

## метод конечных элементов

## Руководство по программе





# Моделирование различных геотехнических задач методом конечных элементов

Теория и практика

## Оглавление

Введение	6
Топология	6
Системы координат	7
Глобальная система координат	7
Пригрузка	7
Анкеры	7
Осадка и поворот опоры	8
Нагрузка на балки	8
Результаты на плоскости	9
Внутренние силы на балках	9
Проект	9
Настройка	9
Расчёты на устойчивость 1	.0
Плоская задача1	.1
Осевая симметрия1	2
Замечение по движению потока1	.4
Тоннели1	5
Расширенный ввод	.6
Методика Ко 1	.8
Движение потока1	.9
Расчёт движения потока 2	20
Неустановившееся движение потока 2	20
Установившееся движение потока 2	21
Границы контура	2
Грунты	23
Материальные модели	24
Линейные модели	26
Эластичны модели	6
Модифицированная элластичная модель 2	26
Нелинейные модели	8
Мора-Кулона (МС) 2	29
Модель Мора-Кулона с пониженным напряжением 3	0
Изменения Мора-Кулона (МСМ) 3	51
Друкер-Прагер	52
Ослабление и усиление	32
Угол замедления	34
Влияние модели материала	5
Модифицированная модель Cam-глина (MCC) 3	6
Обобщенная модель Cam глина (GCC)	;9

Численная реализация моделей МСС и GCC 41	L
1. С использованием методики Ко 41	L
2. Стандартный (эластичный) анализ 43	3
3. Стандартный (пластичный) анализ 43	}
Гипопластическая глина	ł
Параметры модели	5
Критический угол внутреннего трения фсv 46	5
Уклон нормали уплотнения $\lambda^*$ 46	5
Наклон линии набухания к* 47	7
Начало нормали уплотнения N 47	7
Отношение объема и модуля сдвига r 47	7
Настройка начального состояния грунта 47	7
Межкристаллическая деформация 50	)
Модели материала в течении анализа 53	3
Модель Гарднера 54	ł
Модель Ван Генухтена 54	ł
Коэффициент проницаемости 56	5
Базовые данные	3
Модуль упругости Е 58	3
Геостатическое напряжение, гидростатическое протидавление	)
Твёрдое тело	L
Привязка	3
Типы контактов	3
Контактные элементы	5
Обделка 67	7
Модуль Обделка - МКЭ 68	3
Свободные точки	)
Сгущение линий	<u>)</u>
Настройка	<u>)</u>
Генератор форм обделки 73	}
Генератор заанкерованных областей 75	5
Этапы проектирования 75	5
Свободные точки	5
Свободные линии	3
Сгущение точек	)
Сгущение линий	)
Генерация сетки	3
Генератор сетки - предостережения 86	5
Корректор заданной геометрии	7
Программа МКЭ 89	)
Этап проектирования	)
Активация	)

Привязка	
Обделка	
Контакты	104
Контакты и балки (фильтрация воды)	105
Точки опоры	
Точка потока	
Линейные опоры	
Линия потока	110
Анкеры	112
Распорка	116
Армировка	
Пригрузки	124
Диспетчер	155
Графики	158
Устойчивость	159

## Введение

Программа позволяет моделировать широкий спектр геотехнических задач таких как: выемку грунта, забивку шпунтовых свай / «стены в грунте», основания конструкций, устойчивость откоса, балки на слабом основании, осадку грунта, МКЭ и т.д.

## Топология

Способ ввода задания в программу GEO МКЭ отличается от других программ GEO5: прежде всего необходимо определить топологию конструкции, задать границы контуров слоёв грунтов, линии построек, параметры грунтов и контактов, сгенерировать сетку конечных элементов. Для правильного ввода данных задачи следует ознакомиться с принятыми системами координат.

Режим ввода топологических данных выбирают нажатим кнопки на горизонтальной строке.

GEO5 v17 - MK	Э [C:\Users\Pu	iblic\Docume	ents\Fine\GEO5	v17
Файл Изменен	ия Задание	Изображен	ния Настрой	ка
🗋 🚅 🔚 🗠	• ~ • By	🆫 🗈 🗨	Q 🔯 🕀	)  🖸
Этап проектиро	вания: 重	[Tono] [1	] [2] [3]	
🌽 Показать	<никакие>	• • 🗷	Значения:	суммі
-40,00	30,00 -2	0,00 1	-10,00	0,00

Строка «Этапы проектирования» – переключение режима «Топология» и этапов проектирования

Собственно расчёты выполняются на этапах проектирования, на которых можно определять активность частей конструкции, задавать балки, анкеры, пригрузку, моделировать влияние воды и т.д.

В соответствии с выбором режима меняется вертикальная панель управления программы.

## Системы координат

## Глобальная система координат



- Положительное направление ротации вокруг оси *Y* = ротация по часовой стрелке

- ГСК используется для координат

- В общем случае положительная нагрузка действует против положительной оси, положительное вращение - это в положительном направлении положительный знак глобальной ротации

- Во всех случаях нужно изучить спецификацию положительного направления (знака)

## Пригрузка

- Всегда на горизонтальную линию (или на точку)



- Задаём начало (точку) и длину

- Положительная пригрузка под нулевым углом действует в противоположном направлении оси Z

- Нулевой угол обозначает вертикальную пригрузку

- Угол увеличивается в направлении часовой стрелки

- Диапазон угла -180<sup>0</sup>, 180<sup>0</sup>

## Анкеры



- Анкер задают началом и углом в том числе
- Нулевой угол имеет направление оси Х
- Угол увеличивается в направлении часовой стрелки

- Интервал угла -180<sup>0</sup>, 180<sup>0</sup>

## Осадка и поворот опоры



Осадку задают в направлении осей X, Z и вокруг оси Y
Положительная осадка – против направления оси
Положительный поворот - в направлении часовой стрелки

## Нагрузка на балки

- Локальная система координат правая
- Ось XL балки проходит от начала балки до её конца

- Ось ZL балки перпендикулярна относительно балки с разворотом на 90° против направления часовой стрелки

- Нагрузка может иметь три направления:

- глобальная Z
- глобальная Х
- локальная перпендикулярно (Z)



- Положительная нагрузка в глобальном направлении действует против соответствующей оси

- Положительная нагрузка в перпендикулярном направлении действет против направления оси *ZL* 

- Угол нагрузки *α* – положительный в направлении часовой стрелки

- Положительный момент действует в направлении часовой стрелки

- Расположение нагрузки в оси XL

- координата, координата начала
- длина нагрузки
- Виды нагрузок (всегда в вышеуказанных направлениях)
  - сосредоточенная сила
  - сосредоточенный момент
  - равномерно распределённая по всей балке
  - распределённая по трапеции на всю балку (может быть «бабочка»)

- равномерно распределённая на часть балки

- распределённая по трапеции на часть балки (может быть «бабочка»)

#### Результаты на плоскости

- плюсовое напряжение Sigma – сжатие, минусовое -растяжение

- плюсовая деформация Epsilon - сжатие, минусовая - растяжение

## Внутренние силы на балках

- плюсовое *N* растяжение, минусовые сжатие
- плюсовая деформация Epsilon сжатие, минусовая растяжение

#### Проект

В окне «Проект» задают исходные данные о задаче. В рамке имеется входной формуляр для ввода данных о задаче, т.е., информации об объекте, описания объекта, даты и пр. Позднее эти данные приводятся в выдаваемой текстовой и графической информации.

В рамке можно переключать системы единиц измерения (метрическую/дюймовую).

1	Проект	
	Объект :	Часть :
	Описание :	Клиент:
	Автор:	Дата: 11. 9.2008 👻
	Система единиц Система единиц : метрич. (	
Проект		

#### Рамка «Проект»

## Настройка

Рамка «Настройка» предназначена для общей настройки вычислений, выполняемых программой. В рамке выбираем основные теории или стандарты в соответствии с которыми будет выполнен расчёт задачи.

В рамке задают характеристики задачи (тип задачи, тип расчёта), способ

расчёта первичного напряжённого состояния (геостатическое напряжённое состояние, K<sub>0</sub> процедура) и нормативы расчёта бетонных и стальных конструкций.

Доступ к типам задач (плоские задачи, осевая симметрия) и типам расчётов (напряжённое состояние, устойчивость откоса, установившееся или неустановившееся движение потока, тоннели) обусловлен конфигурацией программы, которая Вами была куплена.

Даже в случае, когда Вы располагаете всеми модулями, рекомендуем осмотрительно выбирать тип расчёта – более сложные типы требуют существенно больший объём входных данных и могут усложнять работу с программой.

