

Численный расчет шпунтового ограждения

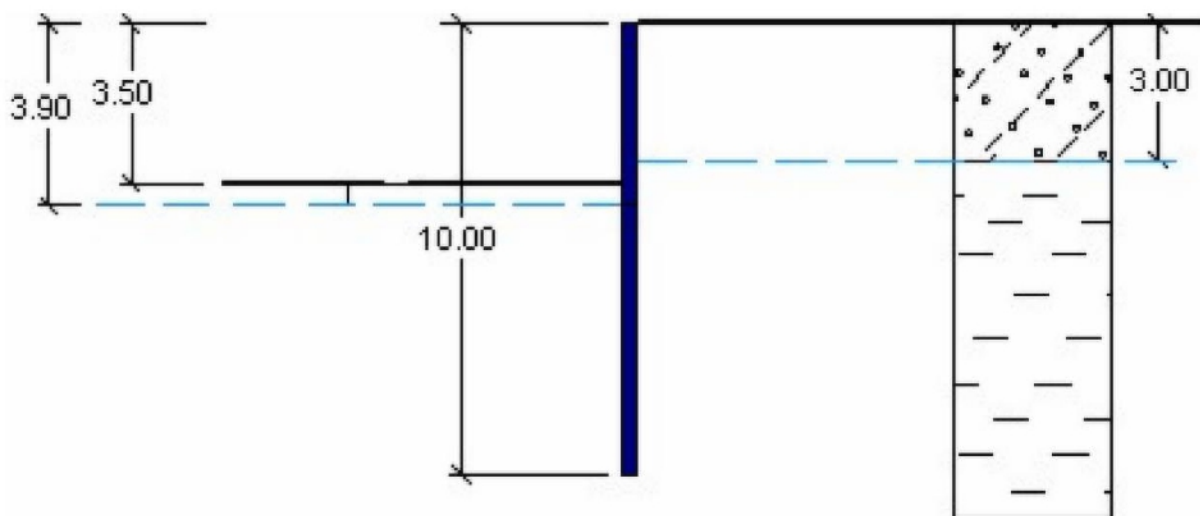
Программа: МКЭ

Файл: Demo_manual_24.gmk

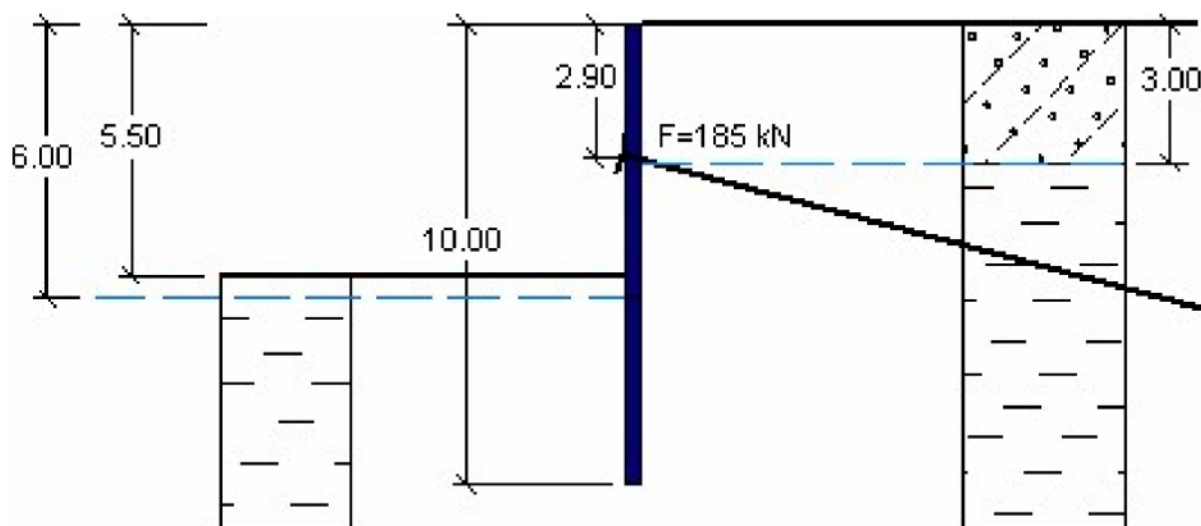
Целью данного руководства является анализ деформаций шпунтового ограждения с анкерным креплением и определение эпюр внутренних усилий с использованием метода конечных элементов.

Описание задачи

Необходимо определить напряженно-деформированное состояние шпунтового ограждения с анкерным креплением, выполненного из шпунта с замками VL 503 ($500 \times 340 \times 9,7$ мм); расчетные схемы для отдельных этапов проектирования представлены на рисунках ниже. Так же необходимо определить внутренние усилия, действующие по длине шпунтового ограждения. Шпунт изготовлен из стали марки EN 10 025: Fe 360. Высота ограждения составляет 10 м.



Этап проектирования 2 - извлечение грунта до глубины 3,5 м



Этап проектирования 3 - установка анкера и извлечение грунта до глубины 5,5 м

Геологический разрез сложен двумя видами грунта со следующими параметрами:

- 0,0 до 3,0 м: Пылеватый песок (SM - средняя плотность сложения)
- ниже 3,0 м: Суглинок легкий (CL, CI - твердая консистенция)

Параметры грунта/ классификация	Гравелистый песок (SM)	Суглинок легкий (CL, CI)
Удельный вес грунта: γ [кН/м ³]	18	21
Модуль упругости: E [МПа]	10	4,5
Модуль упругости при разгрузке: E_{ur} [МПа]	20	13
Коэффициент Пуассона: ν [-]	0,3	0,4
Удельное сцепление: c_{ef} [кПа]	5	12
Угол внутреннего трения: ϕ_{ef} [°]	29	19
Угол дилатансии: ψ [°]	0	0
Удельный вес при полном водонасыщении: γ_{sat} [кН/м ³]	20	23

Таблица параметров грунта - шпунтовое ограждение с анкерным креплением

Решение

Для расчета будет использоваться программа GEO 5 - МКЭ. Пошаговое решение этой задачи будет описано ниже:

- Топология: ввод исходных данных и моделирование задачи (расчетная область, контакты, увеличение плотности сетки вокруг линий);
- Этап проектирования 1: расчет начального геостатического напряжения, определение мониторов точек;
- Этап проектирования 2: активация областей, моделирование балочных элементов, расчет перемещений, внутренних усилий;
- Этап проектирования 3: извлечение грунта, моделирование анкерного крепления, результаты расчета + мониторы;
- Анализ результатов: сравнение, заключение.

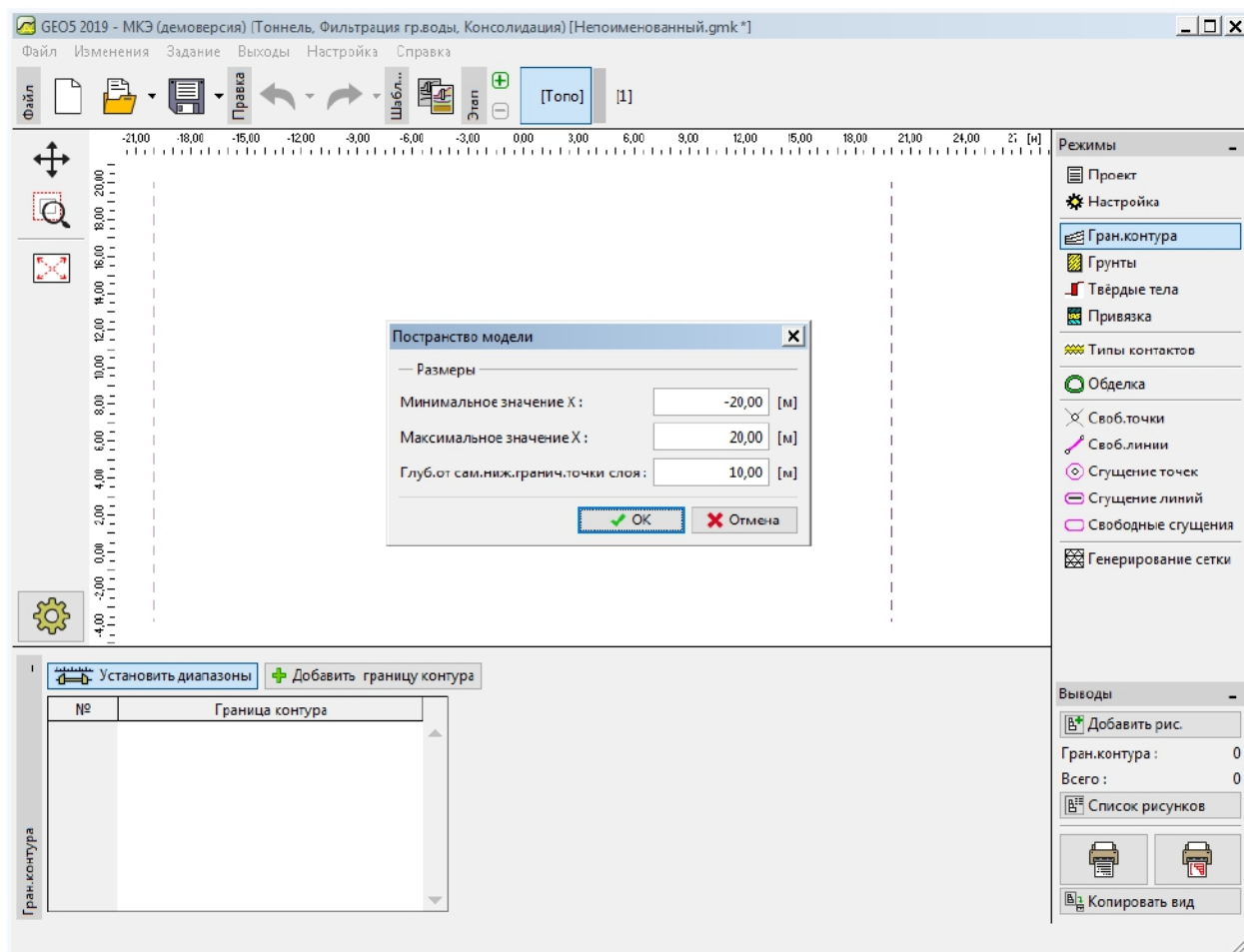
Топология: ввод исходных данных

Для расчета первого этапа проектирования следует указать опцию «Геостат. напряженное состояние». Задача рассматривается в условиях плоской деформации.

