### Численное моделирование проходки тоннеля Ново-Австрийским методом

Программа: МКЭ Файл: Demo\_manual\_26.gmk

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

### Описание задачи

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



Сечение однопутного железнодорожного тоннеля 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 с уступом*, 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.

Разновидность грунта	Мощность слоя [м]	ү [кН/м³]	ф <sub>еf</sub> [°]	<i>с<sub>еf</sub></i> [кПа]	v [-]	<i>Е<sub>def</sub></i> [МПа]	<i>Е</i> [МПа]	<i>E<sub>ur</sub></i> [МПа]	K <sub>0</sub> [-]	γ <sub>sat</sub> [κH/m³]
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 сильновыветрел ый (R5)	5 – 19,75	20	29	39	0,33	45	45	135	0,5	20
Сланец слабовыветрелы й (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

Таблица 1 – Параметры дисперсных и скальных грунтов

### 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 моделирования 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 модель, поведение которой, получена численная 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 К<sub>0</sub> 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.

— Размеры —		
Минимальное значение Х :	-50,00	[м]
Максимальное значение Х :	50,00	[м]
Глуб.от сам.ниж.гранич.точки слоя :	50,00	[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).

Гран	ица 1	Граница 2		Граница З		Граница 4	
х [м]	z [M]	<i>х</i> [м]	z [M]	х [м]	z [M]	<i>х</i> [м]	z [M]
-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 грунтов 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:

$$C_{h+s} = C_h + C_s [\kappa \Pi a]$$

где: с<sub>h+s</sub> общее сцепление скального грунта, увеличенное с помощью анкеров;

*c*<sub>h</sub> исходное сцепление скального грунта;

*c*<sub>h</sub> увеличение сцепления за счет работы анкеров.

Увеличение сцепления за счет работы анкеров рассчитывается по следующей зависимости:

$$c_{s} = \frac{N_{u}}{A_{k}} \cdot \frac{1 + \sin \varphi_{ef}}{2 \cdot \cos \varphi_{ef}} \cdot \frac{1}{\gamma_{kc}} = \frac{120}{2,058} \cdot \frac{1 + \sin 29^{\circ}}{2 \cdot \cos 29^{\circ}} \cdot \frac{1}{1,5} = 33,0 \,\kappa \Pi a$$

где: N<sub>u</sub> несущая способность анкера [кН];

*А<sub>k</sub>* область, включенная в работу одним анкером [*м*<sup>2</sup>];

*φ*<sub>ef</sub> угол внутреннего трения скального грунта [°];

*ү*<sub>kc</sub> 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:

$$c_{h+s} = c_h + c_s = 30 + 33 = 63 [\kappa \Pi a].$$

Модуль упругости *E* [МПа] не определялся непосредственно в ходе геологических изысканий. В связи с этим его величина определена на основании модуля деформации *E*<sub>def</sub> [МПа] с использованием общей зависимости *E* = *E*<sub>def</sub>. Модуль нагрузки по вторичной ветви нагружении равняется *E*<sub>ur</sub> = 3*E*.

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

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

Редактировать параметры грунтов							×
— Распознавание		— — Идеально упруго-пластическая модель М	ора-Кулона	~ ?	— Параметры начального напряжен	ного состояния — ?	— Показать ———
Наименование грунта :	Silty sand (S4 / SM)	Модуль упругости :	E = 10,00 [MITa]		Определение K <sub>0</sub> <sup>NC</sup> :	ввод 💌	Категория
		Модуль деформации по вторичной ветви нагружения :	E <sub>ur</sub> = 30,00 [MΠa]		Коэффициент давления грунта в покое : К <sub>О</sub> NC =	0,500 [-]	GEO
— Модель грунта	?	Модуль :	постоянный 💌		Переуплотнение :	не учитывать 💌	Поиск :
Тип модели грунта :	Стандартная идеально упруго-пластическая модель 💌	Угол внутреннего трения :	φ <sub>ef</sub> = 29,00 [*]				Подкате
Модель грунта :	Мар-Кулон 👻	Сцепление:	c <sub>ef</sub> = 10,00 [xHa]				Грунты (1 - 16)
— Исходные данные —	?	Угол дилатансии :	ψ = 0,00 [*]				Штрих
Удельный вес : ү	= 19,00 [KH/m <sup>3</sup> ]	Отсечка дилатансии :	нет 💌				1111111
коэффициент Пуассона : v	= 0,30 [-]	Ограничения по растяжению :	не учитывать 💌				1111111
Начальное число пористости : е <sub>іл</sub>	= 1,000 [-]						10 0 0000 0000
Тип грунта :	дренированный 👻						Userway
— Взвешивающее давление ———	?						Liser mip
Взвешивающая сила :	обычный 💌						
Удельный вес водонасыщенного грунта : <sub>Узат</sub>	= 19,00 [stH/ss <sup>3</sup> ]						автоматический
							Насыщенность <10 - 90> :
Опременить Сонистить классификацию						0K + 1	
Очистить классификацию						UK * V	V OK