В этом окне можно также выбрать «Расширенный ввод», что повлияет на входные данные программы и возможности представления результатов.

Здесь также определяется способ расчёта напряжённого состояния первого этапа – или стандартный расчёт геостатического напряжённого состояния, или K<sub>o</sub> процедура.

<b>ا</b> ا	Характеристика задачи		Расчёт первич.напряж.состояния (1.этап)		
	Тип задачи :	Плоскостная	Способ расчёта :	Геостатическое напряжённое состо	
	Тип расчета : Напряжённое состояние		Стандарты расчётов		
	Тоннели		Бетонные конструкции :	ČSN 73 1201 R	
	Позволить задавать воду с помощью расчёта установившегося потока		Стальные конструкции :	ČSN 73 1401	
	Расширенный ввод				
oňka	Подробные результаты				
actp					

Рамка «Настройка»

## Расчёты на устойчивость

**Расчёты на устойчивость откоса** можно выполнять в программе МКЭ двумя способами в зависимости от типа задачи:

1. Оределить тип расчёта задачи как «Устойчивость откоса» в окне «Настройка».

2. Запустить модуль в режиме «Устойчивость откоса» на любом этапе проектирования классического расчёта нажатием кнопки «Устойчивость» – в этом случае сгенерируется новая подчинённая задача (которую можно сохранить

отдельно). Работа над задачей будет аналогична пункту 1.

Порядок задавания и проектирования модели в режиме «Устойчивость откоса» полностью соответствует режиму «Напряженное состояние» – только кнопка «Расчёт» запускает вычисление степени устойчивости конструкции. Отдельные расчёты устойчивости откоса на этапах проектирования обладают полной самостоятельностью и никаким образом не относятся к предшествующим этапам и расчётам.

## Плоская задача

Этот вычислительный модуль подходит для решения линейных сооружений (тоннель, насыпь, выемка, плотина), для которых характерен на порядок больший продольный размер, чем поперечные размеры рассматриваемой области.



Предпосылка плоской деформации

В таком случае целесообразно отнести расчёт на *1* погонный *м* конструкции (см.рис.) и задачу решать на предпосылке плоской деформации. Деформациями в плоскостях параллельных с продольной осью конструкции в данном случае можно пренебречь. В массиве, следовательно,

принимаем только образование деформаций и напряжений в плоскости перпендикулярной к продольной оси и, в результате поперечного сжатия также нормального напряжения в направлении продольной оси. Соответствующие ненулевые составляющие напряжения и деформации можно сложить в вектор напряжения и деформации следующим образом:

$$\sigma^{T} = \left\{ \sigma_{xx} \sigma_{zz} \tau_{xz} \sigma_{yy} \right\}$$
$$\varepsilon^{T} = \left\{ \varepsilon_{xx} \varepsilon_{zz} \gamma_{xz} \varepsilon_{yy} = 0 \right\}$$

В случае балочных элементов речь идёт о решении пояса пластины



Балочный двуузловый и трехузловый элементы

шириной 1 м. В Ненулевые составляющие деформаций **УЗЛОВЫХ** на следующем видны рисунке для двуузлового балочного элемента совместимого c трёхузловым треугольным

плоским элементом и для трёхузлового балочного элемента совместимого с шестиузловым треугольным плоским элементом.

Соответствующие составляющие внутренних сил (см.рис.), отнесённые к *1 м* ширины можно сложить в вектор напряжения следующим образом:

$$\sigma^T = \left\{ N \equiv n_{x^l}, M \equiv m_y, Q \equiv q_{z^l} \right\}$$

#### Осевая симметрия

Модуль расчета подходит для решения задач осесимметричными. Это предположение должно соответствовать геометрической конфигурации структуры и нагрузки. Хорошим примером является решение вертикально загруженной одиночной сваи, котлована или водоносной скважины.



И

напряжения

Подобно задаче плоской деформации речь идёт и трёхразмерной проблеме, которую можно преобразовать в решение плоской задачи (см.рис.). Решение будет отнесено к  $l \, m$  длины дуги радиусом x(r). Ось симметрии всегда представляет начало координаты x(r). Сдвигающими деформации составляющими В направлении ротации можно пренебречь. Наряду с составляющими напряжения и деформации в плоскости образование сечения принимаем во внимание периметрической нормальной составляющей деформации. Соответствующие ненулевые составляющие

12

напряжения и деформации можно сложить в вектор напряжения и деформации следующим образом:

$$\sigma^{T} = \{\sigma_{xx} \sigma_{zz} \tau_{xz} \sigma_{\theta\theta}\}$$
$$\varepsilon^{T} = \{\varepsilon_{xx} \varepsilon_{zz} \gamma_{xz} \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u}{r}\}$$



периметрическая деформации, составляющая а следовательно, также задействованные нормальные составляющие напряжения приобретают на оси симметрии бесконечные значения. С точки зрения аппроксимации методом конечных элементов для повышения определения необходима точности ИХ достаточно густая сетка вокруг оси симметрии.

Примеры пригрузки территории

приложение линейной и плоской нагрузки.

заслуживает

также

Отдельные примеры нагружения поверхности территории представлены на следующем рисунке. Очевидно, что эффект от таких нагрузок увеличивается с увеличением расстояния от оси симметрии. Следовательно, приложение нагрузки

Внимания



такого типа непосредственно на ось симметрии не скажется на расчёте. В таком случае необходимо выбрать тип нагружения оси симметрии. Программа позволяет приложение только силовой сосредоточенной нагрузки.

У балочных элементов имеем дело с задачей плоской ротационно-симметричной оболочки с влиянием изгибающих воздействий. Ненулевые степени свободы

соответствуют примеру пояса пластины, принятого для решения задачи плоской деформации. Наряду с осевыми (меридиальными) воздействиями необходимо

принимать во внимание также оболочечные и изгибающие воздействия в периметрическом направлении (см. следующий рисунок).

Соответствующие составляющие внутренних сил (см.рис.), отнесённые к *1 м* ширины можно сложить в вектор напряжения следующим образом:

$$\sigma^{T} = \{n_{r}, m_{r}, q_{r}, n_{\theta}, m_{\theta}\}$$



Внутренние силы на круговой пластине

В случае круговой пластины или кругового кольца (угол  $\alpha = \theta$ ) можно говорить о радиальных и периметрических составляющих внутренних сил (см. следующий рисунок).

Отношение между внутренними силами и

соответствующими составляющими деформации могут быть в общем случае записани в виде:

$$\left\{ \begin{array}{c} n_r \\ m_r \\ q_r \\ n_\theta \\ m_\theta \end{array} \right\} = \frac{1}{1 - \nu^2} \left[ \begin{array}{cccc} EA & 0 & 0 & \nu EA & 0 \\ 0 & EI_y & 0 & 0 & \nu EI_y \\ 0 & 0 & \frac{(1 - \nu)kEA}{2} & 0 & 0 \\ \nu EI_y & 0 & 0 & EA & 0 \\ 0 & \nu EI_y & 0 & 0 & EI_y \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \frac{\mathrm{d}u^l}{\mathrm{d}x} \\ \frac{\mathrm{d}\varphi_y}{\mathrm{d}x} \\ \frac{\varphi_y + \frac{\mathrm{d}w^l}{\mathrm{d}x}}{\mathrm{d}x} \\ \frac{u^l \sin \alpha - w^l \cos \alpha}{r} \end{array} \right\}$$

Принимаем радиус *r* равным бесконечности и переходим к проблеме плоской деформации. Стоит обратить внимание на обстоятельство, что у сдвигающих сил их величина, в отличие от проблемы плоской деформации, находится в сильной зависимости от плотности сетки-деления балки на элементы. То же самое касается вертикальных реакций.

#### Замечение по движению потока

Напомним, что таким же образом как реакции при анализе напряжения

отнесены значения сосредоточенных потоков в узлах сетки с нормированными поровыми давлениями к  $l \ m$  длины дуги радиусом x(r). В случае плоской деформации соответствующие значения сосредоточенных потоков отнесены к  $l \ m$ длины. Этому соответствуют и общие значения расходов, которые можно определить по сосредоточенным потокам  $[m^3/cymku/m]$  следующим образом:

#### Плоская деформация

$$\sum Q = \sum_{i=1}^{N} Q_i \left[ m^3 / den / m \right]$$

Осевая симметрия

$$\sum Q = \sum_{i=1}^{N} 2\pi x_i Q_i \left[ \frac{m^3}{den} \right]$$

где N - количество узлов на соответствующей линии сетки, в которых рассчитывают сосредоточенные потоки  $Qi \ [m^3/сутки/m]$ . В случае осевой симметрии представляет xi значение x-координаты данной точки, т.е. общий расход  $[m^3/сутки]$  напр., через цилиндрическую поверхность (верткальная линия) или через круглоцилиндрическую поверхность (горизонтальная линия).

