

## Численное моделирование проходки туннеля Ново-Австрийским методом

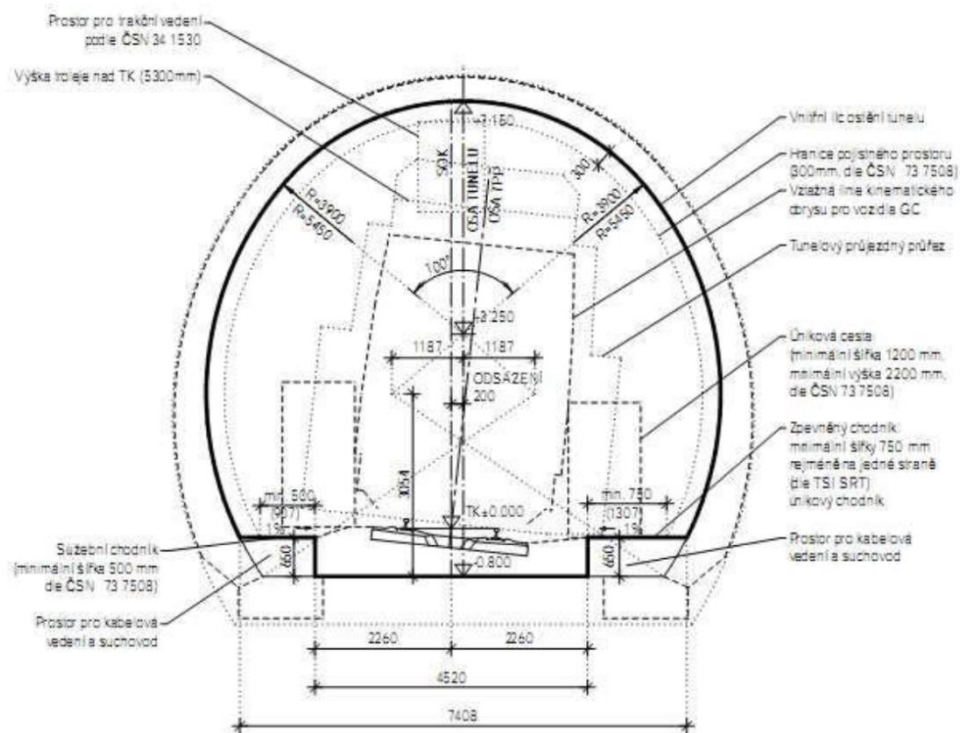
Программа: МКЭ

Файл: Demo\_manual\_26.gmk

Целью данного руководства является описание численного моделирования однопутного железнодорожного туннеля с использованием метода конечных элементов.

### Описание задачи

Необходимо разработать модель и рассчитать обделку однопутного железнодорожного туннеля для скоростей от 160 до 230 км/ч. Поперечное сечение туннеля разработано на основании типовой схемы SZDC (Управление железнодорожной инфраструктуры, государственная организация) и представлено на рисунке.



Сечение однопутного железнодорожного туннеля в соответствии с типовой схемой SZDC

Тоннель предполагается проходить обычным методом (Ново-Австрийский метод проходки, метод последовательной экскавации) в следующем порядке: верхняя часть забоя, уступ и лоток (*разработка суступом*, так называемая горизонтальная последовательность). Толща вскрышной породы составляет 14 м. Первичная обделка выполнена из торкрет-бетона класса С 20/25 толщиной 200 мм. Кровля выработки поддерживается гидрораспорными трубчатыми анкерами (марка WIBOLT EXP) с несущей способностью 120 кН. На основании материалов изысканий предполагается, что все элементы геологического разреза залегают горизонтально. Состав геологического разреза представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры дисперсных и скальных грунтов

Разновидность грунта	Мощность слоя [м]	$\gamma$ [кН/м <sup>3</sup> ]	$\phi_{ef}$ [°]	$c_{ef}$ [кПа]	$\nu$ [-]	$E_{def}$ [МПа]	$E$ [МПа]	$E_{ur}$ [МПа]	$K_0$ [-]	$\gamma_{sat}$ [кН/м <sup>3</sup> ]
Пылеватый песок (S4/SM)	0 – 3	19	29	10	0,3	10	10	30	0,5	19
Гравелистый песок (G4/GM)	3 – 5	19	33	8	0,3	70	70	210	0,5	19
Сланец сильноветрелый (R5)	5 – 19,75	20	29	39	0,33	45	45	135	0,5	20
Сланец слабоветрелый (R3)	Более 19,75	22	38	250	0,25	350	350	1050	0,35	22
Зона закрепленная анкерами (R5)	-	20	29	63	0,33	45	45	135	0,5	20

## Решение

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

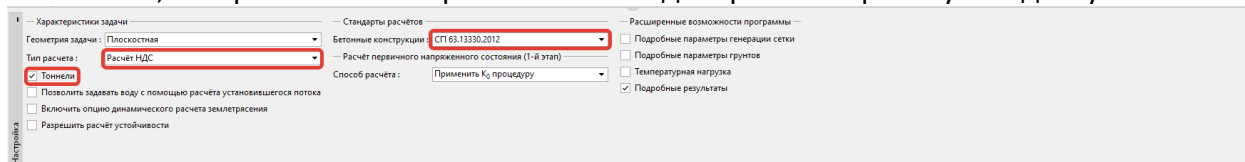
- Топология: ввод исходных данных и моделирование задачи (контактные элементы, моделирование обделки);
- Моделирование процесса возведения: материал первичной обделки, этапы проходки;
- Этап проектирования 1: исходное геостатическое давление в скальном массиве;
- Этап проектирования 2: моделирование проходки верхней части забоя, активация незакрепленного вскрытого проема;
- Этап проектирования 3: закрепление кровли невыдержанным торкрет-бетоном;
- Этап проектирования 4: улучшение параметров материала для выдержанного бетона (кровля);
- Этап проектирования 5: моделирование проходки лотка, активация незакрепленного вскрытого проема;
- Этап проектирования 6: закрепление стенок лотка невыдержанным торкрет-бетоном;
- Этап проектирования 7: улучшение параметров материала для выдержанного бетона (лоток);
- Анализ результатов, выводы: мульда оседания поверхности, деформации скального массива, распределение внутренних усилий и перемещения первичной обделки, усилия в анкерах.

*Примечание: моделирование в программе GEO 5 – FEM состоит из двух этапов. На первом этапе следует определить размеры численной модели в режиме «Топология», определить границы между скальными и дисперсными элементами, определить геометрию конструкции тоннеля с использованием точек и линий и присвоить их соответствующим границам модели (более подробная информация представлена в Справке – F1).*

*На втором этапе определяются отдельные этапы проектирования и проводятся расчеты. Целью отдельных этапов проектирования является моделирование фактической последовательности возведения данного подземного сооружения путем активации, деактивации и изменения материалов выбранных областей модели; добавления и удаления балочных элементов, моделирующих конструкции (например, обделку тоннеля), а также изменения их параметров (материала, размеров). В результате будет получена численная модель, поведение которой, предположительно, полностью соответствует поведению реального сооружения. С ее помощью возможно оценить размеры конструкций тоннеля.*

## Топология (Часть 1): ввод границ элементов и параметров грунта

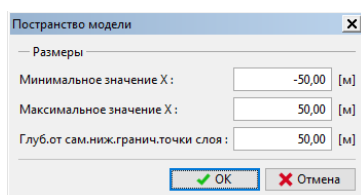
Во вкладке "Характеристики задачи" для этапа проектирования 1 расчет первичного напряженного состояния необходимо поменять на «Применить  $K_0$  процедуру». Используется тип расчета «Расчет НДС». Дополнительно необходимо отметить режим «Тоннели», который позволяет реалистично моделировать первичную обделку тоннеля.



Вкладка «Характеристики задачи»

*Примечание: в случае, если выбран режим «Тоннели», программу можно использовать для моделирования выработок (моделирование пространственного влияния забоя при проходке Ново-Австрийским методом), вводить и рассчитывать деградацию свойств балок, температурные нагрузки, действующие на балки и области, нагрузки в результате набухания, и сопоставлять результаты с данными мониторинга (более подробная информация представлена в Справке - F1).*

Далее следует задать размеры пространства модели и поверхность грунта. Во вкладке «Границы контура» необходимо нажать на «Установить диапазоны». Для данной задачи указываются размеры (-50 м; 50 м); величина глубины исследуемой области от нижней точки поверхности 50 м.



Диалоговое окно «Пространство модели»

*Примечание: границы рассматриваемой задачи или размеры пространства модели должны быть достаточно большими, чтобы на напряженное состояние и деформации скального массива в зоне расположения сооружения (или в других интересующих пользователя областях) не оказывали влияния граничные условия модели. Рекомендуемые значения размеров границ модели представлены для отдельных задач и подробно описаны в Справке к программе (более подробная информация – F1).*

Граница 1		Граница 2		Граница 3		Граница 4	
x [м]	z [м]	x [м]	z [м]	x [м]	z [м]	x [м]	z [м]
-50,0	22,0	-50,0	19,0	-50,0	17,0	-50,0	12,0
50,0	22,0	50,0	19,0	50,0	17,0	50,0	12,0

Список точек границ между скальными и дисперсными элементами

Во вкладке «Грунты» следует ввести параметры скальных и дисперсных грунтовых элементов, а так же параметры закрепленной анкерами зоны (см. Примечание). Для моделирования задачи используется модель Mohr-Coulomb. Она позволяет рассматривать области местного или полного разрушения (более подробная информация представлена в Справке – F1).

*Примечание: скальные анкеры вводятся в численную модель с помощью метода, в котором область скального массива, закрепленная на длину анкера вблизи выработки, заменяется скальным грунтом с лучшими параметрами материала. В таких случаях обычно принимается увеличение сцепления для скального грунта. Общее сцепление в скальном грунте с учетом работы анкеров вычисляется как:*

$$c_{h+s} = c_h + c_s \text{ [кПа]}$$

где:  $c_{h+s}$  общее сцепление скального грунта, увеличенное с помощью анкеров;  
 $c_h$  исходное сцепление скального грунта;  
 $c_s$  увеличение сцепления за счет работы анкеров.

Увеличение сцепления за счет работы анкеров рассчитывается по следующей зависимости:

$$c_s = \frac{N_u}{A_k} \cdot \frac{1 + \sin \varphi_{ef}}{2 \cdot \cos \varphi_{ef}} \cdot \frac{1}{\gamma_{kc}} = \frac{120}{2,058} \cdot \frac{1 + \sin 29^\circ}{2 \cdot \cos 29^\circ} \cdot \frac{1}{1,5} = 33,0 \text{ кПа}$$

где:  $N_u$  несущая способность анкера [кН];  
 $A_k$  область, включенная в работу одним анкером [м<sup>2</sup>];  
 $\varphi_{ef}$  угол внутреннего трения скального грунта [°];  
 $\gamma_{kc}$  коэффициент надежности анкера [-]

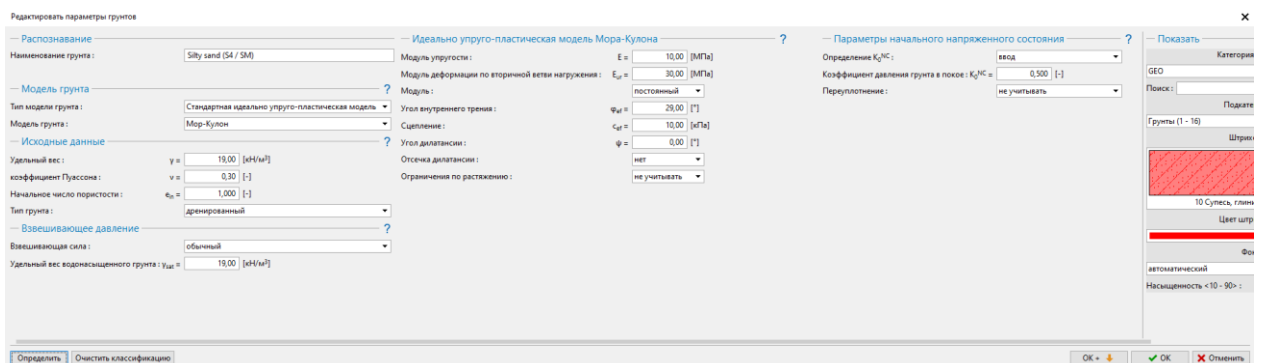
В данной задаче рассматривается использование **10 гидрораспорных трубчатых анкеров** с несущей способностью 120 кН и шагом 3,5 м. Результирующее сопротивление сдвигу, или сцепление, в закрепленной анкерами области соответствует типу скального грунта R5:

$$c_{h+s} = c_h + c_s = 30 + 33 = 63 \text{ [кПа]}.$$

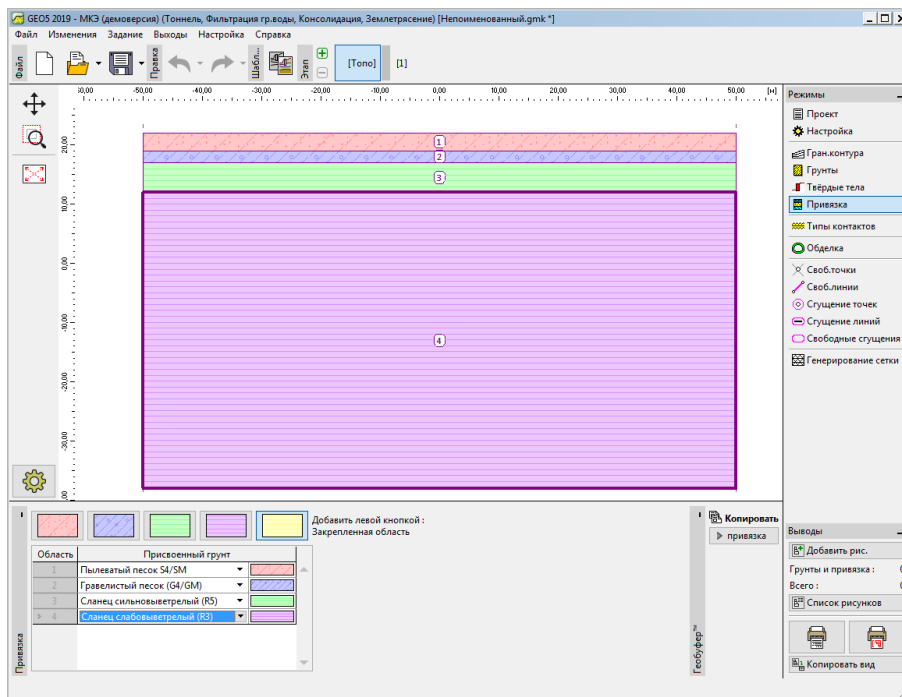
Модуль упругости  $E$  [МПа] не определялся непосредственно в ходе геологических изысканий. В связи с этим его величина определена на основании модуля деформации  $E_{def}$  [МПа] с использованием общей зависимости  $E = E_{def}$ . Модуль нагрузки по вторичной ветви нагружения равняется  $E_{ur} = 3E$ .

