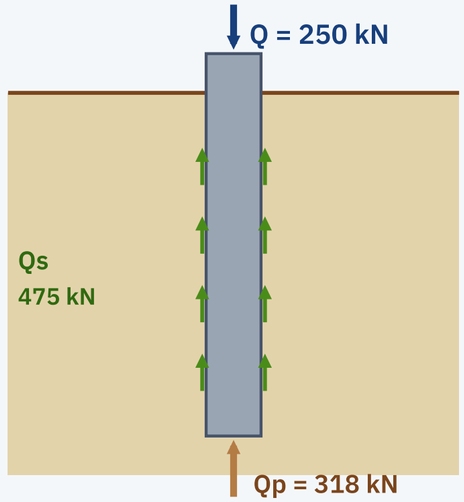
ПРИМЕР

Дано

Сопротивление под нижним концом	**Q_p = 318.0 kN (Пример 2)**
Песок 1 (0–6 m)	**Q_{s1} = 160.4 kN (Пример 4)**
Глина (6–12 m)	**Q_{s2} = 223.2 kN (метод α, пример 5)**
Песок 2 (12–14 m)	**Q_{s3} = 91.0 kN (Пример 4)**
Коэффициент запаса	**FS = 3**
Рабочая нагрузка на сваю	**Q = 250 kN**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить **предельную** и **допустимую** несущую способность сваи; достаточна ли несущая способность для рабочей нагрузки?



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Сопротивление по боковой поверхности: сумма по участкам

$$Q_s = 160.4 + 223.2 + 91.0 \approx \mathbf{474.5}\ \text{kN}$$

2 Предельная несущая способность

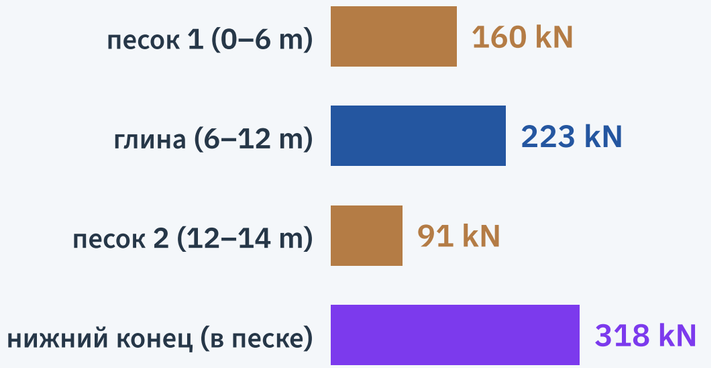
$$Q_u = Q_p + Q_s = 318.0 + 474.5 = \mathbf{792.6}\ \text{kN}$$

3 Допускаемая несущая способность и проверка

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{792.6}{3} = \mathbf{264.2}\ \text{kN}$$

$$Q = 250 \le 264.2 \ \Rightarrow\ \text{достаточно}$$

Коэффициент использования 0.95. Глинистый слой составляет лишь 43% длины сваи, но даёт 47% сопротивления по боковой поверхности: после критической глубины песок перестаёт набирать σ′, а глина на любой глубине даёт одно и то же значение α c_u.



Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

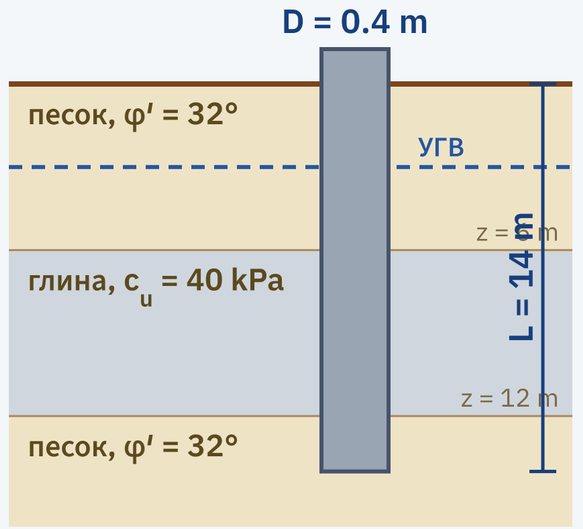
ПРИМЕР

Дано

Песок 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Глина (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
Песок 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Удельный вес	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(три слоя)**
Грунтовые воды	**на глубине 3.0 m**
Методы	**забивная, D = 0.4 m; Meyerhof, α, K–δ**
Длины	**L = 10, 12, 14 и 16 m**
Известные величины	**Пример 2–6 для L = 14 m**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Как изменится Q_u, если длина сваи будет **10, 12 и 16 m**? Объяснить **причину** изменения.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1. L = 10 m: нижний конец в глине (пример 3); участок в глине только 6–10 m

$$Q_p = 45.2\ ; \quad Q_s = 160.4 + 148.8 = 309.2\ ; \quad Q_u = \mathbf{354.4}\ \text{kN}$$

2. L = 12 m: нижний конец точно на границе → **опирается на нижележащий песок**; песок 2 пока не входит в боковую поверхность сваи

$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 = 383.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{701.6}\ \text{kN}$$

3. L = 16 m: песок 2 включается в расчёт боковой поверхности слоем толщиной четыре метра (σ′ ограничено: f постоянно)

$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 + 182.0 = 565.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{883.6}\ \text{kN}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

L (m)	Слой под нижним концом	Q_p (kN)	Q_s (kN)	Q_u (kN)	Q_{all} (kN)
10	глина	45	309	**354**	118
12	песок	318	384	**702**	234
14	песок	318	475	**793**	264
16	песок	318	566	**884**	295

10 m → 12 m: несущая способность возрастает на **347 kN** (98%): из них 273 kN даёт **заглубление нижнего конца в песок**. После 12 m каждый метр добавляет лишь ≈ 45 kN. В слоистом профиле длину сваи определяет **то, в каком слое оканчивается нижний конец**.



Проверить решение в GeoTerva ↗

Правила для буровой сваи действуют и в смешанном профиле

ТЕОРИЯ

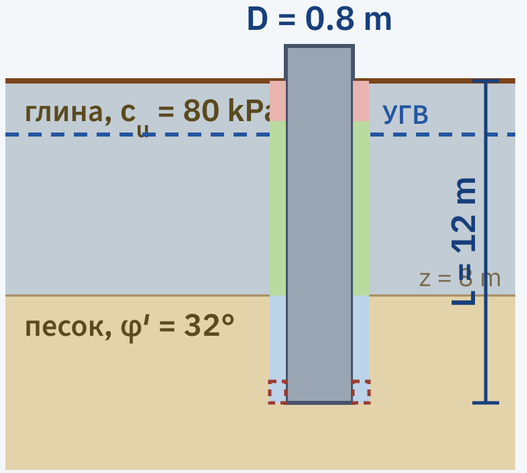
Скважина бурится, бетон укладывается: грунт не вытесняется, глина размягчается на стенке скважины, под нижним концом может накапливаться шлам. В смешанном профиле каждая половина методики применяется **в том слое, к которому она относится**:

Слои глины (α): α* = 0.55 ($c_u/p_a \le 1.5$); на **верхних 1.5 m и нижней 1D** α* = 0. Окно относится **только к α** и не переносится на λ и β.

Слои песка сохраняют собственное правило K–δ или Coyle–Castello; K близко к $\mathbf{K_0 = 1 - \sin\varphi'}$, так как при бурении грунт не вытесняется.

Если **нижний конец** находится в глине, то по Reese–O'Neill: $q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b), 9c_{ub}, 40p_a]$. c_{ub} — среднее значение c_u на протяжении $\mathbf{2D_b}$ под нижним концом; если зона охватывает несколько слоёв, значение взвешивается по толщине.

