

## Расчет обделки коллектора

Программа: МКЭ

Файл: Demo\_manual\_23.gmk

Целью данного руководства является проведение расчета заглубленного коллектора с учетом реакции обделки с использованием метода конечных элементов.

### Описание задачи

Необходимо определить реакцию обделки заглубленного коллектора; его размеры представлены в таблице ниже. Также необходимо определить внутренние усилия, действующие в обделке коллектора. Обделка (толщиной 0,1 м) выполнена из железобетона, класса С 20/25, лоток заложен на глубине 12,0 м. Геологический разрез однородный, грунт имеет следующие параметры:

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| - удельный вес грунта:                           | $\gamma = 20,0 \text{ кН/м}^3$       |
| - модуль упругости:                              | $E = 12,0 \text{ МПа}$               |
| - коэффициент Пуассона:                          | $\nu = 0,4$                          |
| - удельное сцепление:                            | $c_{ef} = 12,0 \text{ кПа}$          |
| - угол внутреннего трения:                       | $\varphi_{ef} = 21,0^\circ$          |
| - удельный вес полностью водонасыщенного грунта: | $\gamma_{sat} = 22,0 \text{ кН/м}^3$ |

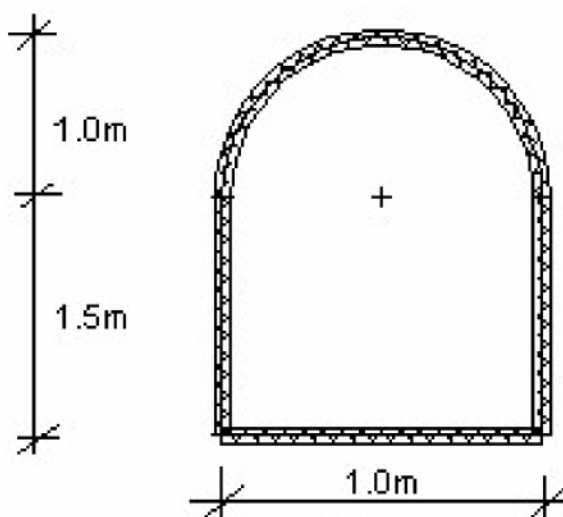


Схема условия задачи – заглубленный коллектор

Величины перемещений и внутренних усилий будут определяться только для упругой модели, так как не ожидается развитие пластических деформаций. Дополнительно будет использована модель Mohr-Coulomb для проверки условия текучести.

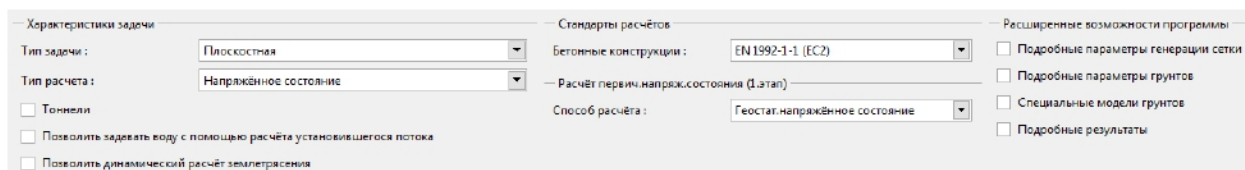
## Решение

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

- Топология: ввод исходных данных и моделирование задачи (расчетная область, свободные точки и линии – регулирование плотности сетки);
- Этап проектирования 1: расчет начального геостатического напряжения;
- Этап проектирования 2: моделирование балочных элементов, расчет перемещений, внутренних усилий;
- Анализ результатов: сравнение, заключение.

### Топология: ввод исходных данных

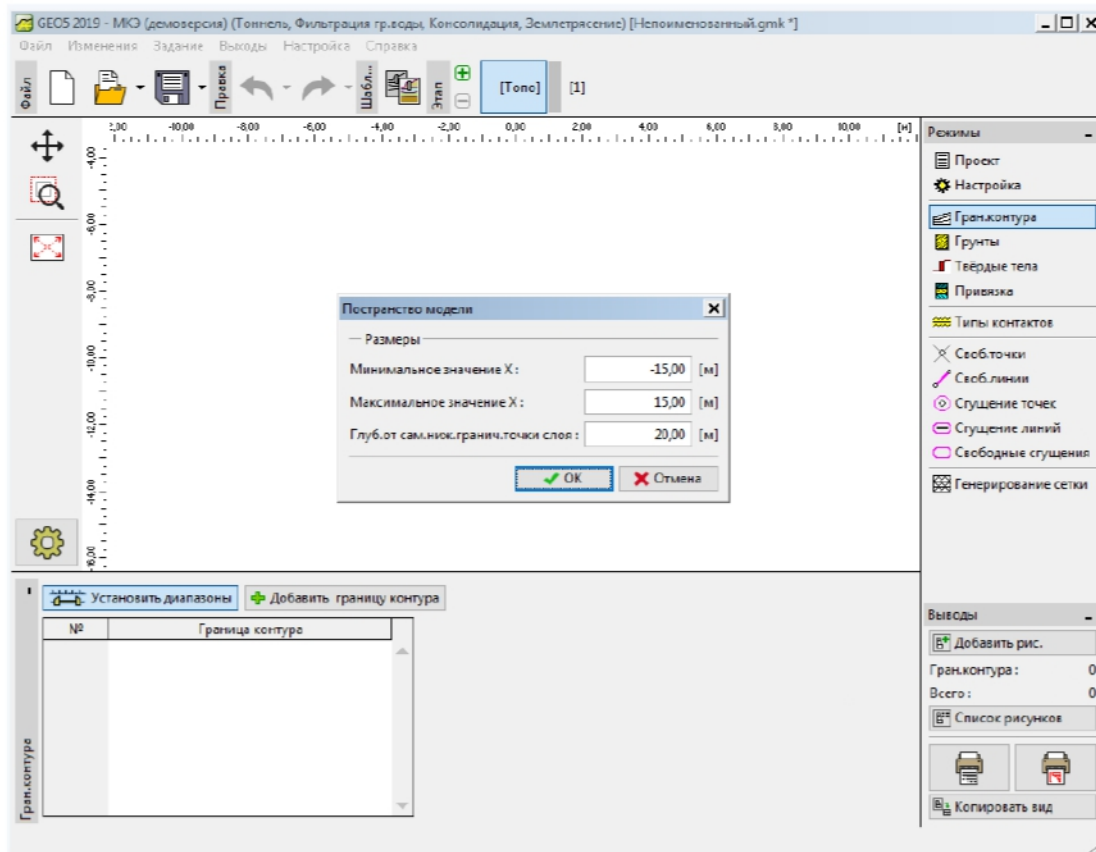
Во вкладке «Характеристики задачи» для расчета первого этапа проектирования следует указать опцию «Геостат. напряженное состояние». Задачу рассмотрим в условиях плоской деформации.



### *Исходные данные задачи*

Далее следует задать размеры пространства модели и границу поверхности. Размеры пространства выбираются достаточно большими, чтобы избежать влияния граничных условий. Для данной задачи указываются размеры (-15 м; 15 м); величина глубины исследуемой области 20 м.

Теперь задается граница контура на поверхности – координаты точек (x, z): [-15, 0]; [15, 0] [м].



*Вкладка "Границы контура" + диалоговое окно "Пространство модели"*

Далее задаются соответствующие параметры грунта, включая параметры модели материала, а затем данный грунт присваивается созданной области (более подробная информация приведена в Справке – F1).

**Редактирование грунта**

Идентификация  
Имя: Soil.No.1

Материальная модель  
Материал: эластичная

Базовые данные  
Удельный вес  $\gamma = 20.00$  [кН/м³]  
Модуль  $E = 12.00$  [МПа]  
Жёсткость: постоянный  
коэффициент  $\nu = 0.40$  [-]  
Подъёмная сила  
Расчёт: стандартный  
Удельный вес  $\gamma_{sat} = 22.00$  [кН/м³]  
Модель: эластичная