Диалоговое окно "Добавление новых грунтов"

🔁 GEOS 2019 - МКЭ (демоверсия) (Тоннель, Фильтрация гр.воды, Консолидация, Землетрясение) [Непоименованный.gmk *]	_ 🗆 ×
Quân     Изменения     Задание     Виходан     Настройка     Справка       Ig     Image: Second Se	
30,00 -50,00 -40,00 -30,00 -20,00 -10,00 0,00 10,00 20,00 30,00 40,00 5	0,00 [H] Режимы _
	Проект Ф Настройка
	🛃 Гран.контура
B	Грунты
	Привязка
	🗰 Типы контактов
	Обделка
8-	🔆 Своб.точки
	Своб.линии
82	Стущение линий
	Свободные сгущения
	🖾 Генерирование сетки
	<u> </u>
Добавить левой кнопкой : Закрепленная область	опировать Выводы _
Область Присвоенный грунт	В* Добавить рис.
1 Пылеватый песок S4/SM • 2222	Грунты и привязка : 0
	Всего: 0
А Сланец слабовыветрелый (R3)	
алка Афер	
	🗟 Копировать вид

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<sub>s</sub>* = 16 925 кН/м<sup>3</sup>
- жесткость при нормальном сжатии:
- $K_n = 45\ 000\ \text{KH/m}^3$  $\delta c = \delta \mu = 1.0.$
- снижение параметров грунта:

Редактир.свойств типа контакта					
Имя:		Rock-Lining			
Модель грунта :		Mohr-Coulomb 🔻			
Сдвиговая жёсткость :	K <sub>s</sub> =	16920,00 [кН/м <sup>3</sup> ]			
Нормальная жесткость :	K <sub>n</sub> =	45000,00 [кН/м <sup>3</sup> ]			
Способ ввода параметро	ов:	задать редукцией грунтов 🔻			
Редукция № :	δc =	1,00 [-]			
Редукция µ:	δμ =	1,00 [-]			
Угол дилатансии :	ψ=	0,00 [°]			
Сопротивление разрыву	: R <sub>t</sub> =	0,000 [кПа]			
		✓ ОК Хотменить			

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 невыветрелых 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. <u>http://www.finesoftware.eu/enqineering-manuals/</u>). 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.

Номер	Положение	Положение
ТОЧКИ	× [m]	y [m]
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

Таблица 2 – Свободные точки выработки (первичная обделка)



Диалоговое окно «Свободные точки»

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

Номер	Тип Способ		Топология линии
линии	линии	ввода	
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

Таблица 3 – Свободные линии выработки (первичная обделка)

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).

Номер точки	Положение <i>x</i> [м]	Положение <i>у</i> [м]
11	7,81	2,25
12	5,71	8,04
13	-5,71	8,04
14	-7.81	2,25

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

Габлица 5 — Свободные линии вокруг области, закрепленной гидрораспорными
трубчатыми анкерами

Номер	Тип	Способ	Топология линии
линии	линии	ввода	
			Начало – точка 14, конец – точка 13,
11	дуга	радиус	радиус — 9,0 м, ориентация
			отрицательная, угол — острый
			Начало – точка 13, конец – точка 12,
12	дуга	радиус	радиус – 7,45 м, ориентация
			отрицательная, угол – острый
			Начало – точка 12, конец – точка 11,
13	дуга	радиус	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 / = 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 увеличение плотности вокруг свободных точек и линий подробно описан в Главе 23. Расчет обделки коллектора (более подробная информация - <u>http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/</u>).