#### Тоннели

В окне «Настройка» можно отметить выбор «Тоннели». (Выбор доступен только в случае, что пользователь приобрёл этот модуль.). После выбора режима «Тоннели» в программу можно вводить данные и вычислять:

•экскавацию (моделирование 3D эффекта забоя по новому австрийскому методу)

•деградацию балок

•тепловую нагрузку балок

•тепловую нагрузку областей (нужен «Расширенный ввод»)

•нагрузку областей набуханием

#### •мониторы результатов

Режим «Тоннели» можно в любой момент выключать и включать, однако этим отменяются все выполненные расчёты. Переход от нормального режима в режим «Тоннели» вполне безопасен. При переходе из режима "Тоннели" в нормальный режим будут потеряны все дополнительно заданные данные –

#### программа сообщает об этом в диалоговом окне.

Предуп	реждение
	При вылючении режима Тоннелиданные будут скоррект.так, чтобы в них не было заданий, специфич.для этого режима (напр., Экскавация).Действительно отключить режим Тоннели?
	И Да

Предупреждение: При выходе из режима Тоннели" происходит корректировка данных.

#### Расширенный ввод

В окне «Настройка» можно отметить выбор "Расширенный ввод". Расширенный ввод даёт следующие дополнительные возможности:

•более подробно описать **материальные модели** грунтов (задают , напр., параметр биоты, Объёмный модуль воды, Коэффициент теплового расширения)

•разрешена трёхузловая сетка (без вставленных узлов)

•разрешена смешанная сетка (треуголники и четырёхугольники)

•можно отобразить больше выходных величин

Расширенный ввод в стандартном режиме выключен. Основное его использование - в научных целях и исследованиях. Режим расширенного ввода можно в любой момент выключать и включать, однако этим отменяются все выполненные расчёты.

Если в окне «Настройка» включён "**Расширенный ввод**", то для всех типов материальных моделей можно дать более подробную спецификацию типа грунта, установить параметр биоты *α* и коэффициент теплового расширения *αt*.

Стандартная настройка предполагает дренированные граничные условия. Расчёт в таком случае предполагает установившиеся условия, когда деформация скелета не оказывает влияния на развитие поровых давлений. Поровые давления носят только характер внешней нагрузки и в процессе расчёта не изменяются (состояние в конце консолидации после полной диссипации избыточного порового давления *u<sub>e</sub>*). В программе это поровое давление *и* обозначено как *us*. В случае недренированных условий, когда вся граница соответствующей области себя ведёт как совершенно водонепроницаемая, приходится решать, наоборот, комбинированную проблему развития деформаций скелета и поровых давлений предполагая, что все изменения моментные и влияние времени отсутствует ( состояние в начале консолидации). Эти вычисленные поровые давления в программе обозначены как *ue*. Полное активное поровое давление *u* описано выражением:

$$u = u_s + u_o$$

Расчёт требует задания эффективного объёмного модуля воды Ке:

$$k_e = \frac{\alpha}{\frac{\alpha - n}{K_s} + \frac{n}{K_w}}$$

где: К<sub>е</sub> - эффективный объёмный модуль

*К*<sub>*s*</sub> - объёмный модуль зерен

*К*<sub>w</sub> - объёмный модуль воды

- *n* пористость (объём пора / объём скелета)
- α параметр биоты

Реальное значение этого параметра не оказывает принципального влияния на полученные результаты, при условии, что оно задано достаточно большим. Чаще всего его выбирают в интервале *1000 - 10000*.

Параметр биоты *α* выражает отношение между объёмным модулем скелета *K*<sub>sk</sub> и зёрен *K*<sub>s</sub> основного материала и описан выражением:

$$\alpha = 1 - \frac{K_{sk}}{K_s} < 1$$

где: α - параметр биоты

*К*<sub>sk</sub> - объёмный модуль скелета

*К*<sub>*s*</sub> - объёмный модуль зёрен

Стандартная настройка предполагает несжимаемость зёрен ( $K_S >> K_S k$ ) и следовательно  $\alpha = 1$ . Тотальное напряжение можно описать выражением:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{eff} + u\delta_{ij} = D_{ijkl}\varepsilon_{kl} + \alpha u\delta_{ij}$$

где:

 $\sigma_{ii}$  - Тензор тотального напряжения

 $\sigma_{ii}^{e\!\!f\!f}$  - Тензор эффективного напряжения

<sup>Е</sup>kl - Тензор общей деформации

*D*<sub>*iikl*</sub> - Тензор жёсткости материала

 $\delta_{ij}$  - Дельта Кронекера

и - Активное поровое давление

#### Методика Ко

Методика  $K_o$  – это метод, позволяющий другим способом вычислять основные геостатические состояния напряжения (1 этап проектирования). Применяется в случае, когда нужно задать другое начальное боковое состояние напряжения. Например, у переуплотнённых грунтов реальное боковое напряжение может быть существенно больше, чем у нормальных непереуплотнённых грунтов.

При стандратном расчёте выполняется стандартный анализ заданной конструкции методом конечных элементов. Использование нелинейных моделей позволяет учесть в расчёте возможное развитие площади разрушения ещё при определении геостатического состояния напряжения. В случае эластической деформации грунта между вертикальным  $\sigma_z$  и горизонтальным напряжением  $\sigma_x$  справедливо отношение известное из теории упругости:

$$\sigma_{x} = \frac{\nu}{(1-\nu).\sigma_{z}}$$

где:  $\sigma_z$  - вертикальное нормальное напряжение

 $\sigma_x$  - горизонтальное нормальное напряжение

*v* - коэффициент Пуассона

При таком расчёте у нелинейных моделей может произойти изменение пластичности (вязкости) грунтов.

Расчёт с помощью методики *K*<sub>o</sub> является эластичным и изменение пластичности (вязкости) грунта не может произойти. Боковое напряжение на первом этапе проектирования вычисляется из отношения:

$$\sigma_{x} = K_{0}.\sigma_{z}$$

- где: *Ко* Коэффициент натурального бокового давления , заданный пользователем
  - $\sigma_{Z}$  Вертикальное нормальное напряжение
  - $\sigma x$  Горизонтальное нормальное напряжение

Коэффициент *K*<sub>o</sub> задают как параметр грунта. Если параметр *K*<sub>o</sub> не задан, его рассчитывают по формуле:

$$K_o = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

#### Движение потока

разрешает Программа выбор анализа установившегося ИЛИ неустановившегося движения потока в массиве. Анализ неустановившегося потока позволяет определить развитие поровых давлений (высоты нагнетания) и текущую степень насыщения во времени. Время, после которого распределение поровых давлений больше не меняется, можно назвать временем необходимым для достижения установившегося состояния. Время зависит как от материальных свойств среды (значение коэффициента водопроницаемости), так и от типа решаемой задачи (напр., открытый поток). В случае установившегося потока отдельые этапы проектирования полностью независимы друг от друга. В случае неустановившегося потока методика расчёта аналогична анализу напряжённого состояния. Отдельные этапы расчёта являются продолжением друг друга. Первый, независимый этап расчёта предназначен для настройки исходных условий, т.е. настройки исходных значений поровых давлений/высоты нагнетания и степени водонасыщения в начале расчёта, зависимого от времени. На последующих этапах расчёта необходимо задавать продолжительность соответствующего этапа и историю нагружения (хронологию истории гидравлических граничных условий). В настоящей версии программы предполагается, что нагрузка была или полностью задана в начале этапа, или линейно увеличивается в течение этапа.

В общем в обоих случаях (установившееся/неустановившееся движение потока) речь идёт об описании движения потока в водоненасыщенной или частично водонасыщенной среде. Движение потока в полностью водонасыщенной

19

среде происходит только ниже уровня грунтовой воды. Выше уровня грунтовой воды (движение потока в частично водонасыщенной среде) движение управляется подходящей моделью материала. Для расчёта движения потока со свободным зеркалом (свободного потока) программа предлагает для ввода одну из трёх моделей материала: Логорифмическая модель, модель Гарднера и модель Ван Генухтена. Ввиду того, что выбором модели обусловлена настройка исходных условий (исходная степень водонасыщения), менять модель материала на последующих этапах программа не разрешает. В таком же духе настоящая версия программы не позволяет менять геометрию модели заданную на начальном этапе.

Для расчёта движения потока необходимо сперва задать граничные условия (на точках или на линиях). В массиве можно моделировать балочные или контактные элементы. В **результате расчёта** получаем распределение поровых напряжений и гидравлического потенциала в массиве, скорость и направления движения потока, а также информацию о величине втока/ оттока в массив /из массива соответственно.