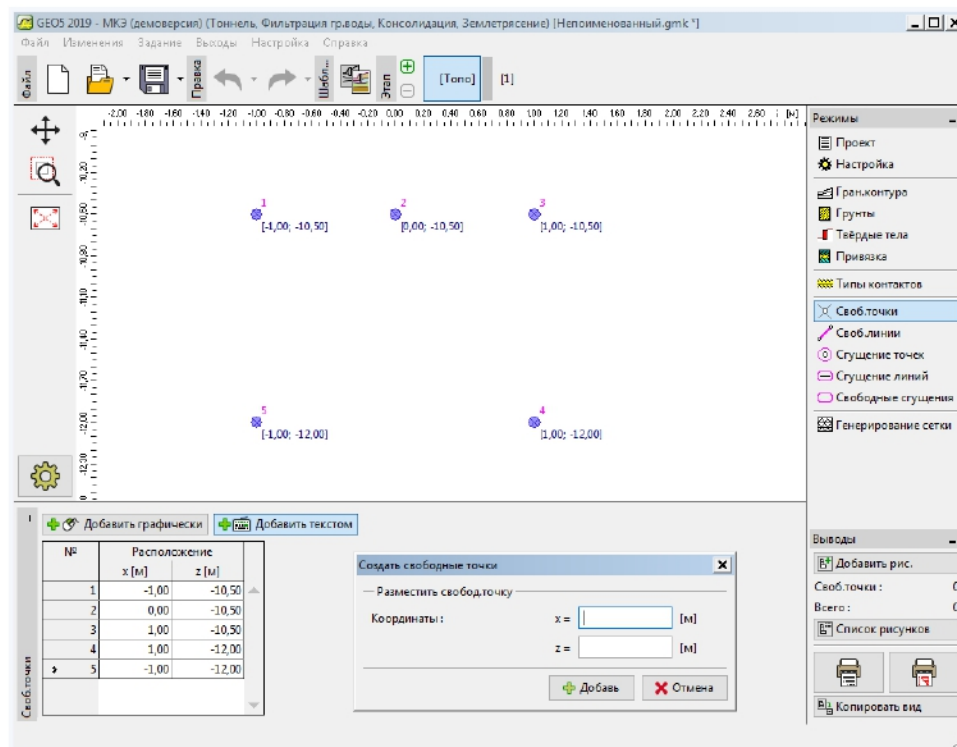
Отображение  
Категория образца: GEO  
Искать:  
Подкатегория: Грунты (1 - 16)  
Образец: 13 Гравий с сульфидным заполнителем  
Цвет:  
Фон: автоматический  
Насыщенность <10 - 90>: 50 [%]

Классификация  
Определить  
Стереть

OK  
Отмена

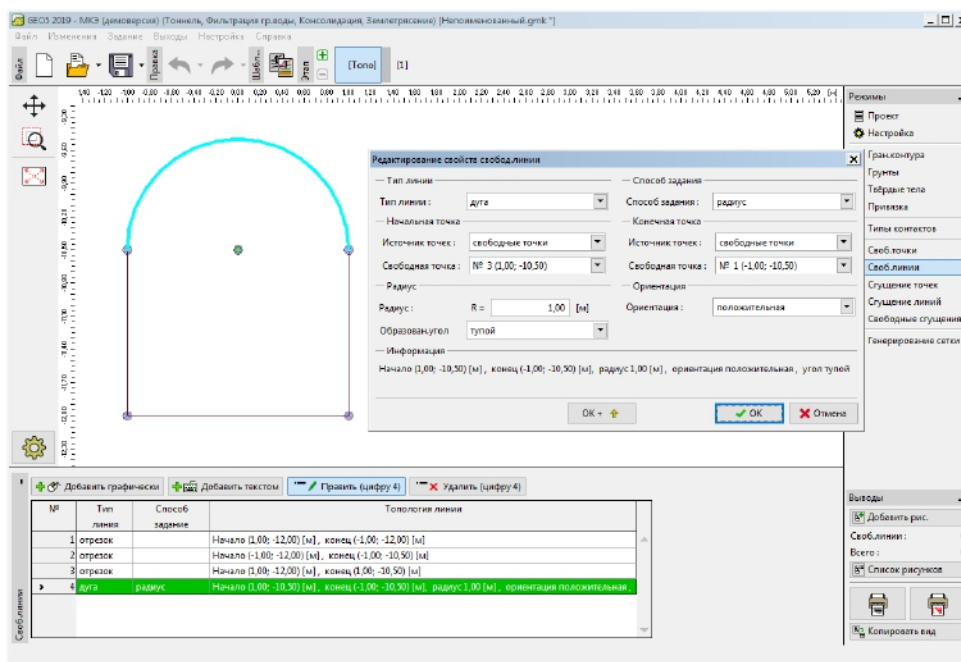
Диалоговое окно "Добавление новых грунтов"

Следующий шаг – определение геометрии сооружения. Сначала следует задать координаты свободных точек (кнопка «Добавь»), соответствующих углам коллектора (более подробная информация приведена в Справке – F1).



*Вкладка "Свободные точки" + диалоговое окно «Создать свободные точки»*

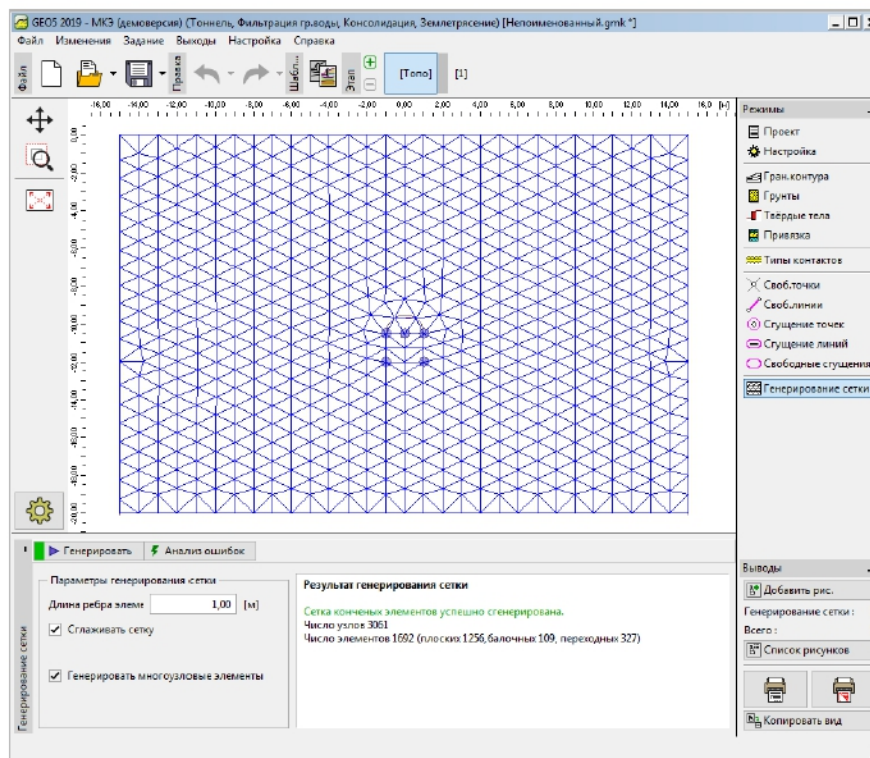
Далее, нажатием кнопки «Добавить» во вкладке «Свободные линии» созданные точки соединяются линиями с помощью указателя мыши (более подробная информация приведена в Справке- F1). Для создания дуги радиусом  $R = 1$  м необходимо изменить тип линии (с использованием кнопки «Править»).



*Диалоговое окно «Редактирование свойств свободной линии»*

Полученную схему сооружения следует проверить. На этом этапе определение геометрии коллектора завершается и можно переходить к созданию сетки КЭ (более подробная информация приведена в Справке – F1).

В параметрах сетки следует указать длину стороны элемента 1,0 м и сгенерировать сетку КЭ нажатием кнопки «Генерировать». Программа автоматически сгенерирует и сгладит сетку конечных элементов.



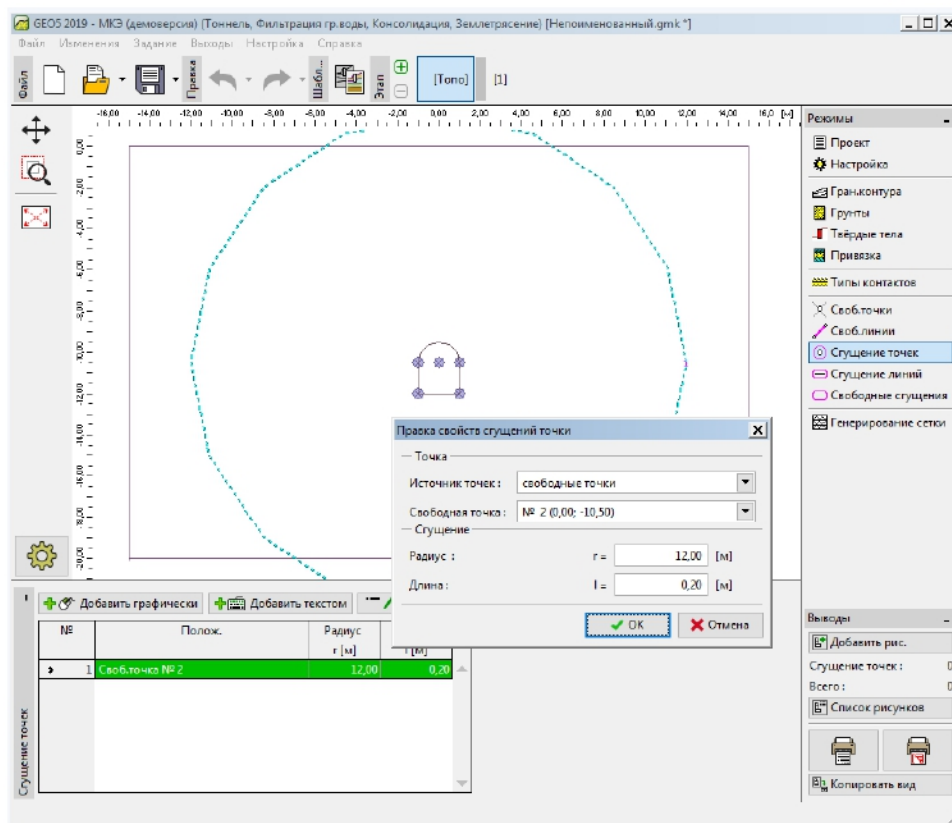
*Вкладка "Создание сетки" - длина стороны элемента 1,0 м (без местного измельчения)*