В расчете принимается нулевое значение угла дилатансии [ $\psi$ ] для всех дисперсных и скальных элементов.

Далее следует присвоить виды грунтов отдельным областям (см. рисунок ниже).



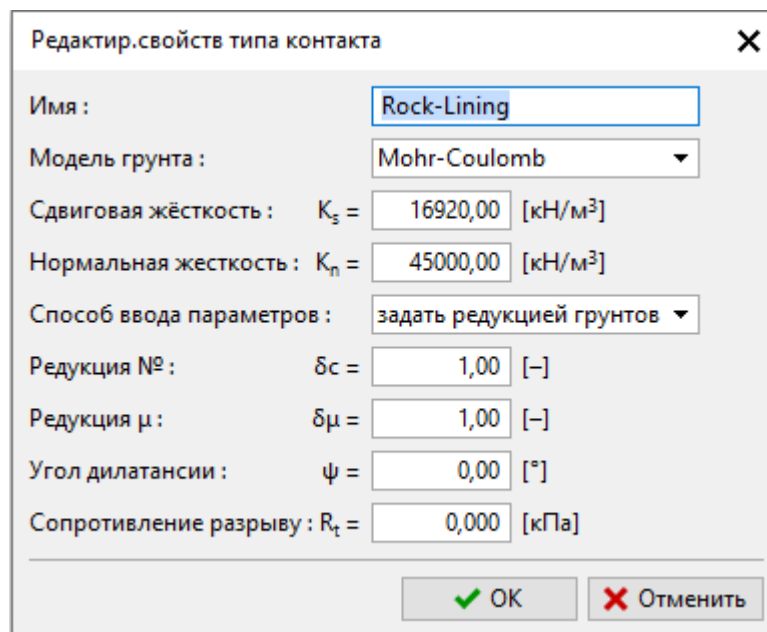
Диалоговое окно "Добавление новых грунтов"



Вкладка "Привязка"

Следующим шагом является определение типа контактных элементов, которые будут расположены между обделкой и грунтом или скальным грунтом во вкладке «Типы контактов». Параметры контакта предполагаются следующими:

- жесткость при сдвиге:  $K_s = 16\,925 \text{ кН/м}^3$
- жесткость при нормальном сжатии:  $K_n = 45\,000 \text{ кН/м}^3$
- снижение параметров грунта:  $\delta_s = \delta_\mu = 1.0$ .



Диалоговое окно «Создать типы контактов»

*Примечание: контактные элементы позволяют прогнозировать взаимодействие между материалами на границе грунта и сооружения, либо между видами грунта. Толщина контактного элемента равняется нулю. Элемент отражает отношение между контактными напряжениями и соответствующими перемещениями на контакте (более подробная информация представлена в Справке – F1).*

В данном случае рассматриваются контактные элементы на границе первичной обделки и скального грунта, то есть предполагается возможное смещение обделки относительно поверхности выработки.

Контактные элементы обычно используются в менее прочных грунтах; ими можно пренебречь, с определенной осторожностью, в неветрелых ненарушенных скальных массивах (в случае тоннельных сооружений). Задачи и методы использования контактных элементов более подробно рассмотрены в Главе 24 «Численный расчет шпунтового ограждения» (более подробную информацию см. <http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/>). Рекомендуемые значения жесткости  $K_s$  и  $K_n$  [кН/м<sup>3</sup>] представлены в Справке (более подробная информация – F1).

На этом завершается начальное определение задачи (моделирование границ, ввод параметров грунтов и типов контактов). Можно перейти к моделированию обделки тоннельной выработки и, далее, к определению области, закрепленной анкерами.

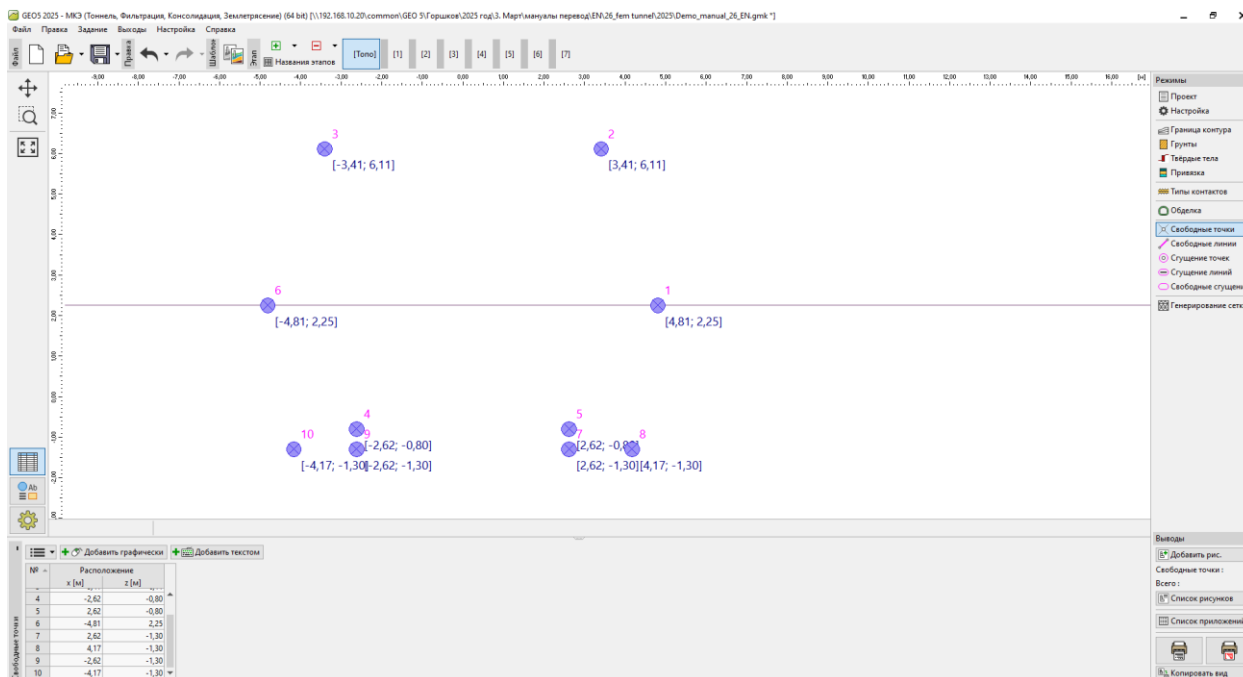
## **Топология (часть 2): моделирование обделки и области, закрепленной анкерами**

Переключимся на рамку «Свободные точки», нажмем «Добавить текстом», чтобы определить расположение точек обделки.

Геометрия поперечного сечения обделки определяется при помощи точек, перечисленных в табл. 2.

*Таблица 2 – Свободные точки выработки (первичная обделка)*

<b>Номер точки</b>	<b>Положение x [м]</b>	<b>Положение y [м]</b>
1	4,81	2,25
2	3,41	6,11
3	-3,41	6,11
4	-2,62	-0,80
5	2,62	-0,80
6	-4,81	2,25
7	2,62	-1,30
8	4,17	-1,30
9	-2,62	-1,30
10	-4,17	-1,30



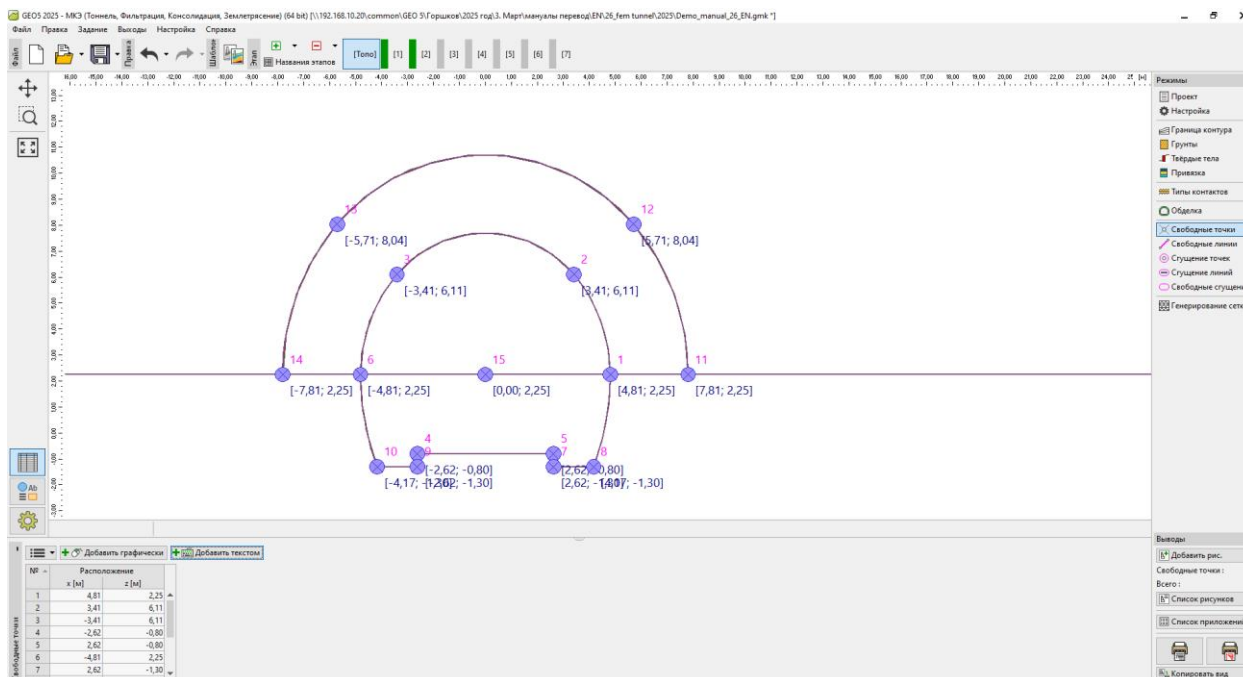
Диалоговое окно «Свободные точки»

После этого необходимо переключиться на рамку «Свободные линии» и соединить точки при помощи прямых и дуговых сегментов согласно табл. 3.

Таблица 3 – Свободные линии выработки (первичная обделка)

Номер линии	Тип линии	Способ ввода	Топология линии
1	дуга	центр	Начало – точка 1, конец – точка 2, центр (-1,19; 2,25), ориентация положительная
2	дуга	центр	Начало – точка 2, конец – точка 3, центр (0,00; 3,25), ориентация положительная
3	отрезок	-	Начало – точка 4, конец – точка 5
4	дуга	центр	Начало – точка 3, конец – точка 6, центр (1,19; 2,25), ориентация положительная
5	отрезок	-	Начало – точка 7, конец – точка 8
6	дуга	центр	Начало – точка 1, конец – точка 8, центр (-5,39; 2,25), ориентация отрицательная
7	отрезок	-	Начало – точка 5, конец – точка 7
8	отрезок	-	Начало – точка 9, конец – точка 10
9	дуга	центр	Начало – точка 10, конец – точка 6, центр (5,39; 2,25), ориентация отрицательная
10	отрезок	-	Начало – точка 4, конец – точка 9

Свободные точки на контуре тоннельной выработки и первичной обделки показаны на рисунке ниже



*Модуль «Обделка – МКЭ» - Свободные линии выработки (в горизонтальной последовательности)*

Поддержка свода тоннеля с использованием анкеров учитывается в процессе расчета подземного сооружения. В инженерной практике эта поддержка обычно моделируется как увеличение параметров скального грунта в данной области. В связи с этим необходимо так же выделить область закрепления – с помощью свободных точек (см. табл. 4) и свободных линий (см. табл. 5).

