

Расчет устойчивости откоса

Программа: МКЭ

Файл: Demo_manual_25.gmk

Целью данного руководства является анализ степени устойчивости откоса (коэффициента запаса) с использованием метода конечных элементов.

Описание задачи

Необходимо определить степень устойчивости откоса, вначале без действия полосовой пригрузки, а затем под действием пригрузки интенсивностью $q = 35,5 \text{ кН/м}^2$. Расчетная схема откоса для всех этапов проектирования (включая отдельные точки границ элементов) представлены на рисунке ниже. Далее необходимо провести стабилизацию откоса преднапряженными анкерами.

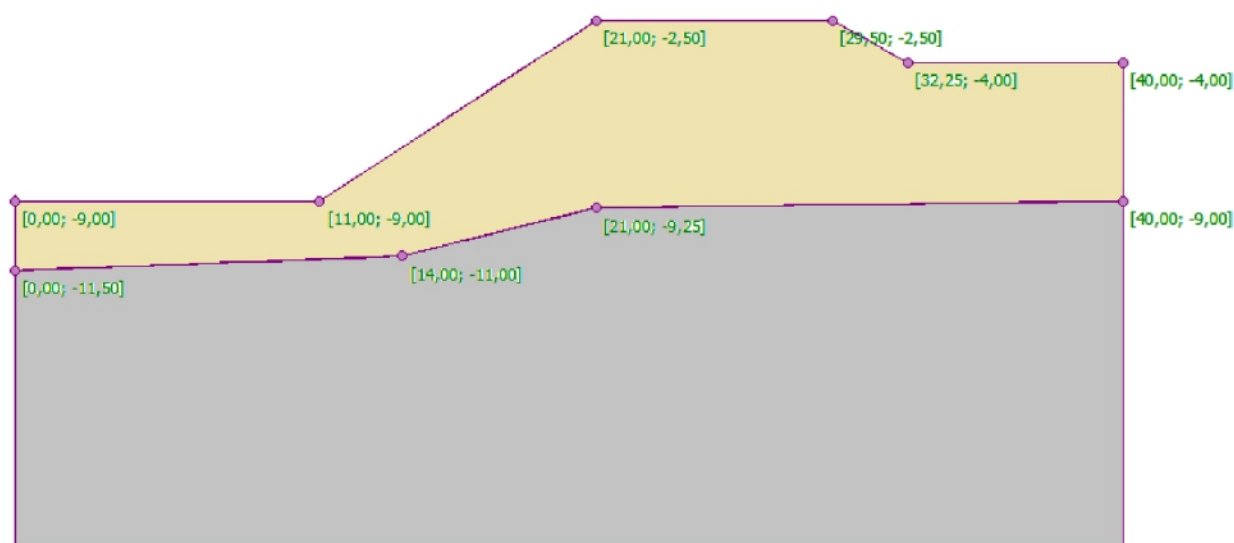


Схема моделируемого откоса - отдельные точки границ элементов

Геологический разрез сложен двумя видами грунта со следующими параметрами:

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

Параметры грунта/ классификация	Грунт № 1	Грунт № 2 - R4
Удельный вес грунта: γ [кН/м ³]	18	20
Модуль упругости: E [МПа]	21	300
Коэффициент Пуассона: ν [-]	0,3	0,2
Удельное сцепление: c_{eff} [кПа]	9	120
Угол внутреннего трения: ϕ_{eff} [°]	23	38

Угол дилатансии: ψ [°]	0	0
Удельный вес при полном водонасыщении: γ_{sat} [кН/м ³]	20	23

Таблица параметров грунта - проверка устойчивости откоса

Примечание: различные значения модуля E для разгрузки и повторного нагружения учитываться не будут ($E = E_{ur}$).

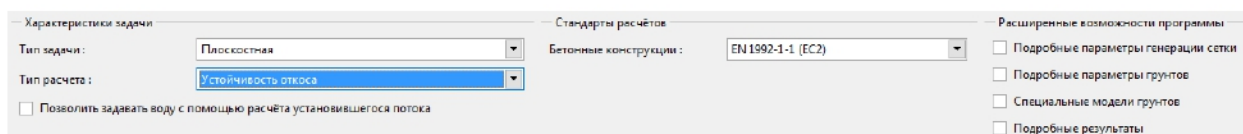
Решение

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

- Топология: ввод исходных данных и моделирование задачи (расчетная область, создание сетки КЭ);
- Этап проектирования 1: расчет коэффициента устойчивости исходного откоса без полосовой пригрузки;
- Этап проектирования 2: расчет коэффициента устойчивости исходного откоса с полосовой пригрузкой;
- Этап проектирования 3: стабилизация откоса с использованием анкеров; расчет устойчивости откоса;
- Анализ результатов: сравнение, заключение.

Топология: ввод исходных данных

Во вкладке "Характеристики задачи" следует выбрать опцию "Устойчивость откоса". Прочие параметры расчета остаются без изменений.