Очевидно, что полученная сетка вокруг коллектора является слишком крупной. Далее плотность сетки будет увеличена, либо вокруг линий, либо вокруг свободных точек. Для контуров коллектора (и любой подземной выработки в целом) может использоваться следующий алгоритм:

- необходимо указать свободную точку вблизи центра выработки;
- плотность сетки в окрестностях данной точки будет увеличена.

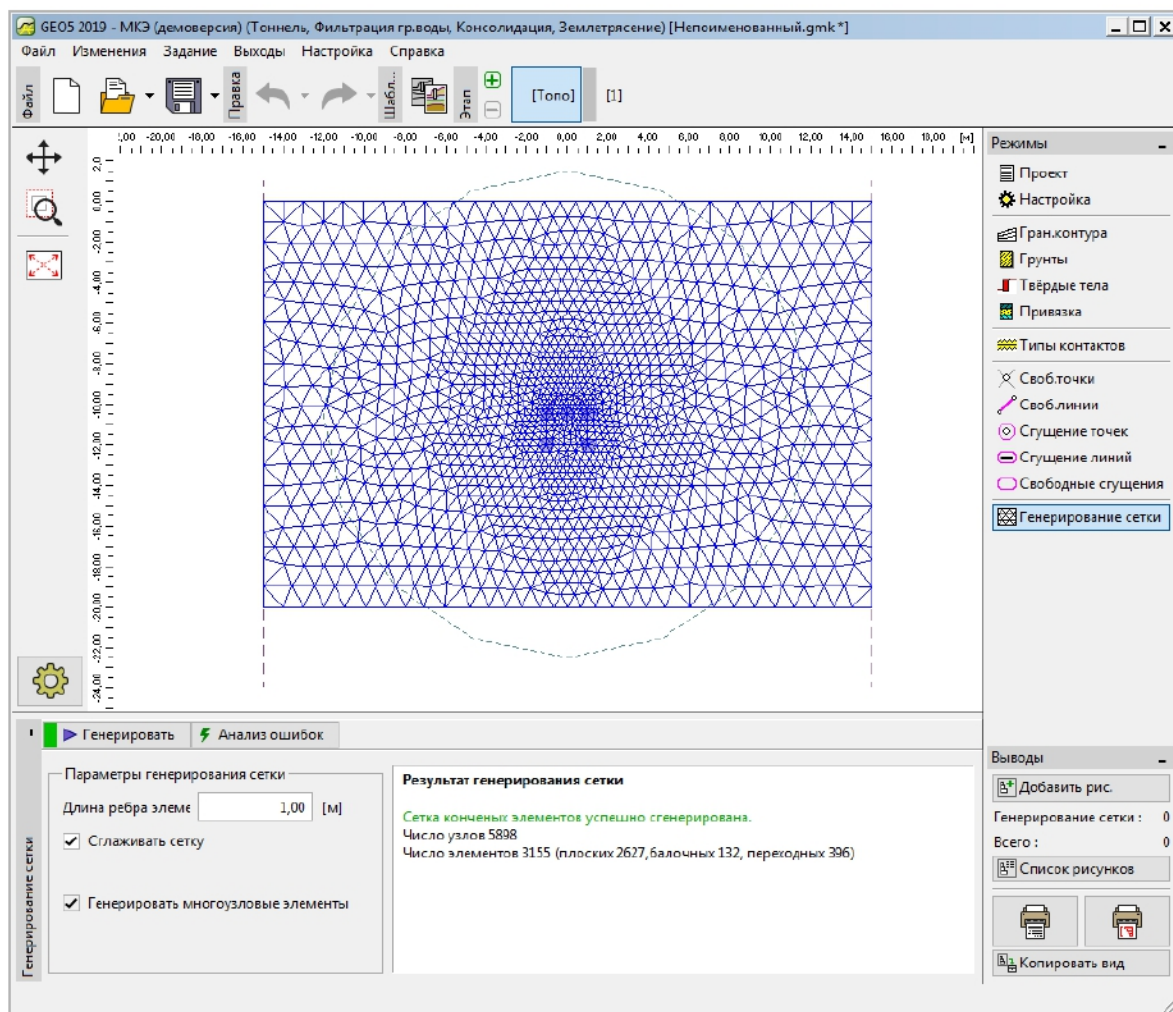
*Примечание: внутренние усилия в балках определяются в отдельных узлах сетки, в связи с чем следует использовать достаточно плотную сетку вокруг свободных линий и точек (более подробная информация представлена в Справке – F1).*

Для увеличения плотности сетки во вкладке «Сгущение точек» следует задать радиус  $r = 12$  м и длину стороны элемента  $l = 0,2$  м. Далее необходимо повторно сгенерировать сетку конечных элементов во вкладке «Генерирование сетки».



*Диалоговое окно «Правка свойств сгущений точки»*

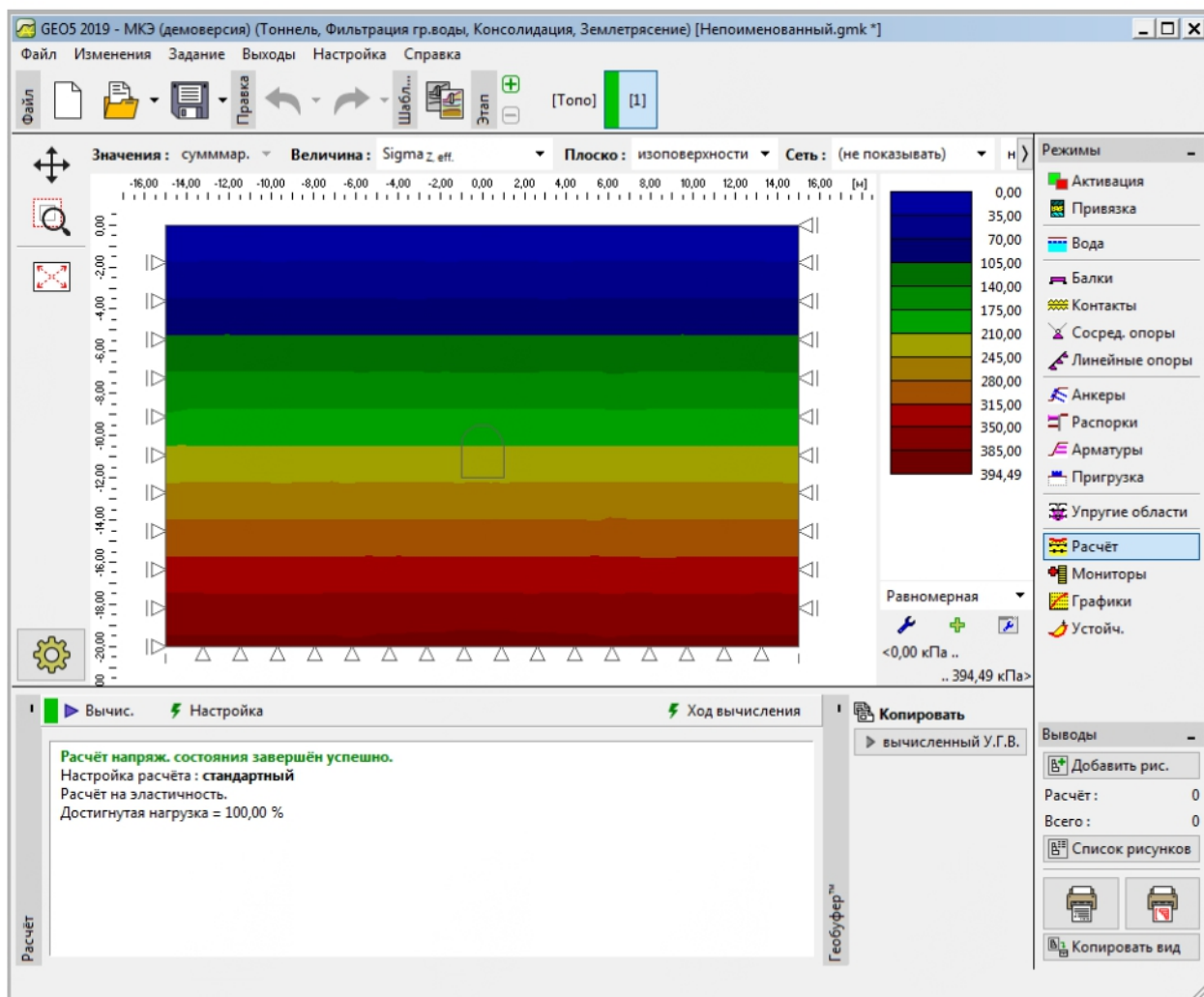
*Примечание: элементы сетки должны быть достаточно мелкими в областях, где ожидаются большие градиенты напряжений (точечные опоры, острые углы, подземные выработки и т.д.) Радиус увеличения плотности сетки должен в 3-5 раз превосходить размер области измельчения, а плотность сетки в 3-5 раз превосходить плотность для вмещающей области. В этом случае обеспечивается гладкий переход между областями с различной плотностью сетки (более подробная информация в Справке – F1).*