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).

Выдержка торкрет-бетона	<b>Модуль упругости</b> <i>E<sub>cm</sub> [МПа]</i>	<b>Модуль сдвига</b> <i>G</i> [МПа]
Невыдержанный бетон	2 900	1 134
Выдержанный бетон	29 000	11 340

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

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  $\beta$ ), 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  $(1 - \beta) \cdot \sigma_0$  (для начального напряженного состояния  $\beta = 1$ ). Если моделируется изменение начального напряженного состояния  $\beta = 1$ ). Если моделируется изменение начального напряженного выработка нагружается величиной  $(1 - \beta) \cdot \sigma_0$  на начальном этапе, а оставшаяся часть нагрузки  $\beta \cdot \sigma_0$  учитывается во втором этапе.

В случае последовательной выработки, этот процесс будет применяться последовательно к каждому отдельному этапу. Величина коэффициента в 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 «Экскавацией». Для целей численного моделирование величина коэффициента в 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 о<sub>z,ef</sub>)

# 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 просмотреть результаты для вертикальных перемещений *d*<sub>z</sub> [мм]. Для лучшего понимая работы выработки можно просмотреть деформированную сетку и мульду оседания.



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 2 (вертикальные перемещения d₂ 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.

Релактир. свойств балки	×	Редактор материада - Бетон
-	^	
Попология Имя		- Описание материала
Расположение : свободная линия  ИМЯ :		Название: С 20/25
Свободная линия: Свободная линия № 4 - Посадка		— Характеристики материала
Параметры Начало :		Основные характеристики материалов
✓ Учесть собственный вес Конец: С	→ Величина: соответ.сечению ▼ 0,20 [M]	Модуль упругости E <sub>cm</sub> = 2900,00 МПа
— Сечение и материал		Модуль упругости при сдвиге G = 1134,00 MI Ia Коеффициент теплового растяжения g = 0.000010 1/К
Тип сечения прямоугольная стена 🗸 🗸	Тип материала : бетон 💌	Удельный вес
Высота сечения : h = 0,20 [м]	Имя : С 20/25	Специальные характеристики материалов
Ширина сечения : b = 1,00 [м]	Каталог Пользователь	Цилинд. прочность на сжатие f <sub>ck</sub> = 20,00 МПа
		Прочность на растяжение f <sub>ctm</sub> = 2,20 МПа
		Пересчитывать значения
I <sub>v</sub> = 6,67E-04 м <sup>4</sup> /м; A = 2,00E-01 м <sup>2</sup> /	м; E = 2900,00 МПа; G = 1134,00 МПа	Класс цемента: О S O N O R
— Контакты		🗸 ОК 🗙 Отмена
Учесть контакт слева	🗸 Учесть контакт справа	
	Тип контакта : Rock-Lining 🔹	
	ОК + +	
GEOS 2025 - МКЭ (Тоннель, Фильтрация, Консолидация, Землетрясение) (64 bit) [\\192.168.10.20\commo Файл Правка Задание Выходы Настройка Справка	on\GEO 5\Горшков\2025 год\3. Март\мануалы перевод\EN\26_fem tunnel\2025\Demo_manual_26_EN.gmk "	1 _ 6 X
§ [``] 📇 • [□] • [] • [] • · · · · · ] [Iono]	[1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]	
	-2,00 -2,00 -1,00 0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00	вро 8,00 Юдо 10,00 12,00 13,00 Идо 15,00 Юдо 17,00 (н) Реконлы _
₩ <sup>4</sup>		Экскавация
		🖷 Активация
	2	Вода
	10000000000000000000000000000000000000	ин, Балки 1006 Контакты
8		¥ Сосредоточенные опоры 4 Личейные алоры
		истиненные опоры К Анкеры
		∬ Harenu The December of the State of the S
3-	\$\\.	
s- 3		Пригрузка Д Нагрузка на балки
	₹.	Ж Нагрузка областей
	\$1	Упругие области
s-	¥	• Мониторы
		И рафики
90 <sup>-</sup>		
89		
342 S-		
242		Выкоды 🗕
Н     П	★ Удалить (цифру 3)	(§ <sup>4</sup> )Добавить рис.
новая изменен. Начало Конец	2-читывать Сечение / Материал / собственный вес Деградация на текущем этапе [%] Текущее воздействие балки [%]	Cnesa cnpasa Bcero: 0
1 Да Свободная линня № 1 Ю— 0,20 — 2 Да Свободная линня № 2 — 0,20 —	Ц 1,00 (b) x 0,20 (h) м С 20/25; E = 2900,00 МПа; G = 1134, С (не задан     П,00 (b) x 0,20 (h) м С 20/25; E = 2900,00 МПа; G = 1134, С (не задан     С 20/25; E = 2900,00 МПа; G = 1134, С (не задан	B Rock-Lining
3 Да Свободная линия № 4 н— Ко—	0,20	) Rock-Lining 🖽 Список приложений
8		
2 Page		Вд Копировать вид