## Расчёт движения потока

## Неустановившееся движение потока

Описание неустановившегося потока в частично водонасыщенной среде, основано на предпосылке несжимаемости скелета и поровой воды и решения общего уравнения Ричардса (уравнение непрерывности):

$$n\dot{S} + div(-K_r\mathbf{K}_{sat}\nabla h) = Q$$

где: *п* Пористость материала

- *Ś* Изменение степени водонасыщения во времени
- *Kr* Коэффициент относительной водопроницаемости
- К<sub>sat</sub> Матрица водопроводности объединяющая коэффициенты водопроницаемости, определённые для полностью водонасыщенной среды
- **⊽***h* Градиент гидравлической высоты

## *Q* Представляет источник (насос/колодец) $[m^{3}/s]$

Временная дискретизация уравнения Ричардса основана на развёрнутой модифицированной итерационной схеме Пикарда [1]. Речь идёт о гибридной формуле, обеспечиваюшей удовлетворение закону сохранения массы. Ввиду того, что речь идёт о общей нелинейной проблеме, расчёт выполнен инкрементальным способом. Итерация условий равновесия выполняется стандартным методом Ньютона-Рафсона. В расчёт входит настройка начальных и граничных условий.

Отметим, что скорость и устойчивость процесса итерации в значительной степени обусловлены выбором материальной модели, иными словами, определением коэффициента относительной водопроницаемости Kr и особенно аппроксимацией ёмкостного члена. В общем расчёт с помощью модели Вана чувствительностью в Генухтена обладает большей отношении подбора параметров материала, занимает больше времени и по сравнению с моделями логлинейным и Гарднера он менее устойчив с точки зрения конвергенции. С другой стороны эта модель даёт более совершенную характеристику реального поведения грунтов. Подробности даны, напр., в [2].

## Установившееся движение потока

Описание установившегося потока предполагает нулевое изменение степени водонасыщенности во времени. Управляющее уравнение проблемы сведено к формуле:

## $\operatorname{div}(-K_r \mathbf{K}_{sat} \nabla h) = Q$

Следовательно, в отличие от неустановившегося движения потока решение данной проблемы независимо от времени. В расчёт вводят только граничные условия. Также и здесь в общем имеем дело с нелинейной проблемой (напр., решение задачи открытого потока, требующей применения итерационного метода Ньютона-Рафсона). Подробности приведены, напр., в [2].

#### Литература:

<sup>[1]</sup> M. A. Celia and E. T. Bouloutas, A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation, Water Resources Research 26 (1990), no. 7, 1483–1496.

<sup>[2]</sup> M. Šejnoha, Finite element analysis in geotechnical design, to appear (2012)

#### Границы контура

В окне «Границы контура» задают отдельные границы грунтов.

Приблизительная оценка ширины в задаче как правило не вызывает большой проблемы (особое внимание нужно уделить достаточной величине площади окружающей объект, главным образом в заданиях по устойчивости) – однако существенное значение имеет также глубина сетки. Конец сетки можно вообразить как несжимаемое основание. При отсутствии несжимаемого основания в данном геологическом разрезе, можно предположить, что на определённом расстоянии от места нагрузки или контакта конструкции с основанием исчезают внутренние силы и, следовательно, не происходит деформация. На этом расстоянии и будем задавать диапазон координат задачи.

При сомнениях в правильном выборе диапазона задачи, целесообразно придерживаться следующего порядка действий:

•Сперва задаём большой диапазон координат с грубой сеткой и вычисляем изменения состояний напряжения в массиве.

•В следующем шагу уточняем величину диапазона координат (места, на которых не произошла деформация или не менялось напряжение можно обрезать), снова генерируем более густую сетку и выполняем новое, более точное вычисление.

Границу контура можно также импортировать из других программ системы GEO через буфер обмена.

Программа позволяет импорт и экспорт границ контура в формате \*.DXF а импорт границ в формате gINT.

GEOS V17 - NK3 [ChUses/Public/Documents/Fine/GEOS v17 Piklady/Demo01.gmk "]	- 3 🞫					
Филл Илиянение Задания Изобросяния Настройка Справка						
🗅 😅 📓 🖒 🔹 🖓 📲 🕲 🗞 🕲 🕲 🖗 🖓 👘 🖂 🧱 😯 🚆 Drodpasseese 🗰 Mathrane (2021) 😥 Processes 🔀 Reports						
Этап проектарования : 🛞 📻 [Tons] [1] [2] [2]						
	Рознец Пранкт Ф. Настройка С. Гранкконтура Прунты Геёрдике теле					
	<ul> <li>Приважа</li> <li>Поли контистов</li> <li>Сооблочин</li> <li>Сооблочин</li> <li>Сооблочин</li> <li>Соубление</li> <li>Стушение точек</li> <li>Стушение пликий</li> <li>Приврирование сатки</li> </ul>					
Долгазоны Граница контура I 🗟 Добекть 🗊 Гразить 😨 Уданть 🚯 Подобрать II Подобрать						
Перечень границ контуров Координаты точек текундик границ контура Ф тикундик границ контура						
[4] (6) (4) (7) (7) (7) (7) (7) (7) (7) (7) (7) (7						
3 15,00 0,00 @ Rpmm. Btamme	Рисунки					
	Добевить рис.					
S. Frankling F						
5	Boero I d					
	Список рисучков					
	4					

Рамка «Границы контура»

## Грунты

В рамке «**Грунты**» находится таблица со списком заданных грунтов. Особенностью таблицы является изображение данных о текущем выборе грунта в правой части рамки.

Входные параметры грунтов зависят от выбора материальной модели, точнее материальной модели движения потока.

Наиболее важными входными параметрами являются модуль упругости грунта E и коэффициент Пуассона (задаётся у всех моделей), далее, угол внутреннего трения и удельное сцепление грунта в нелинейных моделях. Программа моделирует установившееся состояние после перераспределения поровых давлений, так что работает с эффективными параметрами угла внутреннего трения  $\varphi_{ef}$ , и удельного сцепления  $c_{ef}$ .

Входные параметры грунтов различаются также в зависимости от заданного режима ввода. При выборе расширенного задания (задаётся в окне

«Настройка») можно задавать также специальные параметры, которые влияют на материальную модель (напр.,параметр биоты, эффективный емкостный модуль воды и пр.). Эти параметры в подавляющем количестве расчётов являются несущественными и назначены для научных анализов.

В расчёте можно комбинировать отдельные материальные модели – каждый из грунтов может иметь свою собственную материальную модель.

Добавление (редактирование) грунта производится в рамке «Добавление (правка) грунта».

Программа позволяет выполнять импорт грунта в формате gINT.



Рамка «Грунты»

## Материальные модели

Выбор материальной модели и последующее задание параметров грунтов представляют собой одну из наиболее важных и в то же время самых проблемных задач при моделировании конструкции методом конечных элементов.

Материальные модели стараются дать достоверное описание поведения грунта (или породы). Модели можно разделять на две основные группы: модели

линейные и нелинейные. Правильный выбор материальной модели является **необходимым условием** правильного моделирования конструкции.

Для расчёта большинства конструкций нужны нелинейные модели (напр., расчёт ограждающей конструкции с линейной моделью грунта даст полностью нереальные результаты), однако в многих случаях использование линейных моделей может оказаться весьма удобным и упростит весь расчёт.

Добавление новы	х грунтов					<b>X</b>
Идентификация						Отображение
Имg:	Zemina č. 1					Color
1021	Zemme er z					<b>•</b>
Materials						Pattern category
материальная но	одель		1		<u>ن</u>	GEO
Материальная мо,	дель:	Mohr - Could	omb модифиц.			Pattern
Базовые данные	-	эластичный эластич.мо,	а дифицир.		?	
Удельный вес :		Mohr - Could Mohr - Could	omb omb модифиц.			
Meaner very		Drucker - Pr	ager			
модуль упруг		Cam - Clay i Cam - Clay o	модифицир. обобщенный			Clayey sand
коэфф.Пуассона :		Гипопласти	ческая глина			
параметр Биота :		α =	1,00 [-	]		
Тип грунта :		дренирован	нный			
Способ задания к	Ko :	расчёт из к	оэфф.Пуассона			
Противодавлени	e				?	
Расчёт взвешиван	ощего усили:	стандартны	ый	▼		
Удельный вес вод	онасыщеннс	$\gamma_{sat} =$	19,00 (K	Н/м <sup>3</sup> ]		
— Модель Mohr - Co	oulomb модиф	иц.			?	
Смягчение /упроч	ение:	не учитыва	ть			Классификация
Угол внутреннего	трения:	φ <sub>ef</sub> =	29,00	[°]		Определи
Удельное сцепле	ние грунта :	c <sub>ef</sub> =	8,00	[кПа]		Стереть
						Добавить
Угол дилатанции	:	ψ=	0,00	[°]		🗵 Отмена

Рамка «Добавление новых грунтов» – выбор материальной модели

## Линейные модели

Линейные модели дают оносительно быструю, но не очень точную оценку материала. Эта модель может быть использована в случаях, когда только интересует напряжение деформационного состояния грунтовых масс. Они не обеспечивают инфорацией о размещении и возможных механизмах отказа.