Характеристики задачи		Стандарты расчётов		Расширенные возможности программы	
Тип задачи:	Плоскоостная	Бетонные конструкции:	EN 1992-1-1 (EC2)	<input type="checkbox"/> Подробные параметры генерации сетки	
Тип расчета:	Напряжённое состояние	Расчет первич.напряж.состояния (1.этап)		<input type="checkbox"/> Подробные параметры грунтов	
<input checked="" type="checkbox"/> Тоннели		Способ расчета:	Геостат.напряжённое состояние	<input type="checkbox"/> Специальные модели грунтов	
<input type="checkbox"/> Позволить задавать воду с помощью расчёта установившегося потока				<input type="checkbox"/> Температурная нагрузка	
				<input type="checkbox"/> Подробные результаты	

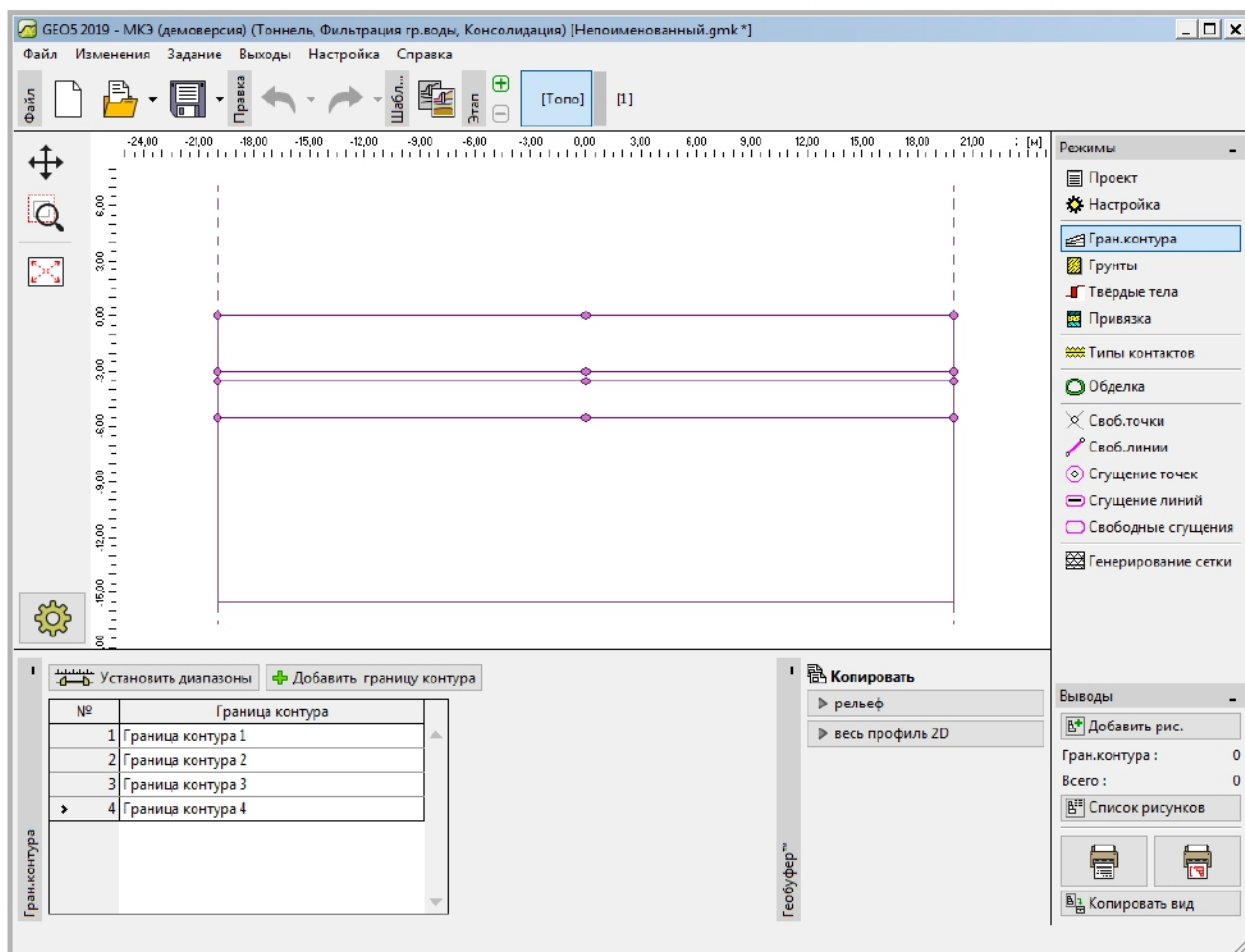
Исходные данные задачи

Далее следует задать размеры пространства модели; размеры назначаются достаточными, чтобы граничные условия не оказывали влияния на результат расчета. Для данной задачи указываются размеры (-20 м; 20 м); величина глубины исследуемой области 10 м.



Диалоговое окно "Пространство модели"

При выполнении расчетов подпорных стен необходимо указывать глубины, до которых предполагается разработка грунта, как границы слоев на отдельных этапах проектирования. В данном случае в качестве границ слоев следует задать уровень поверхности на отметке 0,0 м и горизонтальные границы на уровнях -3,0 м, -3,5 м, и -5,5 м. Точка с координатами [0,0; 0,0] отмечает верх подпорной стенки.

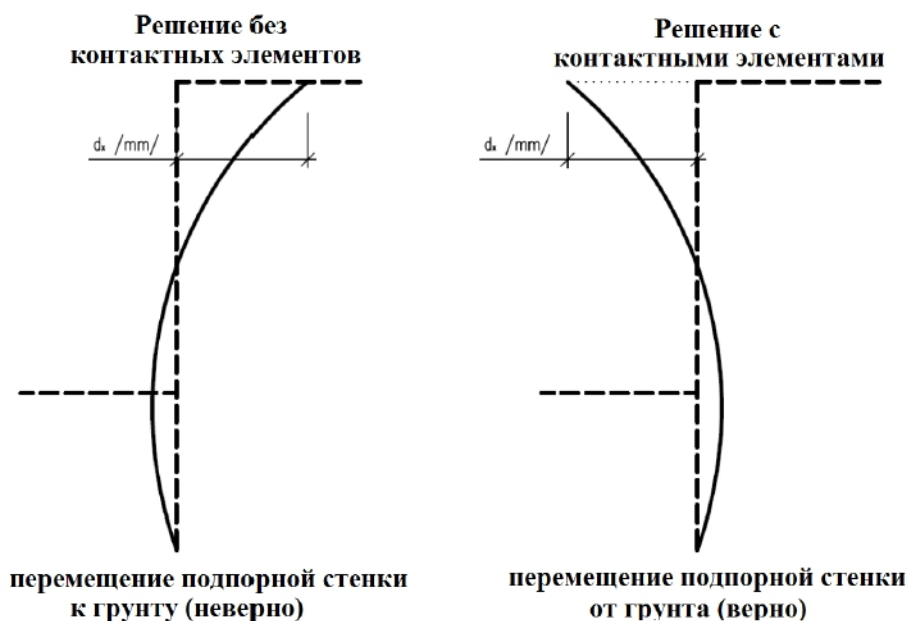


Вкладка "Границы контура"

Далее следует задать соответствующие параметры грунта и присвоить вид грунта созданным областям. Будет использоваться модель Modified Mohr-Coulomb (см. примечание).

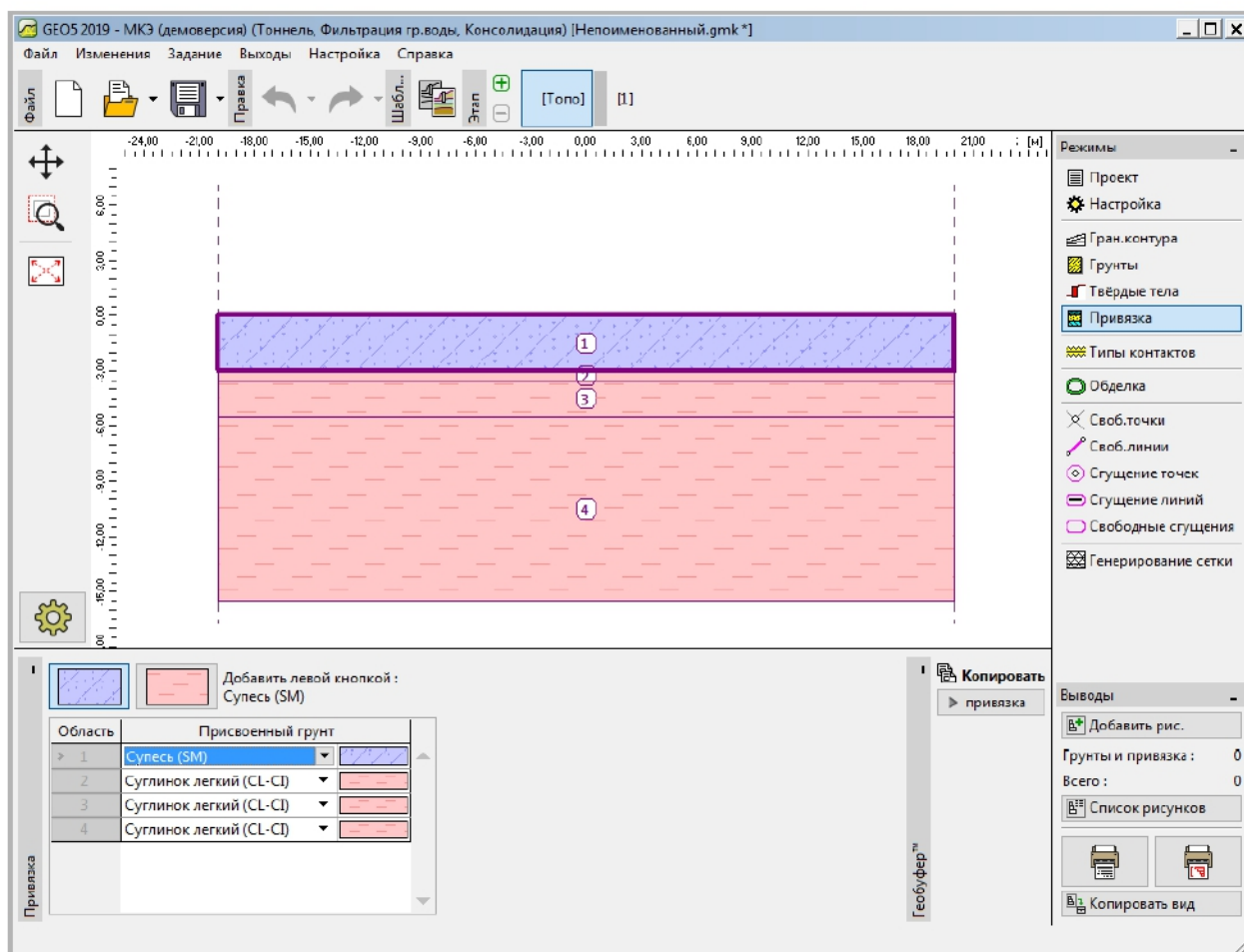
Диалоговое окно "Добавление новых грунтов"

Примечание: при расчетах шпунтовых ограждений необходимо вводить контактные элементы между грунтом и балкой. Выполнение расчетов без контактных элементов приводит к совершенно нереалистичным результатам (более подробная информация приведена в Справке – F1).



