

## Расчёт горизонтальной несущей способности одиночной сваи

Программа: Сваи

Файл: Demo\_manual\_16.gpi

Целью данного технического руководства является объяснение использования программы GEO 5 – Сваи для расчёта горизонтальной несущей способности одиночной сваи.

### Постановка задачи

Общая постановка задачи была описана в предыдущей главе (12. *Свайные фундаменты – Введение*). Выполнить все расчёты горизонтальной несущей способности одиночной сваи последовательно к предыдущей задаче, представленной в главе 13. *Расчёт вертикальной несущей способности одиночной сваи*. Равнодействующая составляющих нагрузки  $N_1, M_{y,1}, H_{x,1}$  расположена на уровне оголовка сваи. Рассчитать размеры сваи в соответствии с EN 1992-1.

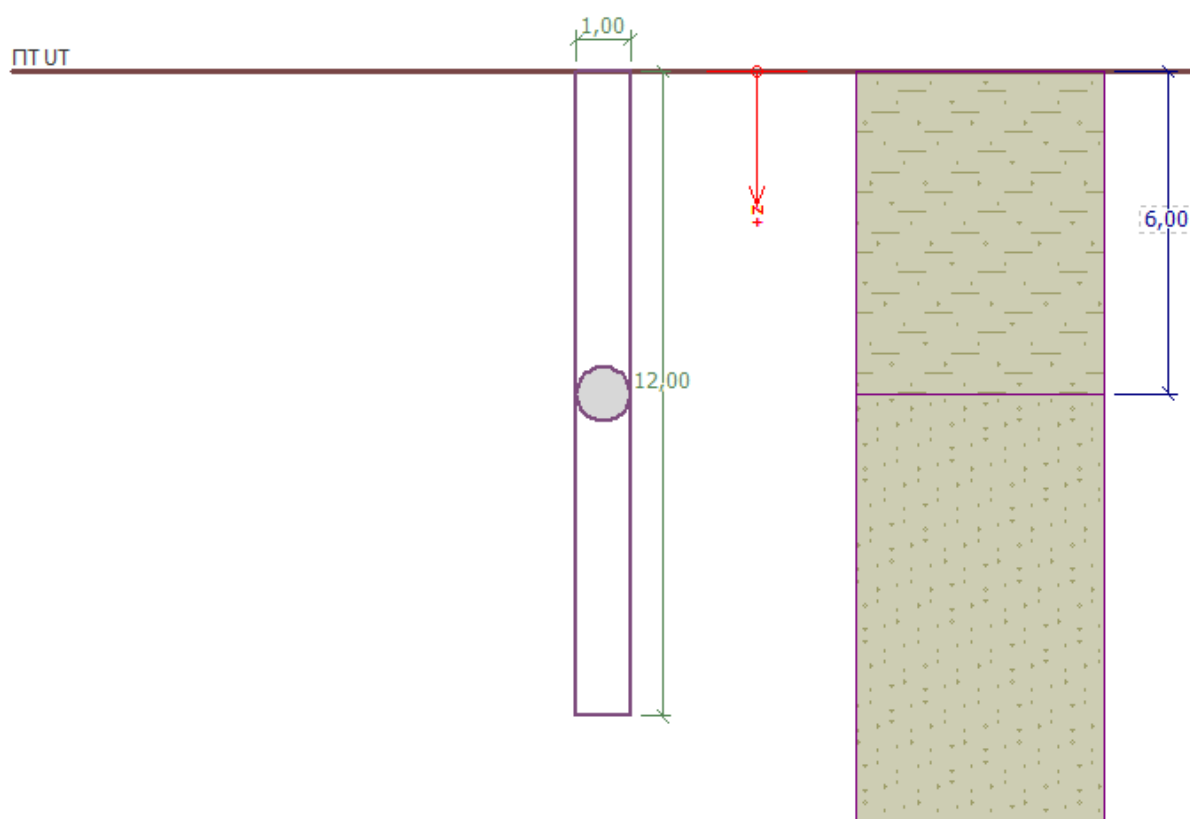


Схема постановки задачи – одиночная свая

### Решение

Для расчёта данного случая мы будем использовать программу GEO 5 – Сваи. В тексте ниже пошагово опишем решение задачи.

Свая с поперечной нагрузкой рассчитывается методом конечных элементов как балка, опирающаяся на упругую среду Винклера (*упругое полупространство*). Параметры грунтов по длине сваи характеризуются модулем горизонтальной реакции грунта.