*Вкладка «Генерирование сетки» - сторона конечного элемента 1,0 м (с локальным увеличением плотности сетки вокруг коллектора)*

## Этап проектирования 1: расчет геостатического напряжения

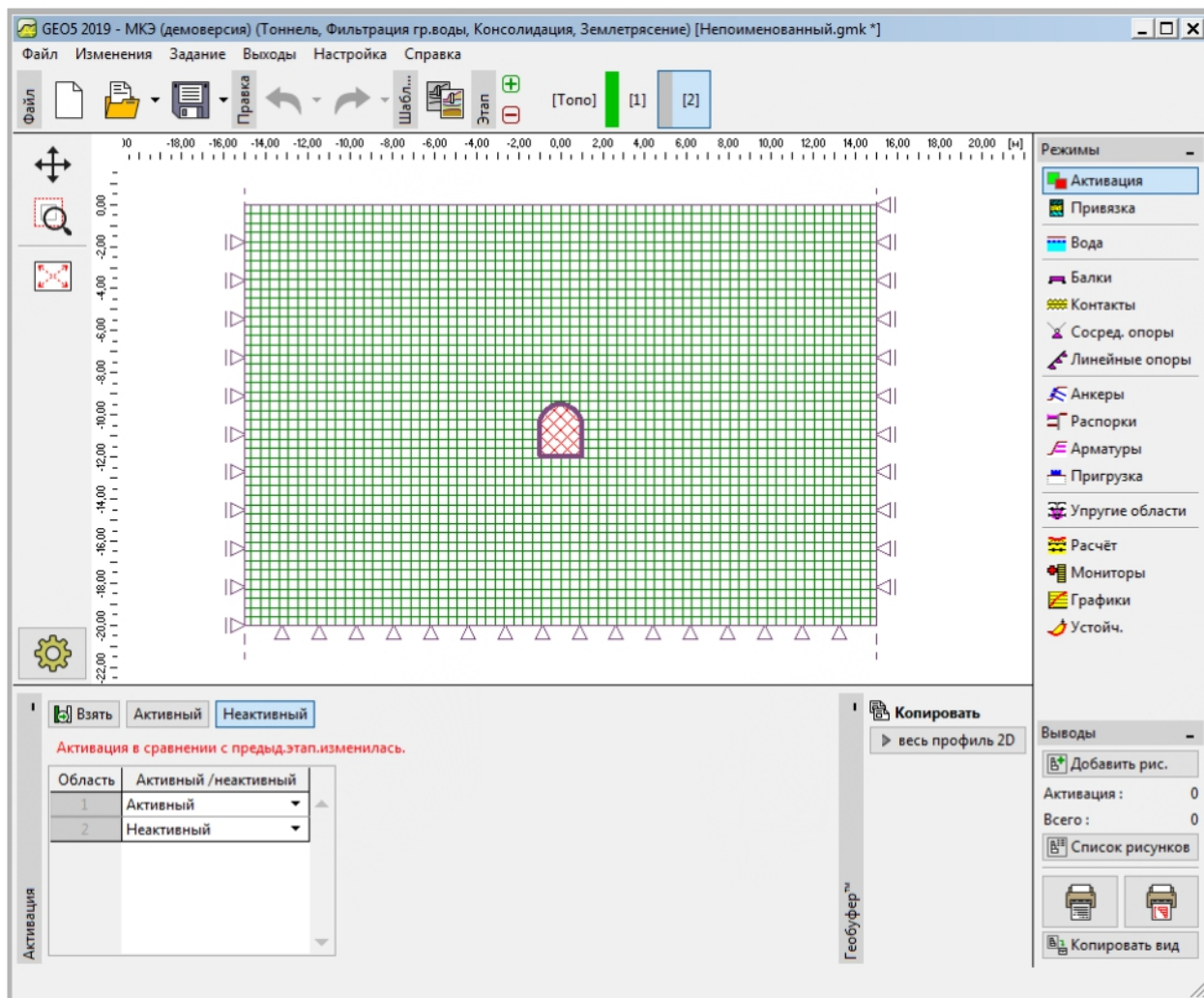
После повторной генерации элементов сетка в окрестности коллектора выглядит значительно лучше. Теперь можно перейти к этапу проектирования 1 и выполнить расчет геостатического напряжения. Параметры расчета принимаются по умолчанию (более подробная информация в Справке – F1).



Вкладка "Расчет" - Этап проектирования 1

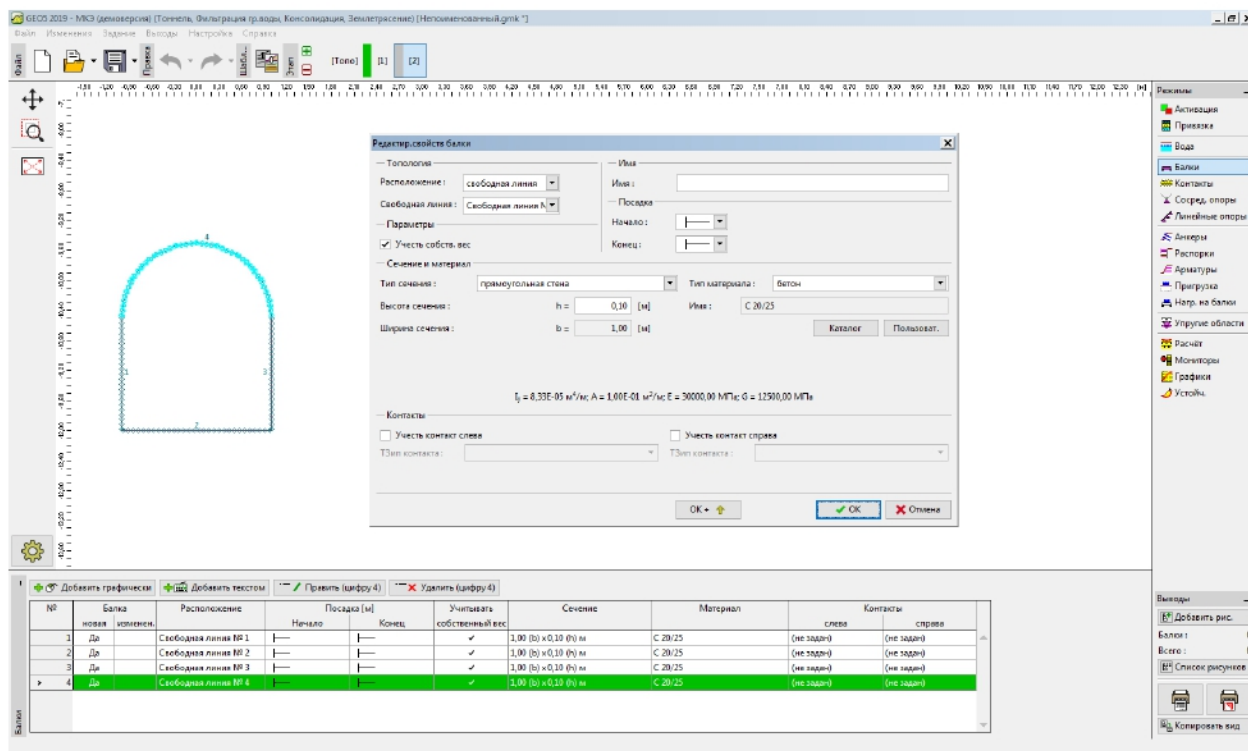
## Этап проектирования 2: моделирование балочных элементов

Во вкладке «Активация» сначала следует смоделировать извлечение грунта из поперечного сечения коллектора – конкретная область отмечается как неактивная (более подробная информация в Справке – F1).