*Таблица 4 – Свободные точки вокруг области, закрепленной гидрораспорными трубчатыми анкерами*

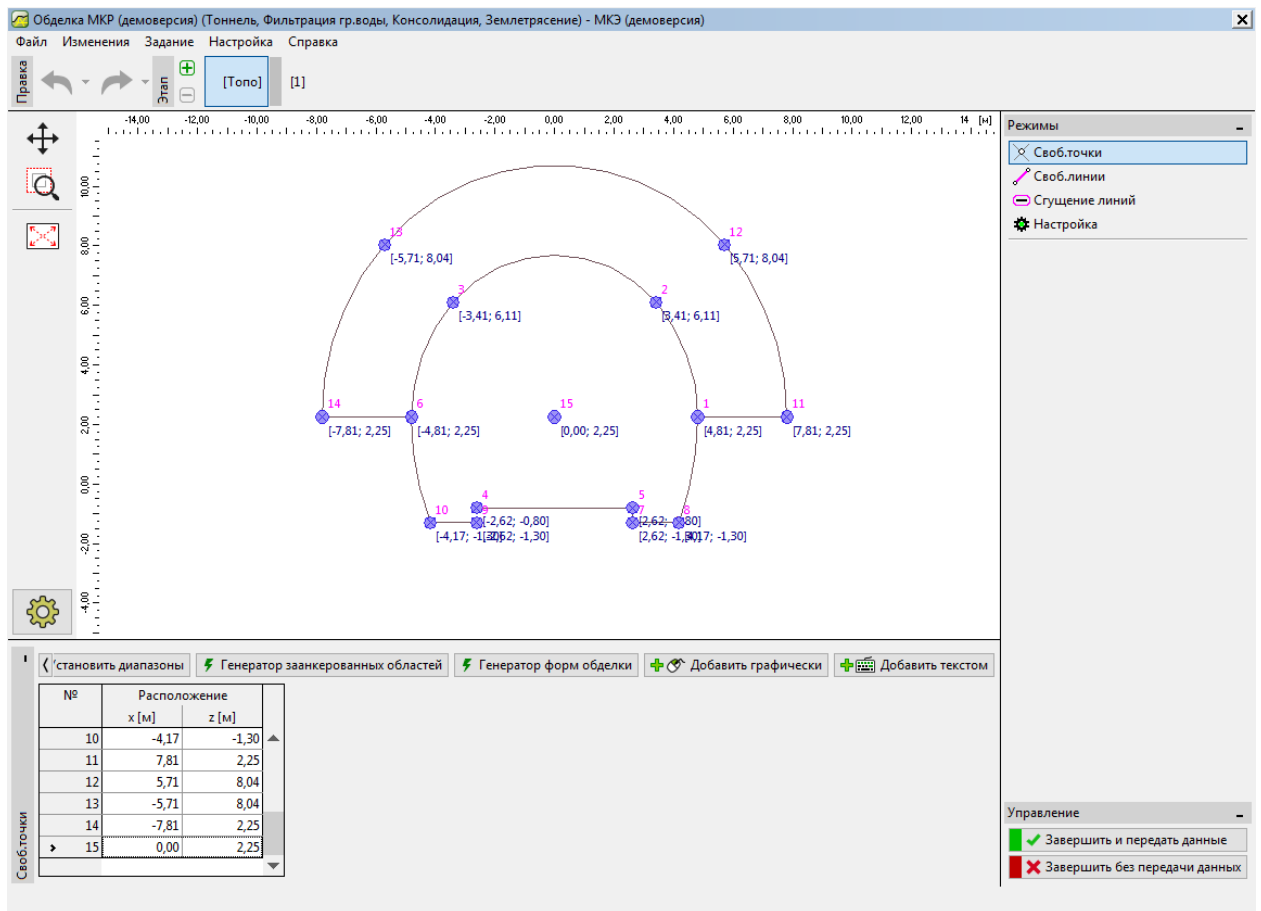
Номер точки	Положение x [м]	Положение y [м]
11	7,81	2,25
12	5,71	8,04
13	-5,71	8,04
14	-7,81	2,25

*Таблица 5 – Свободные линии вокруг области, закрепленной гидрораспорными трубчатыми анкерами*

Номер линии	Тип линии	Способ свода	Топология линии
11	дуга	радиус	Начало – точка 14, конец – точка 13, радиус – 9,0 м, ориентация отрицательная, угол – острый
12	дуга	радиус	Начало – точка 13, конец – точка 12, радиус – 7,45 м, ориентация отрицательная, угол – острый
13	дуга	радиус	Начало – точка 12, конец – точка 11, радиус – 9,0 м, ориентация отрицательная, угол – острый



Далее следует добавить новую свободную точку № 15 с координатами [0,0; 2,25] в рамке «Свободные точки», чтобы затем увеличить плотность сетки вокруг нее (см. Топология – часть 3).



*Свободные точки вокруг закрепленной области и первичной обделки*

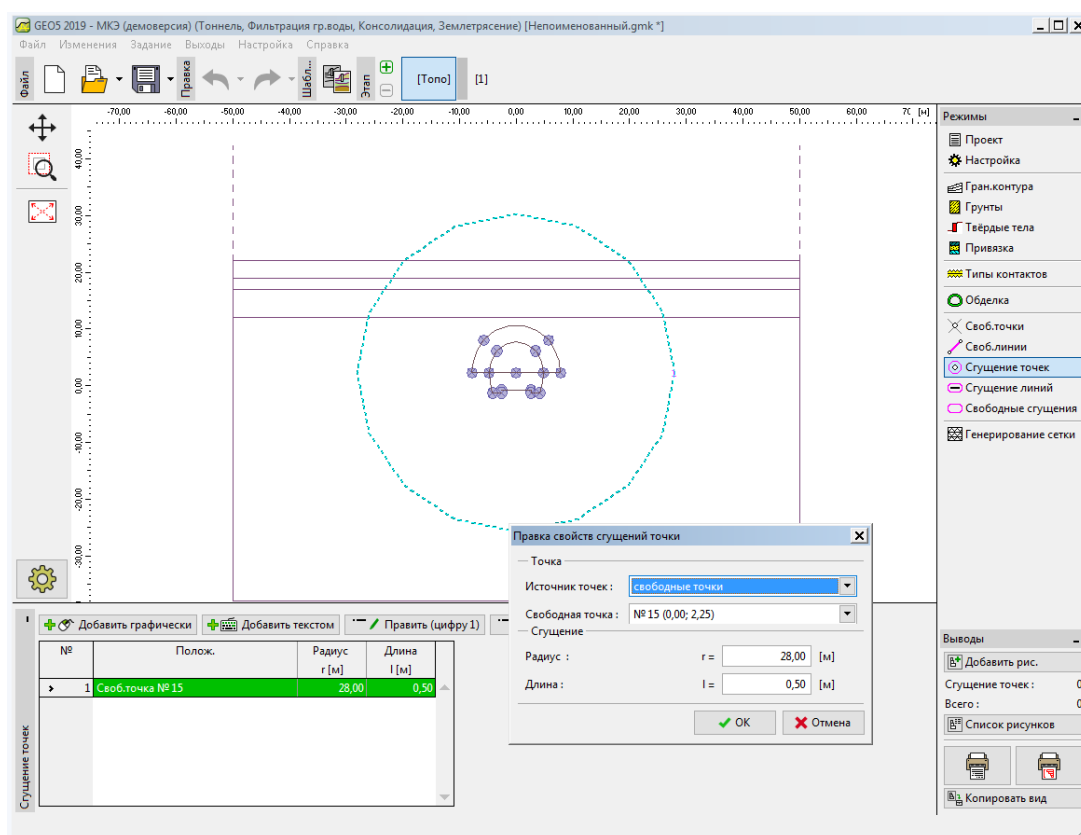
В последней части определения топологии сооружения будет создана сетка КЭ и проведено увеличение ее плотности.

## Топология (часть 3): создание сетки КЭ и увеличение ее плотности

Сетка КЭ в значительной степени влияет на значения, полученные в результате расчета. Перед непосредственным созданием сетки следует увеличить плотность в области выработки (вокруг точки № 15) с длиной стороны элемента  $l = 0,5$  м и радиусом  $r = 28$  м.

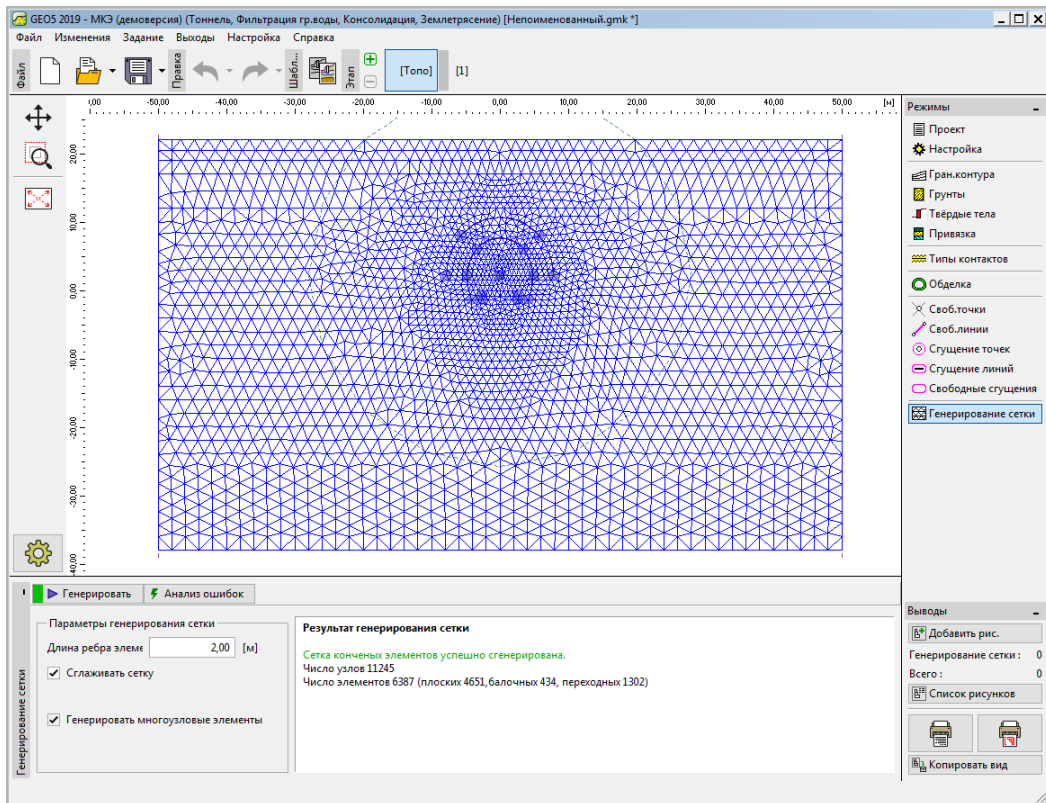
В рамке «Сгущения точек» нажимаем «Добавить графически» либо «Добавить текстом» и выбираем точку № 15 и устанавливаем радиус  $r = 28$  м и длину  $l = 0.5$  м.

*Примечание: на данном этапе создается достаточно плотная сетка в области, представляющей наибольший интерес (выработка). Процесс увеличения плотности вокруг свободных точек и линий подробно описан в Главе 23. Расчет обделки коллектора (более подробная информация - <http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/>).*



Диалоговое окно «Правка свойств сгущений точки»

Далее можно перейти непосредственно к созданию сетки КЭ. Во вкладке «Генерирование сетки» следует установить размер стороны элемента 2,0 м и отметить опцию «Сглаживание сетки».



*Вкладка «Генерирование сетки» - Измельчение вокруг точек вблизи выработки (длина стороны 0,5 м)*

## Примечания к моделированию процесса строительства

В данной части руководства для удобства представлена информация, относящаяся к процессу проектирования – материал первичной обделки тоннеля, последовательность разработки (отдельные выработки). Данная информация полезна для численного моделирования представленного примера, так как некоторые входные данные повторяются (например, выработки).

*Примечание: этапы проектирования учитывают процесс проходки тоннеля. Для возможности совмещения отдельных этапов проектирования необходима информация о материалах первичной обделки тоннеля, последовательности разработки и гидрогеологических условиях в процессе проходки.*

*Первичная обделка проектируется из торкрет-бетона класса С 20/25 толщиной 200 мм. В численную модель вводится только торкрет-бетон и рост во времени прочности или модуля упругости (см. табл. 6).*

*Таблица 6 – Значения модуля упругости для торкрет-бетона (развитие во времени)*

<b>Выдержка торкрет-бетона</b>	<b>Модуль упругости <math>E_{cm}</math> [МПа]</b>	<b>Модуль сдвига <math>G</math> [МПа]</b>
Невыдержанный бетон	2 900	1 134
Выдержанный бетон	29 000	11 340

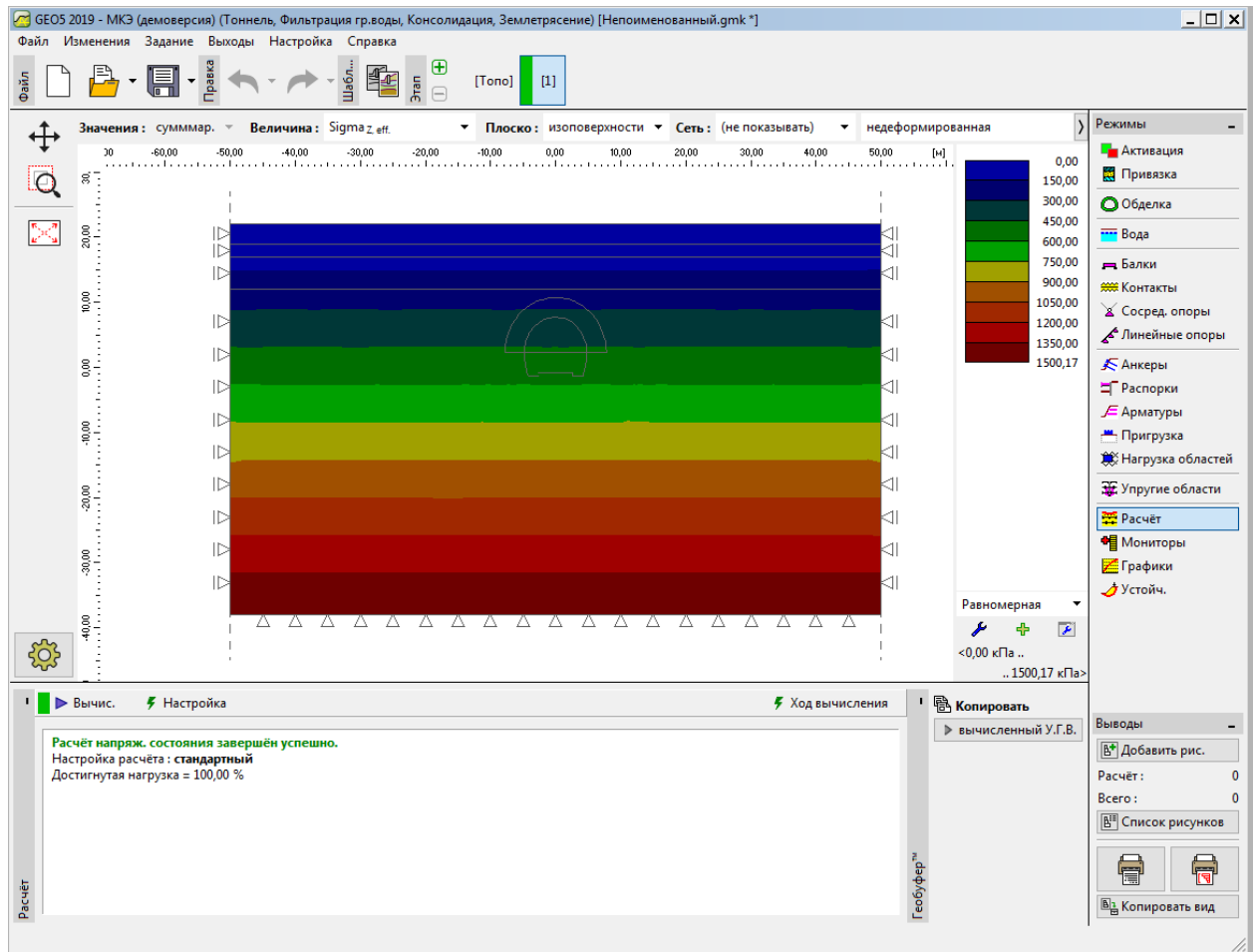
*Примечание: проходка тоннеля моделируется в плоской постановке, что не полностью отражает пространственные изменения напряженного состояния в скальном массиве, которые имеют место в ходе проходки в области забоя. В процессе разработки грунта временно незакрепленная выработка поддерживается ядром забоя (продольная и поперечная скальная арка), а так же частью вскрытой выработки, закрепленной ранее. Это поведение может быть описано трехмерной моделью; поведение модели в плоской постановке в направлении проходки описывает процесс достаточно приблизительно.*