Они могут быть использованы для моделей поведения грунтов в регионах, где имеются только локальные (местные) разрушения без эффекта глобальных неудач, но которые могут быть причиной преждевременной потерей от конвергенции. Обеспечение главного интереса в достоверном описании поведения грунта важно использовать Нелинейные модели.

Линейные модели включают:

- Эластичные модели

- Модифицированные эластичные модели

## Эластичны модели

Линейные модели это базовые материальные модели которые предполагают линейное взаимодействие между напряжением и деформацией данная в законе Гука. Следующие данные требуют:

- Основная масса веса грунта
- Коэффициент Пуассона
- Модуль эластичности



Взаимодействие напряжения и деформации для линейной модели Одна измерительная задача закона Гука – описать линейную зависимость напряжения  $\sigma$ в деформации  $\varepsilon$  через модуль Юнга E (модуль элластичности), см. диаграмму ниже. В этом случае линейная модель обеспечивает линейную вариацию смещения как функции приложенной нагрузки

## Модифицированная элластичная модель

Очевидно, что для почв линейное поведение приемлемо только для

относительно низких величин прилагаемых грузов. Это видно после разгрузки, которая обычно показывает, что довольно небольшое количество упругой деформации сравнивается с полной деформацией. Модифицированная линейная модель пытается по крайней мере в определенной степени принять это во внимание, рассматривая различные модули для загрузки и разгрузки, как изображено на рисунке.

Снижение жесткости материала вдоль заданного пути нагружения, относится к пластической текучести и изображается посредством модуля деформации  $E_{def}$ , который может быть представлен как секущий модуль, связанный с определенным уровнем напряжения.

Допускаем, возможность упругой реакции при разгрузке. Для повышения четкости отображения моделей модуль упругости для линии разгрузки заменяется модулем разгрузки/перезагрузки  $E_{ur}$ , который регулирует реакцию почвы на выгрузке и последующей перезагрузке в критическом состоянии, определенный в материальной точке до начала разгрузки.

Ссылаясь на нижеследующие схемы, эти модули определяются по формулам:

$$E_{def} = tan \beta = \Delta \sigma / \Delta \varepsilon$$

$$E_{ur} = tan \alpha = \Delta \sigma / \Delta \varepsilon^{el}$$

Где: *E*<sub>def</sub>

Деформационный модуль (МПа) Модуль разгрузки/перезагрузки (МПа)



а) Настоящая напряженно-деформированное схема почвы, (б) Упрощенная напряженно-деформированное схема MLM (модифицированный метод Ланглея)

В ходе первичной нагрузки реакция почвы регулируется секущим модулем в то время как на выгрузке она следует по пути, установленной модуля разгрузкиперезагрузка E<sub>ur</sub>. Приближенное значение этого модуля 3\* секанс E<sub>def</sub>. В любом случае, оба параметра должны быть получены от надежных экспериментальных измерений.

## Нелинейные модели

Основные нелинейные модели могут быть разделены на две группы.

Первый класс моделей происходит от классического критерия разрушения Мора-Кулона. В частности, Друкер-Прагер, Мора-Кулона и Модифицированные модели Мора-Кулона попадают в эту категорию. Эти модели могут моделировать также упрочнение и смягчение. Общей особенностью этих моделей является развитие неограниченных упругих деформаций при загрузке по геостатического оси. Это видно из рисунка ниже, который показывает проекции поверхностей текучести в девиаторных и меридиональных плоскостях соответственно. Пример влияния выбранной модели приводится

Вторая группа основных материальных моделей представлена модифицированной Cam глиной, Обобщенной Cam глиной и моделью гипопластической глины, использующей концепцию критического состояния почв.



Проекция текучести поверхностей в (а) девиаторной, (б) меридиональной плоскости

Применение нелинейных моделей позволяет нам увидеть типичные нелинейные реакции почв.

Эти модели описывают развитие постоянной (пластической) деформации

материала почвы. Наступление пластической деформации контролируется так называемой поверхностью текучести. Поверхностная энергоотдача может быть либо постоянной (совершенно упругого пластического материала), или может зависит от текущего состояния напряжения (материальной с упрочнением/смягчением).



Напряженно-деформированное схема для нелинейных моделей

В отличие от модифицированной линейной модели нелинейные модели требуют указать только модуль упругости. Снижение жесткости материала является результатом пластических развития деформаций И соответствующего перераспределения напряжений. Это В свою очередь дает мгновенную касательную материальную жесткость в

зависимости от текущего состояния напряжения, представленной на рисунке по мгновенному касательного модуля ЕТ.

В дополнение к основным параметрам материалов, описанных в разделе "Упругие модели" нелинейные модели требуют введения определенных прочностных характеристик грунта, необходимого в определении данного текучести поверхности. Со ссылкой на первую группу материалов следующие параметры должны быть указаны:

φ - угол внутреннего трения [°]

с - когезия почвы [кПа]

*ψ* - угол расширение [°]

Угол внутреннего трения и когезия определяет начало пластической деформации. Угол расширения контролирует развитие пластической объемной деформации (растяжения).

## Мора-Кулона (МС)

Модель требует ввода следующих параметров: модуль упругости Е,

коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения и когезия. Последние два параметра служат для определения состояния текучести. Формулировка определяющих уравнений предполагает эффективные параметры угла внутреннего трения  $\varphi_{eff}$  и сцепления  $c_{eff}$ . Угол растяжения тоже должен быть указан.

Поверхностная текучесть Мора-Кулона может быть определена по трем предельным функциям, как участок неоднородного гексагонального конуса в основном месте напряжений. Проекции этой поверхности текучести в девиаторных и меридиональных плоскостях изображены на рисунке. Как видно из этого рисунка (часть) функция текучести МС имеет углы, которые могут вызвать определенные трудности в реализации этой модели в методе конечных элементов. Преимуществом с другой стороны является то что традиционные механика грунтов и также частично механика горных пород основаны на этой модели.



Проекция текучести поверхностей в: (а) девиаторной, (б) меридиональной плоскости

#### Модель Мора-Кулона с пониженным напряжением

Первоначальная формулировка модели материала Мора-Кулона расширена за счет введения вида пластичного состоянии Ренкина, см. рисунок (а), что позволяет снижению прочности на разрыв почвы, что в случае стандартной модели Мора-Кулона задается  $c^*cotg\varphi$  (где с - когезия и  $\varphi$  - угол внутреннего трения). Это значение может быть уменьшено путем указания значения прочности на растяжение  $\sigma t$  как видно из рис (б). Если  $\sigma t > c^*cotg\varphi$ , то программа автоматически устанавливает  $\sigma t = c^*cotg\varphi$ . Данная модель может быть

#### использована, если входят дополнительные параметры.



а) Проекция условий текучести Ранкина в девиаторной плоскости, б) Проекция расширенного Мора-Кулона текучего состояния в σ<sub>1</sub>, σ<sub>3</sub> плоскости

## Изменения Мора-Кулона (МСМ)

Модель требует ввода следующих параметров: модуль упругости Е, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения и сцепления. Последние два определения состояния текучести. параметра служат для Формулировка определяющих уравнений предполагает эффективные параметры угла внутреннего трения  $\varphi_{eff}$  и сцепления  $c_{eff}$ . Угол растяжения тоже должен быть указан.

Как и в модели DP Модифицированная модель Мора-Кулона сглаживает



МСМ и МС текучесть поверхности в девиаторной плоскости

углы поверхности текучести МС. Как указывается в рисунке проекция поверхности текучести МСМ в девиаторной плоскости проходит через все углы шестиугольника Мора-Кулона и как функция текучести МС функция текучести МСМ зависит от эффективной длины *от* напряжений и угла Лоде *θ*. Со ссылкой на его определении менее жесткая реакция материала следует ожидать при

пластичности модели MCM по сравнению с моделями MC и DP.