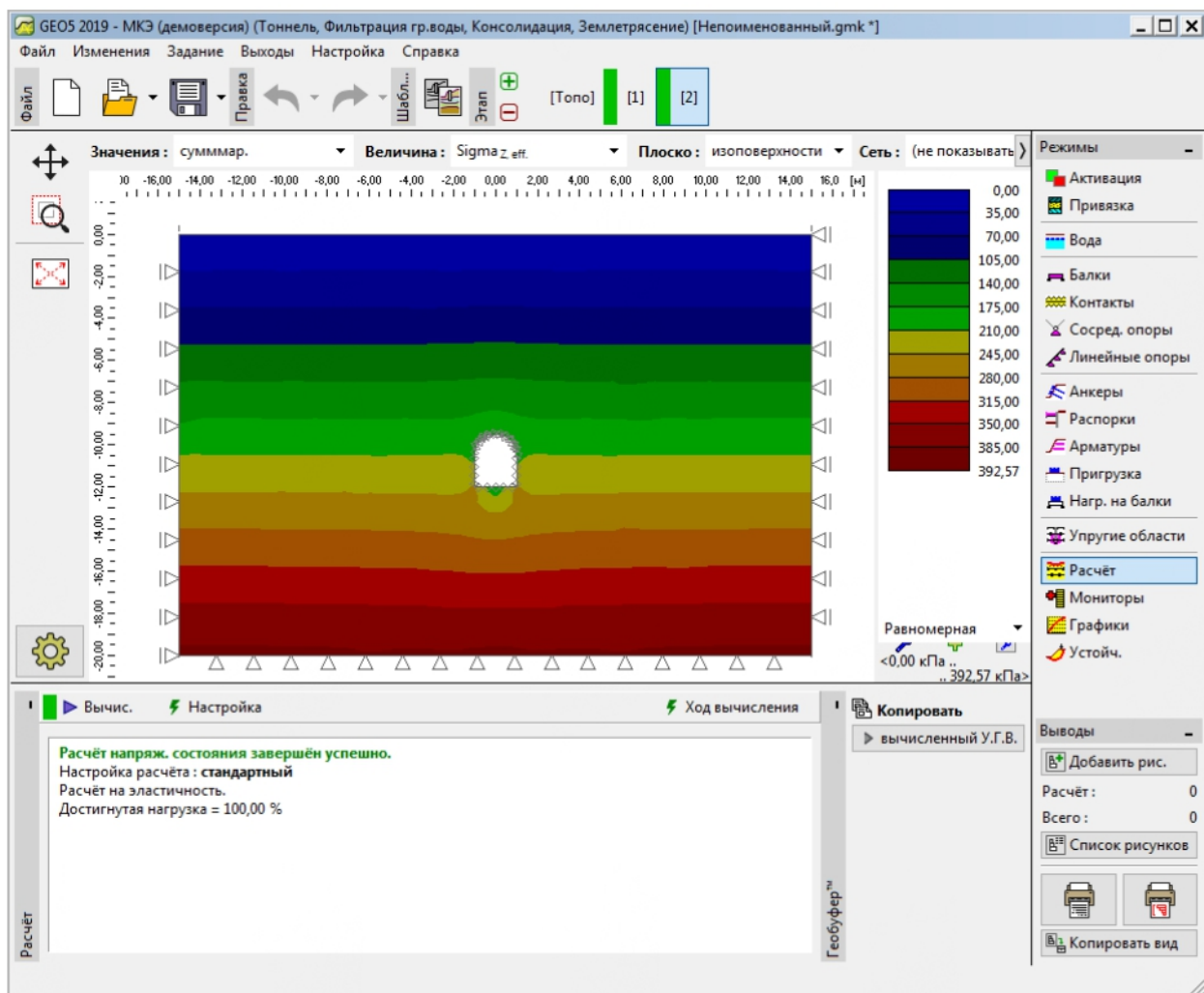
*Вкладка «Активация» - Этап проектирования 2*

Далее следует перейти во вкладку «Балки» и смоделировать обделку коллектора. Пользователем задаются следующие параметры: положение балки (рассматриваются все свободные линии), материал и класс бетона, высота поперечного сечения (1,0 м) и вид опирания концов балки (более подробная информация в Справке – F1).



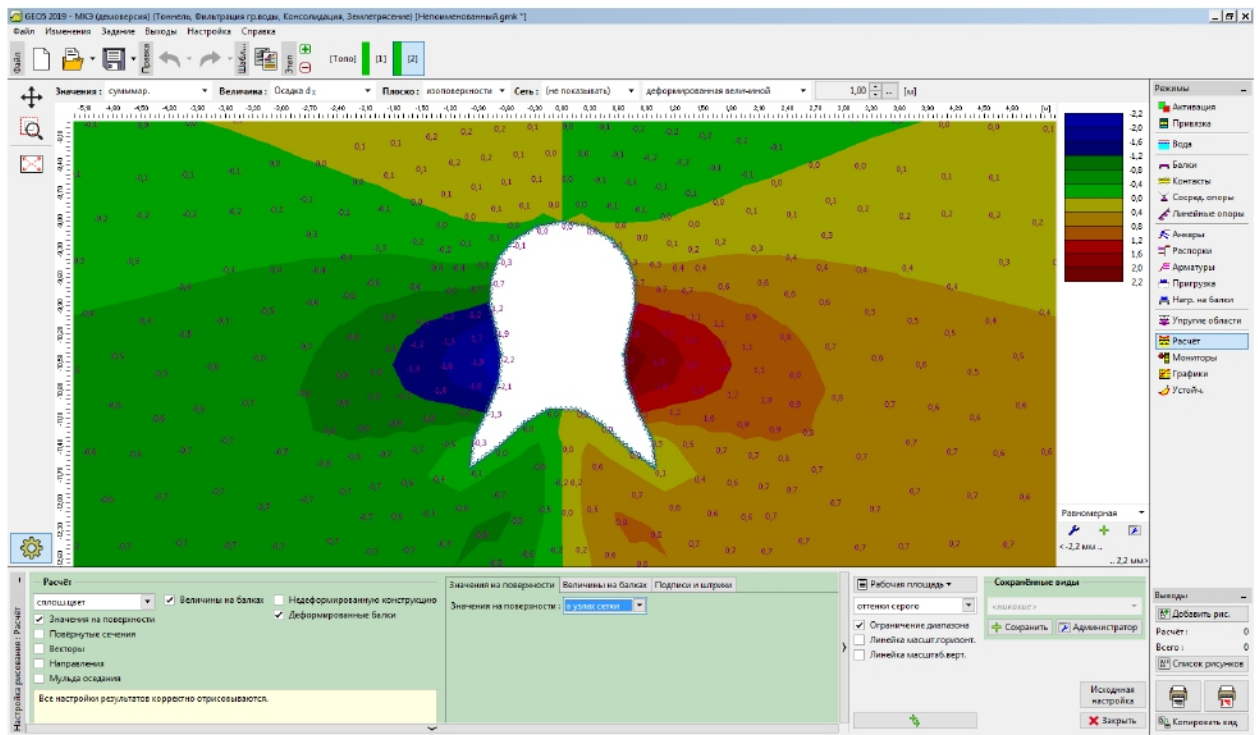
Диалоговое окно "Редактирование свойств балки" - Этап проектирования 2

Далее следует провести расчет и просмотреть результаты для вертикального геостатического напряжения  $\sigma_{z,ef}$  [кПа], горизонтальных перемещений  $d_x$  [мм] и внутренних усилий в обделке коллектора.