*Метод, который часто используется в инженерной практике (часто называемый метод  $\lambda$ , или метод  $\nu$ ), предполагает, что природное напряжение в массиве, например бытовое давление  $\sigma_0$ , действующее в области будущей выработки до ее проходки, плавно меняется во времени в соответствии с зависимостью  $(1 - \nu) \cdot \sigma_0$  (для начального напряженного состояния  $\nu = 1$ ). Если моделируется изменение начального напряженного состояния на двух этапах расчета (этапах проектирования), незакрепленная выработка нагружается величиной  $(1 - \nu) \cdot \sigma_0$  на начальном этапе, а оставшаяся часть нагрузки  $\nu \cdot \sigma_0$  учитывается во втором этапе.*

*В случае последовательной выработки, этот процесс будет применяться последовательно к каждому отдельному этапу. Величина коэффициента  $\nu$  зависит от геологии скального массива, продвижения за цикл проходки и размера выработки; определить ее достаточно сложно. В GEO 5 – FEM, этот метод представлен так называемой «Экスカвацией». Для целей численного моделирования величина коэффициента  $\nu$  определяется как 0,6 для однопутного сечения для верхней части забоя и для лотка.*

## Этап проектирования 1: исходное геостатическое напряженное состояние

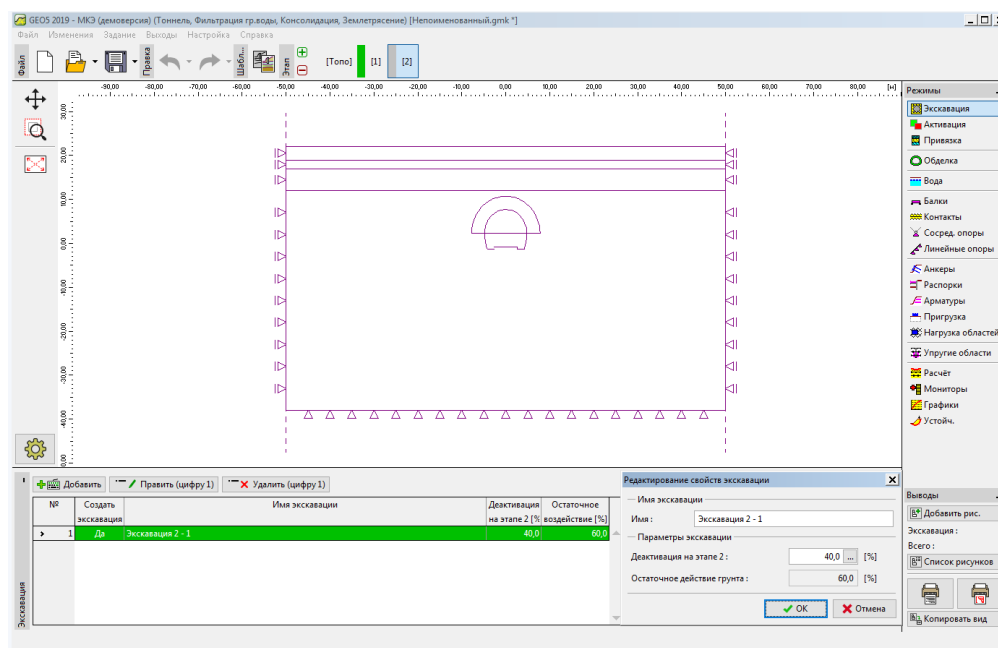
После создания сетки КЭ можно перейти к этапу проектирования 1 и провести расчет геостатического давления в массиве. Для всех этапов проектирования параметры расчета остаются стандартными (более подробная информация представлена в Справке – F1).



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 1 (начальное геостатическое напряжение  $\sigma_{z,ef}$ )

## Этап проектирования 2: разработка верхней части забоя, активация незакрепленной выработки

На следующем этапе добавляется этап проектирования 2. В рамке «Экскавация» мы добавляем новую экскавацию и устанавливаем деактивацию на 40%, далее во вкладке «Активация» необходимо для области № 5. Выбрать экскавацию



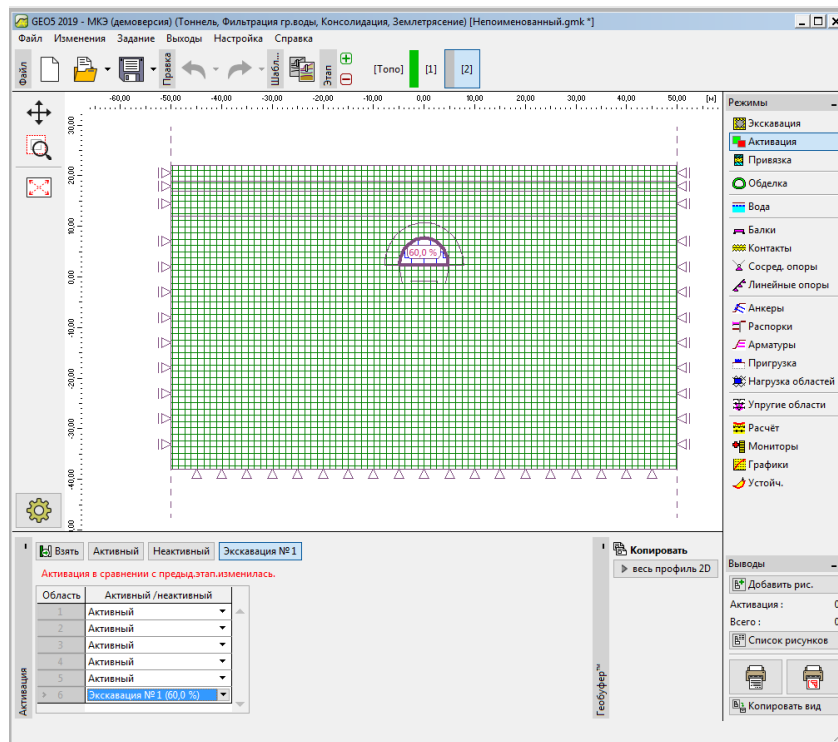
Диалоговое окно «Новая экскавация» - Этап проектирования 2

*Примечание: в инженерной практике последовательность разработки (отдельные экскавации) задается путем деактивации действия скального массива в процентах относительно остающегося действия. В данном примере для отдельных этапов проектирования тоннеля приняты следующие пропорции:*

- разработка верхней части забоя, активация незакрепленной выработки: 40%/60%;
- поддержка кровли забоя невыдержанным бетоном: 30%/30%;
- улучшение свойств материала поддержки кровли забоя: 30%/0%;
- моделирование разработки лотка, активация незакрепленной выработки: 40%/60%;
- поддержка стенок забоя невыдержанным бетоном: 30%/30%;
- улучшение свойств материала поддержки стенок забоя: 30%/0%.

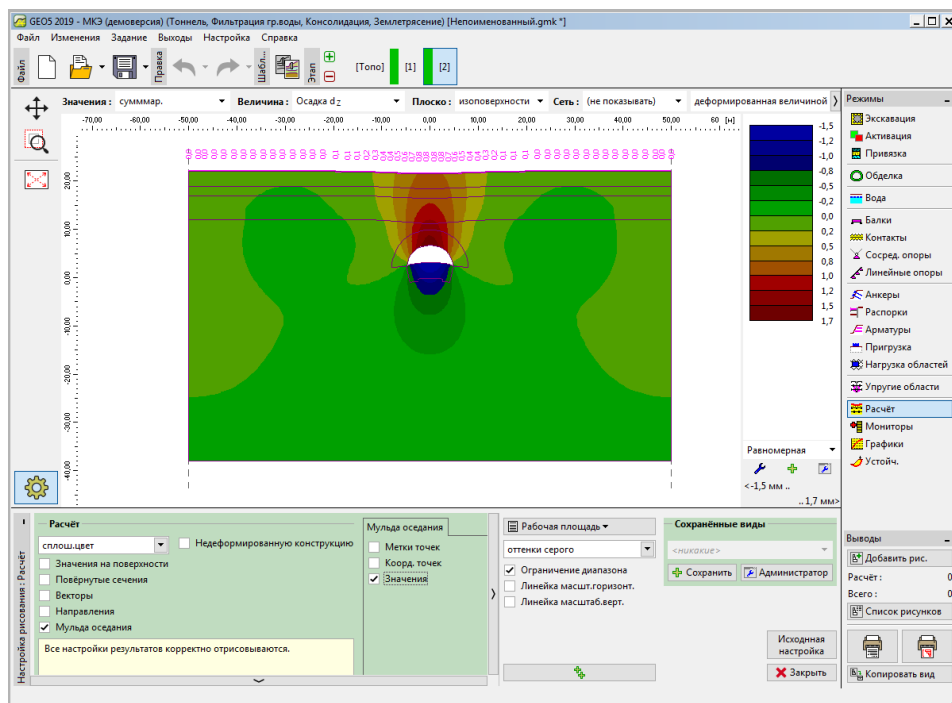
*Приведенные выше пропорции основаны на многолетнем опыте и обеспечивают достаточно надежные результаты. В программе есть возможность задать различные процентные соотношения Экскавация для отдельных этапов проектирования (например, 25/75, 30/45, 30/15, 15/0) для кровли и лотка.*

В общем случае, это активация частичного ( в процентном соотношении) нагружения, действующего на незакрепленную кровлю. На этом этапе принимается 40% деактивация грунта (см. рисунок).



Диалоговое окно «Активация» - Этап проектирования 2 (действие 40% нагрузки на разработанную кровлю).

Далее можно провести расчет и посмотреть результаты для вертикальных перемещений  $d_z$  [мм]. Для лучшего понимания работы выработки можно посмотреть деформированную сетку и мульду оседания.



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 2 (вертикальные перемещения  $d_z$  и мульда оседания)

## Этап проектирования 3: крепление кровли выработки невыдержанным бетоном первичной обделки

На следующем этапе добавляется этап проектирования 3. Вначале следует смоделировать поддержку кровли в виде первичной обделки из невыдержанного бетона толщиной 200 мм ( $E=2900$  МПа,  $G=1134$  МПа) во вкладке «Балки», нажимая «Добавить графически» мы выбираем часть обделки и устанавливаем параметры.

Редактор свойств балки

Топология: свободная линия

Расположение: свободная линия

Свободная линия: свободная линия № 4

Параметры

Учет собственного веса

Сечение и материал

Тип сечения: **прямоугольная стена**

Высота сечения: **h = 0,20 [м]**

Ширина сечения: **b = 1,00 [м]**

Тип материала: бетон

Имя: C.20/25

Каталог Пользователь

$I_y = 6,67E-04 \text{ м}^4/\text{м}; A = 2,00E-01 \text{ м}^2/\text{м}; E = 2900,00 \text{ МПа}; G = 1134,00 \text{ МПа}$

Контакты

Учет контакт слева

Учет контакт справа

Тип контакта: Rock-Lining

OK ↑ OK Отменить

Редактор материала - Бетон

Описание материала

Название: C.20/25

Характеристики материала

Основные характеристики материалов

Модуль упругости  $E_{cm} = 2900,00 \text{ МПа}$

Модуль упругости при сдвиге  $G = 1134,00 \text{ МПа}$

Коэффициент теплового расширения  $\alpha_t = 0,000010 \text{ 1/K}$

Удельный вес  $\gamma = 25,00 \text{ кН/м}^3$

Специальные характеристики материалов

Цилинд. прочность на сжатие  $f_{ck} = 20,00 \text{ МПа}$

Прочность на растяжение  $f_{ctm} = 2,20 \text{ МПа}$

Пересчитывать значения

Класс цемента:  S  N  R

OK Отмена

ГЕОС 2025 - МСД (Тоннель, Филтрация, Консолидация, Землерасклев) (64 bit) (\\192.168.10.20\common\ГЕО 9\Горские\2025 год\3. Маршруты\перевод\EN\26\_fem\_tunnel\2025\Детмо\_планы\_26\_EN.dwg '1)

Файл Правка Задачи Выводы Настройка Справка

Названия этапов [Топо] [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]

Рисунки

- Активация
- Активация
- Привязка
- Ввод
- Балки
- Контакты
- Средоточенные опоры
- Линейные опоры
- Анkers
- Нагрузки
- Распорки
- Арматура
- Пригрузка
- Нагрузка на балки
- Нагрузка областей
- Усиленные области
- Расчет
- Мониторы
- Графики

Выводы

- Добавить рис.
- Всего: 0
- Список рисунков
- Список приложений
- Копировать вид