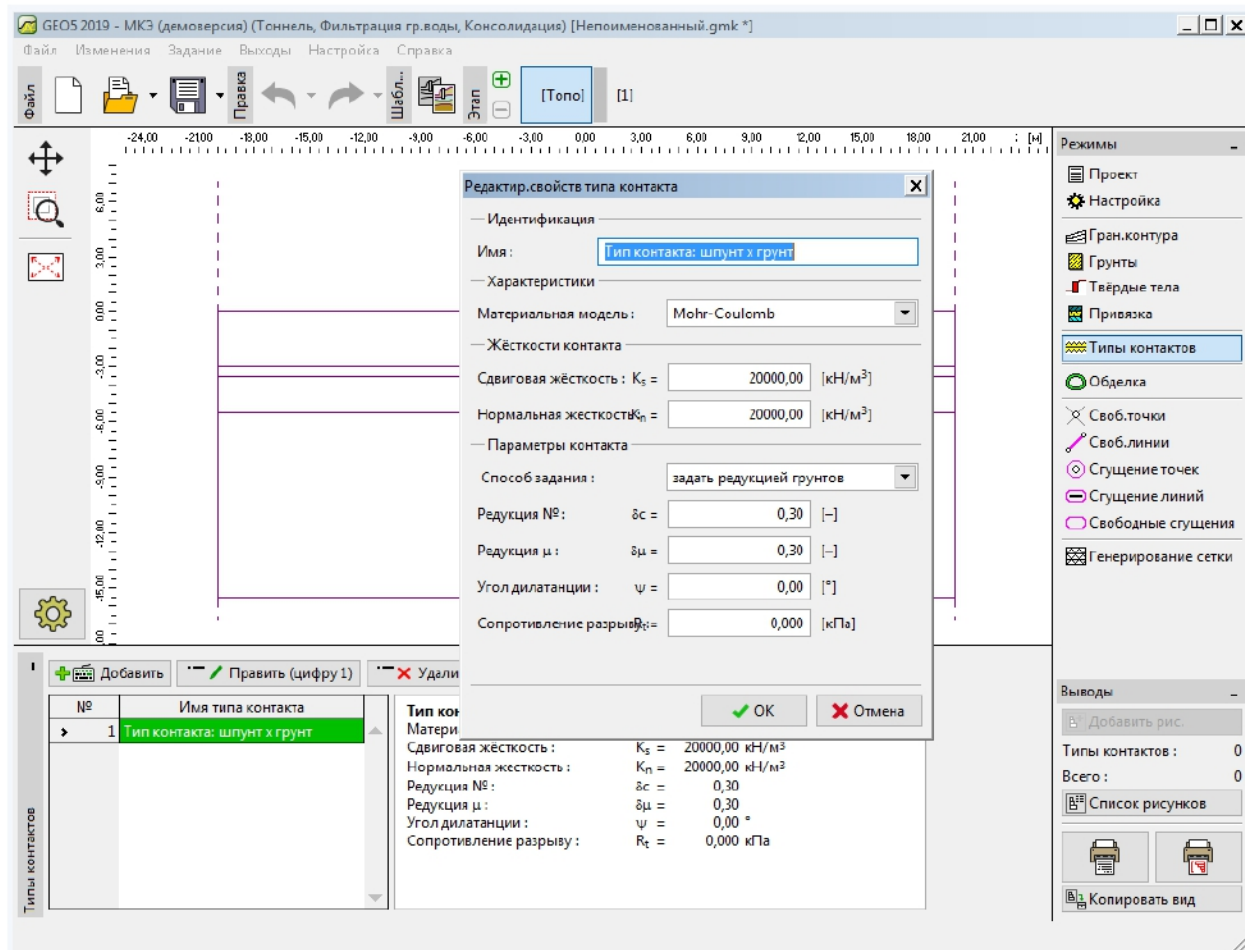
Применение подходящей модели материала для численного анализа подпорных сооружений

На следующем рисунке показано присвоение вида грунта элементам геологического разреза.



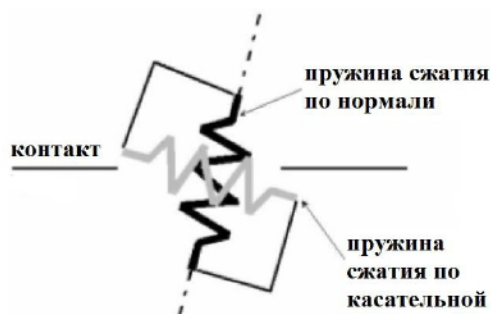
Вкладка "Привязка"

На следующем шаге задаются параметры контакта (с использованием кнопки "Добавить"). При проведении расчетов шпунтовых ограждений необходимо определять контакт для балочных элементов с помощью нелинейных моделей материала. В данном случае для получения реалистичных результатов используется модель Mohr-Coulomb. Предполагается, что снижение параметров грунта на контакте составит $\delta c = \delta \mu = 0,3$, величина жесткости на контакте используется по умолчанию $K_s = K_n = 20\,000 \text{ кН/м}^3$.



Диалоговое окно "Типы контактов"

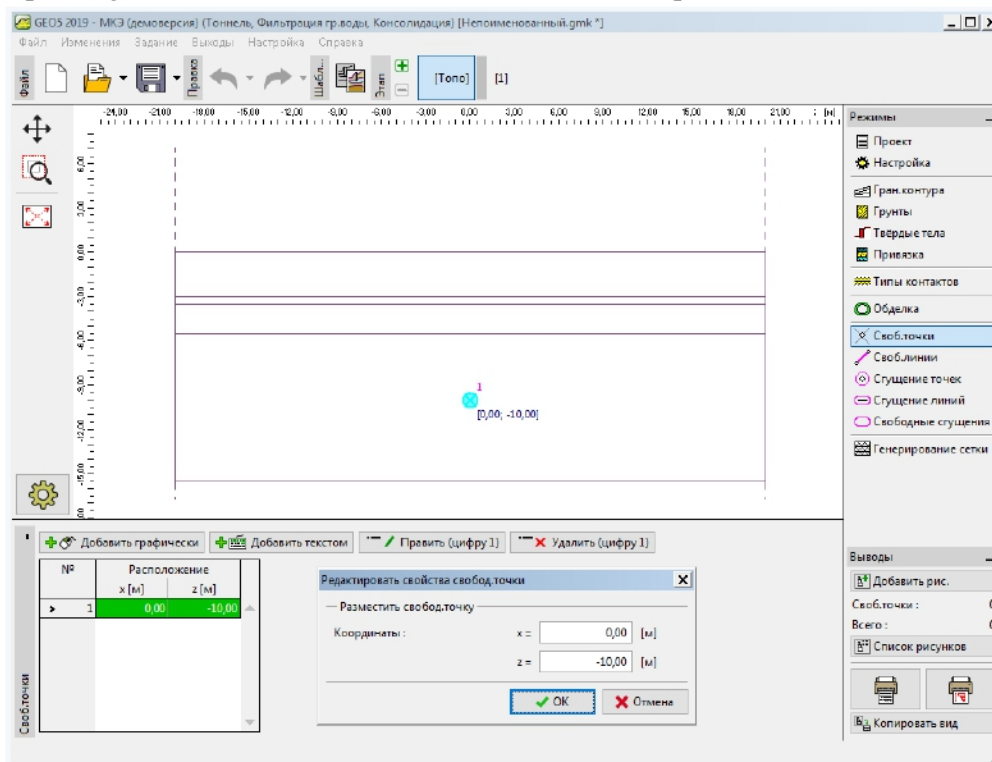
Примечание: контактные элементы используются в расчете для описания взаимодействия между сооружением и окружающей средой - границы между двумя принципиально разными материалами (грунт - шпунт). Типичным примером использования контактных элементов может являться моделирование шпунтовых ограждений, подпорных стен и обделок тоннелей, где контактные элементы используются для моделирования тонкого слоя дисперсного или скального грунта, где развиваются интенсивные напряжения, в первую очередь касательные. Контактные элементы могут вводиться даже между отдельными слоями грунта. Контактный элемент - это элемент нулевой толщины, отражающий отношение между контактными напряжениями и относительными перемещениями вдоль контактной поверхности (более подробная информация приведена в Справке - F1).



Условное представление контактного элемента

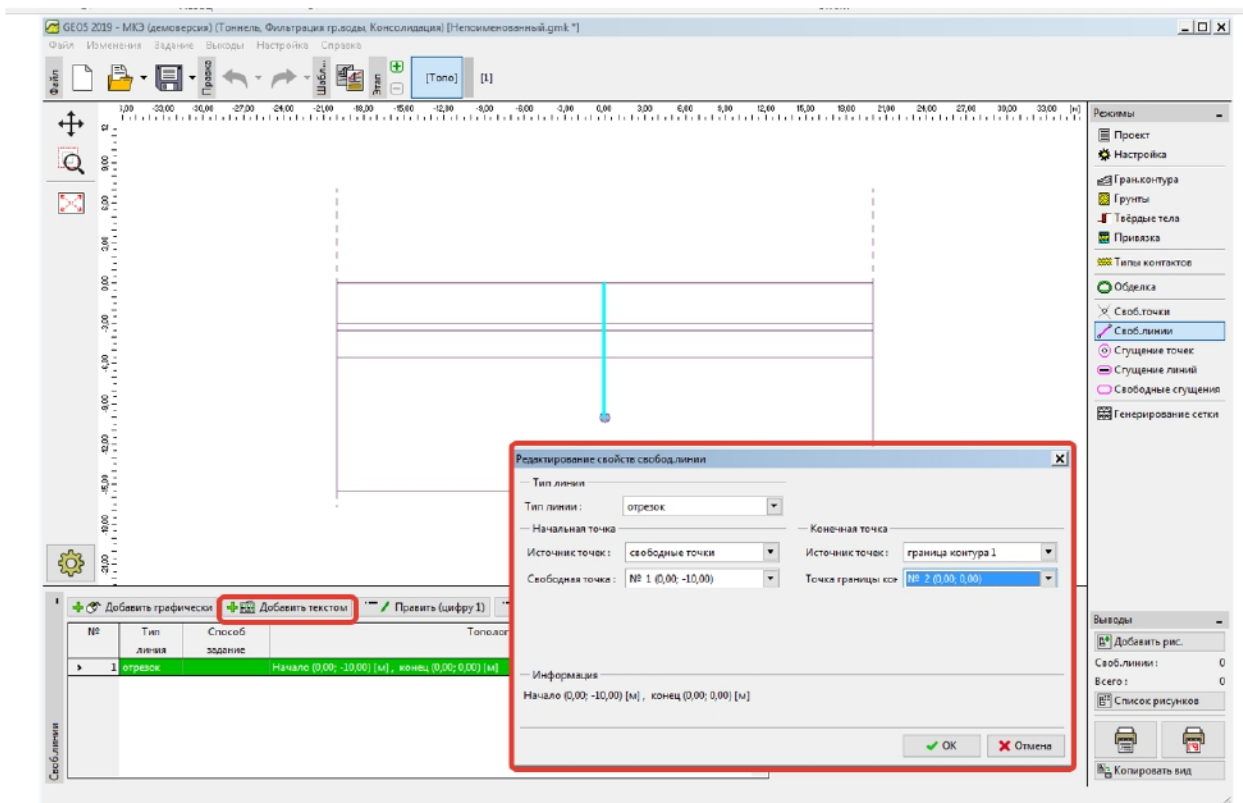
Примечание: несмотря на то, что выбор параметра K_s не важен в случае полностью пластического поведения контакта, его численное значение принципиально для успешного решения задачи в нелинейной постановке. Слишком высокие значения жесткости (более $100\,000\text{ кН/м}^3$) могут привести к колебаниям численного решения. С другой стороны, слишком низкие значения K_s и K_n (менее $10\,000\text{ кН/м}^3$) могут привести к завышенным деформациям конструкций. Однако, величины контактных напряжений K_s и K_n сами по себе незначительно зависят от выбора жесткости K_s и K_n (более подробная информация приведена в Справке - F1).