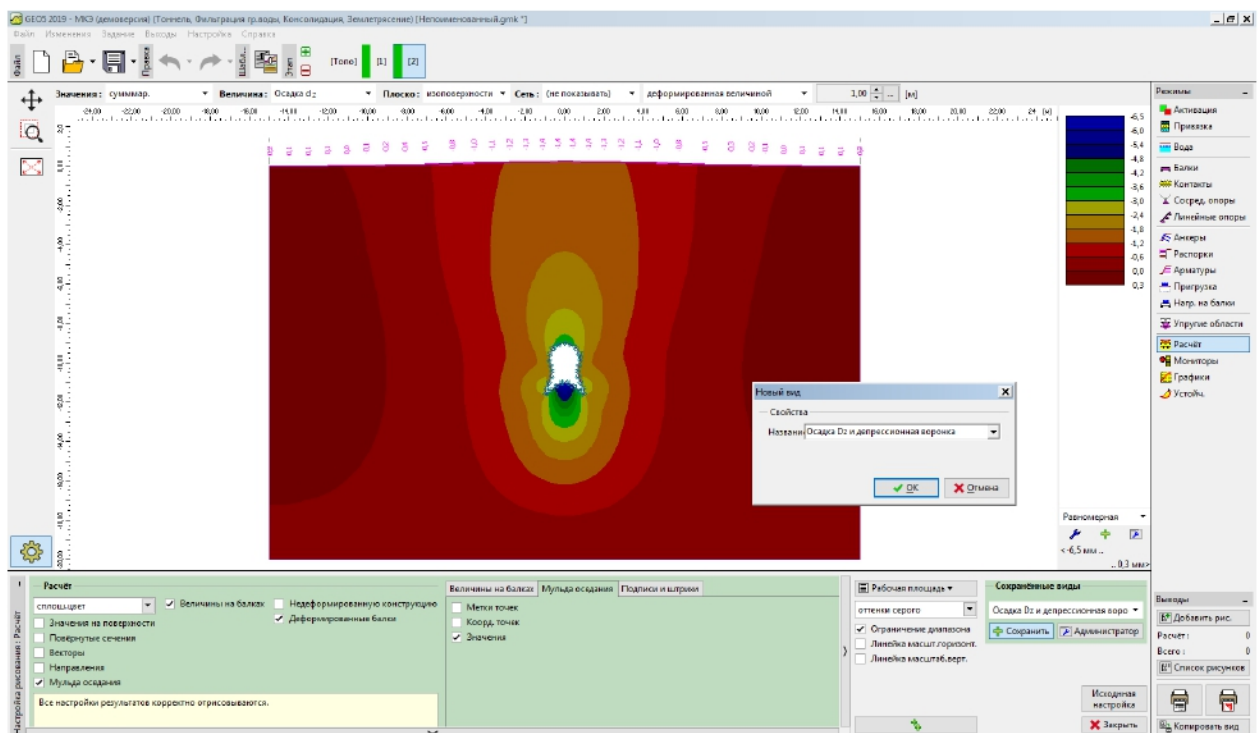
*Вкладка "Расчет" - Этап проектирования 2 (вертикальное геостатическое напряжение  $\sigma_{z,eff}$ )*

Из полученных изополей следует, что максимальные горизонтальные перемещения составляют 2,2 мм (коллектор работает как жесткое тело). Для лучшего понимания поведения конструкции следует отобразить деформированную сетку (кнопка в верхней части экрана).



*Вкладка "Расчет" - Этап проектирования 2 (горизонтальные перемещения  $d_x$  после разработки грунта)*

*Примечание: отдельные текущие отображения на экране могут быть сохранены в качестве отдельных объектов (изображений) для дальнейшего использования. В этом случае просмотр результатов существенно ускорится (более подробная информация в Справке – F1).*

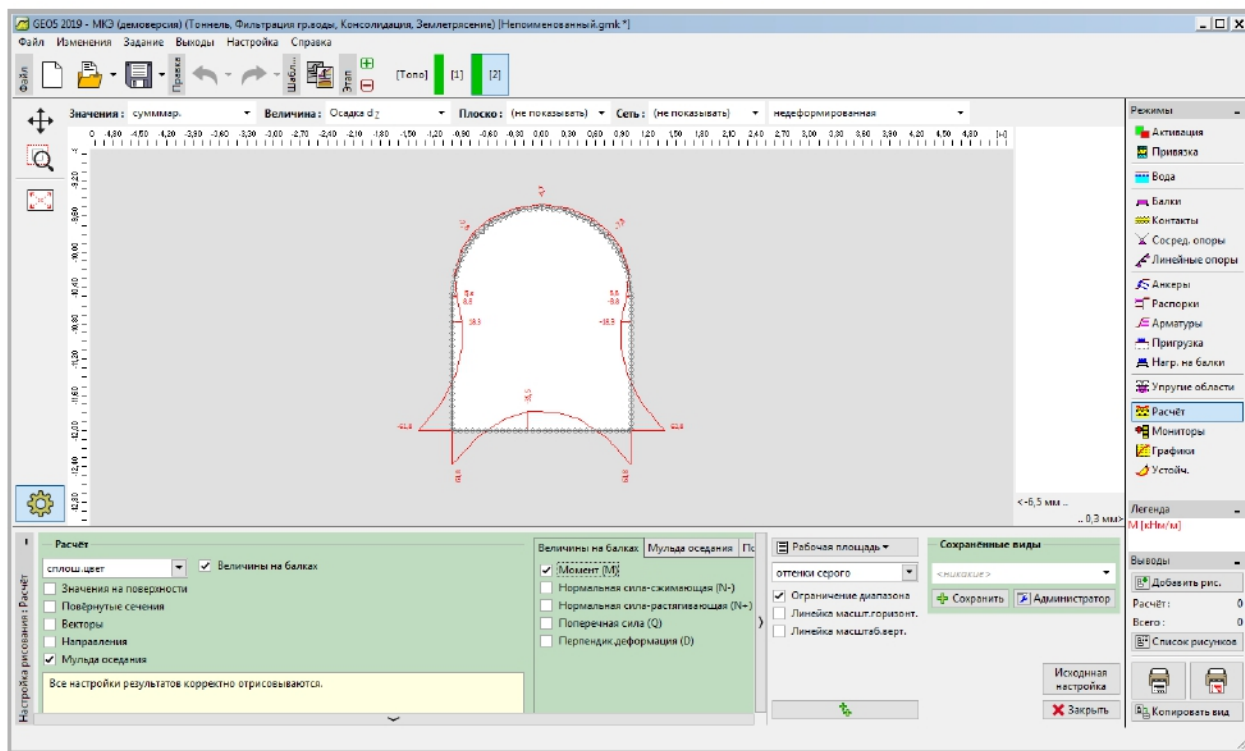


*Диалоговое окно «Новый вид»*

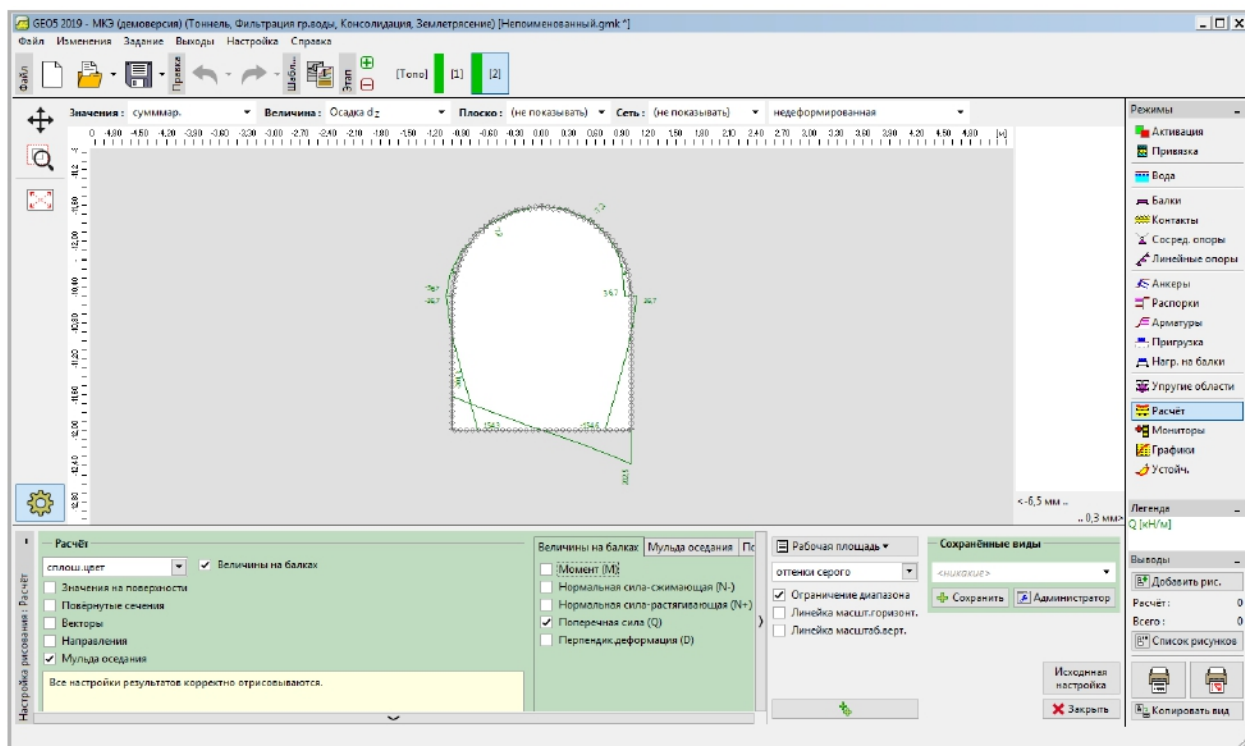
Теперь можно просмотреть эпюры изгибающих моментов  $M$  [кНм/м], поперечных усилий  $Q$  [кН/м] и продольных сжимающих усилий  $N$  [кН/м] для этапа проектирования 2 (используя кнопку «Параметры» и вкладку «Величины на балках»)