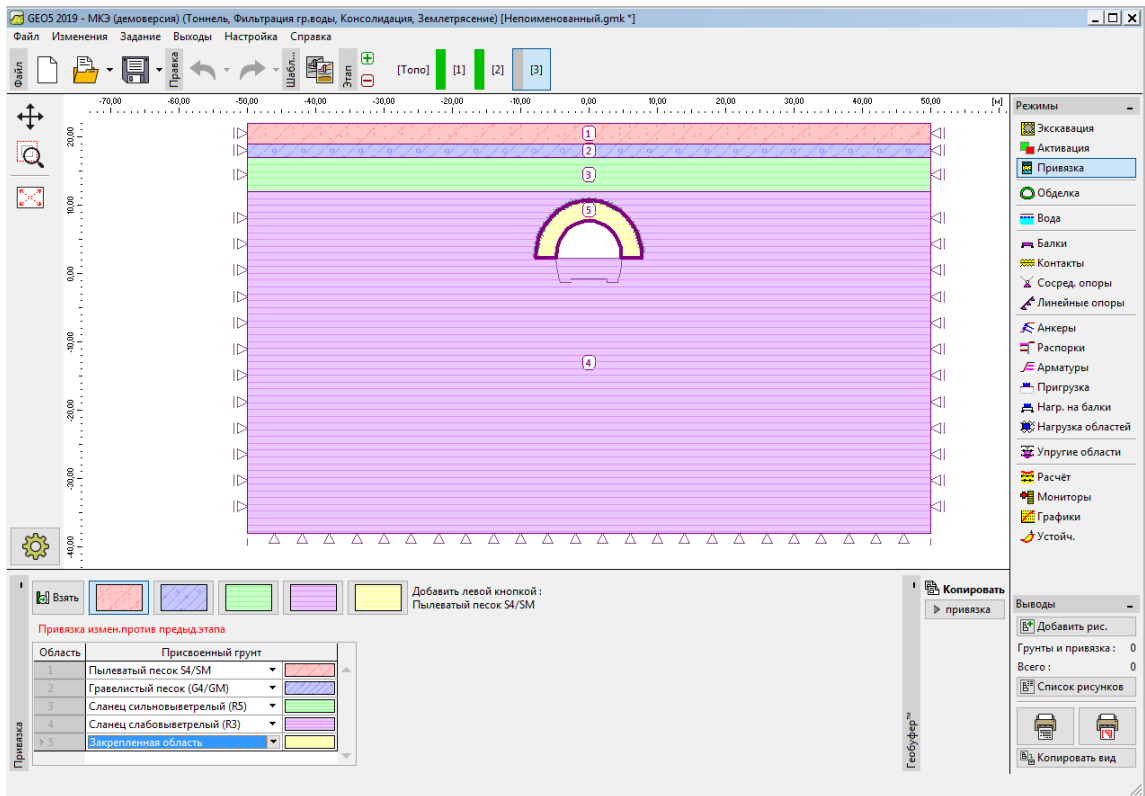
№	Балка	Расположение	Посадка [м]	Сечение /	Материал /	Контакты			
	новая	изменен.	Начало	Конец	учитывать	Датирование на текущем этапе [%]	Текущее воздействие Балки [%]	слева	справа
1	да		Свободная линия № 1	— — —	<input checked="" type="checkbox"/>	1,00 (b) x 0,20 (h) м	C.20/25 E = 2900,00 МПа; G = 1134 (не задан)		Rock-Lining
2	да		Свободная линия № 2	— — —	<input checked="" type="checkbox"/>	1,00 (b) x 0,20 (h) м	C.20/25 E = 2900,00 МПа; G = 1134 (не задан)		Rock-Lining
3	да		Свободная линия № 4	— — —	<input checked="" type="checkbox"/>	1,00 (b) x 0,20 (h) м	C.20/25 E = 2900,00 МПа; G = 1134 (не задан)		Rock-Lining

Ввод первичной обделки кровли с помощью новых балок – Этап проектирования 3 (невыдержанный бетон)

Примечание: мы рассматриваем концы балок как опоры с обоих концов, что означает, что изгибающий момент на них равняется нулю. **Опора** – специфичный тип окончания балки, который увеличивает устойчивость и конвергенцию при расчете (Более подробная информация изложена в Справке – F1).

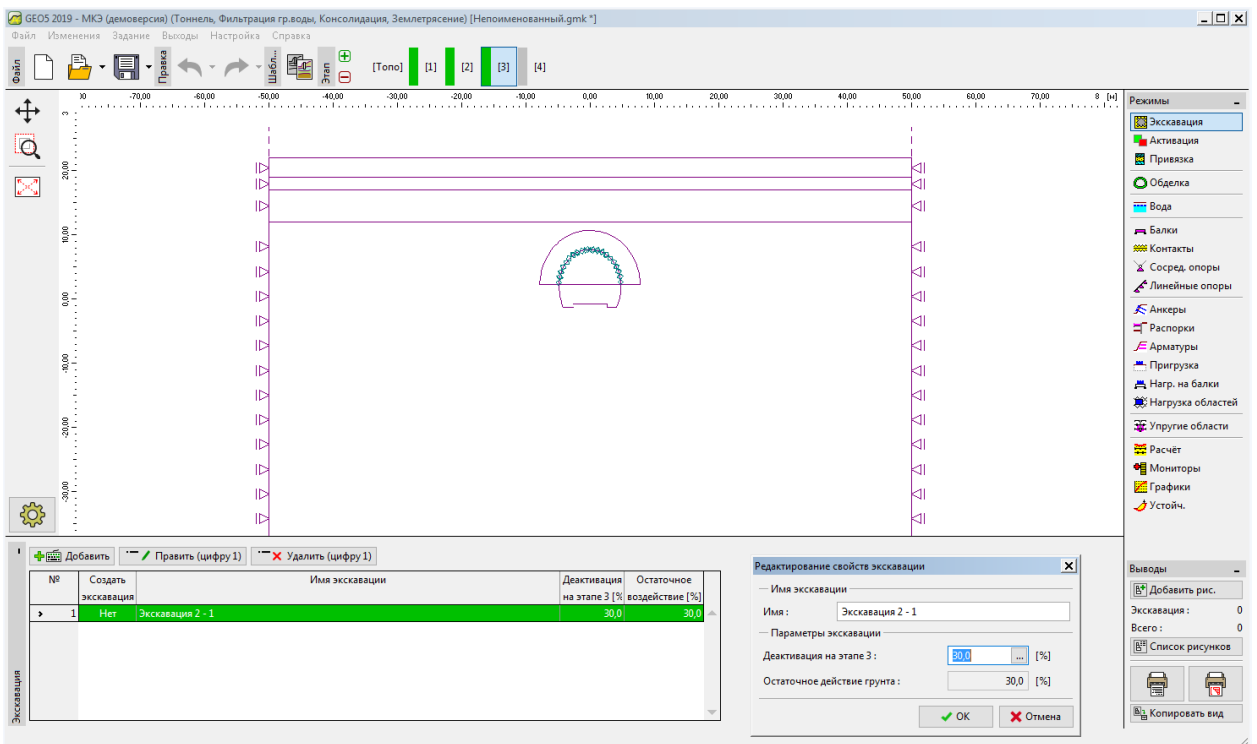
Во вкладке «Привязка» следует изменить скальный грунт в области № 5 (на «закрепленный грунт R5»), что позволит учесть закрепление гидрораспорными трубчатыми стальными анкерами (см. рисунок).





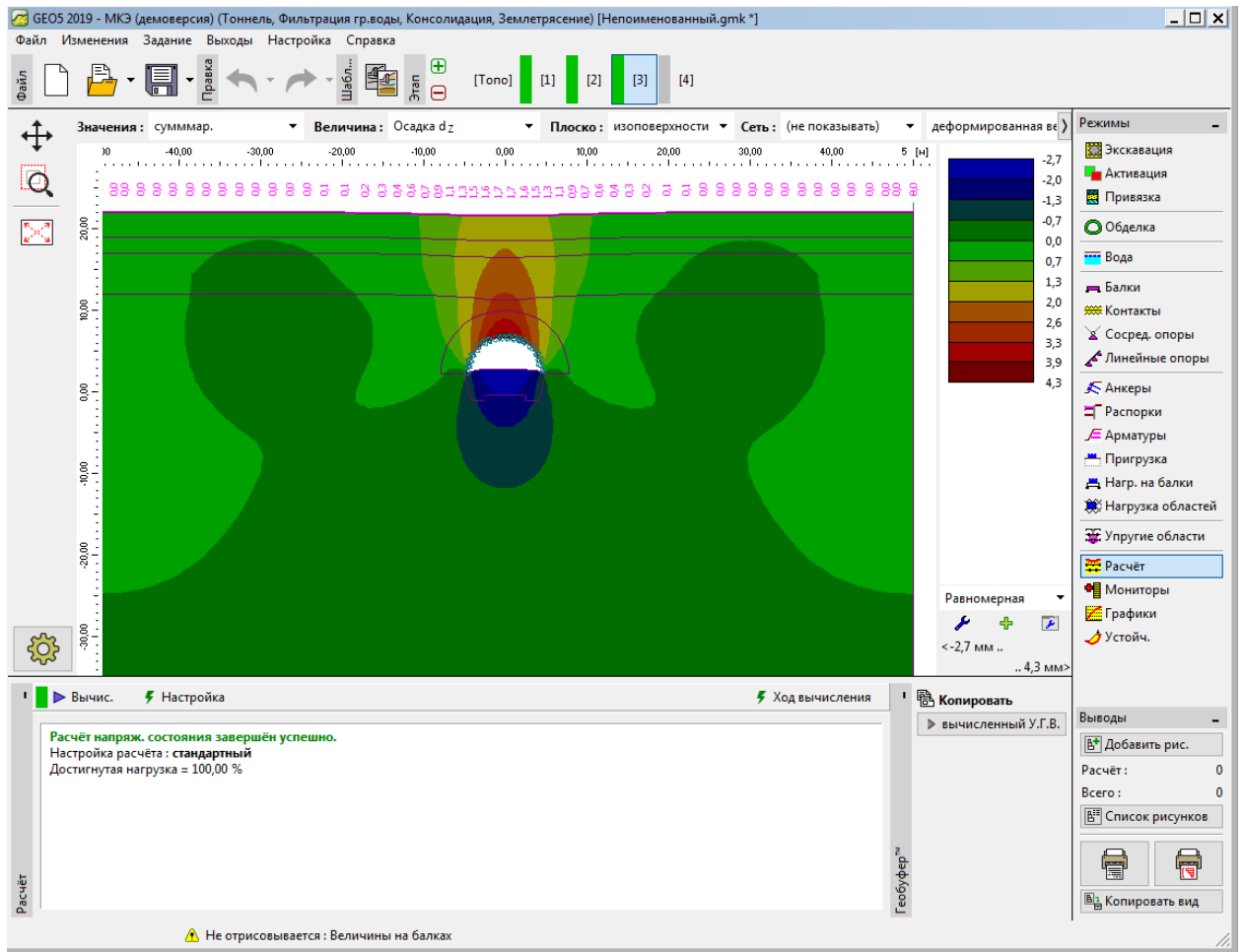
*Вкладка «Привязка» - Этап проектирования 3 (область, закрепленная гидрораспорными анкерами)*

Далее следует активировать анкеры в закрепленном массиве в кровле выработки и изменить свойства экскавации, добавив 30% нагрузки (используя кнопку «Править»).



*Диалоговое окно «Редактирование свойств экскавации» - Этап проектирования 3*

Далее расчет выполняется еще раз.



*Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 3 (вертикальные перемещения  $d_z$  и мульда оседания)*

## Этап проектирования 4: улучшение свойств материала выдержанного бетона (кровля)

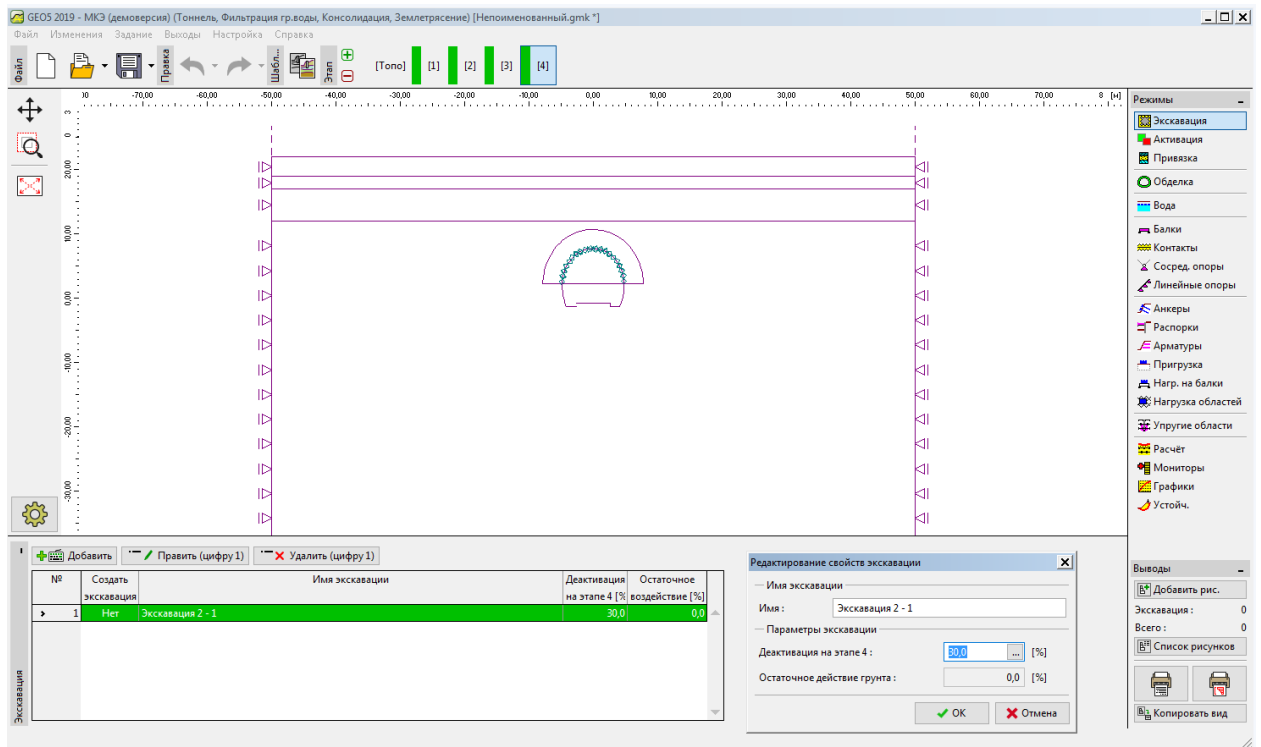
На 4 этапа расчета, мы улучшим характеристики материала, моделируя затвердевший бетон, поддерживающий верхнюю часть. Во вкладке «Балка» мы меняем часть обделки нажатием на кнопку «Редактировать». В рамке «Редактиров. свойства балки» мы выбираем опцию «усиление» и устанавливаем соответствующие значения модуля деформации и сдвига ( $E = 29000$  МПа,  $G = 11340$  МПа). Остальные параметры оставляем без изменений.