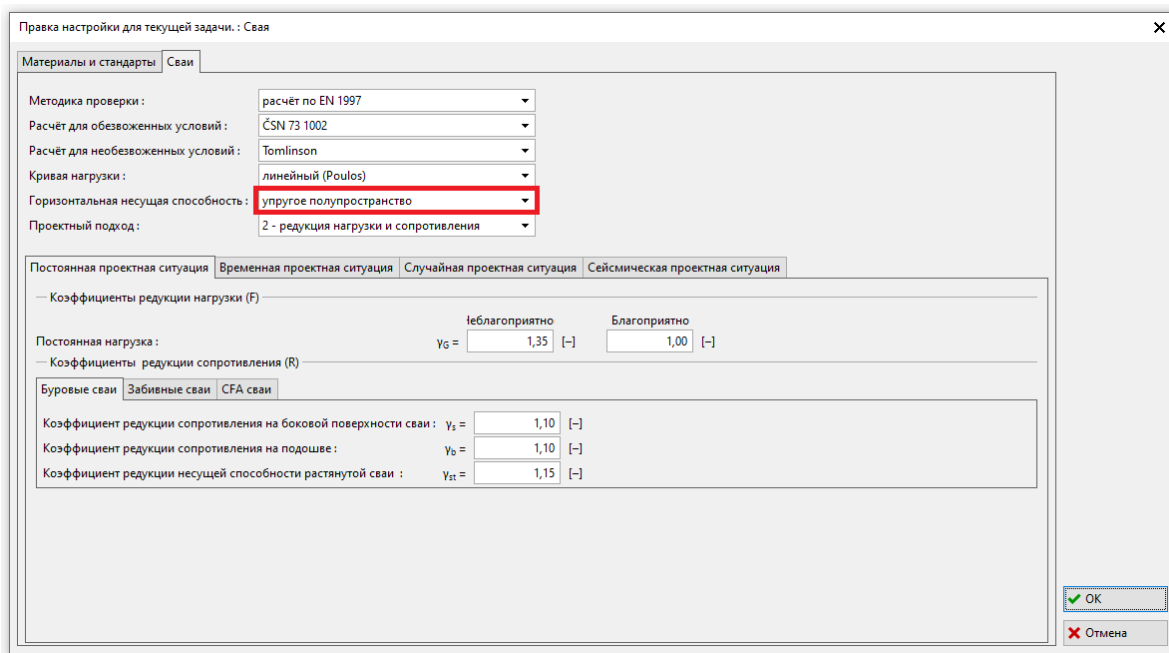
Программа содержит множество вариантов, как определить модуль реакции грунта. Методы линейного типа (Линейный, Matlock and Reese) подходят для несвязных грунтов, в то время как методы постоянного типа (Постоянный, Vesic) лучше подходят для связных грунтов. Метод расчета модуля  $k_h$  по CSN 73 1004 объединяет оба подхода.

В первой части этой главы мы проведем расчёт с использованием постоянного модуля реакции грунта; во второй части – сравним различия, возникающие при использовании других методов.

### Формулировка задачи

В программе «Сваи» открыть файл из инструкции №. 13. Во вкладке «Настройка» нажать кнопку «Редактировать» и убедиться, что метод расчета горизонтальной несущей способности установлен как «Упругое полупространство».

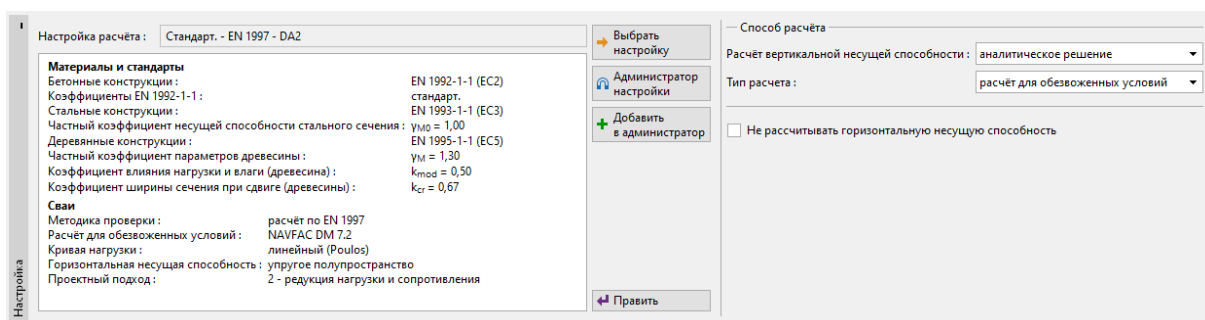
*Примечание: Для расчета вертикальной несущей способности сваи в однородном грунте также можно использовать [метод Бромса](#) (подробнее в справке к программе – F1).*



*Диалоговое окно «Правка настройки для текущей задачи»*

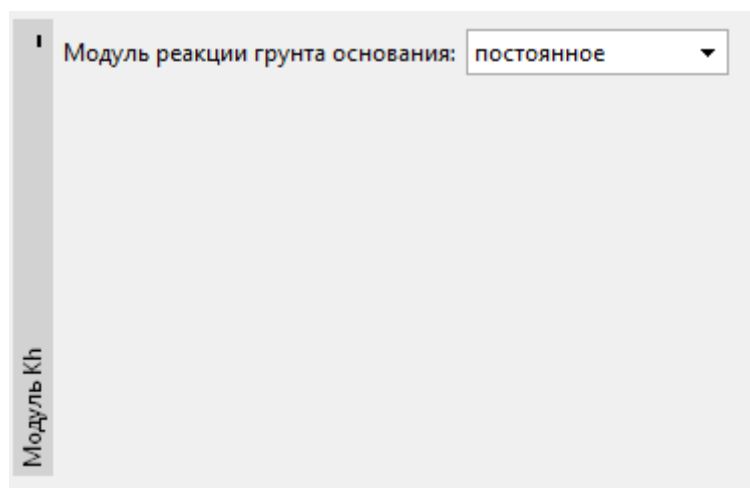
Остальные параметры, такие как значения заданных нагрузок и геологического профиля, включая основные прочностные параметры грунтов, остаются без изменений.