Далее во вкладках "Свободные точки" и "Свободные линии" задается геометрия шпунтового ограждения. Принцип задания свободных точек и свободных линий подробно описан в предыдущей Главе 23. *Расчет обделки коллектора.*



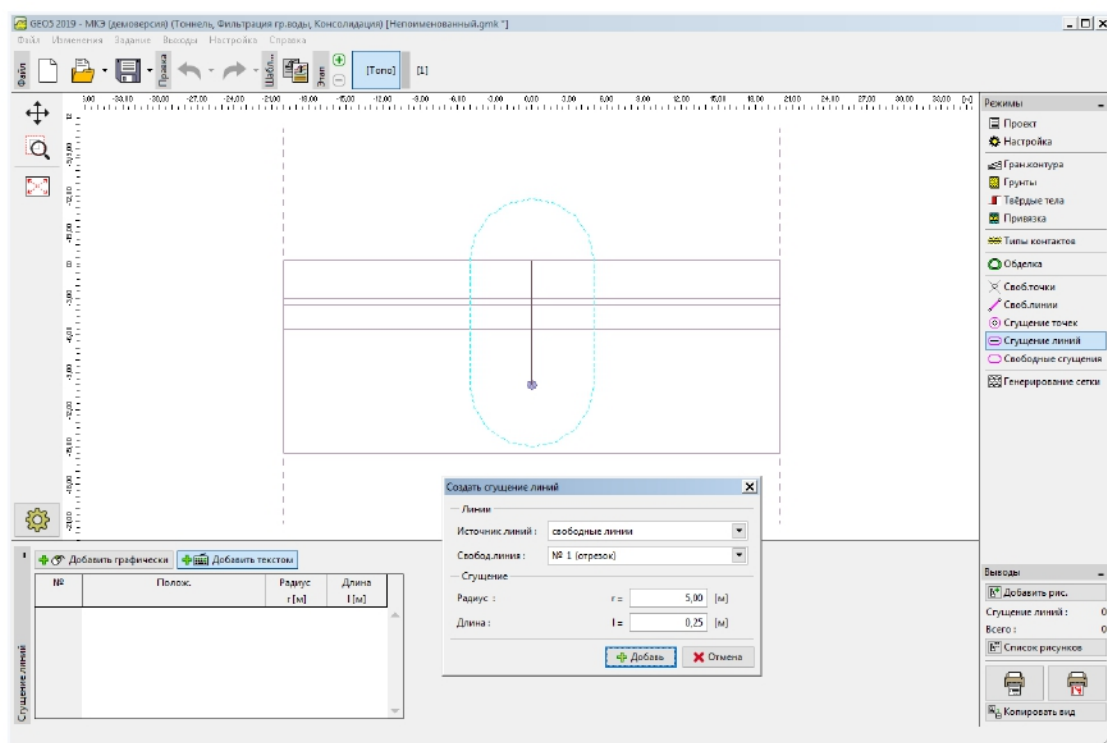
Диалоговое окно "Создать свободные точки"

Сначала следует создать свободную точку с координатами $[0,0; -10,0]$. Свободная линия, изображающая шпунтовое ограждение, будет соединять эту точку с точкой на поверхности (более подробная информация представлена в Справке - F1).



Диалоговое окно "Создать свободные линии"

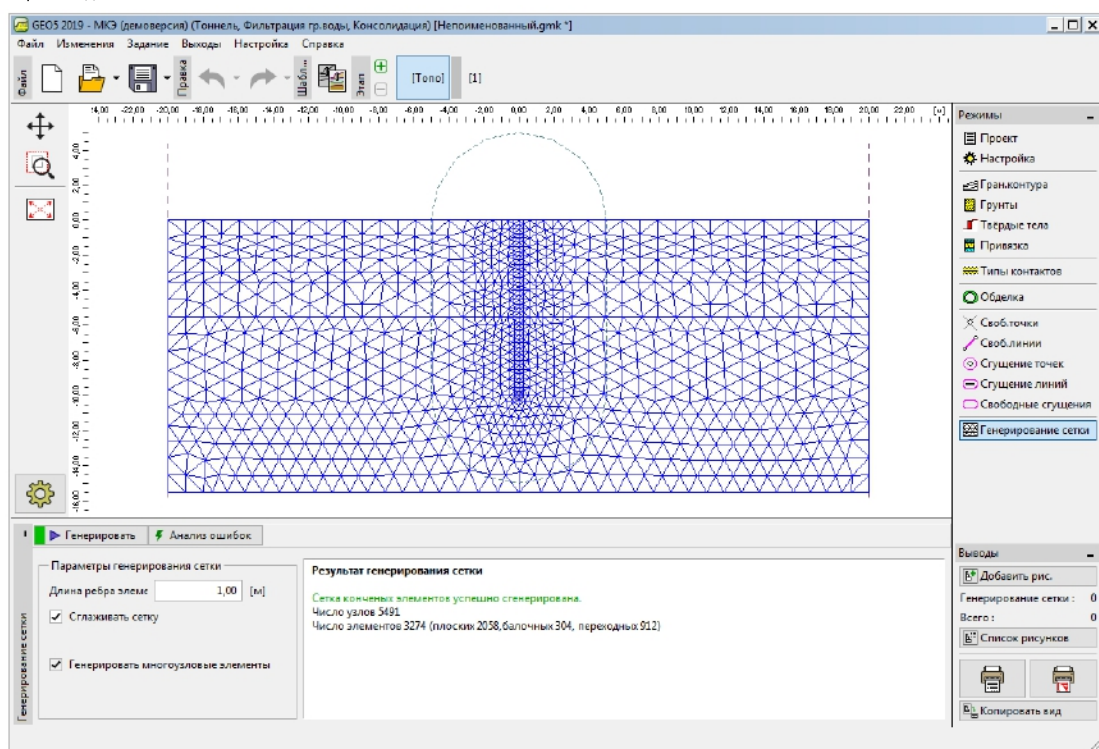
Последним этапом задания топологии является создание сетки конечных элементов. Имеет смысл увеличить плотность сетки КЭ вокруг шпунтового ограждения. Во вкладке "Сгущение линий" следует выбрать радиус увеличения плотности $r = 5,0$ м и длину стороны элемента $l = 0,25$ м.



Диалоговое окно "Создать сгущение линий"

Далее можно перейти во вкладку "Генерирование сетки" и создать сетку с размером элементов 1,0 м (используя кнопку "Генерировать"). Программа автоматически сгладит сетку КЭ с увеличенной плотностью.

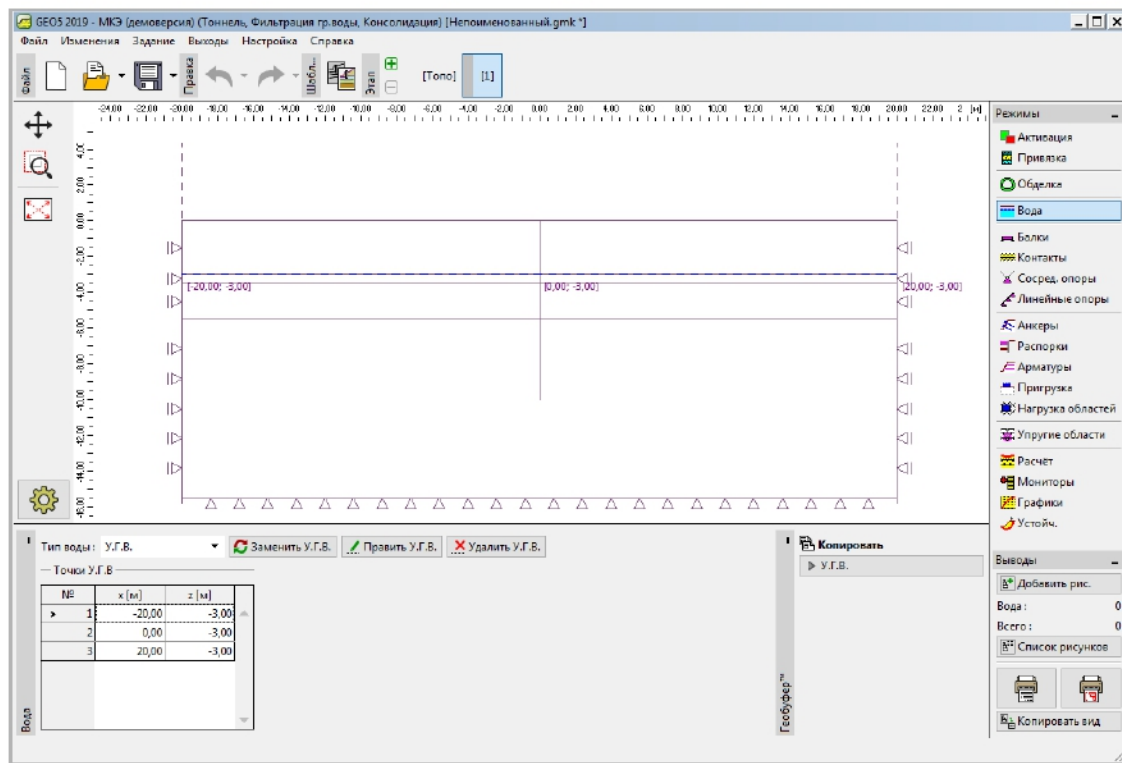
Примечание: Далее необходимо визуально проверить, насколько адекватна плотность сетки конечных элементов степени сложности данной задачи (более подробно в Справке -F1). Увеличение плотности сетки влечет за собой стабилизацию (сходимость) нелинейного анализа, аналогичный эффект достигается уменьшением сдвиговой жесткости.