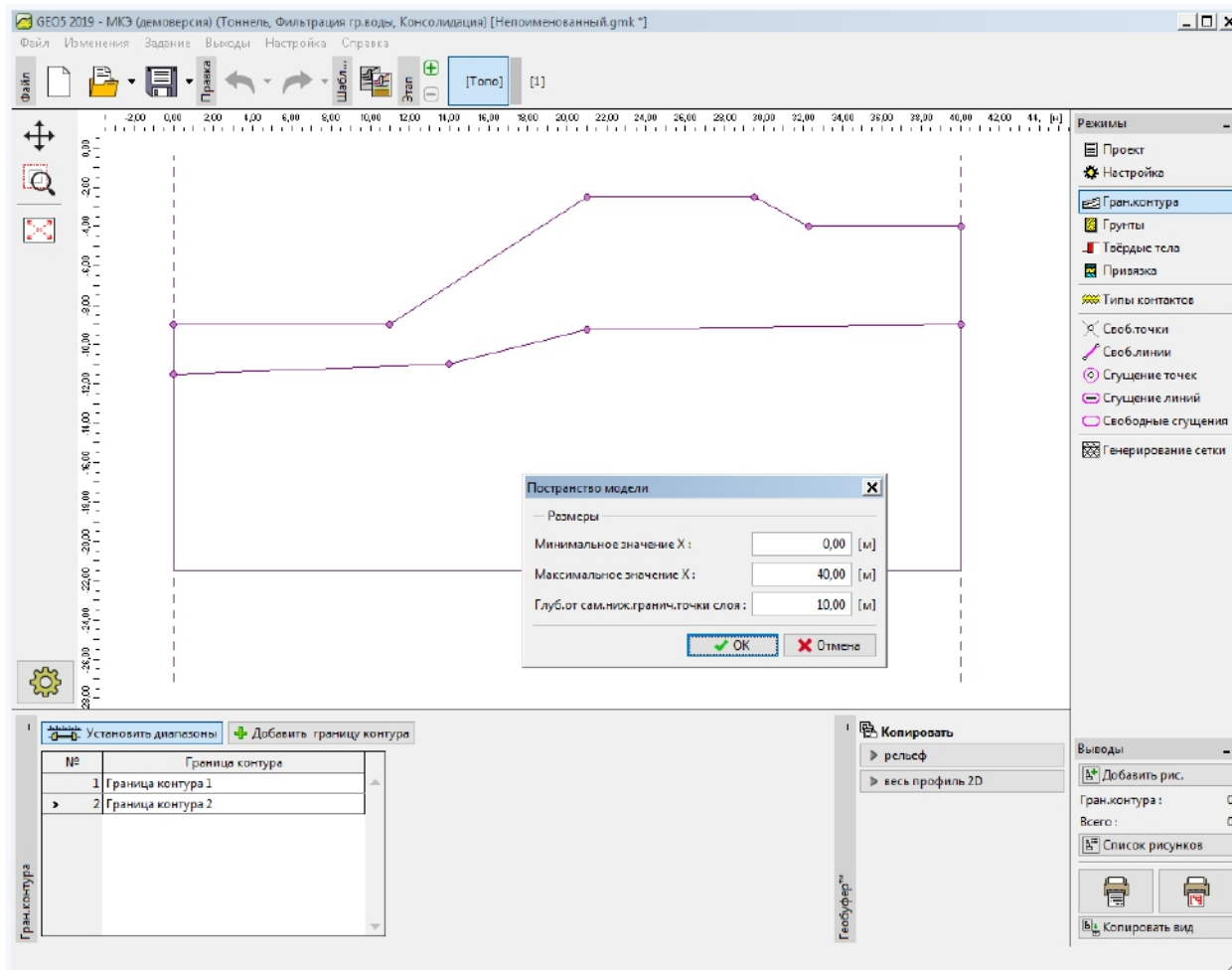


Исходные данные задачи

Примечание: создание модели в режиме "Устойчивость откоса" полностью совпадает с режимом "Напряженное состояние". Расчет устойчивости откоса выполняется нажатием кнопки "Расчет". Отдельные расчеты устойчивости откоса на этапах проектирования полностью независимы и не связаны с предыдущими этапами и расчетами (более подробная информация представлена в Справке - F1).

Далее следует задать размеры пространства модели; размеры назначаются достаточными, чтобы граничные условия не оказывали влияния на результат расчета. Для данной задачи указываются размеры (0 м; 40 м); величина глубины исследуемой области от нижней точки поверхности 10 м.

Теперь следует задать точки границ отдельных слоев грунта, приведенные в таблице ниже.



Диалоговое окно "Пространство модели"

	Граница 1		Граница 2	
	x [м]	y [м]	x [м]	y [м]
1	0,00	-9,00	0	-11,50
2	11,00	-9,00	14,00	-11,00
3	21,00	-2,50	21,00	-9,25
4	29,50	-2,50	40,00	-9,00
5	32,25	-4,00		
6	40,00	-4,00		