Во вкладке «Настройка расчёта» также необходимо снять галочку с опции «Не рассчитывать горизонтальную несущую способность».



Вкладка «Настройка расчёта»

Затем переходим ко вкладке «Модуль Kh», где выберем значение «постоянное».



Вкладка «Модуль Kh»

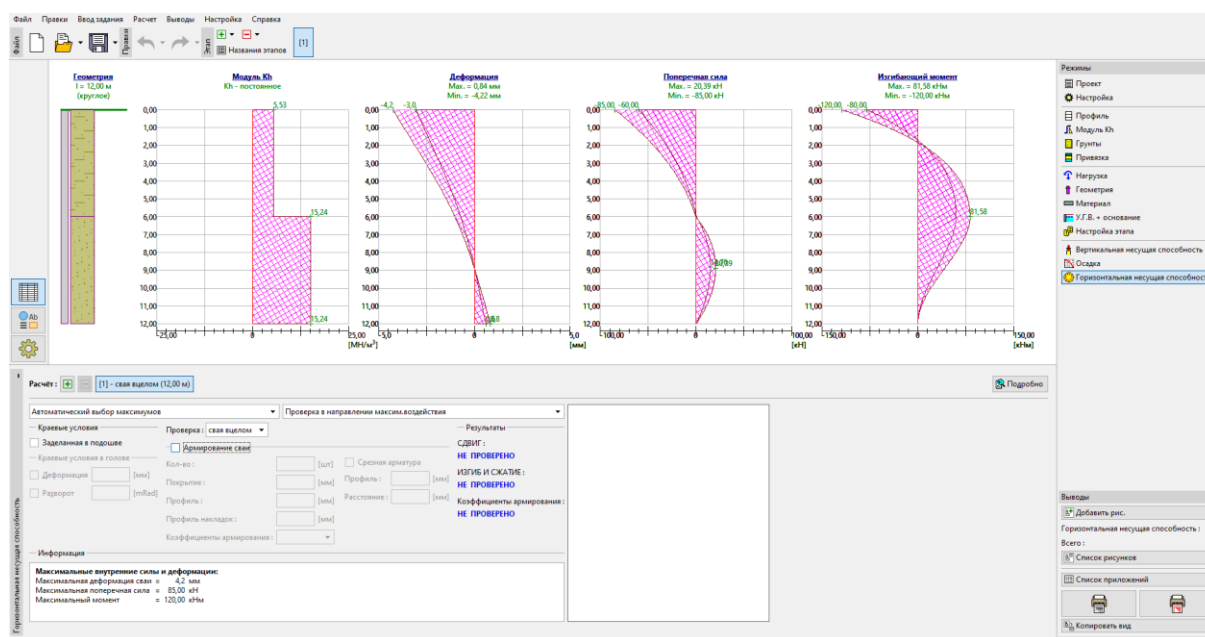
*Примечание: Постоянный тип модуля горизонтальной реакции грунта зависит от модуля деформации грунта  $E_{def}$  [МПа] и приведенной ширины сваи  $r$  [m] (подробнее см. в справке к программе – F1).*

Во вкладке «Грунты» задать параметры грунтов – значение угла рассеивания  $\beta$  [–] в диапазоне  $\frac{\varphi_{ef}}{4} - \varphi_{ef}$ . Таким образом, этот коэффициент определяется относительно угла внутреннего трения грунта (подробнее в справке программы – F1).

Грунт (Классификация грунтов)	Удельный вес $\gamma \text{ [kN/m}^3\text{]}$	Угол внутреннего трения $\varphi_{ef} [^\circ]$	Угол рассеивания $\beta [^\circ]$	Тип грунта
CS – Песчаная глина, плотная консистенция	18,5	24,5	10,0	Связный
S-F – Песок со следами мелких частиц, грунт средней плотности	17,5	29,5	15,0	Несвязный

Таблица с параметрами грунта – Горизонтальная несущая способность одиночной сваи

Далее перейти ко вкладке «Горизонтальная несущая способность», где определить величину максимальной горизонтальной деформации в оголовке сваи, тип внутренних усилий по длине сваи и результаты промеров сваи для оценки армирования бетона в направлении максимального эффекта.