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

Примечание: мы рассматриваем концы балок как <u>опоры</u> 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).

🖻 GEOS 2019 - МКЭ (демоверсия) (Тоннель, Фильтрация гр.воды, Консолидация, Землетрясение) [Непоименованный.gmk "] 💷 💌									
Файл Изменения Задание Выходы Настройка Справка									
-70,00 -80,00 -40,00 -30,00 -20,00 -10,00 0,00 10,00 20,00 30,00 40,00 9	жо,оо [м]	Режимы _							
		🗱 Экскавация							
		Активация							
		Привязка							
		Ооделка							
		Вода							
		💻 Балки							
		Контакты							
		🖍 Линейные опоры							
		🗲 Анкеры							
		<b>Ц</b> Распорки							
		🔎 Арматуры							
		Пригрузка							
		📇 Нагр. на балки							
		Графики							
	<b>-</b>	🥑 Устойч.							
	В Копировать								
[5] Взять	▶ привязка	Выводы _							
Привяжа измен.против предыд-этапа		🕒 Добавить рис.							
Область Присвоенный грунт		Грунты и привязка: 0							
		ВП Список рисунков							
g 4 Сланец слабовыятрелый (R3) -									
33 Закрепленная область ▼		Ва Копировать вид							
C 2									
		11.							

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 d₂ 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.