Эта зона должна быть **полностью глинистой**: если она заходит в песок, модуль останавливается и требует выбрать Meyerhof или Vesic.



Красный: α* = 0 (верхние 1.5 m). Зелёный: α* = 0.55. Синий: K–δ в песке. Красный пунктир: нижние 1D, окна в песке нет.

Условие

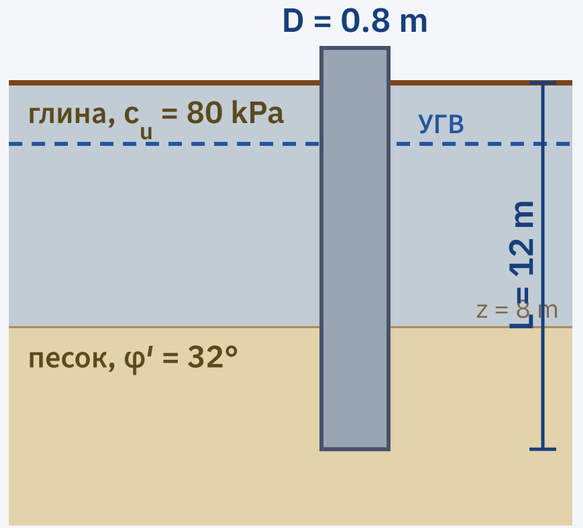
ПРИМЕР

Дано

Свая	**буровая свая круглого сечения, D = 0.8 m, L = 12 m**
Глина (0–8 m)	$c_u = 80$ kPa, $\gamma = \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3
Песок (8–20 m)	$\varphi' = 32^\circ$, $\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 19$ kN/m^3
Грунтовые воды	**на глубине 2.0 m**
Для песка	$K = K_0 = 0.47$, $\delta' = 0.75\varphi' = 24^\circ$
Остриё	**Meyerhof; FS = 3**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить **сопротивление под нижним концом**, **сопротивление по боковой поверхности** и **допустимую несущую способность** буровой сваи.



Решение (1/3)

РЕШЕНИЕ

1 Слой глины: α* и расчётное окно (отбрасываются верхние 1.5 m и нижний участок 1D = 0.8 m: 1.5 → 12 – 0.8 = 11.2 m)

$$\alpha^* = 0.55 \ (c_u/p_a = 0.8 \le 1.5) \qquad L_{eff} = 8 - 1.5 = \mathbf{6.5}\ \text{m}$$

2 Удельное трение и сопротивление

$$f = \alpha^* c_u = 0.55(80) = 44.0\ \text{kPa} \qquad Q_{s1} = \pi(0.8)(44.0)(6.5) = \mathbf{718.8}\ \text{kN}$$

Решение (2/3)

РЕШЕНИЕ

3 Слой песка (8–12 m): собственное правило K–δ; L′ = min(15D; L) = min(12; 12) = 12 m, то есть в пределах слоя ограничение не действует

$$\sigma'(8) = 85.1\ ;\ \sigma'(12) = 121.9\ \text{kPa} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{414.1}{4} = 103.5\ \text{kPa}$$

4 Удельное трение и сопротивление

$$f = K \tan\delta' \, \bar{\sigma}' = 0.47 \tan 24^\circ (103.5) = 21.7\ \text{kPa}$$

$$Q_{s2} = \pi(0.8)(21.7)(4) = \mathbf{217.8}\ \text{kN}$$

Нижний участок 1D окна α (11.2 – 12 m) попадает в слой песка; поскольку окно относится к α, песок сохраняет трение и на этих 0.8 m.