Вкладка «Горизонтальная несущая способность» – оценка постоянного модуля  $k_h$



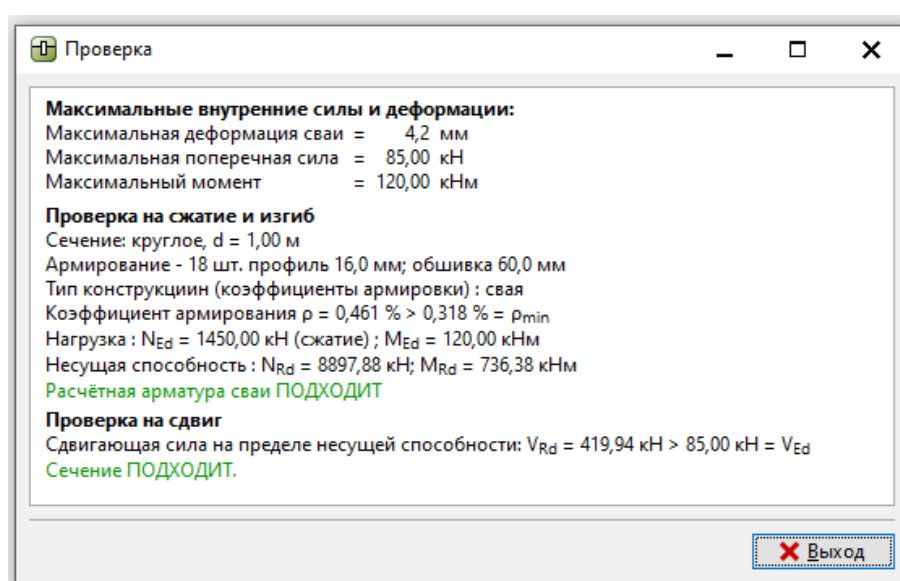
В этом случае мы рассматриваем коэффициент армирования одиночной сваи с боковой нагрузкой в соответствии с *CSN EN 1536: Выполнение специальных геотехнических работ - Буронабивные сваи* (Таблица 4 – Минимальное армирование буронабивных свай). Эта возможность задается в программе выбором параметра коэффициента армирования «Свая».

Площадь поперечного сечения сваи: $A_c [m^2]$	Площадь продольного армирования: $A_s [m^2]$
$A_c \leq 0.5 m^2$	$A_s \geq 0.5 \% \cdot A_c$
$0.5 m^2 < A_c \leq 1.0 m^2$	$A_s \geq 0.0025 m^2$
$A_c > 1.0 m^2$	$A_s \geq 0.25 \% \cdot A_c$

«EN 1536: Таблица 4 — Минимальное армирование буронабивных свай»

*Примечание: В случае сжимаемых элементов лучше использовать коэффициент армирования, как если бы это была «колонна», тогда как «балка» лучше подходит для свай, подвергающихся изгибу. Для сочетания вертикальной и поперечной нагрузки CSN EN 1536 предписывает минимальный коэффициент армирования для буронабивных свай, соответствующий доле площади поперечного армирования к площади бетона (подробнее см. в справке программы — F1).*

Можно увидеть показатели использования поперечного сечения сваи, подверженной изгибу, и условие минимального коэффициента армирования в результатах определения размеров сваи (нажав на кнопку «Подробнее»).



«Проверка (подробно)» – Диалоговое окно

## Результаты расчёта

В рамках оценки одиночной сваи с боковой нагрузкой нас интересуют типы внутренних сил по длине сваи, максимальные деформации и показатели использования сечения сваи. При **постоянном типе** модуля горизонтальной реакции грунта  $k_h$  результирующие значения будут следующие:

– Максимальная деформация сваи:	$u_{\max} = 4.2 \text{ mm} .$	
– Максимальное сдвиговое усилие:	$Q_{\max} = 85.0 \text{ kN} .$	
– Максимальный изгибающий момент:	$M_{\max} = 120.0 \text{ kNm} .$	
– Несущая способность ж/б сваи (изгиб + давление):	16,3 %	ПОДХОДИТ
– Несущая способность ж/б сваи (на сдвиг):	20,2 %	ПОДХОДИТ
– Коэффициент армирования сваи:	69,1 %	ПОДХОДИТ

## Сравнение результатов различных методов расчета модуля реакции грунта

Значения и тип модуля горизонтальной реакции грунта  $k_h$  будут варьироваться в зависимости от используемого метода расчёта и влияющих на него входных параметров грунта. В каждом методе расчета на результаты влияют разные параметры грунта, а именно:

- ПОСТОЯННЫЙ:                      угол рассеивания  $\beta [-]$ ,
  
- ЛИНЕЙНЫЙ (Bowles):            угол рассеивания  $\beta [-]$ ,  
    коэффициент  $k [MN/m^3]$  в зависимости от типа грунта,
  
- По CSN 73 1004:                    будь то связный или несвязный грунт,  
    модуль горизонтальной сжимаемости  $n_h [MN/m^3]$ ,
  
- По VESIC:                            модуль упругости  $E [MPa]$ .

При изменении метода расчета модуля горизонтальной реакции грунта нам потребуется ввести в программу дополнительные параметры грунта (подробнее см. справку к программе – F1) следующим образом:

Модуль реакции грунта $k_h \left[ MN/m^3 \right]$	Угол рассеивания $\beta \left[ - \right]$	Коэффициент $k \left[ MN/m^3 \right]$	Модуль упругости $E \left[ MPa \right]$	Модуль горизонтальной сжимаемости $n_h \left[ MN/m^3 \right]$
ПОСТОЯННЫЙ	10 – CS	---	---	---
	15 – S-F			
ЛИНЕЙНЫЙ (Bowles)	10 – CS	60 – CS	---	---
	15 – S-F	150 – S-F		
CSN 73 1004	Связный грунт – CS, плотная консистенция			---
	Несвязный грунт – S-F, средней плотности			4,5
VESIC	---	---	5,0 – CS	---
			15,5 – S-F	