*Примечание: некоторые результаты не могут быть наглядно и доступно представлены одновременно. Так, например, нельзя отобразить деформированное сооружение и, в то же время, распределение внутренних усилий в балке, всегда следует выбирать только один вариант. Программа выведет предупреждение внизу диалогового окна в случае задания неприемлемых комбинаций результатов для вывода (более подробная информация представлена в Справке – F1).*

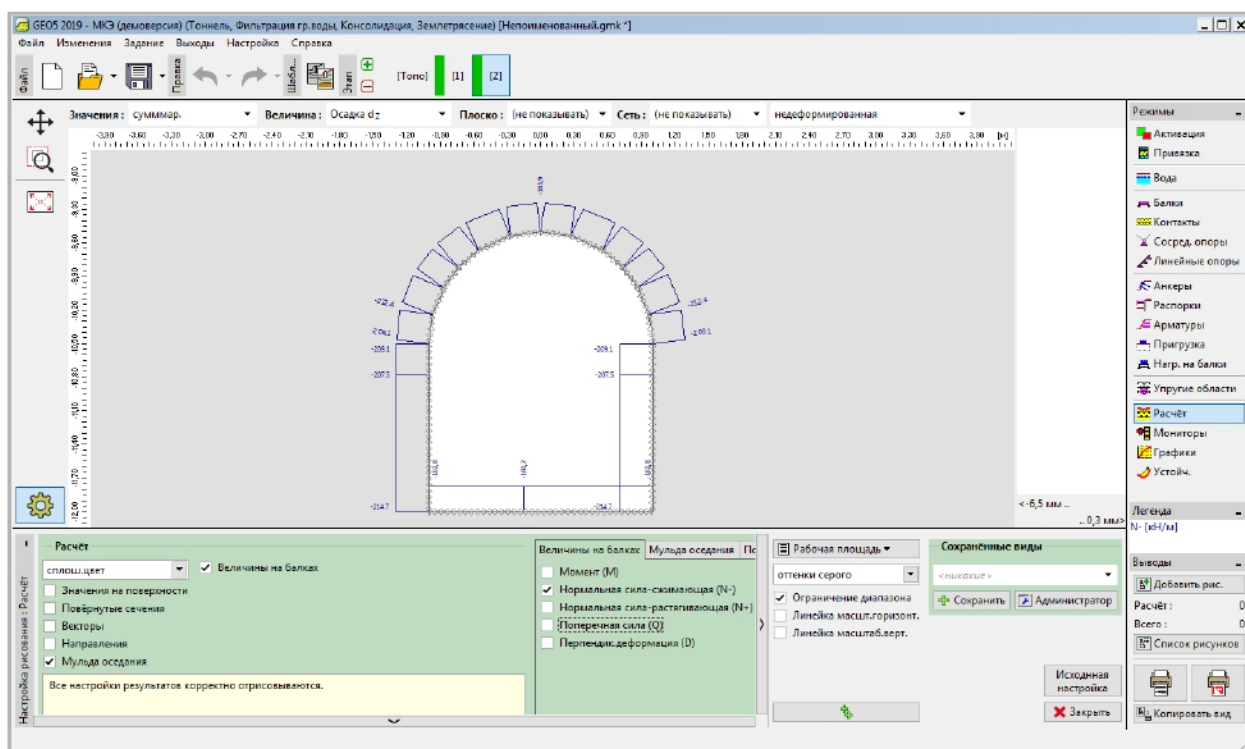
Армирование обделки коллектора может быть рассчитано по полученным значениям в любой сторонней программе для статических расчетов (например, FIN EC – CONCRETE 2D. Результаты сохраняются в виде сводной таблицы.



*Вкладка «Расчет» - этап проектирования 2 (распределение изгибающего момента  $M$ )*



*Вкладка «Расчет» - этап проектирования 2 (распределение поперечной силы  $Q$ )*



*Вкладка «Расчет» - этап проектирования 2 (распределение продольной сжимающей силы  $N$ )*

## Проверка условия текучести: модель материала Mohr-Coulomb

Далее следует проверить, развиваются ли пластические деформации при использовании нелинейных моделей. Необходимо вернуться во вкладку «Топология» и изменить модель материала на «Mohr-Coulomb» во вкладке «Грунты».

**Редактир.парам.грунта**

— Идентификация —  
Имя : soil.No.1

— Материальная модель — ? —  
Матери : Mohr - Coulomb

— Базовые данные — ? —  
Удельн  $\gamma$  = 20,00 [кН/м³]  
Модуль E = 12,00 [МПа]  
Жёстко постоянный

коэф.  $\nu$  = 0,40 [—]  
— Подъёмная сила — ? —  
Расчёт стандартный  
Уд. вес  $\gamma_{sat}$  = 22,00 [кН/м³]

— Модель Mohr - Coulomb — ? —  
Модуль  $E_{ur}$  = 12,00 [МПа]  
Угол вн  $\phi_{ef}$  = 21,00 [°]  
Удельн  $c_{ef}$  = 12,00 [кПа]  
Угол ди  $\psi$  = 0,00 [°]

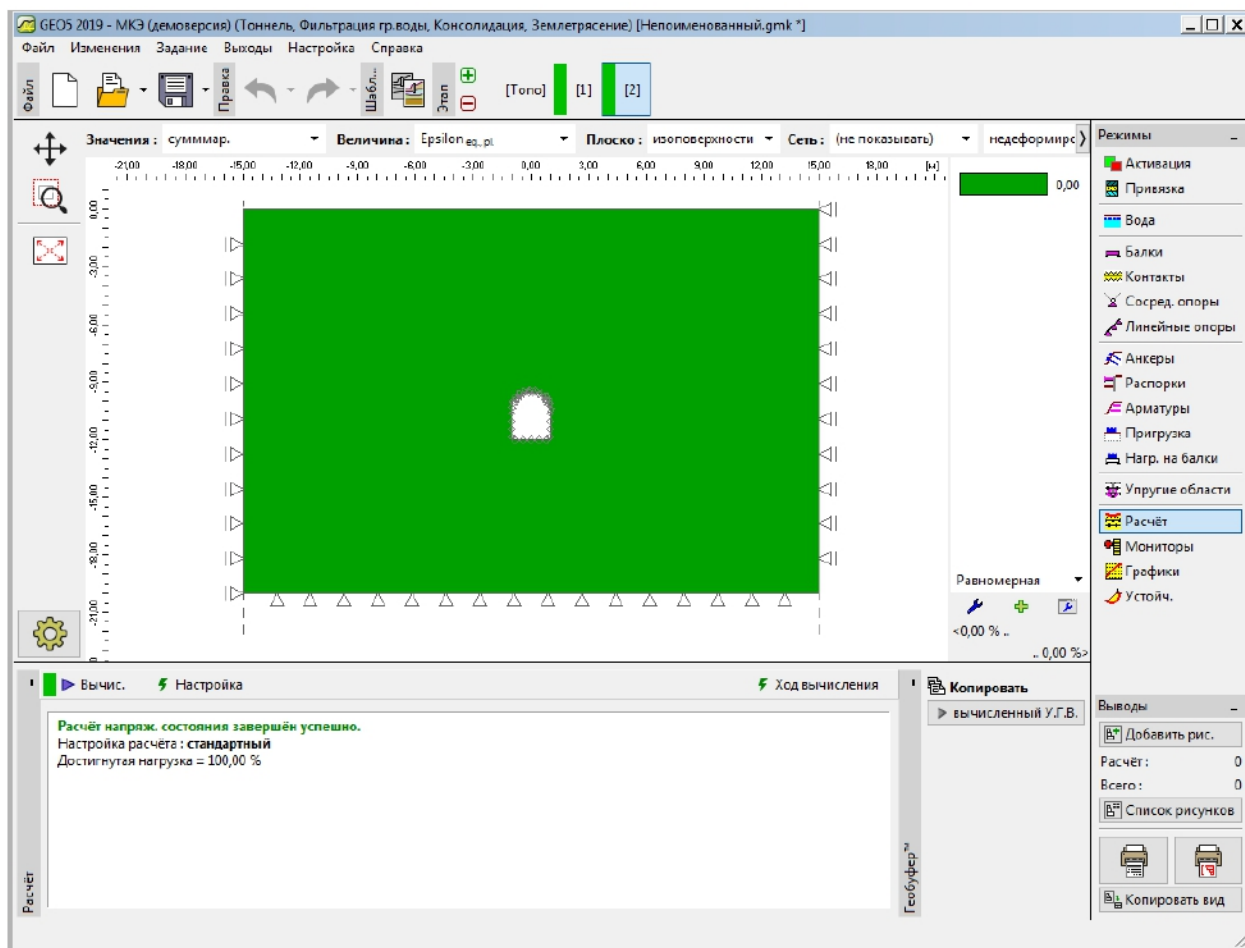
Отображение  
Категорие vzorků : GEO  
Искать :  
Подкатегория : Грунты (1 - 16)  
Vzorek : 13 Гравий с суглинистым заполнителем  
Цвет :  
Фон : автоматический  
Насыщенность <10 - 90> : 50 [%]

Классификация  
Определить  
Стереть

OK  
Отмена

Диалоговое окно "Добавление новых грунтов"

После завершения расчета необходимо просмотреть результаты для эквивалентных пластических деформаций.