Топология Расположение: свободная линия ▼ Свободная линия : Свободная линия N ▼ Параметры ✓ Учесть собств. вес Сечение и материал Параметры балки на этапе задания 3 прямоугольная стена 1,00 (b) x 0,20 (h) м числовое задание E = 2900,00 мГlа; G = 1134,00 мГlа; α. = 1,000000 1/K; γ = 25,00 кH/м <sup>3</sup> Параметры балки на предыдущем этапе 3	адка ю: — т ц: О— т Тип изменения: усиление Высота сечения:	
2асположение: свободная линия ▼ Имя: Свободная линия: Свободная линия № Посс Параметры ✓ Учесть собств. вес Сечение и материал Параметры Балки на этапе задания 3 прямоугольная стена 1,00 (b) x 0,20 (h) м числовое задание E = 2900,00 MПа; G = 1134,00 MПа; α. = 1,000000 1/K; γ = 25,00 кH/и <sup>3</sup> Параметры Балки на предыдущем этапе 3	адка ю: — — — — — — — — — — — — — — — — — — —	
Свободная линия : Свободная линия № Параметры ✓ Учесть собств. вес Сечение и материал Параметры балки на этапе задания 3 прямоугольная стена 1,00 (b) x 0,20 (h) м числовое задание E = 2900,00 МПа; G = 1134,00 МПа; α. = 1,000000 1/K; γ = 25,00 кH/и <sup>3</sup> Параметры балки на предыдущем этапе 3	адка 10 : — — — — — — — — — — — — — — — — — —	
Параметры Начал 2 Учесть собств. вес Конец Сечение и материал Параметры балки на этапе задания 3 прямоугольная стена 1,00 (b) x 0,20 (h) м числовое задание E = 2900,00 MГla; G = 1134,00 MГla; α = 1,000000 1/K; γ = 25,00 kH/м <sup>3</sup> Параметры балки на предыдущем этапе 3	ю: — — — — — — — — — — — — — — — — — — —	
Учесть собств. вес         Конец           Сечение и материал         Параметры балки на этапе задания 3         прямоугольная стена 1,00 (b) x 0,20 (h) м           числовое задание Е = 2900,00 мПа; G = 1134,00 МПа; α = 1,000000 1/K; γ = 25,00 кH/м3         Параметры балки на предыдущем этапе 3	а:	
Сечение и материал Параметры балки на этапе задания 3 прямоугольная стена 1,00 (b) x 0,20 (h) м числовое задание E = 2900,00 МПа; G = 1134,00 МПа; α = 1,00000 1/K; γ = 25,00 кH/м3 Параметры балки на предыдущем этапе 3	Тип изменения : усиление Высота сечения :	
Параметры балки на этапе задания 3 прямоугольная стена 1,00 (b) x0,20 (h) м числовое задание E = 2900,00 МГПа; G = 1134,00 МГПа; α = 1,000000 1/К; γ = 25,00 кН/м3 Параметры балки на предыдущем этапе 3	Тип изменения : усиление Высота сечения :	
прямоугольная стена 1,00 (b) × 0,20 (h) м числовое задание E = 2900,00 MПа; G = 1134,00 МПа; α = 1,000000 1/К; γ = 25,00 кН/м <sup>3</sup> Параметры балки на предыдущем этапе 3	Высота сечения :	
1,000000 1/К; ү = 25,00 кН/м <sup>3</sup> Параметры балки на предыдущем этапе 3		h = 0,20 [м]
параметры балки на предыдущем этапе э		
h = 0,20 м	Manual concerns	E - 20000.00 [MITa]
E = 2900,00 МПа G = 1134.00 МПа	модуль упругости :	
	Модуль упругости при сдвиге :	G = 11340,00 [МПа]
I <sub>y</sub> = 6,67Е-04 м <sup>4</sup> /м; A = 2,00Е-01	1 м <sup>2</sup> /м; E = 29000,00 МПа; G = 11340,0	00 MПa
Контакты		
Изменение параметров		
Учесть контакт слева	Учесть контакт справа	
I <sub>y</sub> = 6,67E-04 м <sup>4</sup> /м; A = 2,00E-01 Контакты Изменение параметров У Учесть контакт слева	1 м <sup>2</sup> /м; E = 29000,00 МПа; G = 11340,0	00 MПa