Диалоговое окно «Редактирование свойств балки» - Этап проектирования 3 (балка № 2)

№	Балка новая/изменен.	Расположение	Посадка [м]	Учитывать собственный вес	Сечение / Дegrадация на текущем этапе [%]	Материал / Текущее воздействие балки [%]	Контакты слева/справа
1	Нет / Да	Свободная линия № 3	— / ○	✓	↑ h = 0,20 м	* E = 29000,00 МПа; G = 11340,00	Mohr-Coulomb (не задан)
2	Нет / Да	Свободная линия № 2	— / —	✓	↑ h = 0,20 м	* E = 29000,00 МПа; G = 11340,00	Mohr-Coulomb (не задан)
3	Нет / Да	Свободная линия № 1	○ / —	✓	↑ h = 0,20 м	* E = 29000,00 МПа; G = 11340,00	Mohr-Coulomb (не задан)

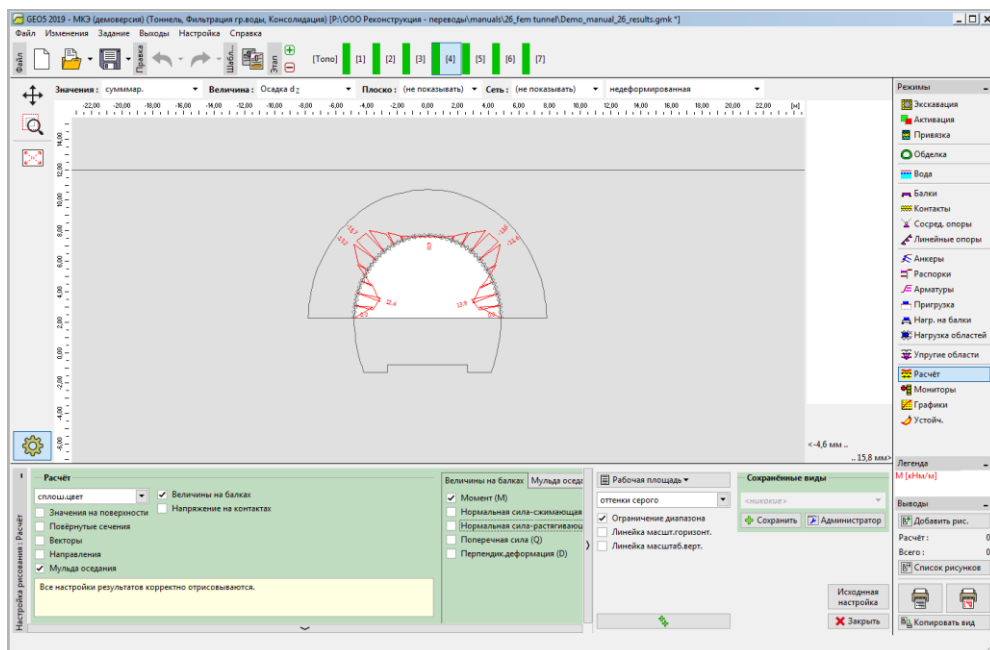
Изменение свойств первичной обделки (кровля) – Этап проектирования 4 (выдержанный торкрет-бетон)

Далее следует активировать оставшиеся 30% нагрузки в скальном массиве. Процедура изменения свойств экскавации аналогична предыдущим этапам проектирования.



Диалоговое окно «Редактирование свойств экскавации» - Этап проектирования 4

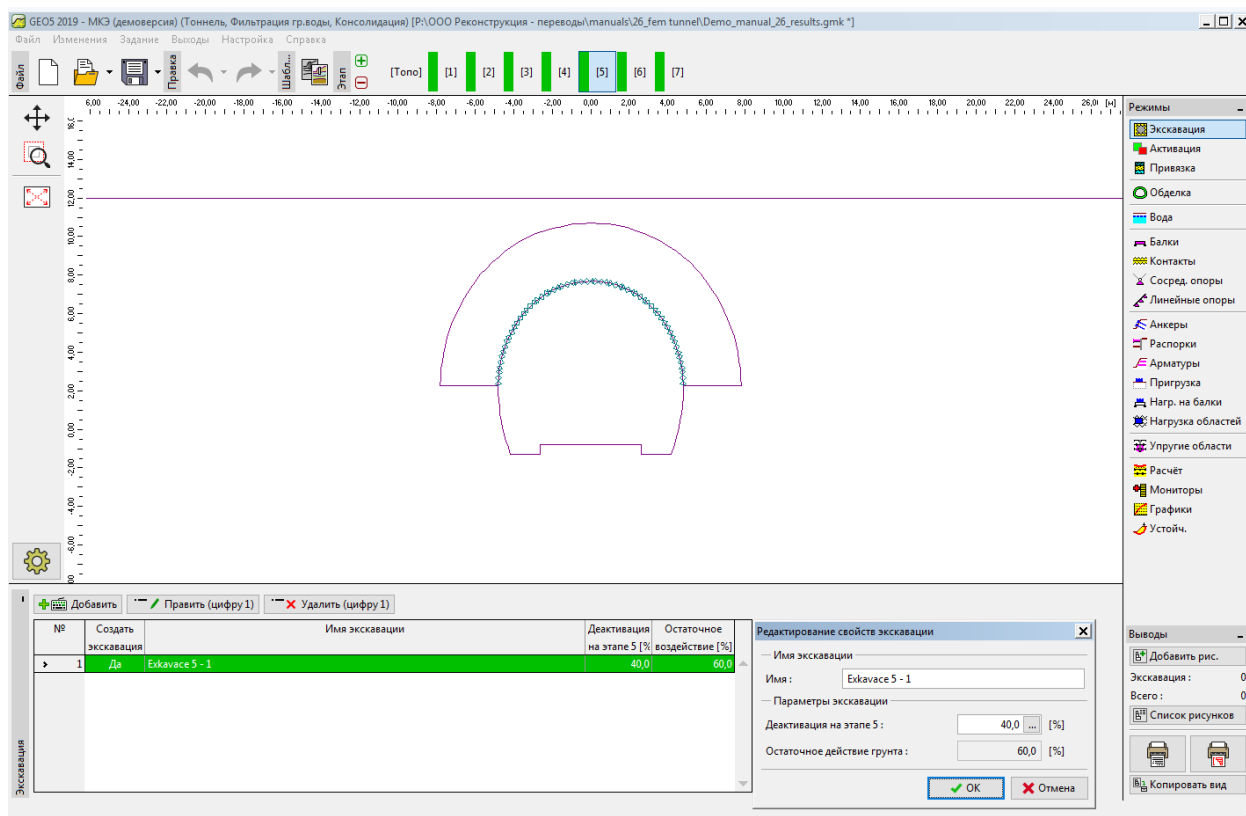
Далее можно выполнить расчет и построить эпюру изгибающих моментов по верхней части обделки.



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 4 (изгибающий момент  $M$  [кНм/м])

## Этап проектирования 5: моделирование разработки лотка тоннеля, активация незакрепленных стенок

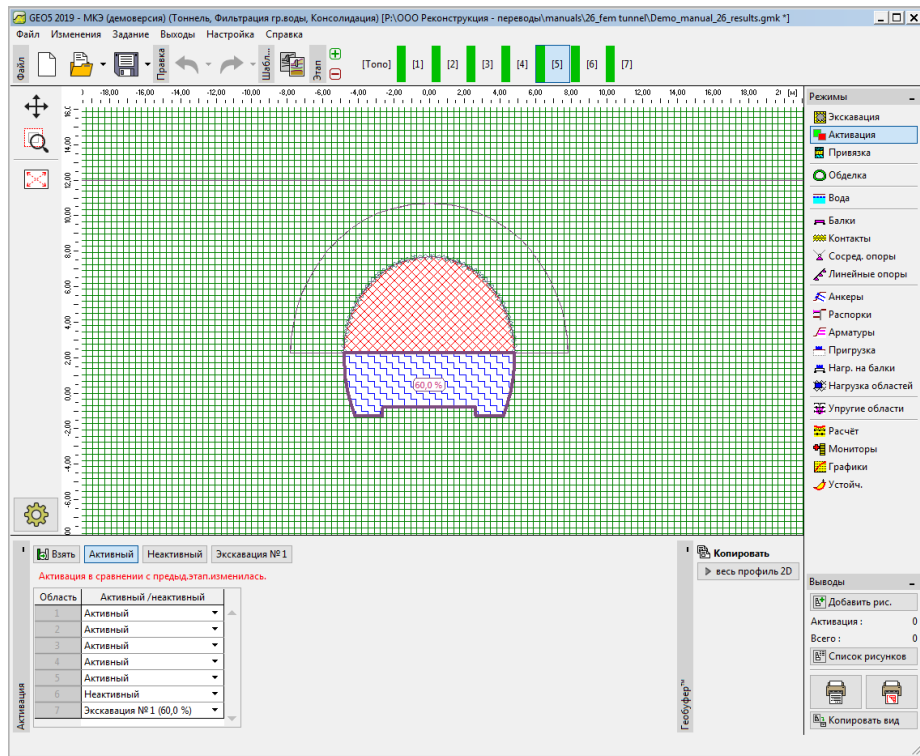
Следующим шагом добавляется этап проектирования 5. На этом этапе рассматривается деактивация грунта, или активация 40% нагрузки, принимаемой к рассмотрению. Оставшаяся нагрузка в массиве вблизи разработки лотка тоннеля, составляет таким образом 60%. В рамке «Экскавация» мы добавляем «Экскавацию 5 – 1» и устанавливаем деактивацию 40%.



Диалоговое окно «Новая экскавация» - Этап проектирования 5

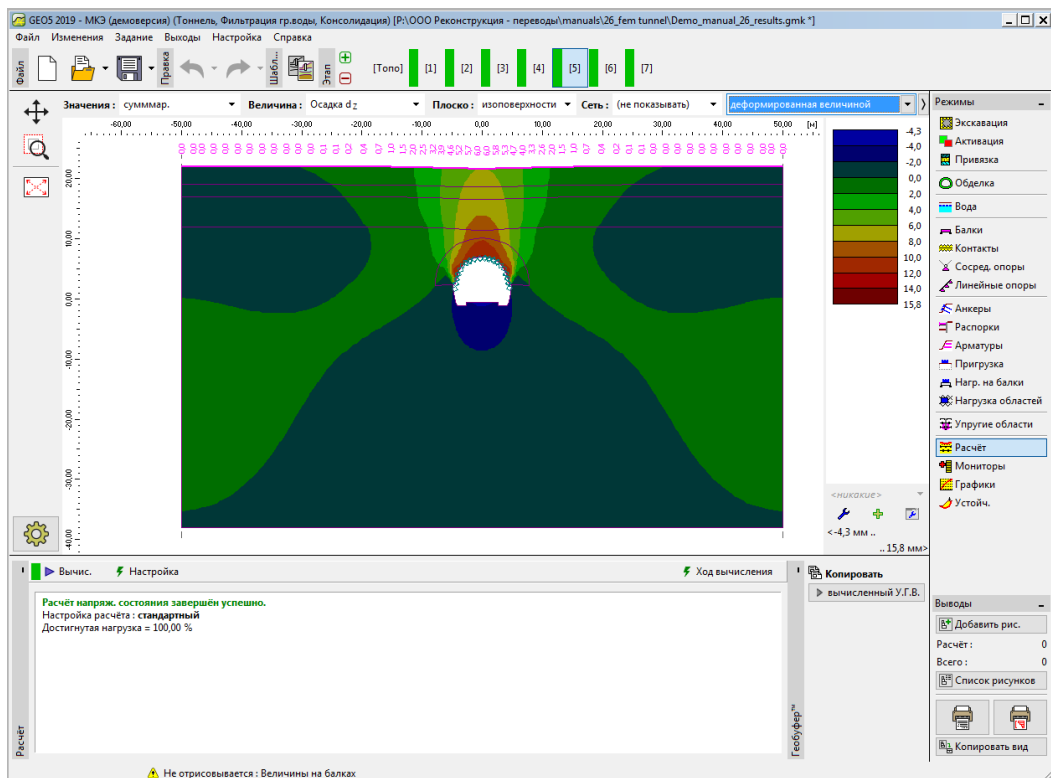
*Примечание: моделирование этой задачи с последовательными этапами проектирования аналогично. Вначале рассматривается первичная обделка стенок тоннеля из неvyдержанного торкрет-бетона. Далее активируется следующая часть нагрузки. На последующем этапе улучшаются характеристики уже выдержанного бетона и прикладывается оставшаяся нагрузка.*

В рамке «Активация» мы выбираем область №5 и применяем «Экскавация №1 (60%)».



Вкладка «Активация» - Этап конструирования 5 (активация 40% нагрузки на лоток тоннеля)

Далее выполняется расчет.



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 5 (вертикальные перемещения  $d_z$  и мутьда оседания)

## Этап проектирования 6: закрепление стенок лотка первичной обделкой из невыдержанного бетона

На этапе проектирования 6 задается закрепление стенок лотка первичной обделкой из невыдержанного торкрет-бетона толщиной 200мм. Обделка кровли остается без изменений на всех последующих этапах.