Вкладка "Генерирование сетки" - элементы с длиной стороны 1,0 м (с локальным увеличением плотности сетки)

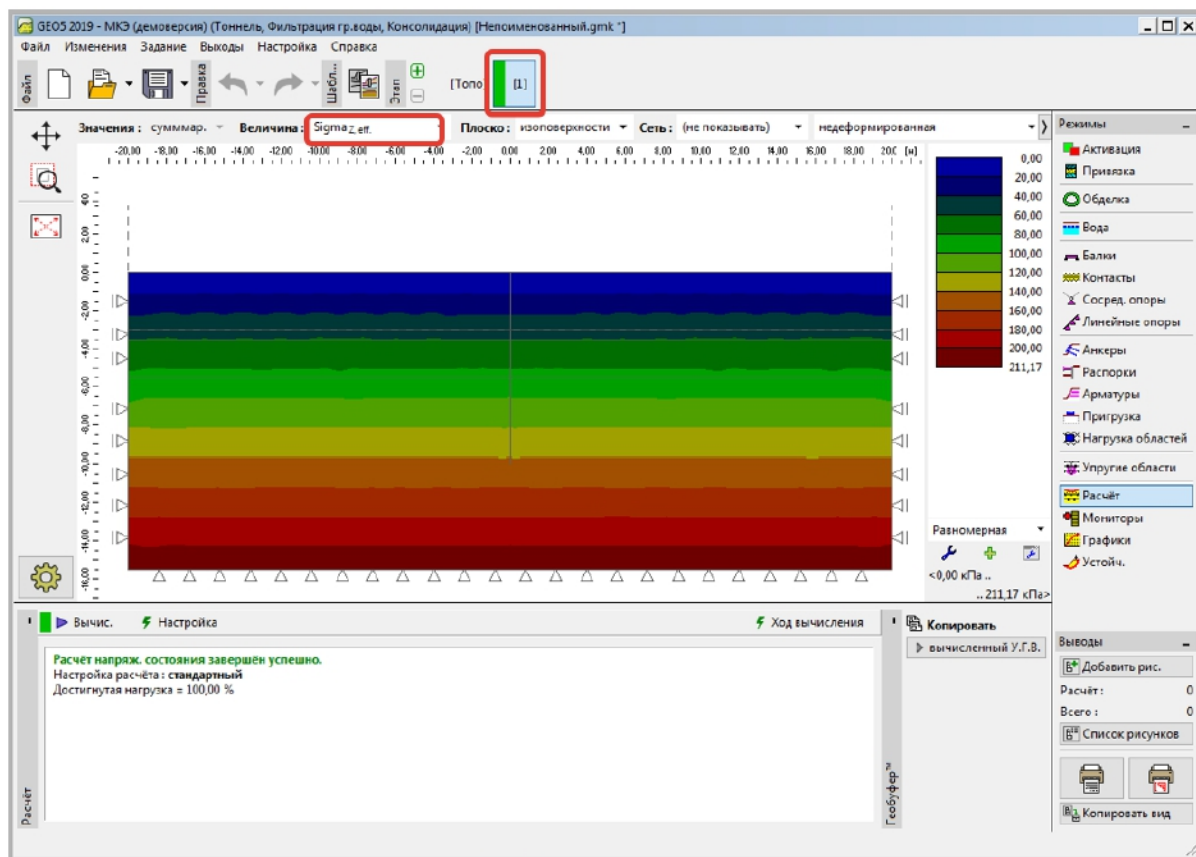
Этап проектирования 1: расчет геостатического напряжения

После создания сетки можно перейти к этапу проектирования 1 и задать положения уровня грунтовых вод (далее - УГВ) на глубине 3,0 м ниже поверхности грунта (см. рисунок).



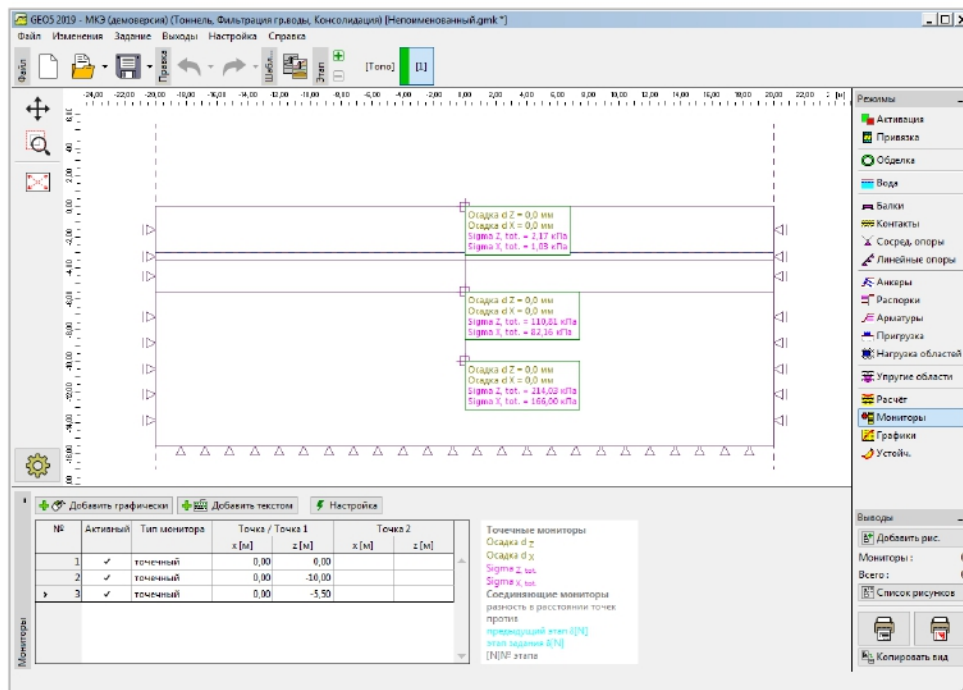
Вкладка "Вода" - Этап проектирования 1 (УГВ на глубине 3,0 м)

Теперь можно провести расчет геостатического напряжения. Параметры расчета остаются стандартными (более подробная информация представлена в Справке - F1).



Вкладка "Расчет" - Этап проектирования 1 (вертикальное геостатическое напряжение $\sigma_{z,ef}$)

С целью просмотра конкретных величин (в ходе расчета отдельных этапов проектирования) в программе следует определить так называемые *мониторы точек* (используя кнопку "Добавь"). Для этого необходимо задать положение точек, которые будут у пята и у оголовка шпунтового ограждения, т.е. $[0,0; 0,0]$ и $[0,0; -10,0]$, и в области извлекаемого грунта на уровне отметки дна котлована $[0,0; -5,5]$.

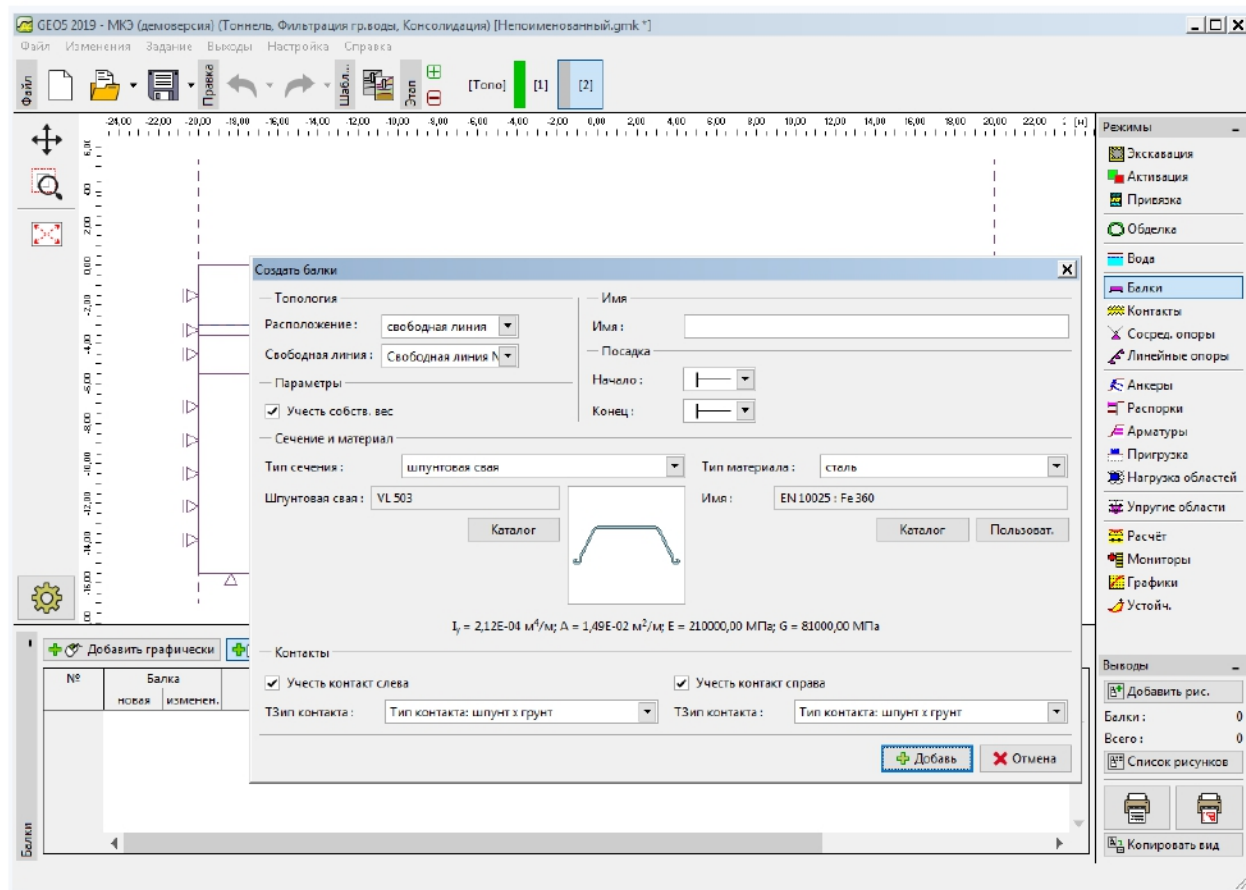


Вкладка "Мониторы" - Этап проектирования 1 (мониторы точек)

Примечание: отдельные значения параметров, которые следует отобразить в результатах, можно редактировать с использованием кнопки "Настройки" (в нижнем правом углу экрана). При проведении расчетов шпунтового ограждения наибольший интерес представляют изменения геостатического напряжения и величина вертикальных и горизонтальных перемещений.