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

								Z)				
GEO!	5 2019 -	МКЭ (дел	юверсия) і	(Тоннель, Фильтрация г	воды, Консолидация,	Землетрясение) [Нег	тоименованный.gi	mk *]				_ 🗆 🗙
Файл	Измени	ния За	дание Вь	ыходы Настройка Сп	равка							
Φaŭn	1	- I	Paska	т Паби		o] [1] [2]	[3] [4]					
±.	-	D	-70,00	-60,00 -50,00	-40,00 -3	0,00 -20,00	-10,00	0,00 10,00 20,00	30,00 40,00	50,00 60,0	) 70,00 8 [H]	Режимы _
Q	c 0 00											🔛 Экскавация 📲 Активация 🔜 Привязка
$\sim$	8 :											О Обделка
	1											вода
	8-						/					🚗 Балки
	18							and the second s				🗰 Контакты
	1			ID			( 18					🔏 Сосред, опоры
	8.						- f	<u> </u>				🖌 Линейные опоры
	° .			15				/		L.		🗲 Анкеры
	1.1									21		🚽 Распорки
				ID								🔎 Арматуры
	001			ID								— Пригрузка
	1			ID						-11		📇 Нагр. на балки
	1.1			12						4		🗮 Нагрузка областей
	20,00											🐺 Упругие области
	11											Расчёт
	- 3											• Мониторы
	8			ID								📶 Графики
502	?:			12						4		🤙 Устойч.
25	1											
• +	🔗 До	іавить гр	афически	🕂 📰 Добавить текст	ом							
	Nº	Ба	лка	Расположение	Посад	ка [м]	Учитывать	Сечение /	Материал /		Онтакты	Выводы _
		новая	изменен.		Начало	Конец	собственный вес	Деградация на текущем этапе [%]	Текущее воздействие балки [%]	слева	справа	Добавить рис.
>	1	Нет	Да	Свободная линия № 3	H -	$\sim$	1	↑ h = 0,20 м	↑ E = 29000,00 MПa; G = 11340,00	Mohr-Coulomb	(не задан) 🔺	Балки: 0
	2	Нет	Да	Свободная линия № 2	H	<b>⊢</b>	~	↑ h = 0,20 м	↑ E = 29000,00 MПa; G = 11340,00	Mohr-Coulomb	(не задан)	Bcero: 0
_	3	Нет	Да	Свободная линия №1	0-	H	1	⊤h = 0,20 м	TE = 29000,00 M∏a; G = 11340,00	Mohr-Coulomb	(не задан)	В. Список рисунков
ā											Ψ	
Eav	_	4									•	Копировать вид
												1.

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.

⁄ GEO5 2	2019 - МКЭ (де	моверсия) (Тоннель, Фильтраци	а гр.воды, Консолид	ция, Землетря	сение) [Непоим	менованный.	gmk *]									<u>_ 🗆 🗙</u>
Файл V	ізменения За	адание Выходы Настройка	Справка													
Файл	🖹 - 🖡	<b>.</b>		[Топо] [1]	[2] [3]	[4]										
<u>ئ</u> ل	30	-70,00 -60,00 -50,	00 -40,00	-30,00	-20,00	-10,00	0,00 10	.00 20,00	30,00	40,00	50,00 (	60,00 . I	70,00	8 [н] 	Режимы	-
Ŧ	° :														🔀 Экска	ация
O	°.	1									1				Актив	ция
	000														🛃 Привя	зка
23	8	IÞ													Обдел	ка
	1.1	I⊳									di 🛛				😶 Вода	
	000										1				💻 Балки	
		IÞ					PS/MARGa								🗯 Конта	сты
	1.1	I⊳					` <b>`</b> }				dI 🛛				Cocpe	д. опоры
	0.0	ID													Линеи	ные опоры
						_									ᄎ Анкер	ы
	1.1															уры Уры
	10.00														📇 Пригр	узка
															📇 Harp.	на балки
															🗮 Harpy	зка областей
	50°00 - 1-														筆 Упруг	ие области
		IÞ													Расчё	r
		I⊳									di 🛛				• Мони	горы
-	30,00	ID													🗾 Графи	ки
र्ेर	÷														🥒 Устой	4.
' <b>+</b> E	🗄 Добавить	- / Править (цифру 1)	🗙 Удалить (цифру 1	)					Редактирован	ние свойств экскавац	ции		×		Выволы	
N	<sup>12</sup> Создат	гь	Имя экскава	ции		۲.	еактивация Ост	аточное	— Имя экска	вации					В+ Лобав	-
-	3KCKaBaL	ция				н	а этапе 4 [% возде 20.0	йствие [%]	Имя:	Экскавация 2 -	1				Экскаваци	я: 0
Ľ,	1 Hel	экскавация 2 * 1					50,0	0,0	— Параметр	ы экскавации					Bcero :	0
									Деактиваци	я на этапе 4 :	30,0		[%]		В Списо	к рисунков
вация									Остаточное	е действие грунта :		0,	),0 [%]			
Экска								-			🗸 ОК	)	🕻 Отмена		🖹 Копир	овать вид

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 М [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%.