## Друкер-Прагер

Модель требует ввода следующих параметров: модуль упругости Е, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения и сцепления. Последние два параметра служат для определения состояния текучести. Формулировка определяющих уравнений предполагает эффективные параметры угла внутреннего трения  $\varphi_{eff}$  и сцепления  $c_{eff}$ . Угол растяжения тоже должен быть указан.

Модель Друкера-Прагер (иногда также известный как расширенной модели Мизеса) изменяет функцию текучести Мора-Кулона, чтобы избежать





Мора-Кулона, текучести чтобы избежать особенностей, связанных с углами. В отличие ОТ модели Мора-Кулона поверхность текучести Друкера-Прагер гладкая и участки в виде цилиндрического конуса в основном пространстве напряжений. Как и в модели МС поверхность текучести DP зависит OT эффективного среднего напряжения  $\sigma m$ . Данная версия модели DP, реализованного в

МКЭ основывается на предположении трехосного расширения. Другими словами, поверхность проекции текучести в девиаторной плоскости затрагивает внутренние углы шестиугольника Мора-Кулона ( $\theta = -30^{0}$ ), где  $\theta$ -угол Лоде.

## Ослабление и усиление

Стандартная формулировка Друкер-Прагер и Модифицированные модели Мора-Кулона предполагает упругое жесткопластическое поведение почвы, когда параметры прочности грунта с и ф остаются неизменными в течение анализа. Расширенная версия обеих моделей (входящих дополнительных вариантов загрузки) позволяет для развития этих параметров в зависимости от эквивалентной девиаторной пластической деформации:

$$\begin{split} c &= c \Bigl( E_d^{\, pl} \, \Bigr) \\ \varphi &= \varphi \Bigl( E_d^{\, pl} \, \Bigr) \end{split}$$

где: -  $E_d^{pl}$  эквивалент девиаторной пластической деформации задается

следующими выражениями:

$$E_d^{pl} = \sqrt{2e_{ij}^{pl}e_{ij}^{pl}}$$
$$e_{ij}^{pl} = \varepsilon_{ij}^{pl} - \frac{1}{3}\varepsilon_v^{pl}\delta_{ij}$$
$$e_v^{pl} = \varepsilon_x^{pl} + \varepsilon_v^{pl} + \varepsilon_z^{pl}$$

- где:  $E_d^{pl}$  эквивалент девиаторная пластическая деформация
  - *е*<sup>*pl*</sup> Девиаторная пластическая деформация Тензор
  - *є*<sup>*pl*</sup> Тензор пластической деформации
  - $\varepsilon_v^{pl}$  Объемная пластическая деформация
  - $\delta_{ii}$  Дельта Кронекера

Допускаем, кусочно-линейное изменение прочностных параметров, это видно из рисунка.



Полилинейный закон уплотнения-размягчения: влияние а) сцепления и б) угла внутреннего трения на эквивалентную девиаторную пластическую деформацию

## $E_d^{pl}$

Угол расширения  $\psi$  можно считать постоянным ибо он может развиваться как функции угла внутреннего трения  $\phi$  следующей теории расширения Rowes:

$$\sin\psi = \frac{\sin\varphi - \sin\varphi_{cv}}{1 - \sin\varphi\sin\varphi_{cv}}$$

где фсv является угоом внутреннего трения при постоянном объеме в соответствии с критическим состоянием почвы (состояние, при котором почва деформируется при нулевых объемных пластических деформациях). Для предотвращения бесконечного увеличение угла растяжения (увеличение растягивающих объемных пластических деформаций) он должн быть ограничен, например, в зависимости от максимального коэффициента пористости етах, приемлемой для данного материала. Теория расширение Rowes требует введения следующих параметров:

 $\varphi_{cv}$  - угол внутреннего трения при постоянном объеме [-]

*е*<sub>0</sub> - начальный коэффициент пустотности

*е<sub>тах</sub>* - максимальный коэффициент пустотности [-]

В настоящее время коэффициент пористости *е* может быть выражен с точки зрения текущей объемной деформации  $\varepsilon_v$  и величины первоначального коэффициента пористости  $e_0$  как:

$$\lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_v = \frac{e - e_0}{1 + e_0}$$
$$\varepsilon_v = \varepsilon_v + \varepsilon_v + \varepsilon_z$$

где: е текущий коэффициент пористости

е<sub>0</sub> начальный коэффициент пустотности

*є*<sub>v</sub> общая объемная деформация

Когда текущий коэффициент пористости *е* превышает максимальный коэффициент пористости *е<sub>max</sub>*, угол расширение *ψ* установлен на 0.

## Угол замедления

Угол замедления контролирует количество пластической объемной деформации, разработанной в ходе пластического сдвига и предполагается постоянной в течение пластического проседания. Значение  $\psi = 0$  соответствует объему сохранения деформации в то время как при сдвиге.

Глины (независимо от переуплотнения слоев) характеризуются очень низкой степенью расширения ( $\psi \approx 0$ ). Что касается песков, угол расширения зависит от угла внутреннего трения. Для несвязных грунтов (песок, гравий) с угла внутреннего трения  $\phi > 30^\circ$  значения угла расширения можно оценить как  $\psi = \phi$  - 30°. Отрицательное значение угла расширения является приемлемым лишь при достаточно сыпучих песках. В большинстве же случаевдопущение о  $\psi = 0$  может быть принято.

34

#### Влияние модели материала

Для иллюстрации влияния той или иной модели, используемой для прогнозирования структурной реакции приведем пример мелкого фундаментанагруженного распределенной нагрузкой д. Некое упрощение этой задачи является предположение о бесконечно жестком основаниинагруженного установленными смещениями.

Геометрическая модель и сетка конечных элементов для отдельных задач представлена на рисунке. Влияние почвы и собственного веса фундамента на результирующие реакции пренебрегают. В силу симметрии модели, анализируют только половину структуры.



Назначенная задача: ленточный фундамент



Геометрическая модель и сетка конечных элементов

Метод конечных элементов



#### Результаты анализа

Полученные результаты свидетельствуют о значительно жесткой реакции почвы к внешней нагрузке при использовании модели МСМ по сравнению с моделями DP и MC, которые в данном примере показывают аналогичную реакцию.

## Модифицированная модель Сат-глина (МСС)

Модель МСС была первоначально разработана для трехосных условий нагрузки. Экспериментальные измерения на мягких глинах послужили основой для развития конститутивной модели, выражающей изменение коэффициента пористости e (объемная деформация  $\varepsilon_v$ ) в зависимости от логарифма эффективной длины напряжения  $\sigma m^{eff}$ , как видно из нижеследующего графика. Оба графика связаны следующим образом:

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e}$$
$$\kappa^* = \frac{\kappa}{1+e}$$

к Наклон пучения [-]

λ Наклон NCL (нормального уплотнения) [-]

е Текущий коэффициент пористости [-]


Реакция материала при изотропном уплотнении (основополагающая модель)

График состоит из нормали уплотнения (NCL) и ряда кривых набухания. На первой загрузке нетронутый грунт перемещается вниз NCL. Далее, предположим, что почва была уплотнена до определенного уровня напряжения, которую называют давлением предуплотнения - pc, и выгружается до текущую уровня набухания. Затем, после перезагрузки почва на первых этапах смещается к кривой набухания пока не достигнет напряженного состояниязаданную параметром pc, который существовал до начала разгрузки. В этот момент почва начинает двигаться до нормали уплотнения (первичная нагрузка - сжатия кривая).

Параметры к и λ можно вывести из следующих выражений:

$$\lambda = \frac{C_c}{2,3}$$

$$\kappa = 1,3 \frac{1 - v_c}{1 + v} C_s$$

где: С<sub>с</sub> одномерный индекс сжатия

*C<sub>s</sub>* одномерный индекс набухания

Эти параметры следуют из простого теста Одометр.

Поверхность текучести является гладкой без возможности развитии растягивающих напряжений. Модель МСС позволяет, в отличие от первой группы моделей, прямое моделирование деформационного упрочнения или размягчения для нормально уплотненных или переуплотненных грунтов, нелинейной зависимости объемной деформации на эффективные средние напряжения и предельные условия идеальной пластичности. При использовании модели МСС грунт загружается и при сдвиге может быть пластическая деформация без распада (точки 1,2 для не затвердевания пункт 2 для размягчения) до достижения критического состояния (точки 3 и 2 для затвердивания и размягчения, соответственно). Почва деформируется далее в сдвиге при условии идеальной пластичности без изменения *е* и  $\sigma m^{eff}$ . После разгрузки, предполагается линейная реакция грунта.