Список точек границ отдельных слоев грунта

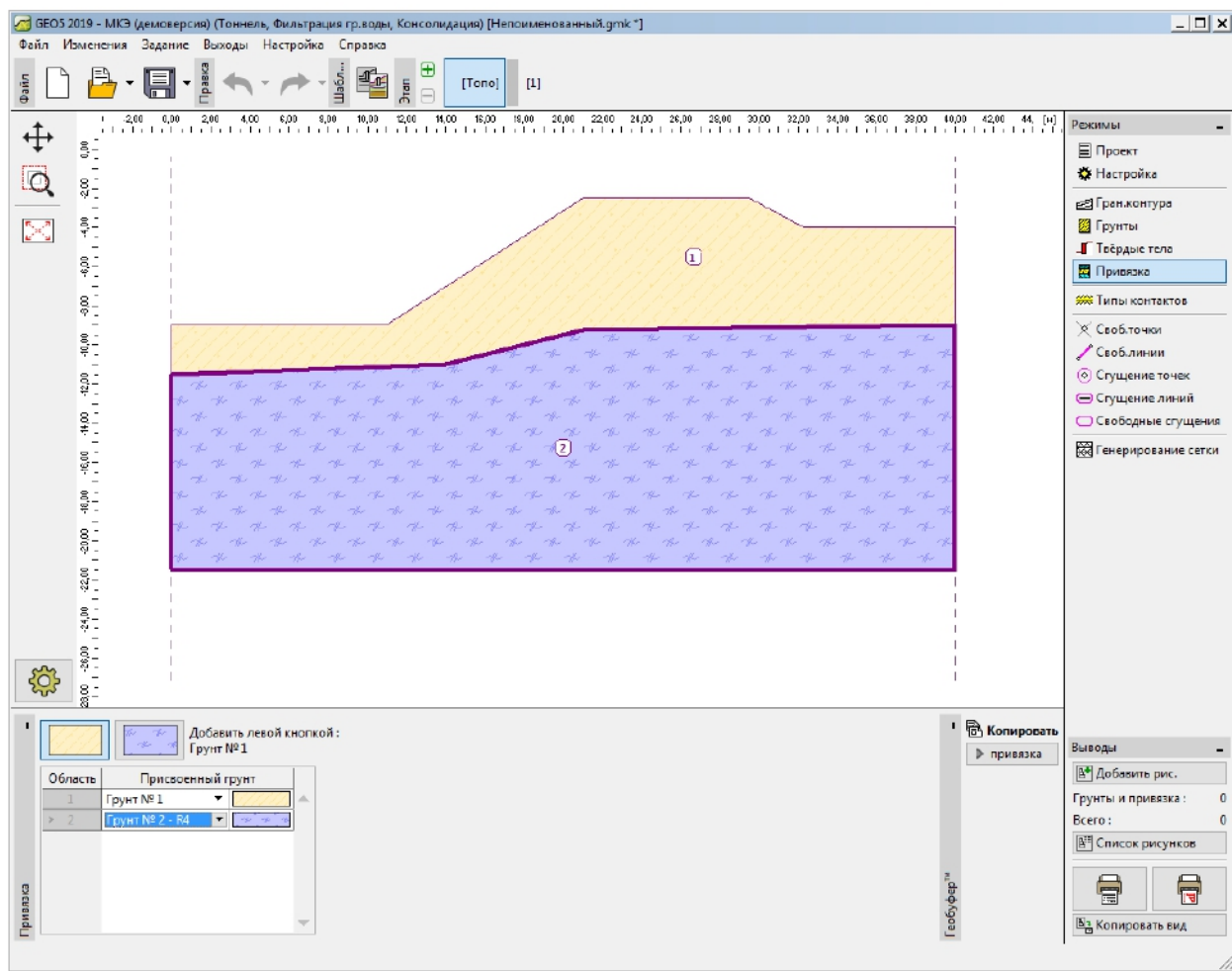
Далее следует ввести соответствующие параметры грунтов и присвоить их отдельным областям. В расчете будет использоваться модель Drucker-Prager (см. Примечание). Величина угла дилатансии ψ для обоих слоев принимается равной нулю, так как материалы не меняют свой объем при действии касательных напряжений (более подробная информация представлена в Справке - F1).

Примечание: при выполнении расчетов устойчивости откоса следует использовать нелинейные модели грунта, предполагающие развитие пластических деформаций и сформулированные на основании параметров прочности c и ϕ .

В данном случае используется модель Drucker-Prager, так как она больше склонна к течению, чем классическая модель Mohr-Coulomb (более подробная информация представлена в Справке - F1). Сравнение результатов, полученных с использованием различных нелинейных моделей материалов, представлено в таблице в конце данного примера.

Диалоговое окно "Добавление новых грунтов"

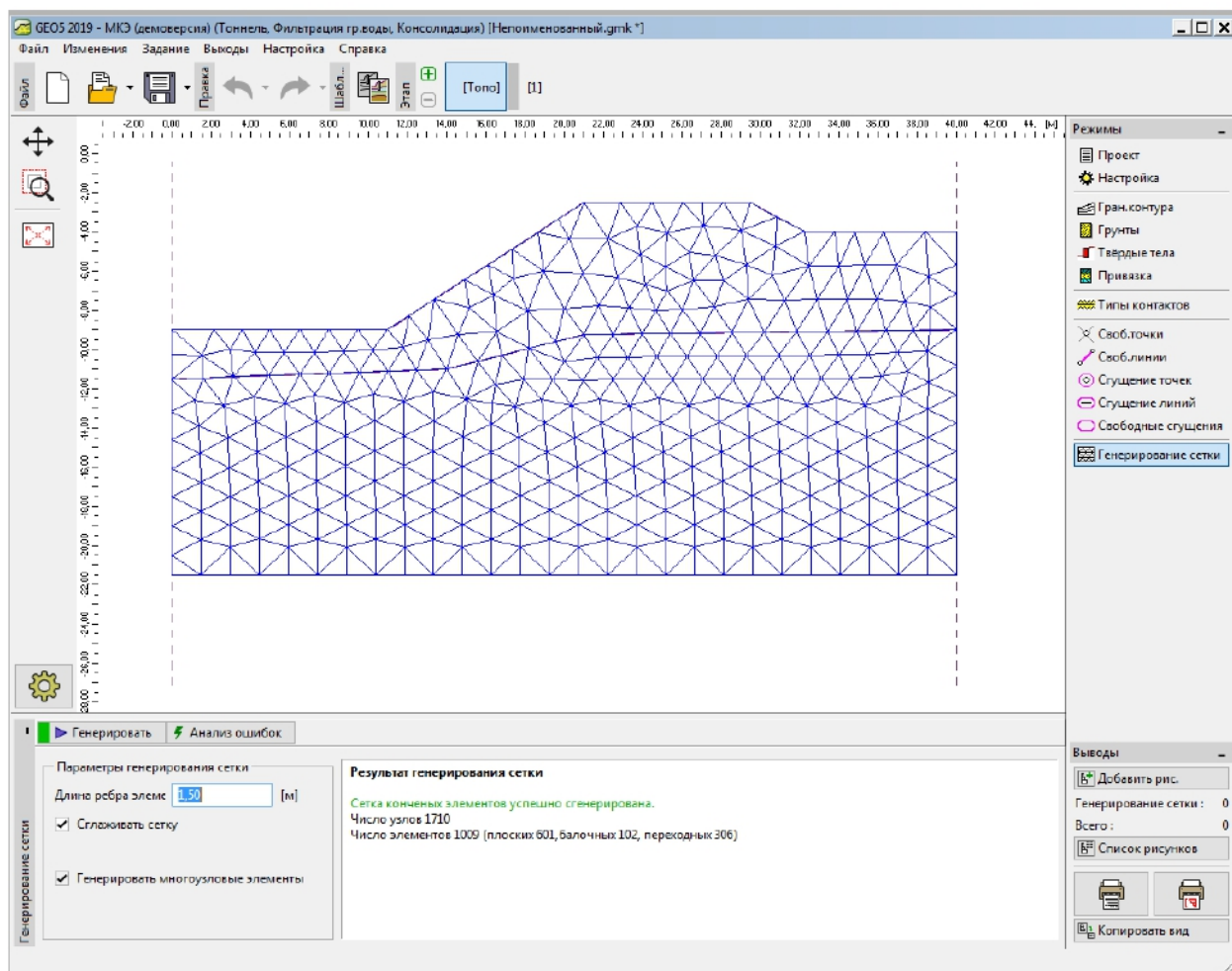
На следующем рисунке представлено присвоение видов грунта элементам геологического разреза.