裙 GE	05 2019 -	МКЭ (демоверсия) (Тоннель, Фил	ьтрация гр.воды, Консолидация)	[Р:\ООО Реконструкция - перево,	цы\manuals\26_fem tunnel\Demo_ma	nual_26_results.gmk *]		<u>_ 🗆 ×</u>
Файл	Измен	ения Задание Выходы Настр	ойка Справка					
Файл		<mark>}</mark> • 🔚 • 🚪 🖘 • 🦟		o] [1] [2] [3] [4]	[5] [6] [7]			
1		6,00 -24,00 -22,00 -20,00 -18,01 	0 -16,00 -14,00 -12,00 -10,00 -   -   -   -   -   -   -   -   -   -	-8,00 -6,00 -4,00 -2,00	0,00 2,00 4,00 6,00 8,00	) 10,00 12,00 14,00 16,00 18,0 	0 20,00 22,00 24,00 26,0 [₩]	Режимы _
- <b>1</b>	- 81 -							🔛 Экскавация
C	<b>)</b> 📳							Активация
_								
2	2 20							Ооделка
	8-							Бода
	-							на Балки
	8				pooloogaa.			🖌 Сосред. опоры
				and the state of t	and the second s			🖌 Линейные опоры
	3-				<b>X</b>			🗲 Анкеры
	8- -							⊒Г Распорки
								Де Арматуры
	2.00							📇 Нагр. на балки
	82							🍀 Нагрузка областей
	° -							💥 Упругие области
	2,00							🚟 Расчёт
	8							Мониторы
	*1							и Графики Истойн
~								
<del>ر</del> ې	2							
1	- Ф	бавить 💛 Править (цифру 1	) Удалить (цифру 1)					
	Nº	Создать	Имя экскавации		Деактивация Остаточное	Редактирование свойств экскавации	×	Выводы
H	> 1	экскавация Да Ехкаvace 5 - 1			на этапе 5 [% воздеиствие [%] 40.0 60.0	— Имя экскавации		Добавить рис.
						Имя: Exkavace 5 - 1		Экскавация: 0
						— Параметры экскавации		всего: 0
						Деактивация на этапе 5 :	40,0 [%]	
eautive						Остаточное действие грунта :	60,0 [%]	
Экска.					-		🗸 ОК 🗙 Отмена	Б. Копировать вид

Диалоговое окно «Новая экскавация» - Этап проектирования 5

Примечание: моделирование этой задачи с последовательными этапами проектирования аналогично. Вначале рассматривается первичная обделка стенок тоннеля из невыдержанного 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 d₂ и мульда 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.

2	GEO5 201	) - МКЭ (дел	оверсия) (	Тоннель, Фильтрация гр.в	оды, Консолидация) [	Р:\ООО Реконструк	ция - переводы\m	anuals\26_fem tunnel\Demo_manua	l_26_results.gmk *]				_ 🗆 X
Фаі	іл Изм	енения За 斗 <b>- (</b>	ание Вь	аходы Настройка Спра	вка Z + (Tono	o] [1] [2]	[3] [4] [	[5] [6] [7]					
									00 14,00 16,00 10,00 20,00 22,0	0 24,00 26,00 26,00	30,00 32,00 34,00 3	8.01 (M)	Рехилиы → Асселевация → Асселевация Привака © Обделка ■ Вода ■ Вода ■ Вода ■ Вода ■ Контасты ¥ Сосред опоры ▲ Линейные опоры ▲ Алккеры □ Распорки ▲ Алккеры □ Распорки ₩ Нагрузка областей ₩ Упругна области ₩ Расчёт ● Мониторы Ш Графики ↓ Устойч.
-		-		🛻 📼 ปอร์วรมระ รองกรรณ									
		Loosenie i p	фически	Расположение	Docas	ca [u]	VIIIITLIBATE	Caucauna /	Материал (	Ko	(T3/T)		
		новая	изменен.	- denonoxenine	Начало	Конец	собственный вес	Деградация на текущем этапе [%]	Текущее воздействие балки [%]	слева	справа		Выводы _
	>	1 Нет	Нет	Свободная линия №1	∽	F	1	без изменений	без изменений	(не задан)	Mohr-Coulomb		вт Добавить рис.
		2 Нет	Нет	Свободная линия № 2	<b>⊢</b>	F	1	без изменений	без изменений	(не задан)	Mohr-Coulomb		Балки: 0
		3 Нет	Нет	Свободная линия № 4	H	o—	1	без изменений	без изменений	(не задан)	Mohr-Coulomb	- 1	Bcero: 0
		4 Да		Свободная линия № 6	0—	⊢ 	-	1,00 (b) x 0,20 (h) м	C 20/25; E = 2900,00 MTIa; G = 113	Mohr-Coulomb	(не задан)	- 1	В. Список рисунков
UKN .		5 Да		Свободная линия № 9	F	<u> </u>	1	1,00 (b) x 0,20 (h) M	C 20/25; E = 2900,00 MFla; G = 113	Mohr-Coulomb	(не задан)	-	
6a		4										,	Копировать вид