Отображение функции текучести в меридиональных и девиаторных плоскостях

Развитие поверхности текучести (упрочнение/размягчения) управляется текущим значением давления предуплотнения *p<sub>c</sub>*:

$$p_{c}^{i+1} = p_{c}^{i} \exp\left[\frac{-\Delta \varepsilon_{v}^{pl}}{\lambda^{*} - \kappa^{*}}\right]$$

где: *р* 

текущее давление предуплотнения

приращение объемной пластической деформации

Помимо параметров *κ* и *λ*, собственный вес и коэффициент Пуассона, модель МСС требует указание следующих трех параметров:

- *M<sub>cs</sub>* Наклон критического состояния кривой [-]
- *ОСК* Отношение переуплотнения [-]
- е<sub>0</sub> Начальный коэффициент пористости [-]

Надежная инициализация модели описывается в разделе "Численные

### реализации моделей МСС и GCC"

Наклон критического состояния кривой *Mcs* может быть определена из выражения:

$$M_{cs}^{+30^{\circ}}(\varphi_{cv}) = \frac{2\sqrt{3}\sin\varphi_{cv}}{3-\sin\varphi_{cv}} ,$$
Для трехосного сжатия  
$$M_{cs}^{-30^{\circ}}(\varphi_{cv}) = \frac{2\sqrt{3}.\sin\varphi_{cv}}{3+\sin\varphi_{cv}} ,$$
Для трехосного расширения

где  $\varphi_{cv}$  является уголом внутреннего трения для постоянного объема, соответствующий критическому состоянию.

### Обобщенная модель Сат глина (GCC)

Эта представляет собой улучшеную модель значительно модифицированной Сат глины (МСС) модель, в частности, при моделировании почвы в сверхкритической области, см. рис, где поверхность разрушения классической Мора-Кулона, модели Друкер-Прагер подчиняется И модифицированной модели Мора-Кулона. В отличие OT модели модифицированной Сат глины (пунктирная линия), у графика модели GCC, как и у модели ММС, округлый треугольник в девиаторной плоскости. График модели МСС, как и у модели Друкер-Прагер, в виде круга. В докритическом области обе модели ведут себя одинаково. При разгрузке, линейная реакция почвы GCC учитывается. модель доступна только при завершении. Точная инициализация модели описывается в разделе "Численные реализации модели МСС и GCC".



Проекция текучести поверхности модели МСС и GCC в меридиональных и девиаторных плоскостях

Вещественные коэффиценты, необходимые для распространненой модели Сат глины идентичны материальным данным моделей МСС и ММС:

- к Уклон линии набухания
- λ Уклон нормали уплотнения (NCL)
- е<sub>0</sub> Начальный коэффициент проистости
- **OCR** Соотношение переуплотнения
- с Когезия
- *φ* Угол внутреннего трения
- $\varphi_{cv}$  Угол внутреннего трения при постоянном объеме [-]
- *v* коэффициент Пуассона

Параметры κ и λ можно рассчитать по\_следующим выражениям:

$$\lambda = \frac{C_{c}}{2,3}$$
$$\kappa = 1,3 \frac{1-\nu}{1+\nu} C_{s}$$

где: С<sub>с</sub> одномерный индекс сжатия

*С*<sub>*s*</sub> одномерный индекс увеличения

Эти параметры следуют из простого Одометр теста.

Как и в модели МСС формулировка модели GCC основана на соотношении между коэффициентом пористости (объемной деформации) и средним эффективным напряжением, как показано на следующем графике. Оба графика связаны следующим образом:



Реакция материала во время изотропного сжатия (материальное уравнение)

Развитие текучести поверхности (упрочнение / смягчение) приводится в действие под действием давления предуплотнения *p*<sub>c</sub>

$$p_{c}^{i+1} = p_{c}^{i} \exp\left[\frac{-\Delta \varepsilon_{v}^{pl}}{\lambda^{*} - \kappa^{*}}\right]$$

где:  $p_c^{i+1}$  Действие давления предуплотнения  $\Delta \varepsilon_v^{pl}$  Приращение объемной пластической деформации

# Численная реализация моделей МСС и GCC

Важным шагом, обеспечение надежного применения модели МСС и GCC, является определение первоначального давления предуплотнения  $pc^{in}$  и соответствующего модуля сжатия  $K^{in}$ . Эти два параметра, однако, непосредственно не задаются пользователем. Вместо этого они выводятся с помощью программы, основанной на предположении распределения начального геостатического давления. Напомним, три основных варианта для получения первоначального геостатического давления:

### 1. С использованием методики Ко

Применение методики *K<sub>o</sub>* дает следующее первоначальное значение среднего напряжения:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}\gamma h(1 + 2K_0)$$

где: Коэффициент давления грунта в состоянии покоя

у Объемный вес грунта

*h* Текущее значение глубины от уровня земли

Считая уплотнение нормальное, значение *pc<sup>in</sup>* определяется таким образом, чтоб усилия полученные с помощью методики Ко удовлетворяли следующему условию:

$$p_{\epsilon}^{in} = -\frac{J^2}{M_{\epsilon s}^2 \sigma_m} - \sigma_m$$

где: *M<sub>cs</sub>* - наклон линии критического состояния

J - эквивалент девиаторного давления

#### *от* - среднее напряжение.

Величины *J* и *от* определяются следующими выражениями:

$$\begin{split} S_{ij} &= \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} & \sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{ij} & \sigma_m = \frac{1}{3} \left( \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \right) \\ e_{ij} &= \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_v \delta_{ij} & S_{ij} = 2Ge_{ij} & J = \sqrt{\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}} \\ J &= GE_d & \sigma_m = K\varepsilon_v & e_v = \varepsilon_x + e_y + e_z \\ & E_d = \sqrt{e_{ij} e_{ij}} \end{split}$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} = \frac{GE}{3(3G-E)} = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)}G$$

- где: *E*<sub>d</sub> эквивалент девиаторного давления
  - *е*<sub>*ij*</sub> девиаторный тензор деформаций
  - *ε*<sub>*ij*</sub> общая тензор деформация
  - *ε*<sub>v</sub> объемная деформация
  - $\sigma_{ij}$  тензор напряжение
  - *s*<sub>ij</sub> девиаторный тензор напряжений
  - $\delta_{ii}$  дельта Кронекера
  - *D*<sub>*ijkl*</sub> тензор упругой жесткости
  - *G* модуль упругости при сдвиге
  - К эластичный объемный модуль
  - Е модуль Юнга
  - *v* число Пуассона

В случае трехосного сжатия или растяжения можно определить наклон кривой критического состояния  $M_{cs}$  из следующих выражений:

$$M_{cs}^{+30^{\circ}}(\varphi_{cv}) = \frac{2\sqrt{3}\sin\varphi_{cv}}{3-\sin\varphi_{cv}}$$
$$M_{cs}^{-30^{\circ}}(\varphi_{cv}) = \frac{2\sqrt{3}.\sin\varphi_{cv}}{3+\sin\varphi_{cv}}$$

В случае переуплотнения грунтов начальное значение *pc<sup>in</sup>* приводится как:

$$p_{c}^{in} = p_{c}^{in}OCR$$

Начальное значение объемного модуля следует из:

$$K^{in} = -\frac{1+e}{\kappa}\sigma,$$

где текущий коэффициент пористости е записывается в виде:

$$e = e_0 - \lambda \ln\left(p_{\epsilon}^{in}\right) + \kappa \ln\left(-\frac{p_{\epsilon}^{in}}{\sigma_m}\right)$$

Для малых напряжений  $|\sigma_m^{in}| < 1$  получим:

$$p_c^m = 1$$
$$K_{in} = -\frac{1+e^0}{\kappa}$$

### 2. Стандартный (эластичный) анализ

Напомним, что программа допускает для замены материала модели между стадиями строительства. В том случае, если процедуру Ко нельзя использовать, можно провести анализ в предположении упругой реакции глинистой почвы. Полученные напряжения используются для получения начальных значений  $pc^{in}$  и *k*<sup>in</sup> использующие ранее заданные выражения. В следующих этапах строительства оригинальная заменяется модель эластичного материала необходимыми МСС или GCС моделями.

### 3. Стандартный (пластичный) анализ

Эта опция позволяет грунту консолидироваться в предположении нелинейной зависимости при формировании геостатического давления. Это приводит к развитию пластических деформаций уже на первом этапе строительства. Как и в процедуре Ко рассмотрим правило консолидированного грунта, который, в ходе деформации, смещается ниже нормали консолидации с начальными значениями  $pc^{in}$  и  $K^{in}$  определяется по формуле:

$$p_{\epsilon}^{in} = 1$$
$$K_{in} = -\frac{1+e^0}{\kappa}$$

Перед следующим этапом анализа полученные пластические деформации считаются равными нулю. В отдельных случаях такой анализ может не сойтись.