Таблица параметров грунта по горизонтальной несущей способности одиночной сваи

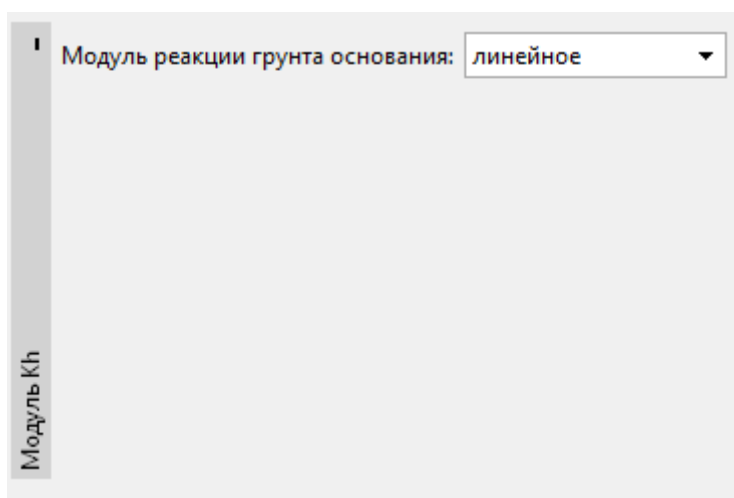


Вернуться во вкладку «Модуль Kh» и изменить настройки. Мы каждый раз будем менять соответствующий метод расчета модуля горизонтальной реакции грунта, а затем добавлять необходимые параметры грунтов. Выполним процедуру следующими методами:

- линейный (по Bowles),
- в соответствии с CSN 73 1004,
- по Vesic.

### **Линейный метод (по Bowles)**

Перейти во вкладку «Модуль Kh» и изменить настройки на «линейное».



*Вкладка «Модуль Kh»*

Во вкладке «Грунты» выбрать грунт «CS — Песчаная глина» и нажать на кнопку «Редактировать». Изменить коэффициент  $k$  на  $\text{МН/м}^3$  и нажать «ОК».

Правка параметров грунта

Имя: **CS - Sandy clay, firm consistency**  
Песчанистая глина (CS), консистенция полутвёрдая

Базовые данные

Удельный вес:  $\gamma = 18,50$  [ $\text{кН/м}^3$ ] 18,5

коэффициент Пуассона:  $\nu = 0,35$  [-] 0,35

Метод NAVFAC

Тип грунта: связный

Связность грунта:  $c_u = 50,00$  [ $\text{кПа}$ ] 50

Коэффициент адгезии:  $\alpha = 0,60$  [-]

Характеристики деформации

Расчёт осадки: ввести  $E_{\text{оed}}$

Одометрический модуль:  $E_{\text{оed}} = 8,00$  [ $\text{МПа}$ ] 6 - 10

Подъёмная сила

Расчёт подъёмной силы: стандартный

Удельный вес водонасыщенного грунта:  $\gamma_{\text{sat}} = 20,50$  [ $\text{кН/м}^3$ ]

Определение модуля реакции основания

Коэффициент:  **$k = 60,00$  [ $\text{МН/м}^3$ ]**

Угол распределения:  $\beta = 10,00$  [°]

Отображение

Категория узоров: GEO

Поиск:

Подкатегория: Грунты (1 - 16)

Штриховка:

5 Песчанистая глина

Цвет штриховки:

Фон: автоматический

Насыщенность <10 - 90>: 50 [%]

Определить Стереть Данные IFC

OK + OK Отмена

Вкладка «Грунты» — Редактировать параметры грунта (грунт CS)

Повторить ту же процедуру для грунта «S-F – Песок со следами мелких частиц». На этот раз установить коэффициент  $k$  равным  $150 \text{ МН/м}^3$ .

Правка параметров грунта

Имя : S-F - Sand with trace of fines, medium dense

Песок с примесью мелкозерн. грунта (S-F), средне уплотнённая

Базовые данные

Удельный вес :  $\gamma = 17,50 \text{ [кН/м}^3\text{]}$  17,5

коэффициент Пуассона :  $\nu = 0,30 \text{ [-]}$  0,30

Метод NAVFAC

Тип грунта : несвязный

Угол внутреннего трения :  $\phi_{ef} = 29,50 \text{ [°]}$  28 - 31

Угол трения на поверхности сави : посчитать

Коэффициент бокового давления грунта : посчитать

Характеристики деформации

Расчёт осадки : ввести  $E_{oed}$

Одометрический модуль :  $E_{oed} = 21,00 \text{ [МПа]}$  16 - 26

Подъёмная сила

Расчёт подъёмной силы : стандартный

Удельный вес водонасыщенного грунта :  $\gamma_{sat} = 19,50 \text{ [кН/м}^3\text{]}$

Определение модуля реакции основания

Коэффициент :  $k = 150,00 \text{ [МН/м}^3\text{]}$

Угол распределения :  $\beta = 15,00 \text{ [°]}$

Отображение

Категория узоров : GEO

Поиск :

Подкатегория : Грунты (1 - 16)

Штриховка :

9 Песок

Цвет штриховки :