Вкладка "Привязка"

Последним шагом в построении геометрической модели является создание сетки КЭ. Плотность сетки оказывает значительное влияние на результирующую степень устойчивости (коэффициент запаса), в связи с чем всегда следует выбирать достаточно мелкую сетку.

Для данного примера используются элементы с размером стороны 1,5 м, создание сетки выполняется нажатием кнопки "Генерировать". Расчет выполняется с применением программы GEO 5 - FEM для различных сеток с размерами элементов 1,0, 1,5 и 2,0 м, результаты представлены в таблице в конце данной главы.



Вкладка "Генерирование сетки" - размер стороны элемента 1,5 м

Этап проектирования 1: расчет степени устойчивости (коэффициента запаса)

После создания сетки КЭ можно перейти к этапу проектирования 1 и провести расчет (нажатием кнопки "Вычислить"). Параметры расчета остаются стандартными.

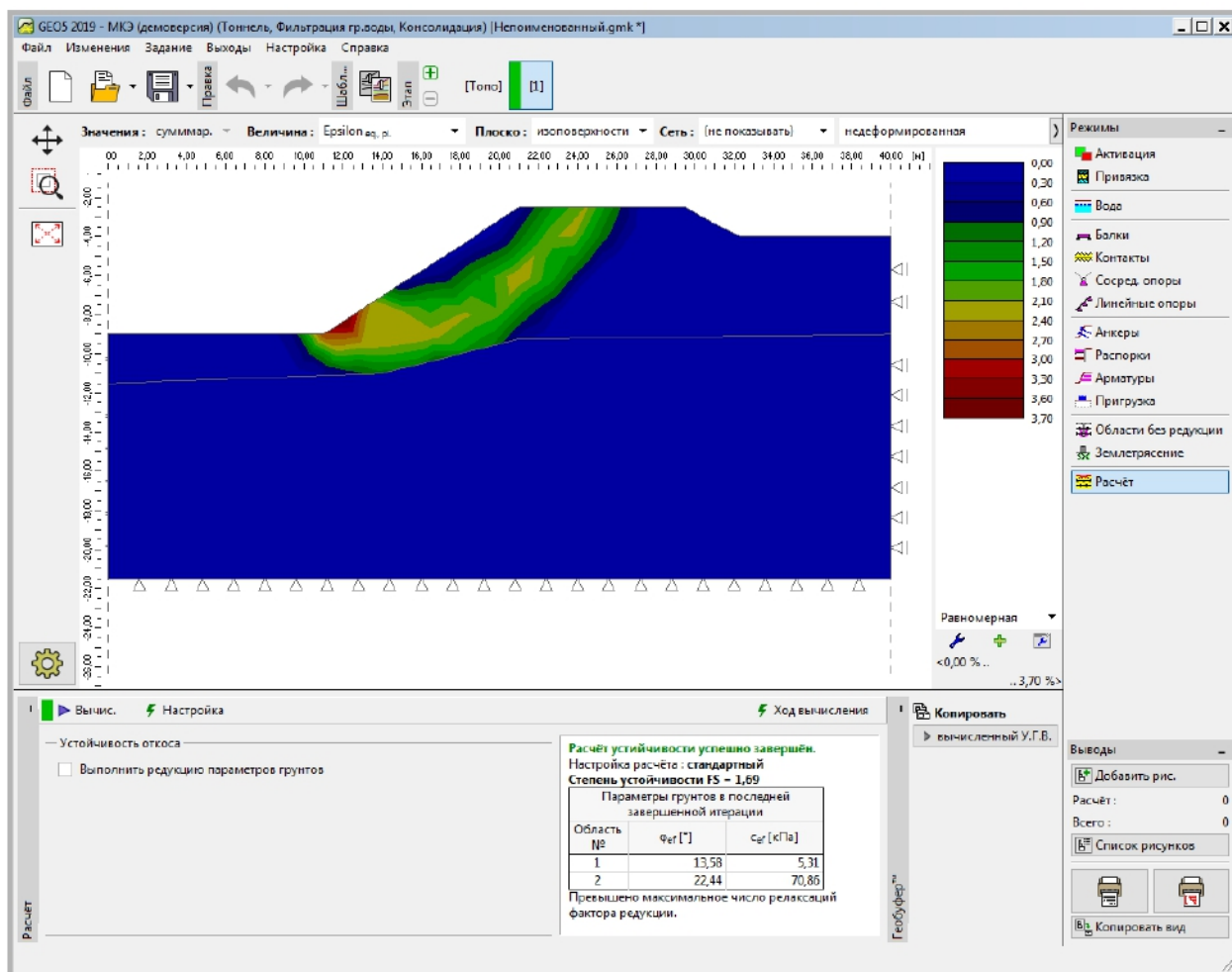
Диалоговое окно "Настройка расчета"