Решение (3/3)

РЕШЕНИЕ

5 Нижний конец в песке → правило для песка (Meyerhof); дополнительного снижения на бурение нет, используется заданное φ′

$$q' = \sigma'(12) = 121.9 \text{ kPa} \qquad N_q^* = 81$$

$$q' N_q^* = 9{,}874 > q_l = 2{,}531 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; q_p = 2{,}531 \text{ kPa}$$

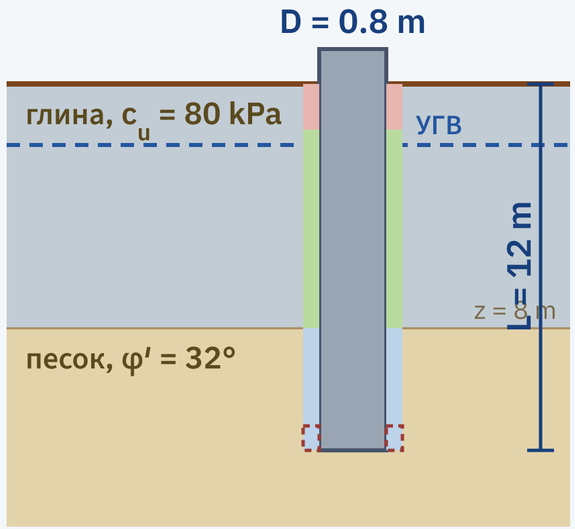
$$Q_p = A_p q_p = 0.5027(2{,}531) = \mathbf{1{,}272} \text{ kN}$$

6 Полная и допускаемая несущая способность

$$Q_s = 718.8 + 217.8 = \mathbf{936.6} \text{ kN}$$

$$Q_u = 1{,}272 + 937 = 2{,}209 \text{ kN}$$

$$Q_{all} = \frac{2{,}209}{3} = \mathbf{736} \text{ kN}$$



Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

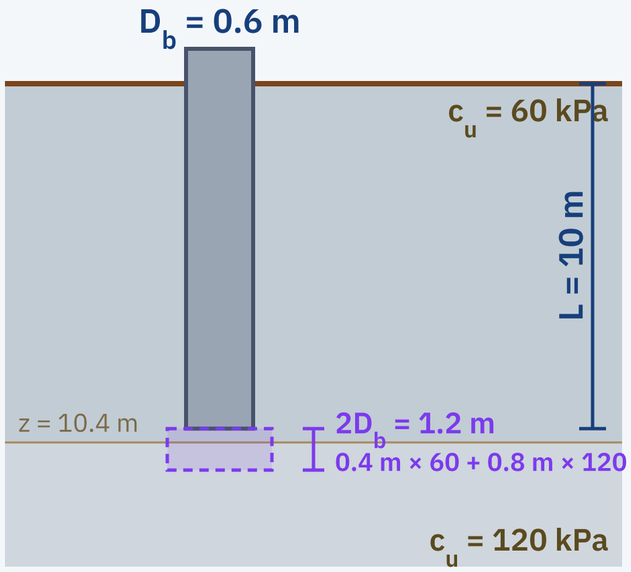
ПРИМЕР

Дано

Свая	**буровая свая, $D_b = D = 0.6$ m, $L = 10$ m**
Глина 1 (0–10.4 m)	$c_u = 60$ kPa
Глина 2 (10.4–20 m)	$c_u = 120$ kPa
Подошва	**Reese–O'Neill; $p_a = 100$ kPa**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить c_{ub} в зоне $2D_b$ под нижним концом, а также значения q_p и Q_p.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Зона 10 → 10 + 2D$_b$ = 11.2 m; граница на 10.4 m: среднее, взвешенное по толщине

$$c_{ub} = \frac{60(0.4) + 120(0.8)}{1.2} = \mathbf{100}\ \text{kPa}$$

2 Наименьшее из трёх значений

$$6c_{ub}\left(1 + 0.2\,\frac{L}{D_b}\right) = 2{,}600\ ; \quad 9c_{ub} = 900\ ; \quad 40p_a = 4\,000 \ \Rightarrow \ q_p = \mathbf{900}\ \text{kPa}$$

3 Площадь основания и сопротивление под нижним концом

$$A_b = \frac{\pi(0.6)^2}{4} = 0.2827\ \text{m}^2 \qquad Q_p = 0.2827(900) = \mathbf{254.5}\ \text{kN}$$

Если бы принималось только значение на нижнем конце c$_u$ = 60 kPa, получилось бы Q$_p$ = 152.7 kN: лежащая ниже более жёсткая глина даёт на **67%** больше.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Единый коэффициент запаса, но неопределённость велика

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**.