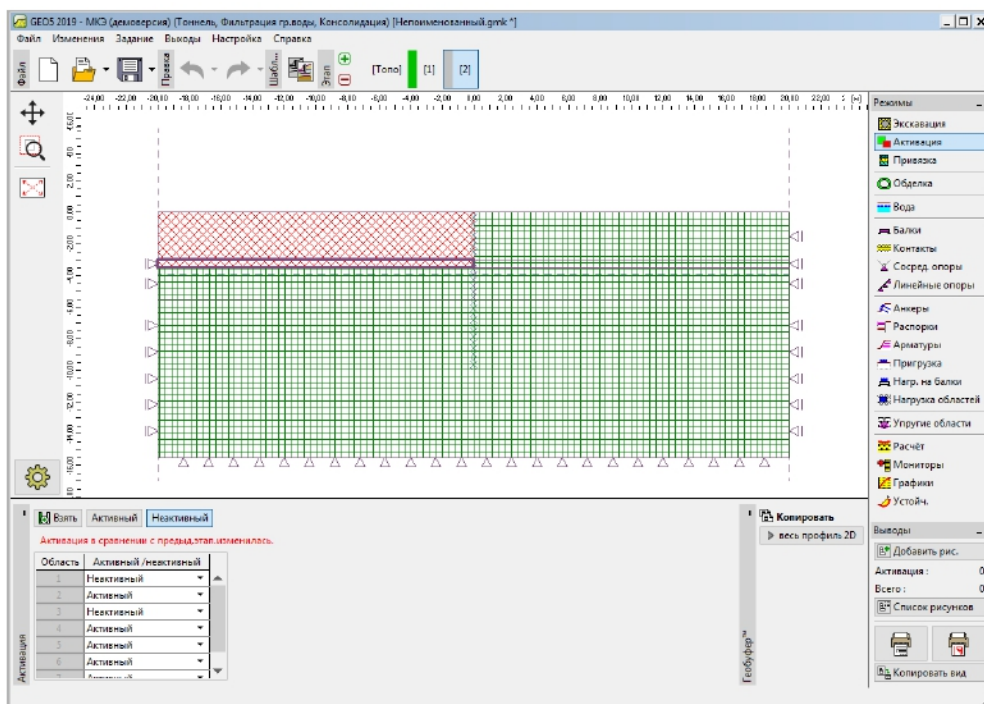
Этап проектирования 2: моделирование балочных элементов

На данном этапе проектирования в первую очередь выполняется моделирование шпунтовой стенки во вкладке "Балки". Следует определить следующие соотношения: положение, материала и класс стали, вид поперечного сечения, заделки на концах балки и условия контакта (более подробная информация в Справке – F1).



Диалоговое окно "Создать балки" - Этап проектирования 2

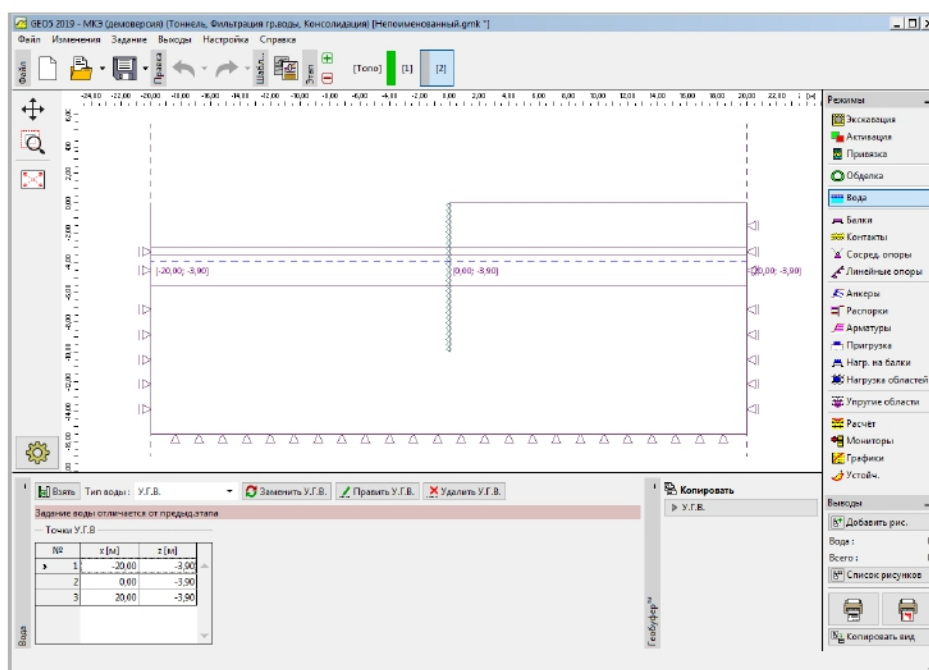
Далее в окне "Активация" моделируется разработка грунта - с помощью указателя мыши выделенные области отмечаются как неактивные (более подробная информация в Справке – F1).



Вкладка "Активация" - Этап проектирования 2

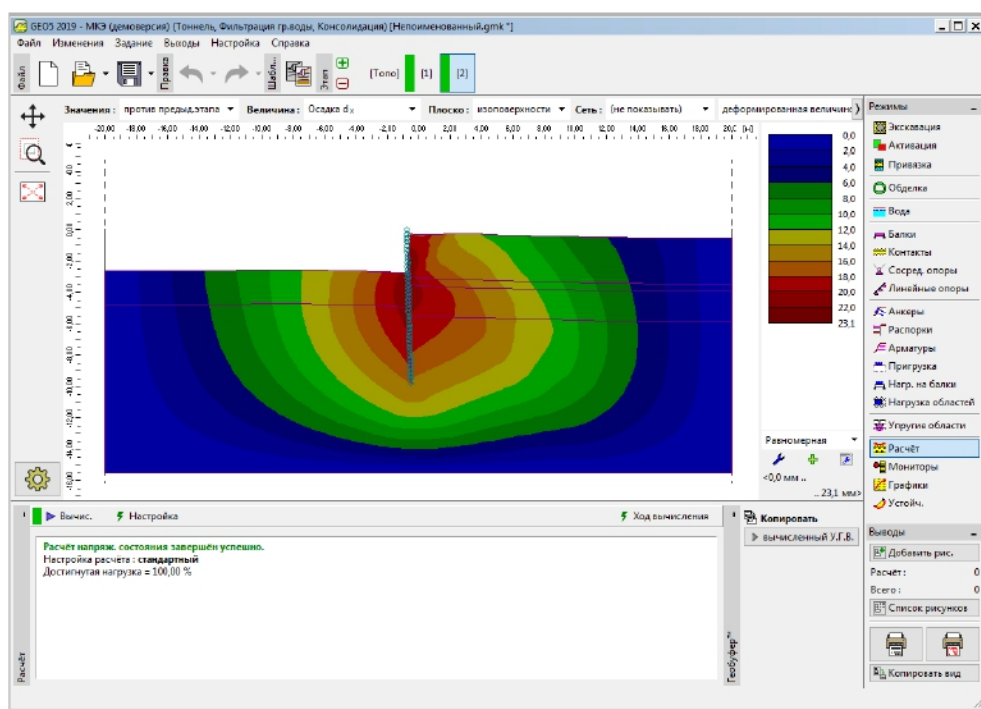
Примечание: из предыдущего рисунка следует, что автоматический корректор структуры, встроенный в программу, разделил слои грунта, пересеченные подпорной стенкой на отдельные области (более подробная информация представлена в Справке - F1).

Далее во вкладке "Вода" задается изменение УГВ в соответствии со следующим рисунком. Прочие параметры остаются без изменений.

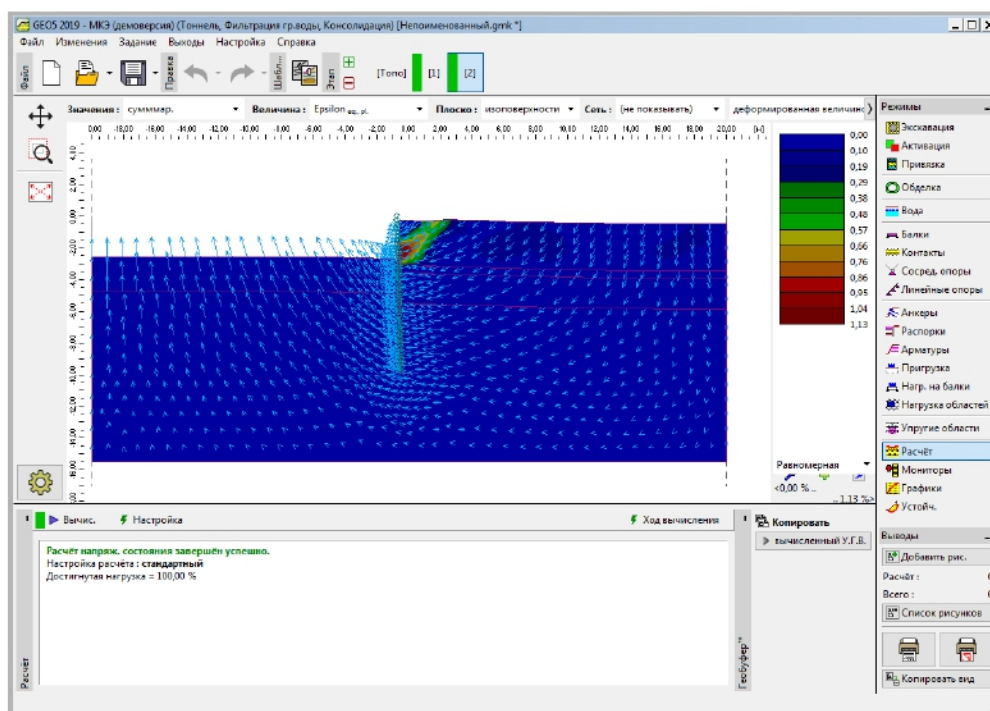


Вкладка "Вода" - Этап проектирования 2 (изменение положения УГВ)

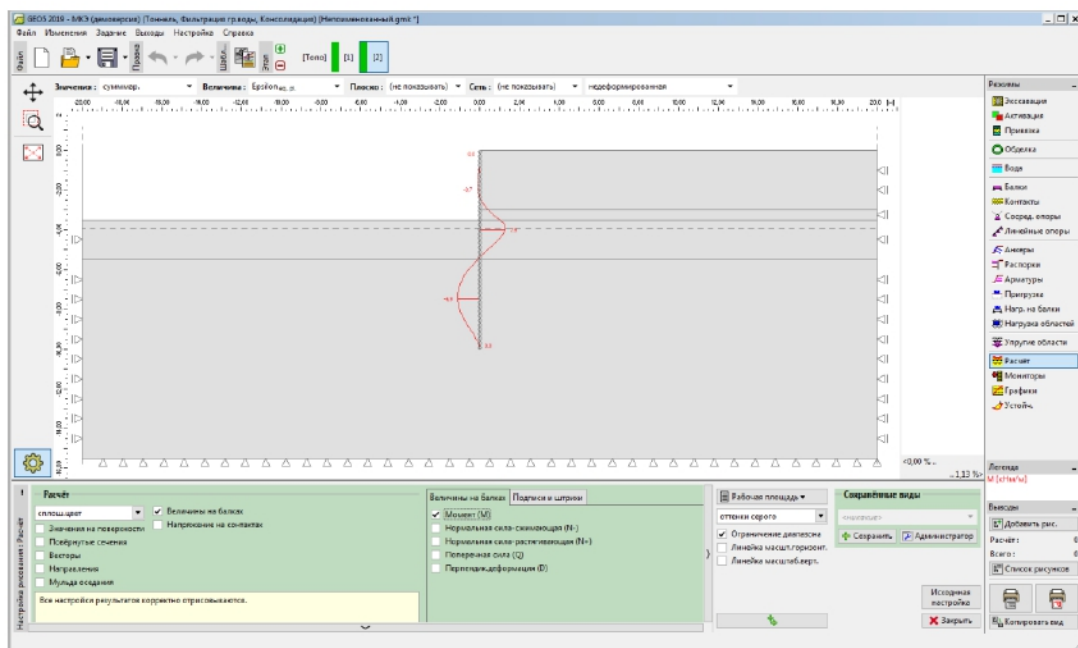
Далее можно выполнить расчет этапа проектирования 2 и просмотреть результаты: распределение внутренних усилий в балке, эквивалентные пластические деформации и деформированное сооружение.