Примечание: расчет устойчивости откоса основан на снижении параметров прочности грунта c и φ . Коэффициент запаса определяется в рамках данного метода как коэффициент снижения фактических значений параметров c и φ , приводящий к потере устойчивости (более подробная информация представлена в Справке - F1). Степень устойчивости откоса определяется программой по соотношению:

$$FS = \frac{\tan \varphi^s}{\tan \varphi^p},$$

где: φ^s - фактическое значение угла внутреннего трения;
 φ^p - значение угла внутреннего трения при разрушении.

Одним из наиболее удобных способов вывода при расчете устойчивости откоса является вывод векторов перемещений и эквивалентной пластической деформации $\varepsilon_{eq,pl}$. Пластические деформации показывают форму и величину потенциальной поверхности скольжения (см. рисунок).

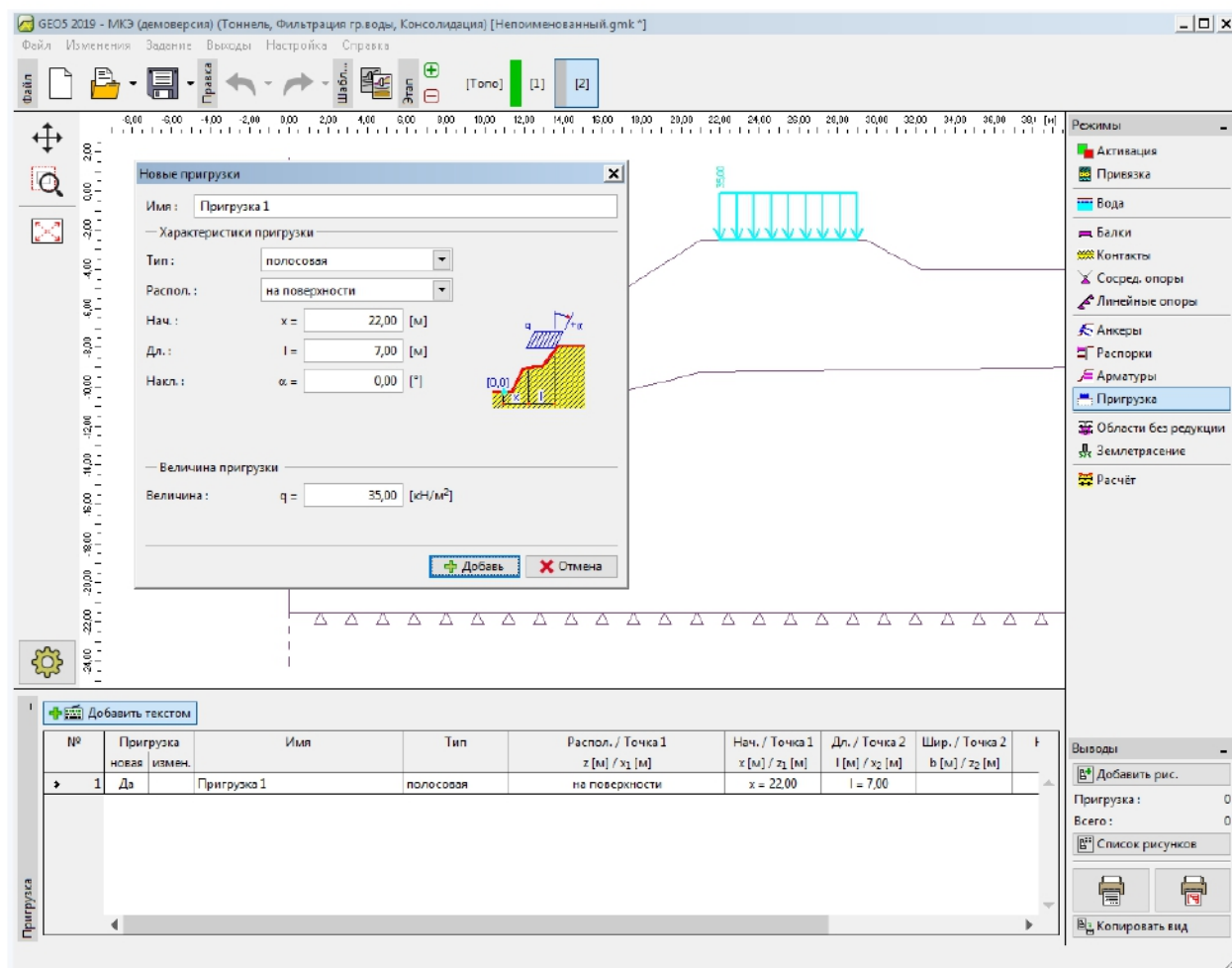


Вкладка "Расчет" - Этап проектирования 1 (эквивалентные пластические деформации $\epsilon_{eq,pl}$)

Примечание: в режиме "Устойчивость откоса" программа позволяет выводить только перемещения (в направлениях Z и X) и деформации (полные и пластические). Деформации сооружений также определяются в расчете со сниженными параметрами грунта, однако не имеют ничего общего с реальными деформациями - они только дают представление о поведении всего откоса или сооружения в момент разрушения (более подробная информация представлена в Справке - F1).