Верхний предел: профиль известен **по малому числу скважин**. Слоистый профиль — именно такой случай: между скважинами **границы слоёв наиболее неопределённы**, а приведённый выше пример показал, насколько всего один метр положения границы изменяет несущую способность.

ДВА ВОПРОСА ТРЕБУЮТ ОТДЕЛЬНЫХ РАСЧЁТОВ

В слоистом профиле, отдельно от расчёта несущей способности:

- Осадка мягкого слоя и его «зависание» на свае в виде **отрицательного трения по боковой поверхности**
- **Осадка**, определяемая сжимаемым слоем ниже нижнего конца

Правила по слоям и способу устройства

ТЕОРИЯ

Слой	Боковая поверхность (Q_s)	Нижний конец (Q_p): слой у нижнего конца
Песок	K–δ (L′ = 15D, одно значение для всей сваи) или Coyle–Castello (K σ⃗′ tan0.8φ′)	$q'N^*_q \le q_l$ (Meyerhof), Vesic, Coyle–Castello
Глина	α · λ (по слоям: расширение) · β	$9c_u$ (Meyerhof) · $N^*_c(I_{rr})$ (Vesic)
Буровая, глина	α* = 0.55; верхние 1.5 m и нижние 1D = 0	Reese–O'Neill: c_{ub} = среднее значение в пределах $2D_b$
Буровая, песок	$K \approx K_0 = 1 - \sin\varphi'$; окно не применяется	$q'N^*_q$ (заданное φ′)

Каждая строка — отдельный выбор для соответствующего слоя; **в одной свае** используются правила и для песка, и для глины.

Резюме

Главное

Эффективное напряжение **накапливается по слоям** и непрерывно; удельное трение же **скачкообразно меняется на границах**

Нижний конец рассчитывается только по правилу для слоя, в котором он находится; конец, совпадающий с границей, считается опирающимся на **нижележащий** слой

Песок: $f = K\sigma'\tan\delta'$ и **$L' = 15D$ относится ко всей свае** · **Глина**: α, λ (по одному продолжению на слой), β

Сопротивление по боковой поверхности складывается по слоям: $Q_s = p\Sigma f_i \Delta z_i$; длину определяет слой, в котором оканчивается нижний конец сваи

Буровая свая: окно α* только для глины/α; если нижний конец сваи в глине, c_{ub} по длине $2D_b$ (слоёв может быть несколько)

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$, $FS = 2.5 – 4$; для крупных объектов — **испытание нагрузкой**

Список литературы

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.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. Wiley — значения α из таблицы 2.

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.

Vijayvergiya, V.N. and Focht, J.A. (1972). A new way to predict capacity of piles in clay. Offshore Technology Conference Paper 1718, Houston.

O’Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025 — коэффициент α для буронабивных свай.

Reese, L.C. and O’Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA — базовое выражение для буронабивной сваи в глинистом грунте.

Burland, J.B. (1973). Shaft friction of piles in clay — a simple fundamental approach. Ground Engineering, 6(3), 30–42.

Mansur, C.I. and Hunter, A.H. (1970). Pile tests, Arkansas River project. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM5), 1545–1582.

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning (обобщение методов в форме, принятой на данной странице).

ПРИМЕЧАНИЕ

Рисунки этой презентации взяты со страницы теории GeoTerva; все числовые примеры получены с помощью собственных расчётных правил и библиотеки модуля, 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.