*Вкладка "Расчет" - Этап проектирования 2
(перемещения d_x - деформированное сооружение)*



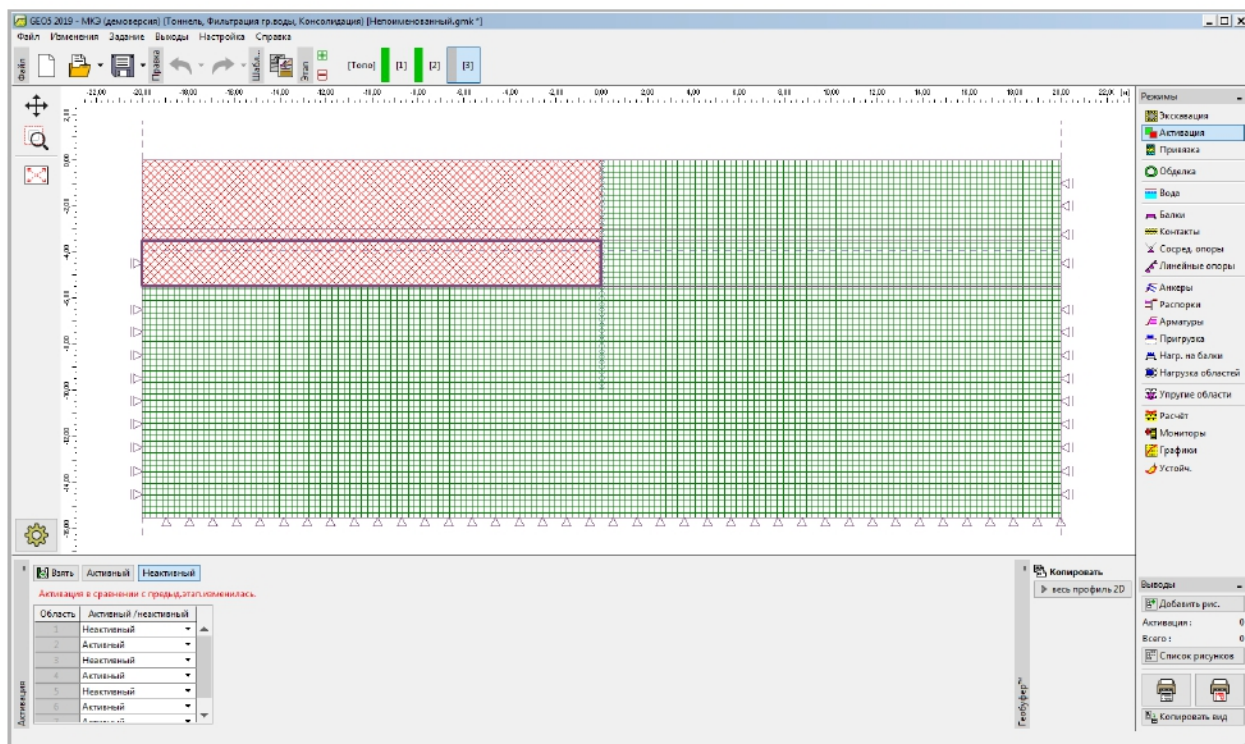
*Вкладка "Расчет" - Этап проектирования 2
(эквивалентные пластические деформации $\epsilon_{eq,pl}$ и векторы перемещений)*



Вкладка "Расчет" - Этап проектирования 2 (распределение изгибающих моментов M)

Этап проектирования 3: моделирование анкерного крепления

На этапе проектирования 3 проводится выемка грунта. Следует выбрать область с помощью указателя мыши и нажать кнопку "Неактивный".



Вкладка "Активация" - Этап проектирования 3

Далее, во вкладке "Анкеры" в диалоговом окне "Создать анкеры" нажатием кнопки "Добавь" следует создать стальной анкер с усилием преднапряжения $F = 185$ кН. Предполагается, что анкер расположен на глубине 2,9 м от поверхности грунта - координаты точки заделки $[0,0; -2.9]$.

Примечание: анкеры моделируются программой как упругие стержневые элементы с постоянной жесткостью. Разрушение анкерного элемента контролируется путем задания максимального усилия. Анкер закрепляется в грунте в двух точках - в заделке и в корне. Никакого взаимодействия между грунтом и армирующим элементов по длине анкера не предполагается (более подробная информация представлена в Справке - F1).

Для данной задачи принимаются следующие параметры анкера:

- Длина анкера: $l = 12$ м;
- Наклон тяги: $\alpha = 15^\circ$;
- Диаметр анкера: $d = 10$ мм;
- Шаг анкеров: $b = 1$ м.

Примечание: жесткость анкера определяется в расчете модулем упругости, площадью поперечного сечения и шагом анкеров. Необходимо понимать, что в случае плоской

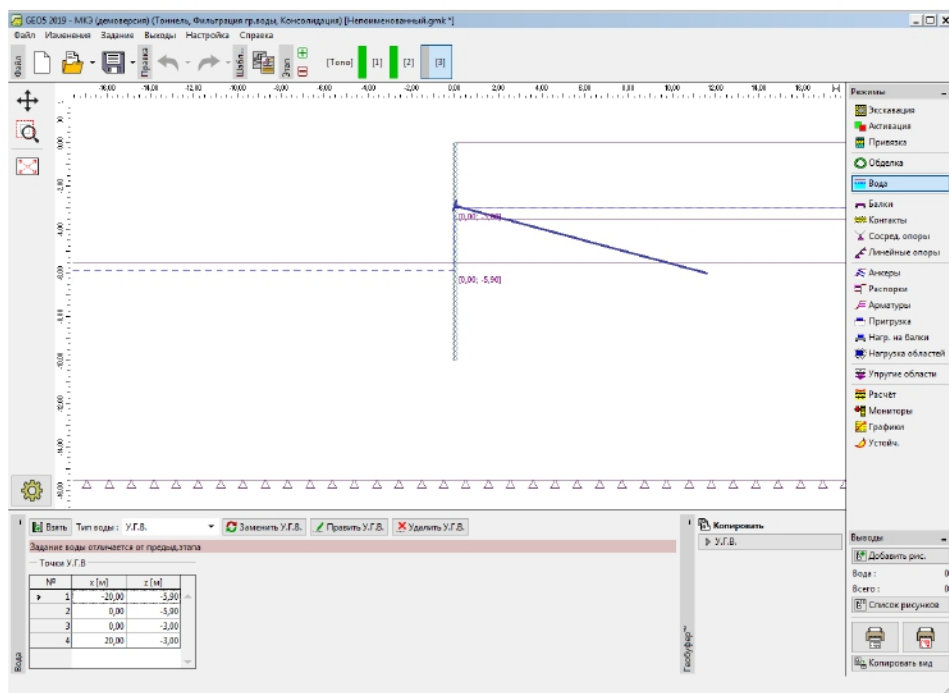
деформации отдельные анкера заменяются оболочкой шириной 1 м. Другим важным входным параметром анкера является усилия преднатяжения и усилие разрыва. В данной задаче не рассматривается возможность разрушения армирующего элемента, поэтому величина усилия разрыва F_c задается достаточно большой (более подробная информация представлена в Справке - F1).

Диалоговое окно "Создать анкера" - Этап проектирования 3

Примечание: анкер деформируется в ходе расчета. В результате деформации анкера и окружающего массива усилие преднатяжения может снизиться. Следовательно, если есть необходимость поддерживать усилие преднатяжения постоянным, следует приложить дополнительное напряжение на следующем этапе проектирования или изначально установить достаточно большое усилие (результатирующее усилие в анкере после расчета, превышающее усилие преднатяжения, отражается на эпюре в точке заделки). На последующих этапах проектирования параметры анкера не могут быть изменены, допускается только приложение напряжения до достижения нового значения усилия преднатяжения, либо полное удаление анкера.

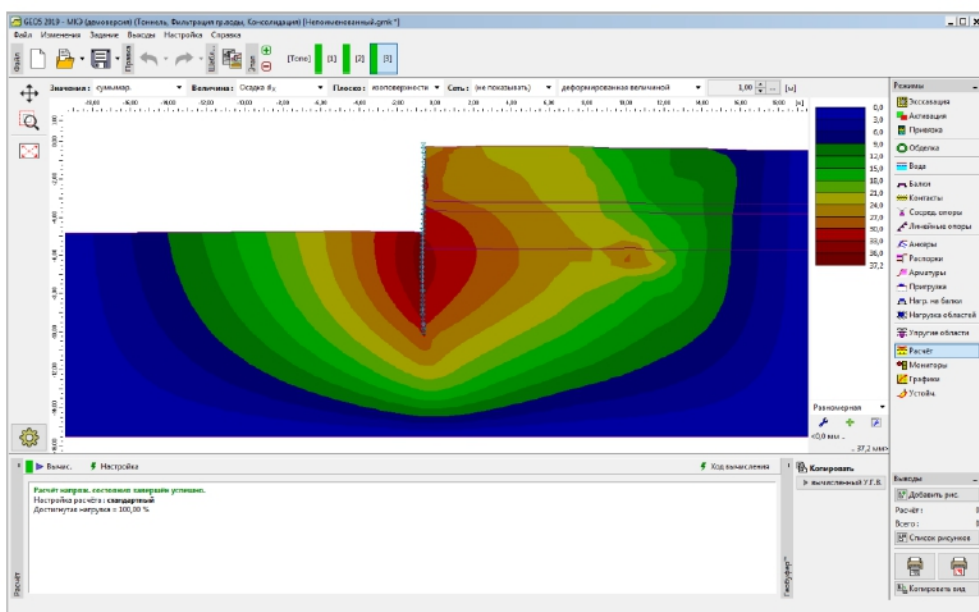
Заделка анкера в массив грунта должна быть достаточно прочной (закрепление к элементу) для того, чтобы не происходило маловероятного выдергивания анкера при развитии значительных пластических деформаций вблизи корня (закрепление к узлу, значительное увеличение плотности вокруг корня), вызывающего нереалистичное снижение усилия преднатяжения.