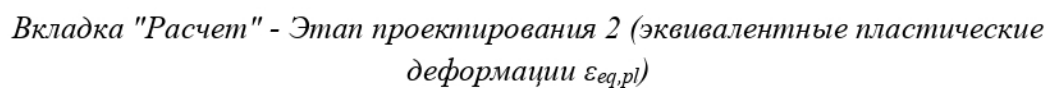
Этап проектирования 2: добавление пригрузки откоса, расчет

На данном этапе проектирования следует смоделировать пригрузку путем задания ее параметров и интенсивности во вкладке "Пригрузка".



Диалоговое окно "Новые пригрузки" - Этап проектирования 2

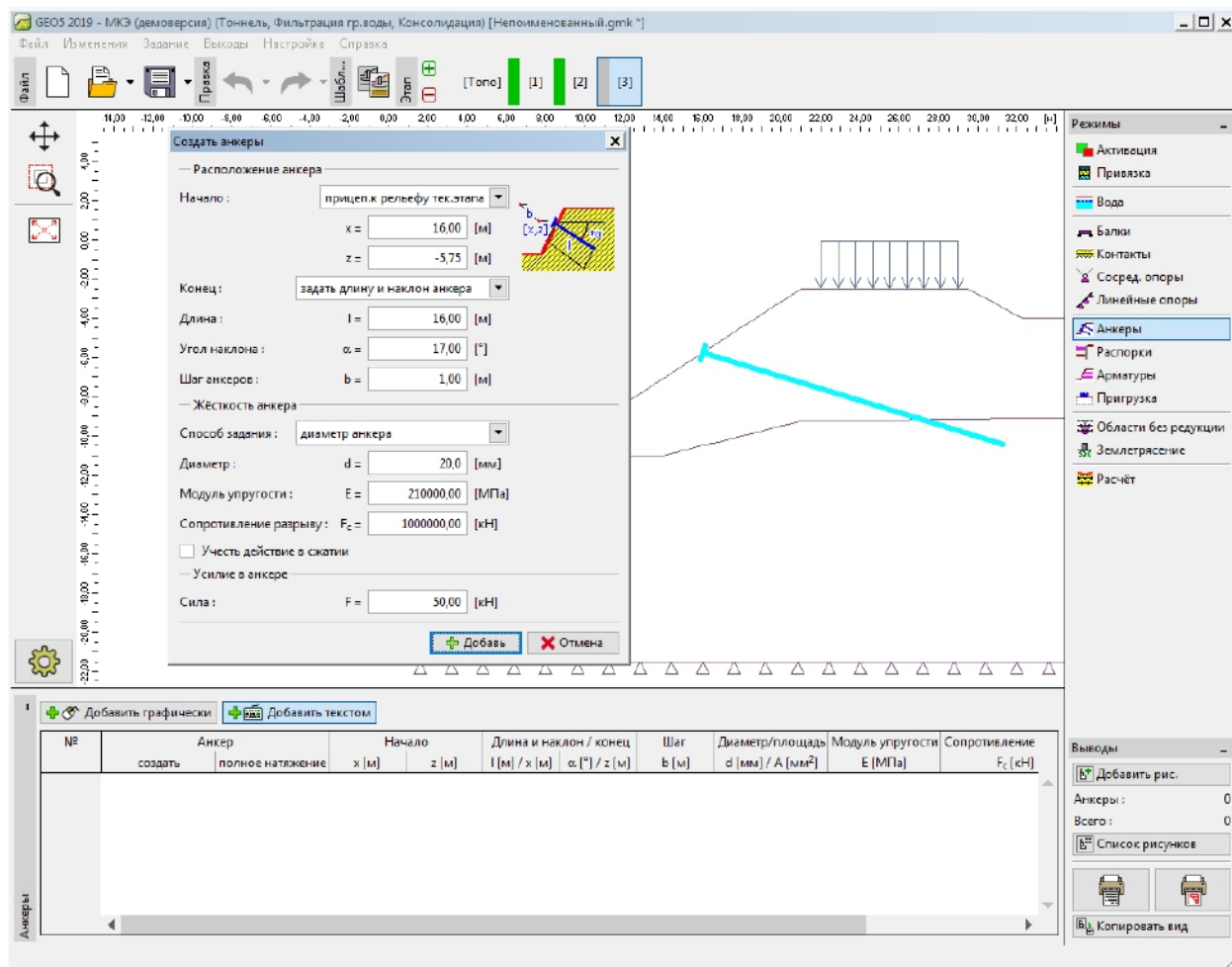
Далее можно выполнить расчет этапа проектирования 2 и просмотреть полученные эквивалентные пластические деформации.



Этап проектирования 3: стабилизация откоса с помощью анкеров, расчет

На этапе проектирования 3 следует добавить анкера нажатием кнопки "Добавь" во вкладке "Анкеры". В диалоговом окне "Создать анкера" следует задать стальной анкер с усилием преднапряжения $F = 50$ кН со следующими параметрами:

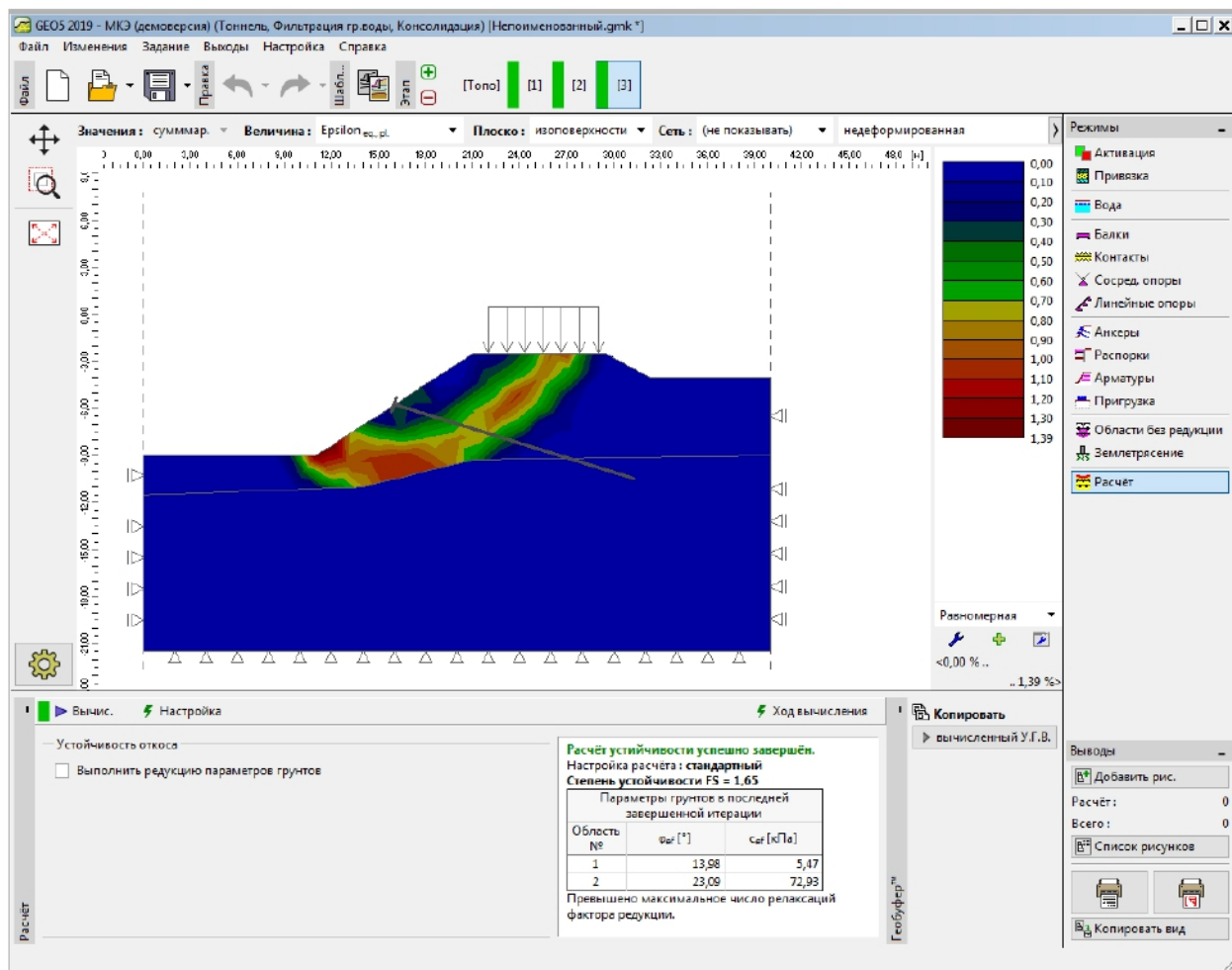
- длина анкера: $l = 16$ м,
- наклон анкера: $\alpha = 17^\circ$,
- диаметр анкера: $d = 20$ мм,
- шаг анкеров: $b = 1$ м.



Диалоговое окно "Создать анкера" - Этап проектирования 3

Примечание: в расчетах устойчивости откосов преднапряженные анкера принимаются в расчете как пригрузка, вызванная силой, приложенной к заделке анкера - жесткость анкера не оказывает влияния на устойчивость. Тем не менее, грунт у заделки анкера может перейти в пластическое состояние. В связи с этим, после завершения расчета следует убедиться, что пластические деформации отражают реалистичное положение поверхности скольжения. В случае если грунт у заделки анкера переходит в пластическое состояние, следует внести изменения в модель (более подробная информация представлена в Справке - F1).

Остальные входные параметры остаются без изменений. Теперь можно выполнить расчет этапа проектирования 3 и просмотреть результаты (аналогично предыдущим этапам проектирования).