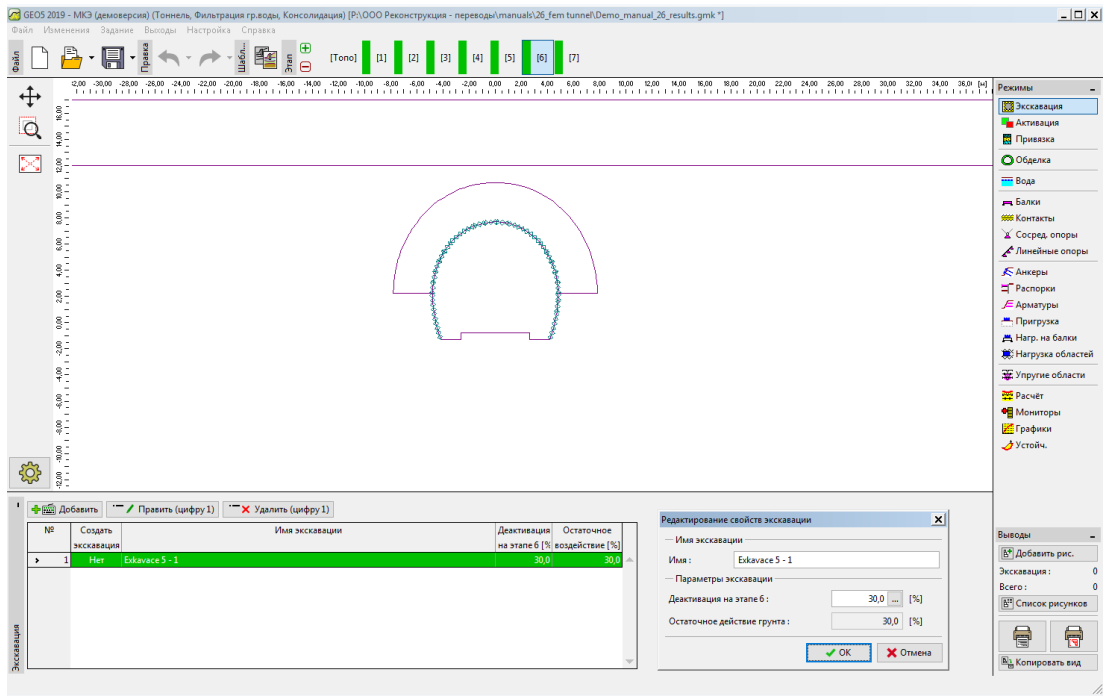
The screenshot shows the GEOS 2019 software interface. The main window displays a cross-section of a tunnel with reinforcement bars (beams) numbered 1 through 9. The interface includes a menu bar, a toolbar, and a right-hand panel with various tool icons. Below the main window is a table with the following data:

№	Балка		Расположение	Посадка [м]		Учитывать собственный вес	Сечение / Дegrадация на текущем этапе [%]	Материал / Текущее воздействие балки [%]	Контакты	
	новая	изменен.		Начало	Конец				слева	справа
1	Нет	Нет	Свободная линия №1	○	—	✓	без изменений	без изменений	(не задан)	Mohr-Coulomb
2	Нет	Нет	Свободная линия №2	—	—	✓	без изменений	без изменений	(не задан)	Mohr-Coulomb
3	Нет	Нет	Свободная линия №4	—	○	✓	без изменений	без изменений	(не задан)	Mohr-Coulomb
4	Да		Свободная линия №6	○	—	✓	1,00 (b) x 0,20 (h) м	C 20/25; E = 2900,00 МПа; G = 113	Mohr-Coulomb	(не задан)
5	Да		Свободная линия №9	—	○	✓	1,00 (b) x 0,20 (h) м	C 20/25; E = 2900,00 МПа; G = 113	Mohr-Coulomb	(не задан)

### Ввод первичной обделки лотка тоннеля с помощью новых балок – Этап проектирования 6 (невыдержанный бетон)

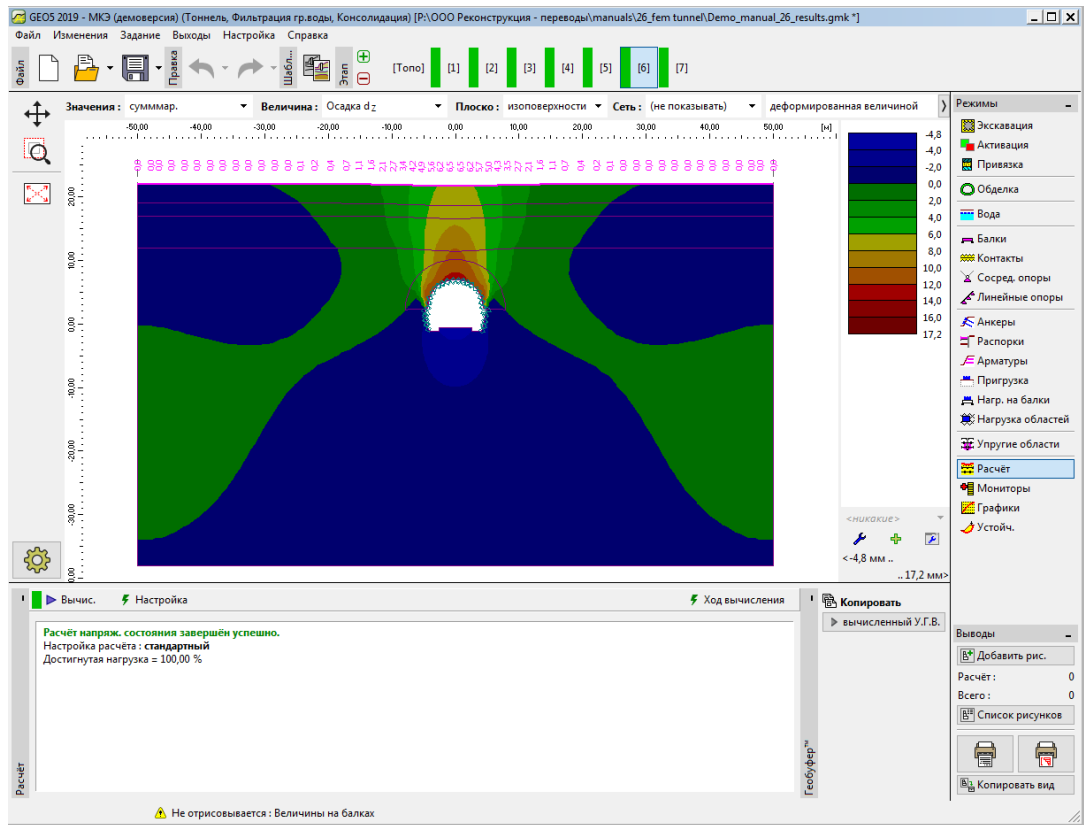
*Примечание: балки снова рассматриваются как опоры на обоих концах; контакт между обделкой кровли и лотка не может передавать изгибающие моменты (так как это не случай непрерывных стыков). Размеры поперечного сечения лотка идентичны размерам кровли, то есть  $b = 1,0$  м,  $h = 0,2$  м. Однако контакты на новых балках задаются с противоположной стороны (более подробная информация представлена на рисунке), так как ориентация балок (стенок лотка) отрицательная.*

На этом этапе активируются дополнительные 30% нагрузки от скального массива.



Диалоговое окно «Редактировать свойства экскавации» - Эта проектирования 6

В конце данного этапа проектирования выполняется расчет.



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 6 (вертикальные перемещения  $d_z$  и муфта оседания)



## Этап проектирования 7: улучшение свойств материала выдержанного бетона (лоток)

На последнем этапе проектирования улучшаются свойства материала уже выдержанного бетона, поддерживающего стенки выработки.

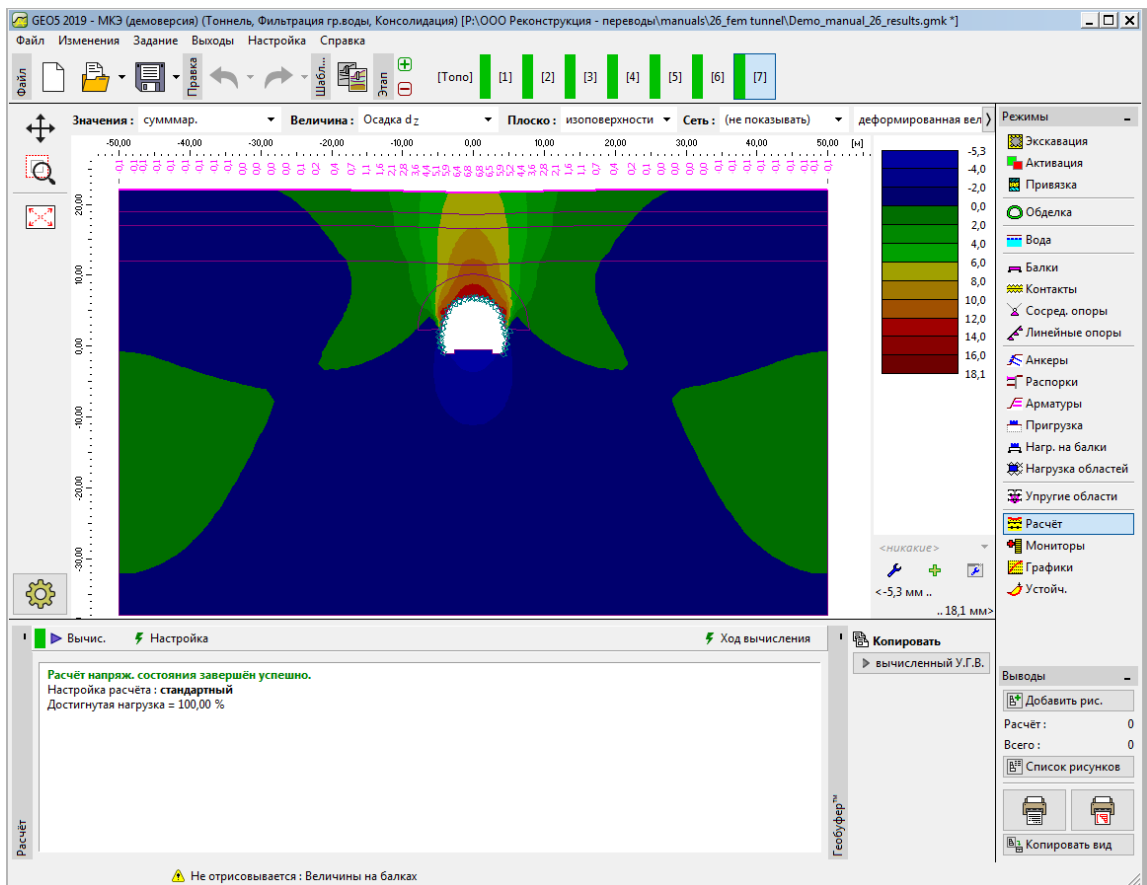
№	Балка		Расположение	Посадка [м]		Учитывать собственный вес	Сечение / Деграация на текущем этапе [%]	Материал / Текущее воздействие балки [%]	Контакты	
	новая	изменен.		Начало	Конец				слева	справа
1	Нет	Нет	Свободная линия №1	○	—	✓	без изменений	без изменений	(не задан)	Mohr-Coulomb
2	Нет	Нет	Свободная линия №2	—	—	✓	без изменений	без изменений	(не задан)	Mohr-Coulomb
3	Нет	Нет	Свободная линия №4	—	—	✓	без изменений	без изменений	(не задан)	Mohr-Coulomb
4	Нет	Да	Свободная линия №6	○	—	✓	↑ h = 0,20 м	↑ E = 29000,00 МПа; G = 11340,00	Mohr-Coulomb	(не задан)
5	Нет	Да	Свободная линия №9	—	○	✓	↑ h = 0,20 м	↑ E = 29000,00 МПа; G = 11340,00	Mohr-Coulomb	(не задан)

### Изменение свойств первичной обделки (лоток тоннеля) – Этап проектирования 7 (выдержанный торкрет-бетон)

Порядок увеличения несущей способности балок та же, что на этапе проектирования 4. Следует активировать оставшиеся 30% нагрузки от скального массива. На этом этапе мы удаляем все грунты из выработки, и вся нагрузка действует на первичную обделку (включая кровлю и стенки лотка) на 100%.