На последнем шаге определения параметров этапа проектирования 3 меняется УГВ в соответствии с рисунком ниже. Остальные параметры остаются без изменений.



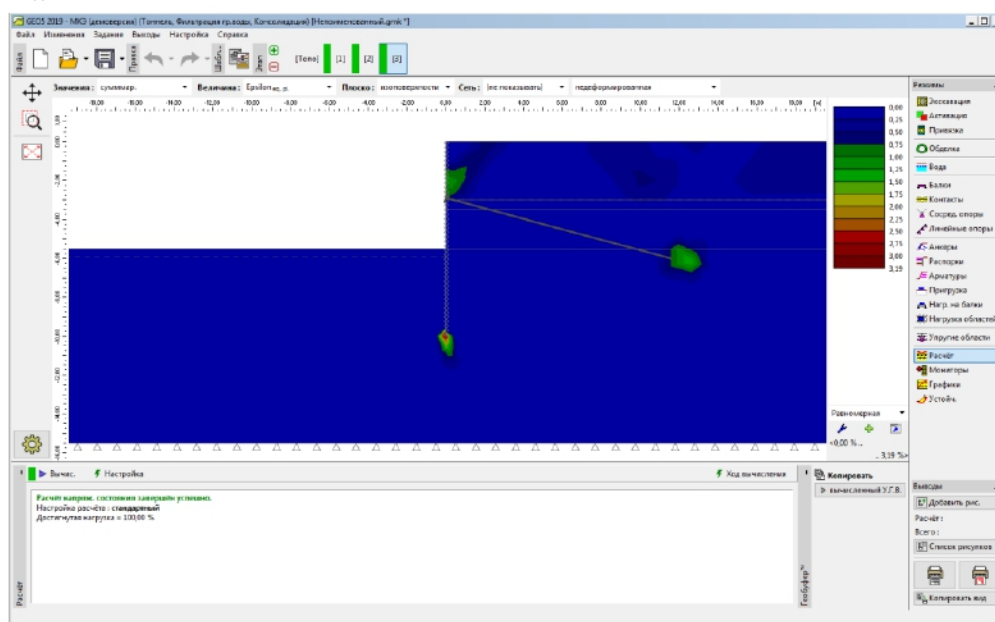
Вкладка "Вода" - Этап проектирования 3 (изменение положения УГВ)

Теперь можно выполнить расчет этапа проектирования 3 и снова просмотреть результаты численного решения (аналогично предыдущему этапу проектирования).



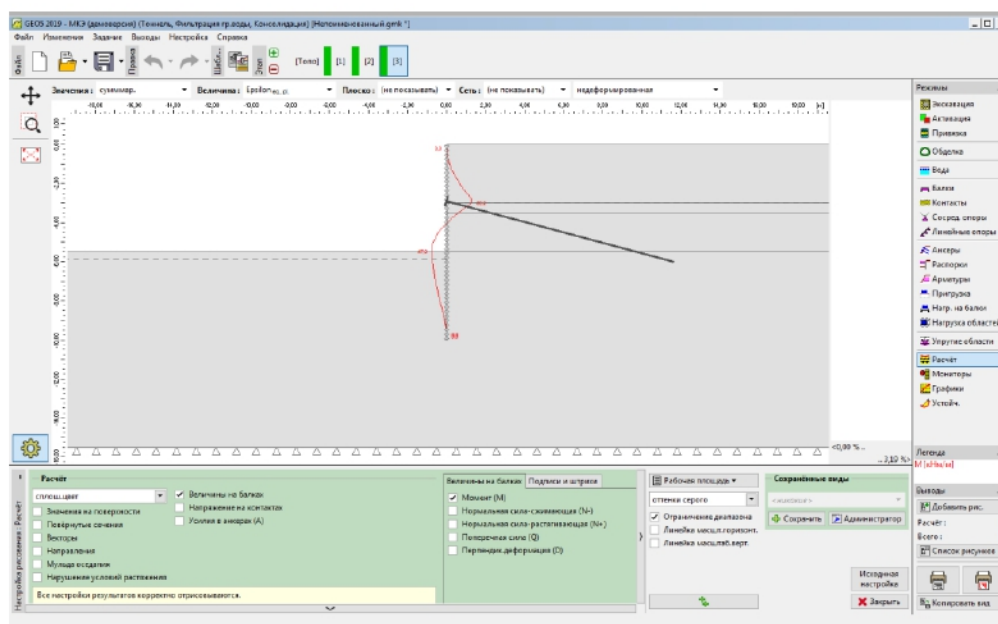
*Вкладка "Расчет" - Этап проектирования 3
(перемещения d_x - деформированное сооружение)*

Из рисунка следует, что максимальное горизонтальное перемещение в окрестности шпунтового ограждения составляет 35 мм.



Вкладка "Расчет" - Этап проектирования 3 (эквивалентные пластические деформации $\varepsilon_{eq,pl}$)

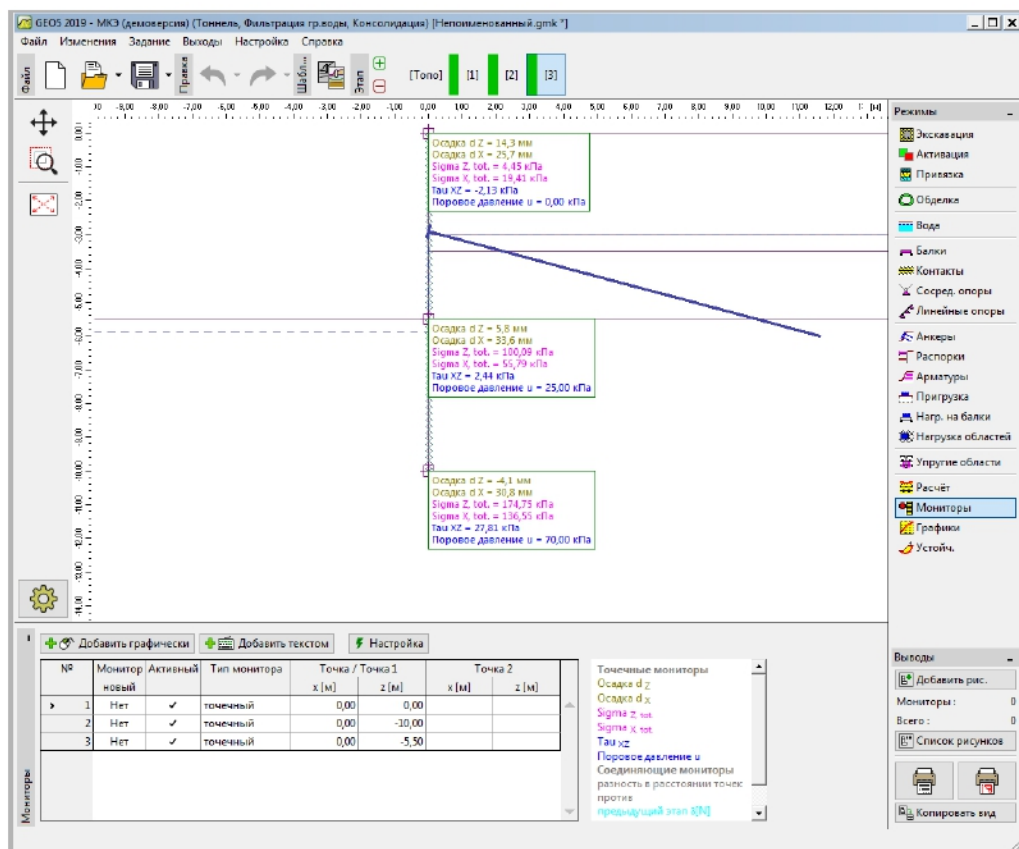
Из эпюр эквивалентных пластических деформаций видно, что максимальные пластические деформации в грунте развиваются в окрестности пяты шпунтового ограждения. На предыдущем этапе грунт пластически деформировался вблизи заделки анкера (более подробная информация представлена в Справке - F1).



Вкладка "Расчет" - Этап проектирования 3 (распределение изгибающих моментов M)

Локальные экстремумы на эпюре изгибающих моментов по высоте шпунтового ограждения сведены в таблицу, представленную в конце этой главы.

Теперь можно просмотреть результаты по мониторам и определить перемещения верха шпунтового ограждения.



Вкладка "Мониторы" - Этап проектирования 3 (Мониторы точек)

Анализ результатов

В следующей таблице приведены значения максимальных внутренних усилий (изгибающих моментов). Расчет выполнялся с применением модели Modified Mohr-Coulomb с локальным увеличением плотности сетки вдоль линии. Данные результаты сравниваются с расчетом в GEO 5 - Ограждение котлованов.

Модель материала	Этап 2 M [кНм/м]	Этап 3 - поле M [кНм/м]	Этап 3 - анкер M [кНм/м]
MCM (Modified M-C)	6,8	-45,9	79,5
Ограждение котлована* (аналитическое решение)	29,16	-28,91	110,57

Сводная таблица результатов - изгибающие моменты по высоте шпунтового ограждения

*Примечание *: для получения аналитического решения использовался расчет горизонтальной реакции ниже уровня земли по Шмитту (более подробная информация представлена в Справке - F1). Расчет проводился с использованием следующих параметров:*

- Вид грунта SM, средней плотности:

*расчет давления покоя - несвязный грунт,
угол трения между конструкцией и грунтом $\delta = 17^\circ$
модуль деформации грунта $E_{def} = 10$ Мпа*

- Вид грунта CL, твердой консистенции:

*расчет давления покоя - связный грунт ($\nu = 0,4$),
угол трения между конструкцией и грунтом $\delta = 14^\circ$
модуль деформации грунта $E_{def} = 4,5$ Мпа*

Условия расчета рассматривались как "Стандартные - Предельные состояния". Расчет давления грунта проводился без снижения параметров грунта. Кроме того, расчет не учитывал величину минимального ограничивающего давления (более подробная информация представлена в Справке - F1).

Заключение

Из результатов численного анализа могут быть сделаны следующие выводы:

- локальное увеличение плотности сетки конечных элементов вокруг линий позволяет точнее определить внутренние усилия;
- для расчета ограждающих конструкций необходимо использовать контактные элементы и нелинейные модели материала, позволяющие развитие пластических деформаций и дающих представление о реальном поведении сооружения в окружающем грунтовом массиве;
- максимальные эквивалентные пластические деформации $\epsilon_{eq,pl}$ показывают зоны возможного разрушения (в результате превышения условия текучести материала).