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.

G GEOS 2019 - МКЭ (демоверсия) (Тоннель, Фильтрация гр.воды, Консолидация) [P:\OOO Реконструкция - переводы\manuals\26_fem tunnel\Demo_manual_26_results.gmk *]	_ 🗆 🗙
Файл Изменения Задание Выходы Настройка Справка	
g D [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]	
↑.	о [н] Режимы _
	Экскавация
	на Активация
	🔣 Привязка
N 8 <sup>2</sup>	О Обделка
	вода
	🚗 Балки
8 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Контакты
8	🗶 Сосред, опоры
	Гинейные опоры
	🔊 Анкеры
	П Распорки
	— Пригрузка
	📇 Нагр. на балки
	🏽 Нагрузка областей
	Эт Упругие области
	Pacuár .
	Ф Мониторы
	Графики
	👌 Устойч.
A detail (forsaure) - Z Desere (under) ) - V Vaser (under) )	
на политически себется эксказации Х	
и содина и на этокавации на этокавации на этокавации и на этока	Выводы _
▶         1         Her         Eskavace 5 - 1         30,0         30.0         Имя :         Eskavace 5 - 1	В* Добавить рис.
— Параметры экскавации	Экскавация: 0
Деактивация на этапе 6 : 30,0 [%]	All Concor proveros
0-ratione anti-rate roots - 30.0 [5]	а список рисунков
₹ Ormena	
	- понтровате вид

Диалоговое окно «Редактировать свойства экскавации» - Эта проектирования 6

В конце данного этапа проектирования выполняется расчет.



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 6 (вертикальные перемещения d₂ и мульда оседания)

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

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



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%.



Диалоговое окно «Редактировать свойства экскавации» - Эта проектирования 7



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 7 (вертикальные перемещения d₂ и мульда оседания)

Далее на следующем этапе можно просмотреть эквивалентные пластические деформации  $\varepsilon_{eq,pl}$  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  $\varepsilon_{eq,pl}$  не равны нулю, что соответствует работе сооружения по нелинейной модели материала (Mohr-Coulomb).



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 7 (эквивалентные пластические деформации ε<sub>eq,pl</sub> в соответствии с моделью Mohr-Coulomb)



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



Вкладка «Расчет» - Этап проектирования 7 (нормальная сжимающая сила № [кНм/м])



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

### Анализ результатов

В следующей таблице представлены максимальные значения внутренних усилий (изгибающих моментов, поперечных и продольный 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.

	Этап проек	Этап проектирования 7 - внутренние усилия							
Модель материала	<i>N</i> [кН/м]	<i>М</i> [кНм/м]	Q [кН/м]						
	- 701,3	- 11,3	- 13,8						
Wonr-Coulomb	- 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*<sub>z</sub>, *d*<sub>x</sub> [мм] первичной обделки тоннеля на каждом этапе проектирования.

Этап	Ве	личина абсолютных і	перемещений dz, dx [и	nw]
проектирования	<b>d</b> <sub>z,min</sub>	d <sub>z,max</sub>	<b>d</b> <sub>x,min</sub>	d <sub>x,max</sub>
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 dz, dx первичной обделки (максимумы) - Все этапы проектирования

### Заключение

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 150х150 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 <u>ссылке</u>.