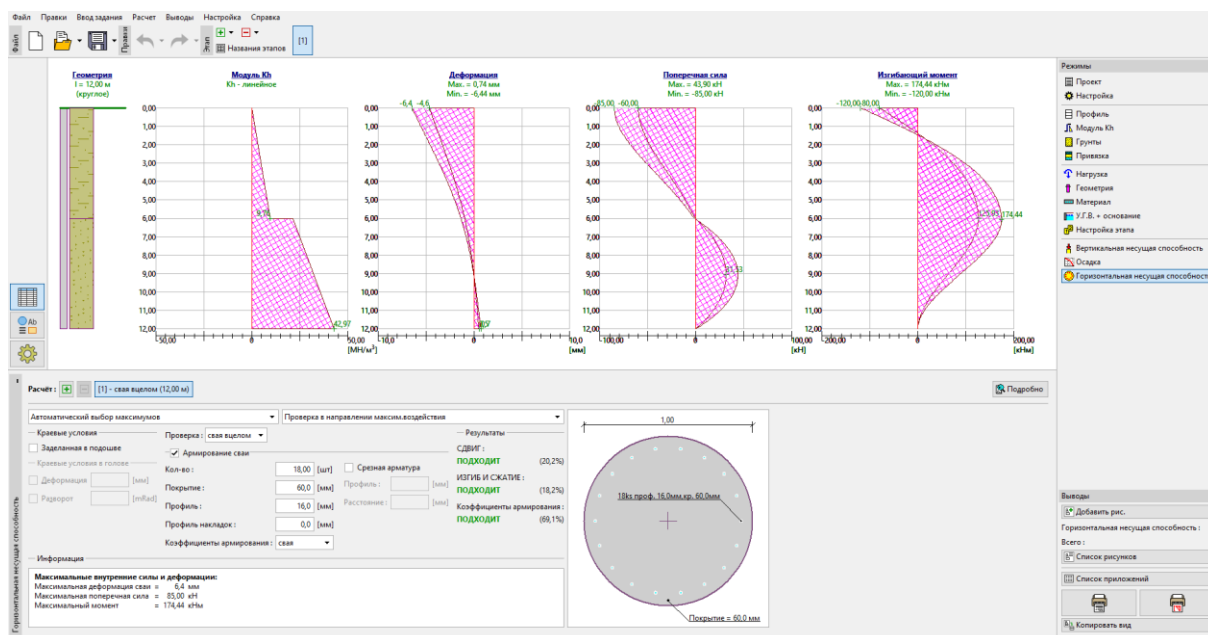
Фон : автоматический

Насыщенность <10 - 90> : 50 [%]

Определить Стереть Данные IFC OK + Отмена

Вкладка «Грунты» — Редактировать параметры грунта (грунт S-F)

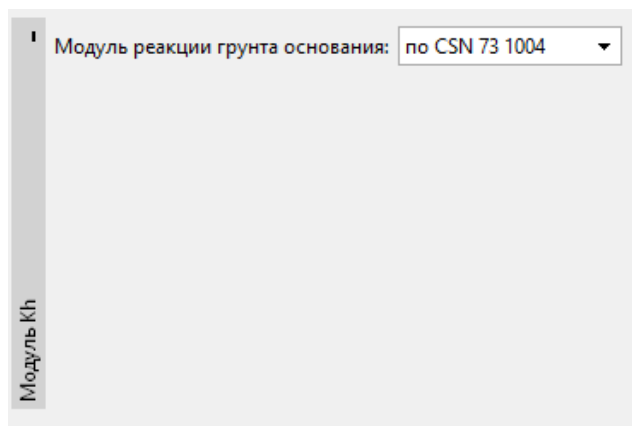
Перейти ко вкладке «Горизонтальная несущая способность», где можно увидеть результаты расчета.



Вкладка «Горизонтальная несущая способность» - Линейный тип модуля горизонтальной реакции грунта  $k_h$ , деформации и внутренние усилия

## В соответствии с CSN 73 1004

Перейти ко вкладке «Модуль Kh» и выбрать метод «по CSN 73 1004».



Вкладка «Модуль Kh»

Во вкладке «Грунты» задать модуль горизонтальной сжимаемости для несвязного грунта «S-F – Песок со следами мелких частиц». Нажать на кнопку «Редактировать» и установить значение модуля на  $4,50 \text{ MN/m}^3$ .

Правка параметров грунта

**Идентификация**

Имя: S-F - Sand with trace of fines, medium dense  
Песок с примесью мелкозерн. грунта (S-F), средне уплотнённая

**Базовые данные**

Удельный вес:  $\gamma = 17,50 \text{ [кН/м}^3\text{]}$  17,5

коэффициент Пуассона:  $\nu = 0,30 \text{ [-]}$  0,30

**Метод NAVFAC**

Тип грунта: несвязный

Угол внутреннего трения:  $\varphi_{ef} = 29,50 \text{ [°]}$  28 - 31

Угол трения на поверхности сави: посчитать

Коэффициент бокового давления грунта: посчитать

**Характеристики деформации**

Расчёт осадки: ввести  $E_{oed}$

Одометрический модуль:  $E_{oed} = 21,00 \text{ [МПа]}$  16 - 26

**Подъёмная сила**

Расчёт подъёмной силы: стандартный

Удельный вес водонасыщенного грунта:  $\gamma_{sat} = 19,50 \text{ [кН/м}^3\text{]}$

**Определение модуля реакции основания**

Тип грунта: несвязный

Модуль горизонтальной сжимаемости:  $n_h = 4,50 \text{ [MN/m}^3\text{]}$

**Отображение**

Категория узоров: GEO

Поиск:

Подкатегория: Грунты (1 - 16)

Штриховка:

9 Песок

Цвет штриховки:

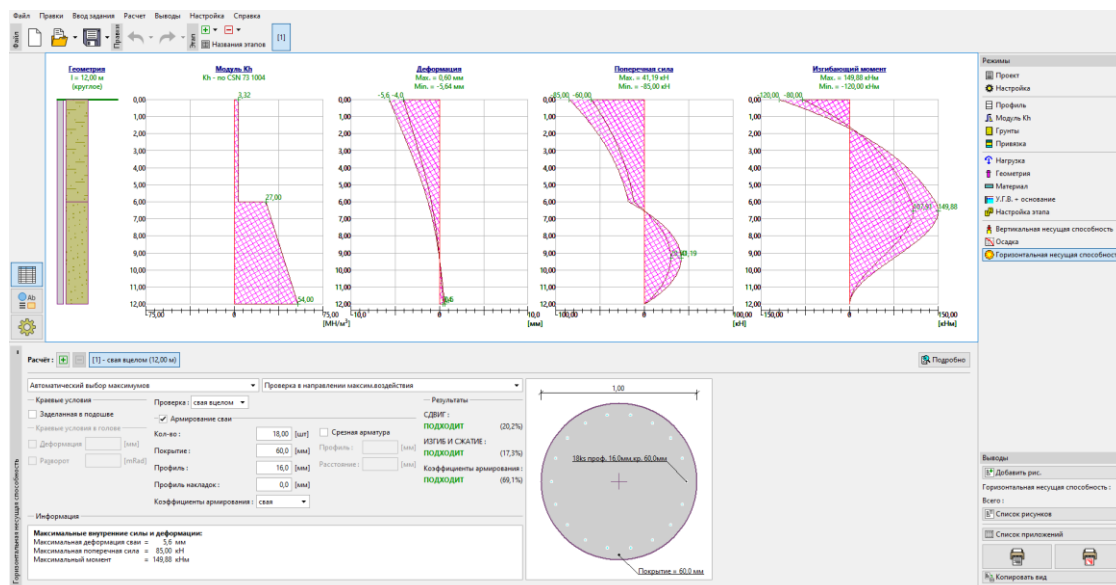
Фон: автоматический

Насыщенность <10 - 90>: 50 [%]

Определить Стереть Данные IFC OK + OK Отмена

Вкладка «Грунты» — Редактировать параметры грунта (грунт S-F)

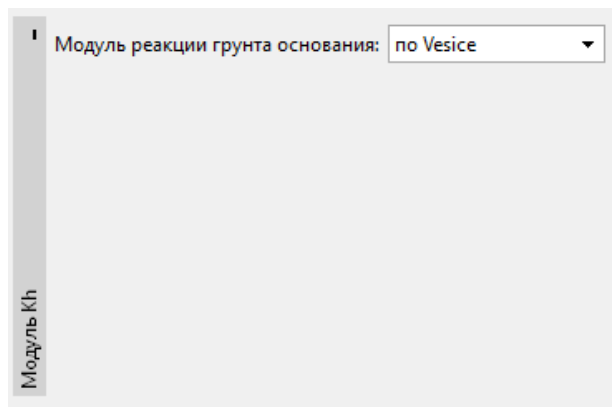
Результаты можно увидеть во вкладке «Горизонтальная несущая способность».



Вкладка «Горизонтальная несущая способность» – значение модуля упругости грунта  $k_h$  в соотв. с CSN 73 1004, деформация и внутренние усилия

## По Vesic

Перейти ко вкладке «Модуль Kh» и выбрать метод «по Vesic»



Вкладка «Модуль Kh»

Во вкладке "Грунты" установить модуль упругости  $E$  для обоих грунтов. Для «CS – песчано-глинистый грунт» значение составит 5 МПа.

Правка параметров грунта

Имя: CS - Sandy clay, firm consistency  
Песчанистая глина (CS), консистенция полутвёрдая

Удельный вес:  $\gamma = 18,50$  [кН/м³] 18,5

коэффициент Пуассона:  $\nu = 0,35$  [-] 0,35

Тип грунта: связный

Связность грунта:  $c_u = 50,00$  [кПа] 50

Коэффициент адгезии:  $\alpha = 0,60$  [-]

Расчёт осадки: ввести  $E_{oed}$

Одометрический модуль:  $E_{oed} = 8,00$  [МПа] 6 - 10

Расчёт подъёмной силы: стандартный

Удельный вес водонасыщенного грунта:  $\gamma_{sat} = 20,50$  [кН/м³]

Модуль упругости:  $E = 5,00$  [МПа]

Категория узоров: GEO

Поиск:

Подкатегория: Грунты (1 - 16)

Штриховка:

5 Песчанистая глина

Цвет штриховки:

Фон: автоматический

Насыщенность <10 - 90>: 50 [%]

Определи

Стереть

Данные IFC

OK +

OK

Отмена

Вкладка «Грунты» — Редактировать параметры грунта (грунт CS)

Затем установить модуль упругости для грунта «S-F – песок со следами мелких частиц». Его значение составит 15,50 МПа.