№	Создать экскавацию	Имя экскавации	Деграация на этапе 7 [%] воздействия	Остаточное действие грунта
1	Нет	Excavace 5 - 1	30,0	0,0

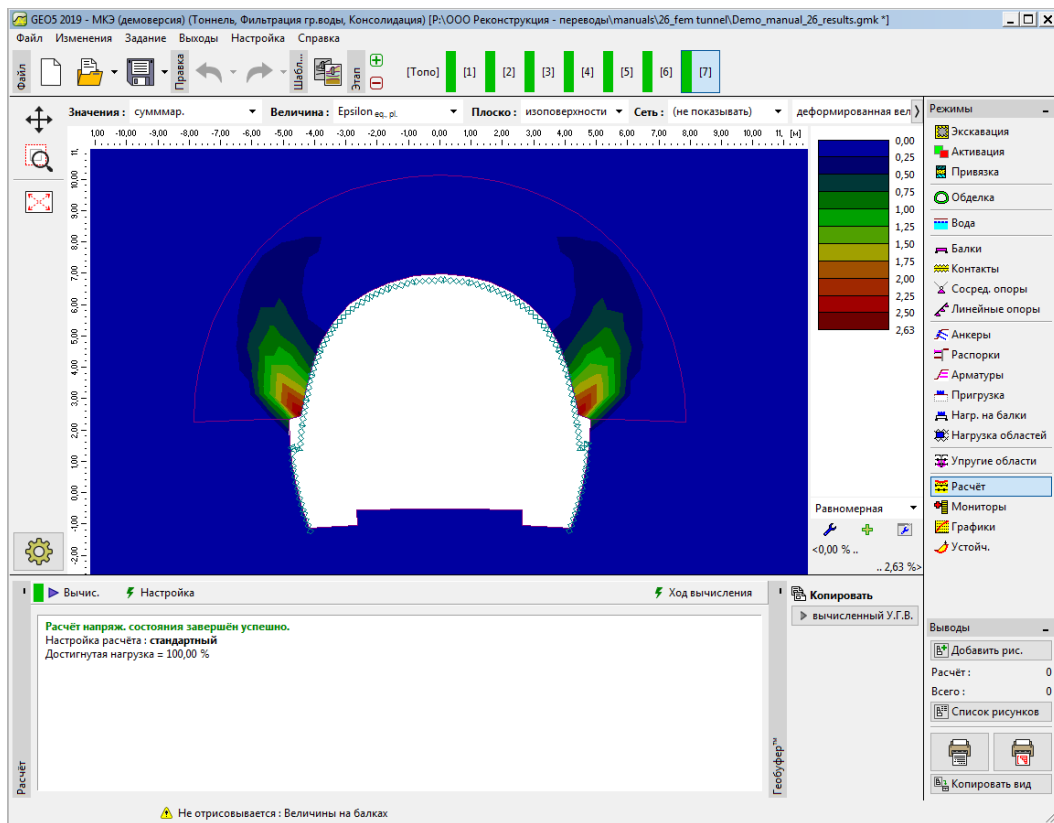
### Диалоговое окно «Редактировать свойства экскавации» - Эта проектирования 7



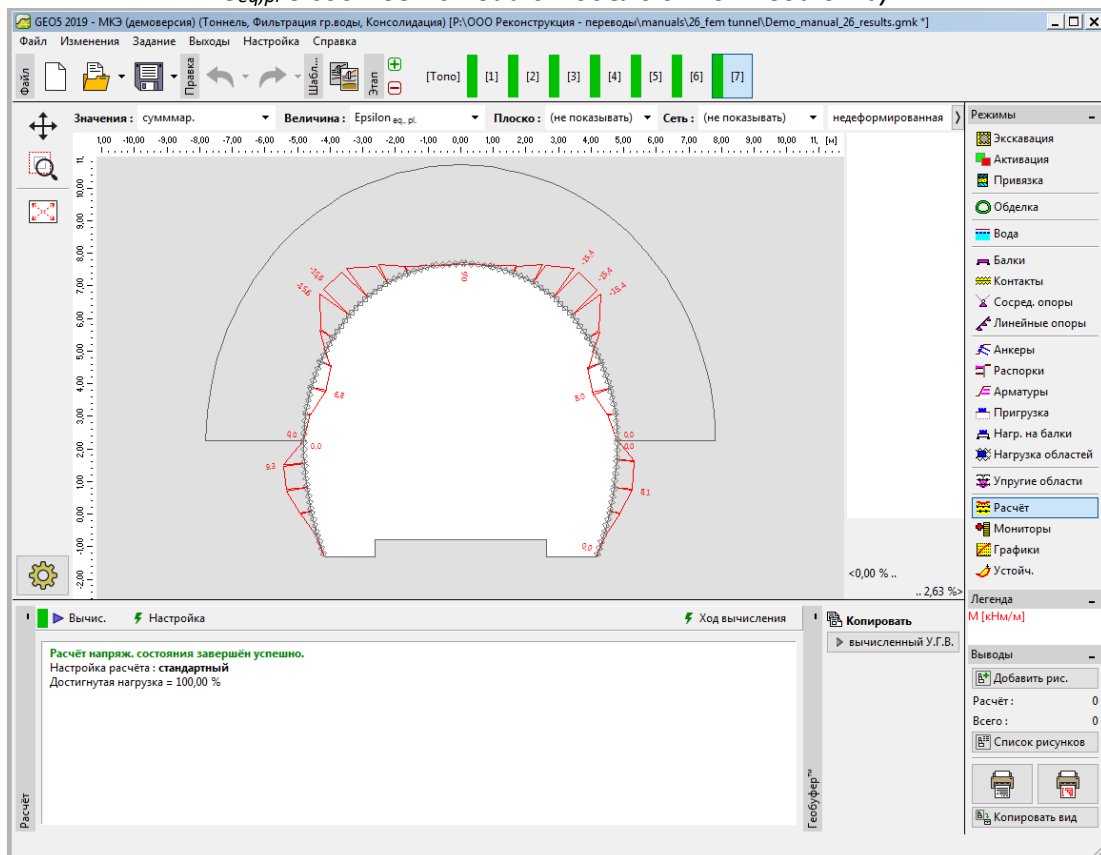
Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 7 (вертикальные перемещения  $d_z$  и мутьда оседания)

Далее на следующем этапе можно просмотреть эквивалентные пластические деформации  $\epsilon_{eq,pl}$  и распределение внутренних усилий – изгибающих моментов и нормальных сил (кнопка «Показать», вкладка «Распределение»). Результаты вносятся в сводную таблицу.

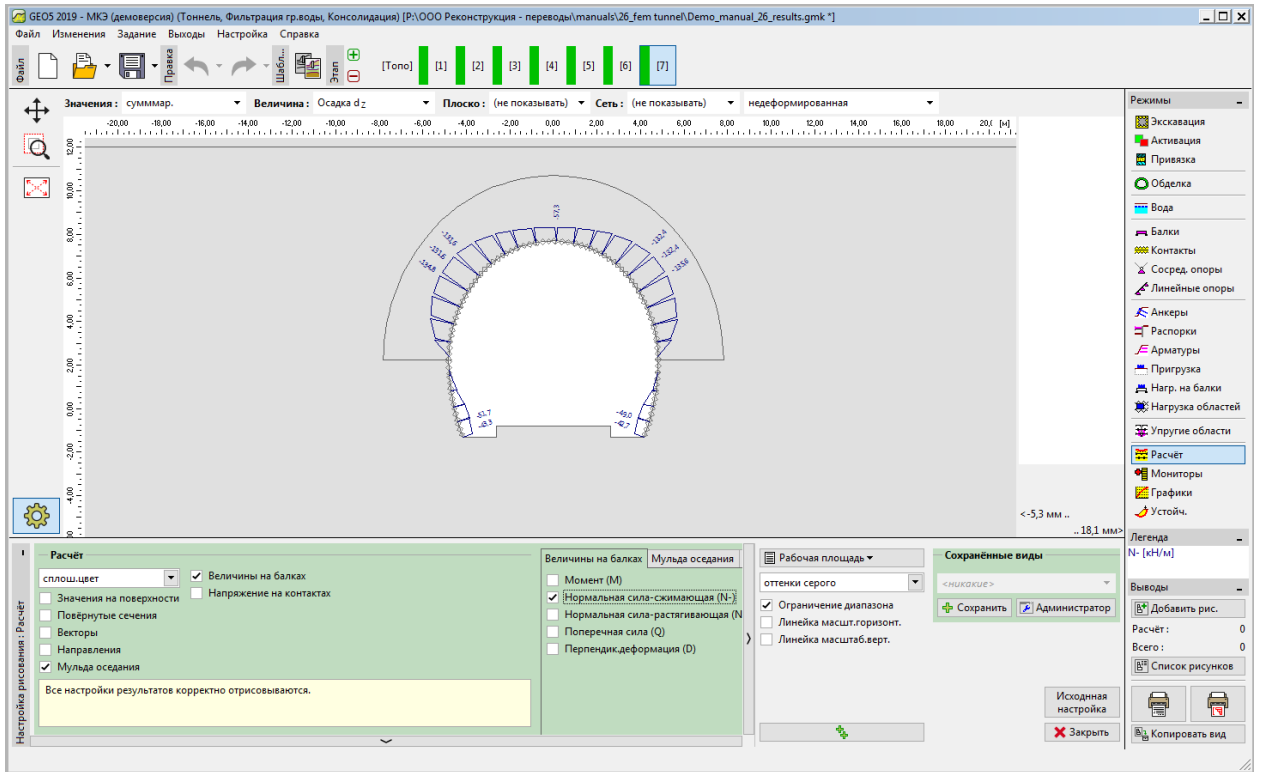
Из представленного рисунка следует, что эквивалентные пластические деформации  $\epsilon_{eq,pl}$  не равны нулю, что соответствует работе сооружения по нелинейной модели материала (Mohr-Coulomb).



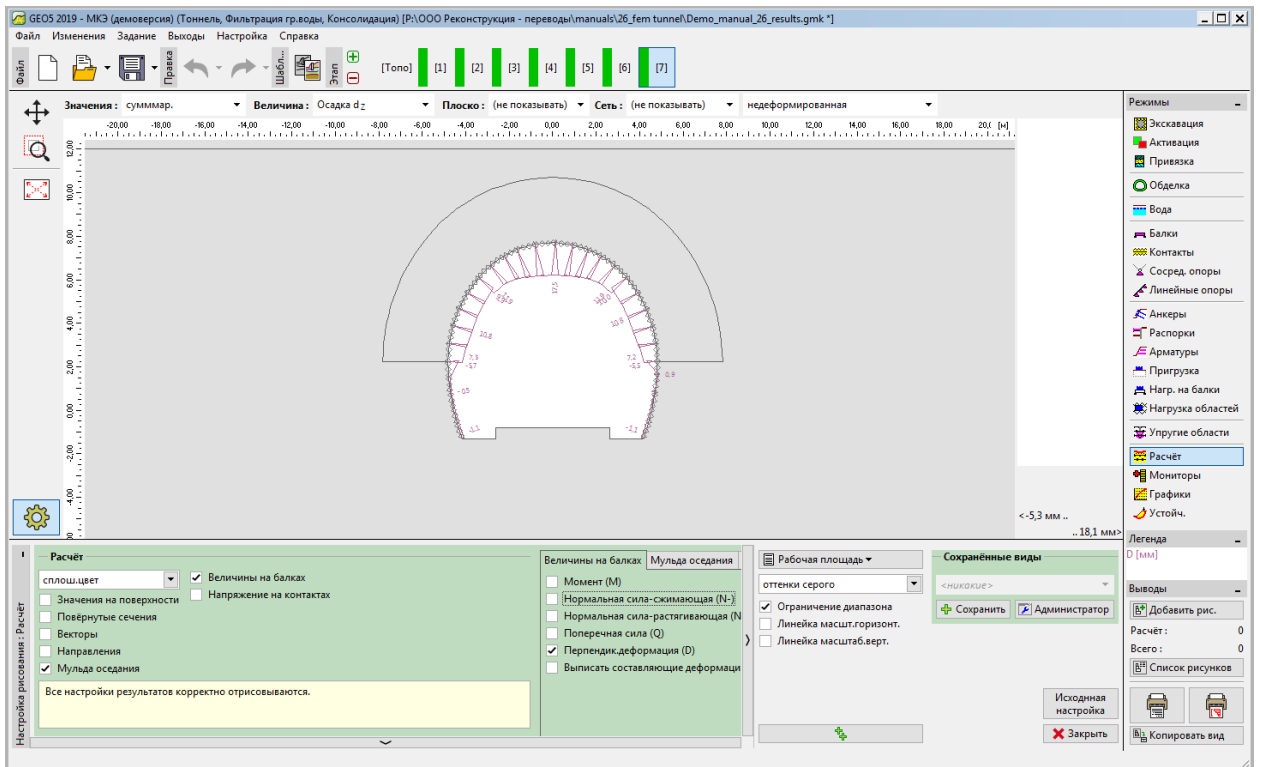
Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 7 (эквивалентные пластические деформации  $\epsilon_{eq,pl}$  в соответствии с моделью Mohr-Coulomb)



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 7 (изгибающий момент  $M$  [кНм/м])



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 7 (нормальная сжимающая сила N [кН/м])



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 7 (поперечная деформация)

## Анализ результатов

В следующей таблице представлены максимальные значения внутренних усилий (изгибающих моментов, поперечных и продольных сил), действующих в балках (первичной обделке тоннеля) на этапе проектирования 7. Расчет выполнялся с использованием пластической модели материала Mohr-Coulomb с местным увеличением плотности треугольных элементов.

Модель материала	Этап проектирования 7 - внутренние усилия		
	$N$ [кН/м]	$M$ [кНм/м]	$Q$ [кН/м]
Mohr-Coulomb	- 701,3	- 11,3	- 13,8
	- 124,8	+ 3,3	+ 9,8

*Максимальные значения внутренних усилий в первичной обделке - Этап проектирования 7*

В следующей таблице представлены значения вертикальных и горизонтальных перемещений  $d_z$ ,  $d_x$  [мм] первичной обделки тоннеля на каждом этапе проектирования.

Этап проектирования	Величина абсолютных перемещений $d_z$ , $d_x$ [мм]			
	$d_{z,min}$	$d_{z,max}$	$d_{x,min}$	$d_{x,max}$
1	-	-	-	-
2	-1,4	+16,4	-4,9	+4,9
3	-2,3	+20,7	-6,2	+6,2
4	-3,2	+22,7	-6,7	+6,8
5	-3,0	+23,3	-6,9	+7,0
6	-3,5	+23,4	-7,0	+7,1
7	-4,0	+23,4	-7,0	+7,1

*Величины перемещений  $d_z$ ,  $d_x$  первичной обделки (максимумы) - Все этапы проектирования*

## Заклучение

В данной задаче было представлено моделирование первичной обделки реального тоннеля с использованием метода конечных элементов. Тоннель выполнен Ново-Австрийским методом. Проходка тоннеля разделена на отдельные этапы. При разработке скального грунта, массив теряет опору и деформируется, при этом перемещения направлены внутрь выработки.

Первичная обделка армирована сеткой KARI (армирующей сеткой, сваренной из стальных стержней диаметром 8 мм с размером ячейки 150x150 мм) и стальными решетчатыми прогонами из 3 несущих стержней. Учет сетки KARI в численной модели МКЭ (гомогенизация бетона и армирования) является спорным вопросом; чаще всего сетка учитывается только после отдельного расчета обделки.

Первичная обделка тоннеля будет далее рассчитываться с использованием программного обеспечения для расчетов конструкций (например, FIN EC - CONCRETE 2D) на основании полученных максимальных значений внутренних усилий, возникающих вследствие совместного воздействия изгибающего момента и продольной силы (в соответствии с эпюрой).

*Примечание: расчет подземного сооружения без использования балочных и контактных элементов с использованием линейной модели материала (с упругим поведением) был описан в Главе 23. Расчет обделки коллектора (см. <http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/>).*

*Примечание: данный пример (Demo\_manual\_26.gmk) можно скачать по [ссылке](#).*