*Вкладка «Расчет» - этап проектирования 2 (эквивалентные пластические деформации  $\epsilon_{eq,pl}$  в соответствии с моделью МС)*

Из предыдущего рисунка следует, что условие текучести модели Mohr-Coulomb не превышено – эквивалентные пластические деформации  $\epsilon_{eq,pl}$  равны нулю, что соответствует поведению конструкции в соответствии с выбранной упругой моделью материала. Результаты расчета перемещений, геостатического давления и внутренних усилий, таким образом, совпадают.

## Анализ результатов

В следующей таблице приведены значения максимальных внутренних усилий вдоль балок (обделки коллектора) для этапа проектирования 2 (значения изгибающих моментов, поперечных сил и нормальных сил). Расчет выполнялся для упругой модели материала с локальным увеличением плотности сетки треугольных конечных элементов.

Модель материала	Этап проектирования 2		
	$N$ [кН/м]	$M$ [кНм/м]	$Q$ [кН/м]
Упругая	-160,2	+61,8	+202,5
	-214,7	-61,8	-201,3

*Значения внутренних усилий в балках (экстремумы) – этап проектирования 2*

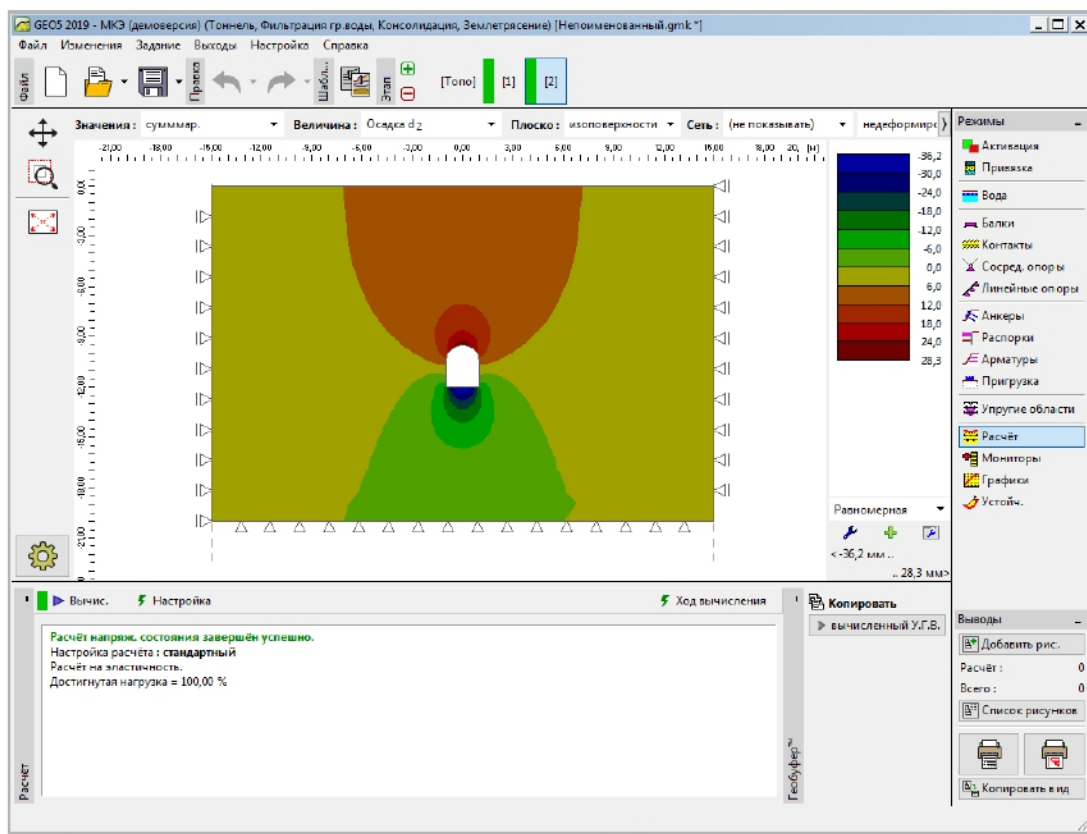
## Заключение

Из результатов численного анализа могут быть сделаны следующие выводы:

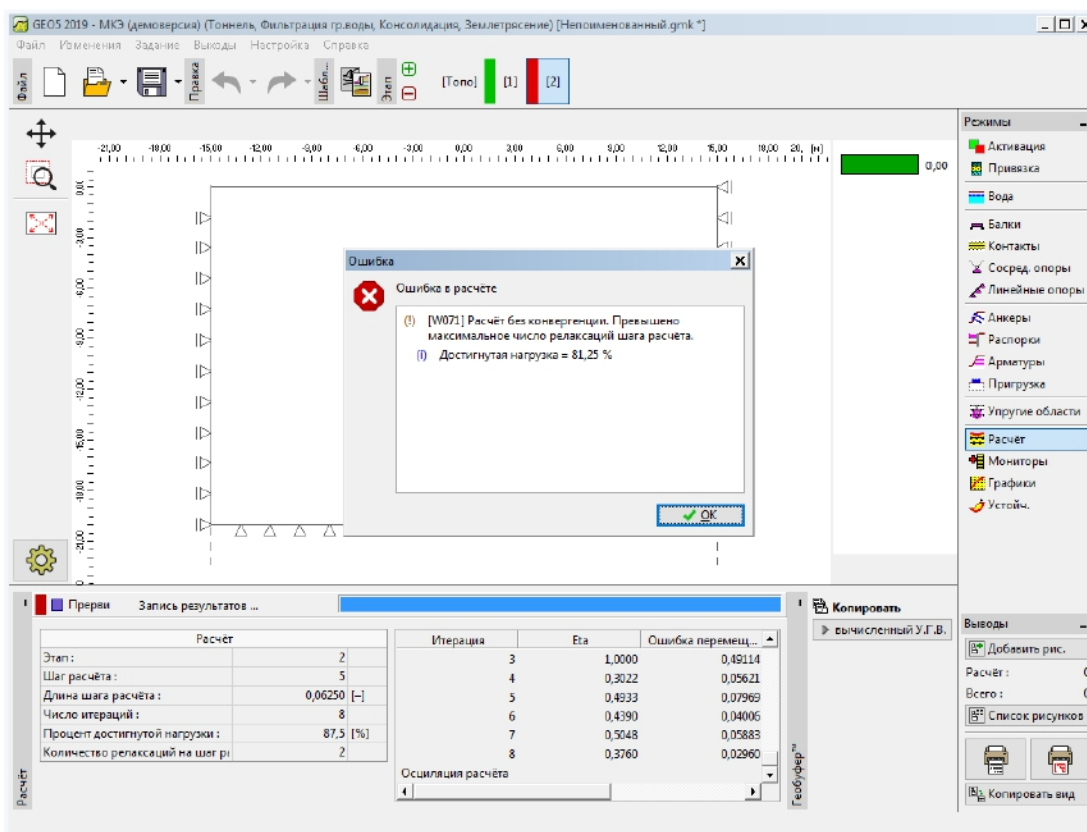
- локальное увеличение плотности сетки конечных элементов позволяет получить более точный результат;
- если нелинейная модель материала (например, Mohr-Coulomb) дает нулевые значения эквивалентных пластических деформаций  $\epsilon_{eq,pl}$ , то конструкция работает упруго и результаты определения внутренних усилий, перемещений и напряжений совпадают для обоих типов моделей.

*Примечание: выполненный расчет основан на нереалистичном предположении, что обделка включается в работу одновременно с разработкой грунта. Такой порядок моделирования подходит для сооружений, монтируемых вдавливанием конструкций в сборе в слабые грунты при помощи домкратов. В реальности грунтовый массив разгружается и деформируется в направлении выработки в процессе разработки грунта. Реальный пример моделирования тоннеля рассмотрен в Главе 26. Численное моделирование проходки тоннеля Ново-Австрийским методом.*

*Если бы в данном конкретном случае обделка не включалась в работу мгновенно (она может быть смоделирована на следующем этапе проектирования без задания балочных элементов), выработка бы обрушилась; для упругой модели это бы выразилось в больших деформациях, а в случае использования нелинейной модели программа не смогла бы получить решение.*



*Расчет без балочных элементов (осадка  $d_z$  по упругой модели)*



*Диалоговое окно «Ошибка» - расчет без балочных элементов (по модели МКЭ)*