Правка параметров грунта

**Идентификация**

Имя: S-F - Sand with trace of fines, medium dense

Песок с примесью мелкозерн. грунта (S-F), средне уплотнённая

**Базовые данные**

Удельный вес:  $\gamma = 17,50$  [кН/м<sup>3</sup>] 17,5

коэффициент Пуассона:  $\nu = 0,30$  [-] 0,30

**Метод NAVFAC**

Тип грунта: несвязный

Угол внутреннего трения:  $\phi_{ef} = 29,50$  [°] 28 - 31

Угол трения на поверхности сави: посчитать

Коэффициент бокового давления грунта: посчитать

**Характеристики деформации**

Расчёт осадки: ввести  $E_{oed}$

Одометрический модуль:  $E_{oed} = 21,00$  [МПа] 16 - 26

**Подъёмная сила**

Расчёт подъёмной силы: стандартный

Удельный вес водонасыщенного грунта:  $\gamma_{sat} = 19,50$  [кН/м<sup>3</sup>]

**Определение модуля реакции основания**

Модуль упругости:  $E = 15,50$  [МПа]

**Отображение**

Категория узоров: GEO

Поиск:

Подкатегория: Грунты (1 - 16)

Штриховка:

9 Песок

Цвет штриховки:

Фон: автоматический

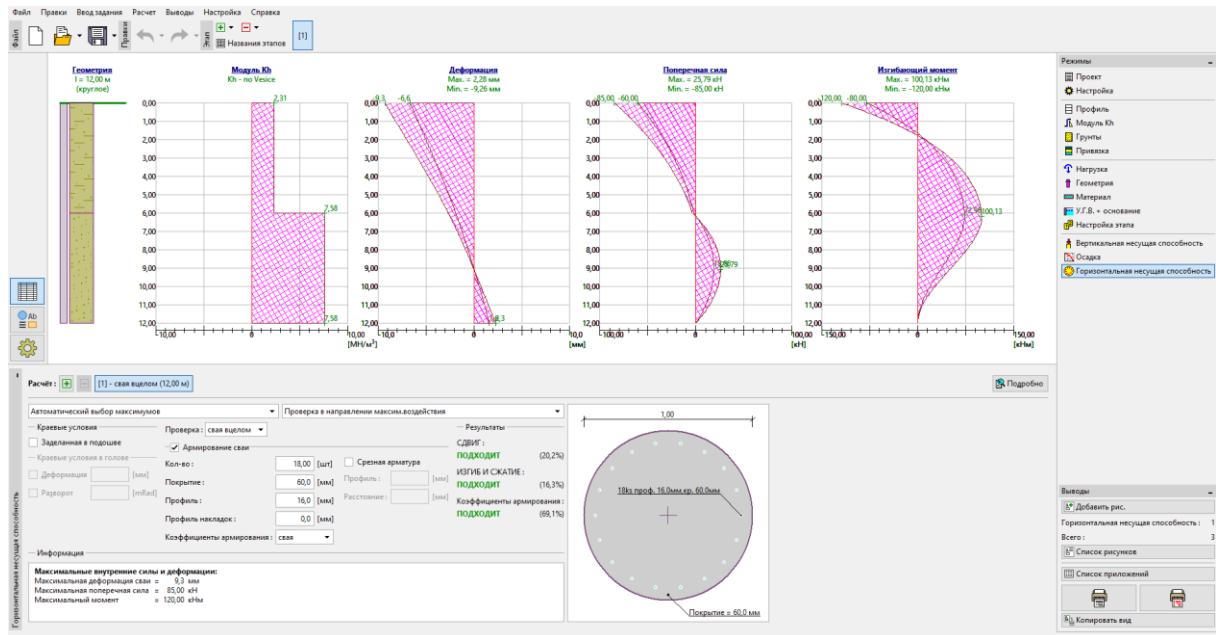
Насыщенность <10 - 90>: 50 [%]

Определить Стереть Данные IFC OK + ↑ OK Отмена

Вкладка «Грунты» — Редактировать параметры грунта (грунт S-F)



Результаты можно увидеть во вкладке «Горизонтальная несущая способность».



Вкладка «Горизонтальная несущая способность» – значение модуля упругости грунта

$k_h$  в соотв. с Vesic, деформация и внутренние усилия

### Результаты расчёта горизонтальной несущей способности одиночной сваи:

Результаты расчёта горизонтальной несущей способности одиночной сваи в соответствии с методом, используемым для расчёта модуля горизонтальной реакции грунта  $k_h$  представлены в следующей таблице:

Модуль реакции грунта $k_h [MN/m^3]$	Максимальное смещение сваи $u_{max} [mm]$	Максимальный изгибающий момент $M_{max} [kNm]$	Несущая способность ж/б сваи [%]
ПОСТОЯННЫЙ	4.2	120.0	16.3
ЛИНЕЙНЫЙ (Bowles)	6.4	174.44	18.2
CSN 73 1004	5.6	149.87	17.3
VESIC	9.3	120.0	16.3

*Таблица результатов – Горизонтальная несущая способность, изгибающий момент и смещение одиночной сваи*

### Вывод

Результаты расчетов показывают, что наблюдаемые значения внутренних усилий по длине сваи и максимальные деформации в оголовке сваи немного отличаются, но влияние выбранного метода расчета модуля упругости грунта не является решающим.