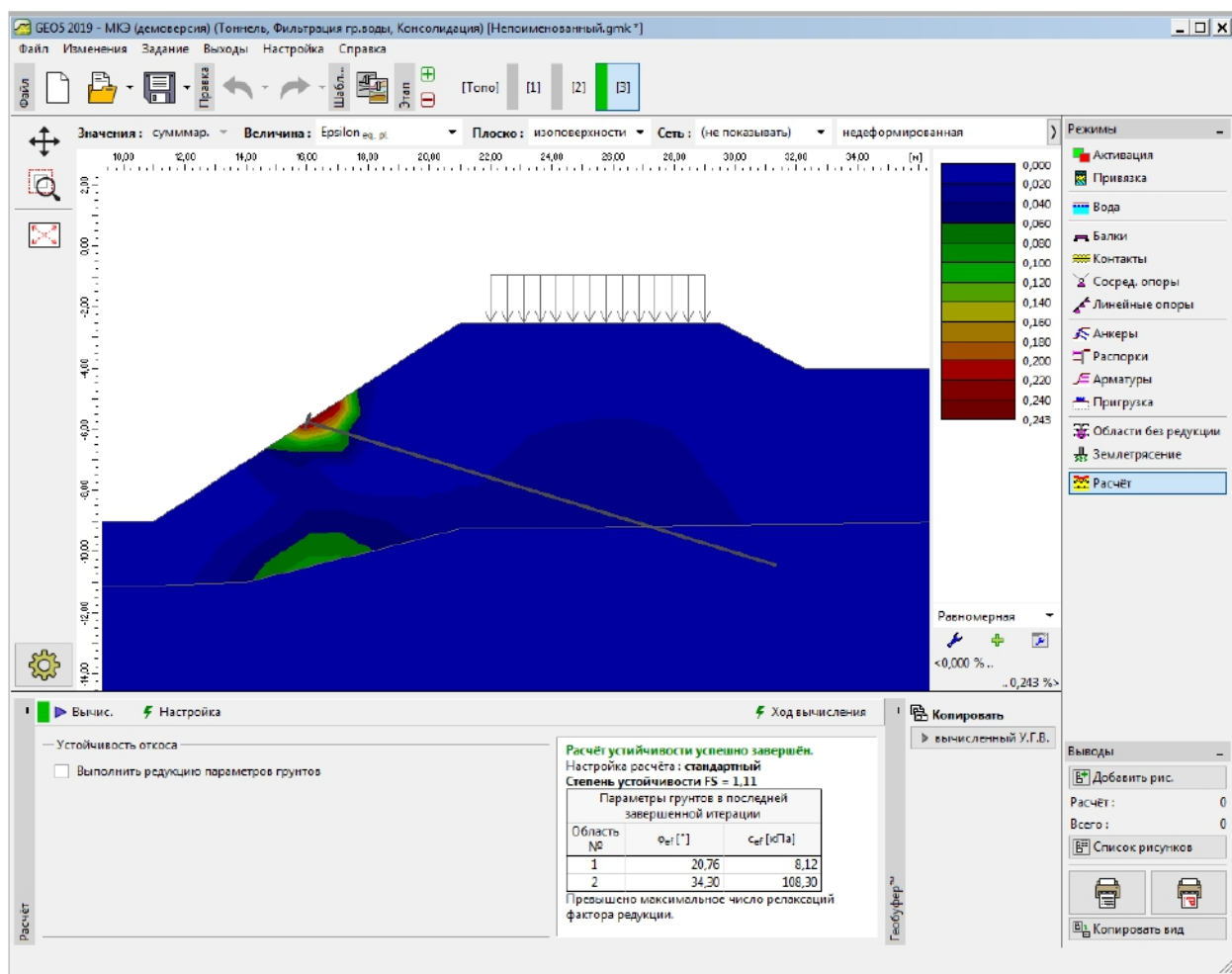
Вкладка "Расчет" - Этап проектирования 3 (эквивалентные пластические деформации $\varepsilon_{eq,pl}$)

Этим этапом завершается расчет. Полученные значения степени устойчивости откоса могут быть сведены в таблицу; далее выполним расчет с использованием других моделей материалов (Mohr-Coulomb и Modified Mohr-Coulomb).

Примечание: проверка формы поверхности скольжения в некоторых случаях имеет большое значение, так как местная потеря устойчивости может происходить в других зонах (более подробная информация представлена в Справке - F1). На рисунке представлено развитие местных пластических зон поблизости заделки анкера в ходе расчета с плотность сетки 1,0 м и моделью Drucker-Prager. В этом случае следует внести изменения модель, например:

- увеличить размер элементов сетки;
- ввести грунт с большими значениями параметров прочности c и φ вблизи заделки анкера;

- поместить балочный элемент у заделки анкера (это улучшит распределение нагрузки на грунт);
- использовать области без снижения параметров (более подробная информация представлена в Инженерном мануале № 35).



Вкладка "Расчет" - Этап проектирования 3 (местная пластическая зона у заделки анкера, модель Drucker-Prager с сеткой 1,0 м)

Анализ результатов

В следующей таблице приведены значения степени устойчивости откоса (коэффициента запаса) для отдельных этапов проектирования. Расчет выполнен для нескольких нелинейных моделей материалов и различных сеток КЭ в программе GEO 5 - FEM. Для сравнения так же представлены результаты, полученные с помощью программы GEO 5 - Устойчивость откоса (по Bishop и Spencer).

Модель материала	Размер элементов сетки [м]	Этап 1 <i>FS</i>	Этап 2 <i>FS</i>	Этап 3 <i>FS</i>	Примечание
DP	1,0	1,65	1,42	1,08*	* грунт у заделки анкера переходит в пластическое состояние
DP	1,5	1,69	1,46	1,65	
DP	2,0	1,71	1,48	1,69	
MC	1,0	1,52	1,35	0,90*	* грунт у заделки анкера переходит в пластическое состояние
MC	1,5	1,56	1,37	1,52	
MC	2,0	1,58	1,39	1,58	
MCM	1,0	1,76	1,54	1,20*	* грунт у заделки анкера переходит в пластическое состояние
MCM	1,5	1,81	1,58	1,76	
MCM	2,0	1,83	1,58	1,81	
BISHOP (аналитическое решение)	-	1,51	1,33	1,41	см. ниже
SPENCER (аналитическое решение)	-	1,51	1,32	1,52	см. ниже

Сводная таблица результатов - степень устойчивости откоса (коэффициент запаса)

Примечание: рассмотрены настройки расчета "Стандартные - коэффициенты запаса". Расчет выполнялся сначала по методу Bishop, а потом по методу Spencer с оптимизацией круглоцилиндрической поверхности скольжения (без ограничений).

Заключение

Из результатов численного анализа могут быть сделаны следующие выводы:

- локальное увеличение плотности сетки конечных элементов приводит к более точным результатам; с другой стороны, увеличивается время расчета каждого этапа проектирования.
- в расчетах необходимо использовать нелинейные модели материалов, допускающие развитие пластических деформаций.
- максимальные эквивалентные пластические деформации $\varepsilon_{eq,pl}$ показывают зоны возможного положения поверхности скольжения.