#### Гипопластическая глина

Гипопластическая глина моделирования применяется ДЛЯ МЯГКИХ мелкозернистых грунтов . Подобно всем другим моделям это относится к семейству стандартных феноменологических моделей. Поскольку при описании реакции грунта он попадает в группу критического состояния моделей (Cam глины, Обобщенные Cam глины). Эта модель, однако, объясняет нелинейный отклик почв, как при нагрузке и разгрузке. По сравнению с другими моделями, основанными на теории пластичности, это позволяет при расчете только полных деформаций. Таким образом, нет никакой разницы между упругой и пластической деформаций. Индикация типа и расположения потенциального отказа, в других моделях предоставляемых графиком эквивалентной пластической деформации быть в случае гипоплазии глины, девиаторной, может представленного распределения мобилизованного угла внутреннего трения.

При описании реакции грунта, модель позволяет отражать другую жесткость в погрузке и разгрузке, смягчения или упрочнения в зависимости от уплотнения почвы и изменение объема при сдвиге (расширение, сжатие). В настоящее время жесткость зависит только от направления нагрузки, но также и от текущего состояния почвы, заданной пористости. В отличие от моделей Сат глины, он строго исключает растягивающие напряжения в почве, см. Рисунок 1а.



Рисунок 1: Форма границы гипопластической модели - (а) сравнение с поверхностью текучести модели Сат глины в меридиональной плоскости, (б) сравнение с поверхностью текучести модели Мора-Кулона в девиаторной плоскости

В случае гипопластической модели стандартная поверхность текучести заменяется так называемой границой состояния поверхности. Ее проекция в девиаторной плоскости похожа на модель, см. рисунок 1b. Это правило потока неассоциированных результатов в несимметричной матрице жесткости (ср. например с моделью Мора-Кулона, имея различные значения для угла внутреннего трения ф и угла расширение ψ). Подробности о модельном формулировки можно найти в [1].

### Параметры модели

Основной вариант модели требует ввода пяти материальных параметров:

- Угол внутреннего трения для постоянного объема (критический угол внутреннего трения) φ<sub>cv</sub>
- Наклон кривой набухания  $\kappa^*$
- Наклон нормали уплотнения (NCL нормаль уплотнения) λ\*
- Начало нормали уплотнения N
- Соотношение между объемом и модулем сдвига *r*

Параметры  $\kappa$  \*,  $\lambda$  \* и *N* определяют билинейную схему изотропного уплотнения в двойном логарифмическом масштабе, рисунке 2a. В том случае, если параметры билинейной Cam модели глины (в полулогарифмическом масштабе, 2б) доступны, можно ввести эти значения и параметры гипопластической модели снова рассчитfnm. Параметрамии билинейной модели Cam глины являются:

- Наклон кривой набухания к (в полулогарифмическом масштабе)
- Наклон нормали уплотнения λ (в полулогарифмическом масштабе)
- Коэффициент пористости *е<sub>max</sub>* для нормали изотропного уплотнения при давлении 1 кПа



Рисунок 2: Билинейные схемы изотропного уплотнения - (а) гипоплазия глины, (б) модель Сат глина

### Критический угол внутреннего трения осу

• Идентичный для исходного (невозмущенного) и восстановленного впоследствии уплотнения образца

• Может быть определен из стандартного трехосного испытания с применением различных давлений секций на восстановленный образец

• Оба дренирующий и недренирующий грунт (ускоренный) теста могут быть выполнены

• Наиболее распространенные значения находятся в диапазоне от 18  $^\circ$  - 35  $^\circ$ 

### Уклон нормали уплотнения λ\*

• Она определяется графически из линии нагрузки одометрического теста или изотропного теста уплотнения, см. рисунок 3

• Для жесткой глины является предпочтительным запуск теста на восстановленный образец

• Наиболее распространенные значения находятся в диапазоне от 0,04 - 0,15



Рисунок. 3: Моделирование одометрического теста с гипопластической моделью

### Наклон линии набухания к\*

• Она может быть определена аналогично тому, как параметр λ \* графически или путем выполнения параметрическое исследование - сравнение измерений и моделирования вдоль разгрузки линии одометрической или изотропного теста уплотнения, см. рисунок 3

• Наиболее распространенные значения к находятся в диапазоне от 0,01 - 0,02

• Соотношение  $\lambda/\kappa$  должна быть большой , чем 4,0

# Начало нормали уплотнения N

• Она определяется графически из нагрузки линии одометрического или изотропного теста уплотнения

• Испытание должно проводиться на ненарушенных образцах - при поиске пересечения лямбда соответствии с вертикальной осью, можно определить наклон лямбда полученный из восстановленного образца, см. рисунок 3

• Наиболее распространенные значения находятся в диапазоне 0.8 - 1.6

### Отношение объема и модуля сдвига г

• Физический смысл этого параметра определяется выражением r = Ki/Gi

- *Кі* соответствует касательной объемной упругости от изотропного сжатия в соответствии с нормалью уплотнения
- *Gi* соответствует касательной модуля сдвига к испытанию недренирующего грунта на сдвиг исходя из той же напряженного состояния
- Параметр *r* может быть определен путем параметрического исследования сдвига трехосным испытанием

• Наиболее распространенные значения находятся в диапазоне 0,05 - 0,7

# Настройка начального состояния грунта

При гипопластической глине текущее состояние почвы, связанное с текущим уплотнением, представленно коэффициентом пористости. Внедрение модели позволяет для ввода начального или текущего коэффициента пористости непосредственно или он может быть снова рассчитываться с использованием введенного давление предуплотнения *OCR*. В первом случае, введенное значение

 $e_0$  соответствует коэффициенту пористости, измеренной в незагруженном образце, извлеченного из заданной глубины. Во втором случае, введенный значение  $e_{curr}$  соответствует коэффициенту пористости напряженной почвы. В последнем случае, значение *OCR* указан. Этот параметр представляет собой соотношение между средней нагрузки на NCL и начальной среднего напряжения, см. рисунок 46.

При инициализации задачу с использованием процедуры К<sub>о</sub> начальное состояние напряжения в начале второй стадии присваивается текущее состояние давления. Если принять стандартный анализ на первом этапе (модель гипопластической глины вводится уже на первом этапе расчета), где почва загружается его собственным весом, значение начального напряжения pin = 1 кПа предполагается, и он держит  $e_{curr} = e_0$ . В том случае, если другой материал (например, эластичный материал рассматривается в первом этапе расчета) заменяется моделью гипопластической глины, начальное состояние напряжения, предыдущем принимается. Напомним, полученного на этапе ЧТО при использовании эластичного материала на первом этапе расчета полученный соответствует результатам, предусмотренных напряженного состояния процедурой Ко для *K*<sub>o</sub> (v коэффициент Пуассона).



Рисунок 4: Инициирование коэффициента пористости - (а) с помощью начального коэффициента пористости, (б) инициирование OCR

Как видно из рис 5, что для нормально уплотненных грунтов состояние, для которого OCR = 1.0 соответствует только изотропное уплотнение, таким

образом, для  $K_o = 1.0$ . Если почва испытывает ненулевое девиаторное напряженное состояние соответствующее *OCR* для нормально уплотненных грунтов превышает 1.0. Точное значение зависит как от параметров грунта и пути напряжения (величина  $K_o$ ). На рисунке 5 показана зависимость минимума для различных значений  $K_o$  и различных видов глинистых грунтов. Конкретные значения указаны в таблице 1. Основные параметры материала из этого набора грунтов приведены в таблице 2.

Выбор *OCR* = 1.0 для нормально уплотненных грунтов с *K<sub>o</sub>* не равным 1.0 создают неприемлемые напряженные состояния, что может привести к потере конвергенции.



Рисунок 5: Зависимость OCR от коэффициента давления грунта при покое K<sub>o</sub>

Грунт / К.	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0		
pym / Ko		OCR						
Лондонская глина (London clay)	1.309	1.174	1.059	1.011	1.000	1.0		
Лондонская глина (сведения по Гаспари)	1.394	1.159	1.033	0.994	0.995	1.0		
(London clay (data Gasparre)								
Глина Фудзиномори (Fujinomori clay)	0.886	0.859	0.898	0.950	0.987	1.0		

Метод конечных элементов	тод конечных эл	ементов
--------------------------	-----------------	---------

Грунт / Ко		0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
		OCR				
Боткеннарская глина (Bothkennar clay)	1.104	1.048	1.019	1.001	1.001	1.0
Пизанская глина (Pisa clay)	1.354	1.202	1.085	1.033	1.006	1.0
Бокерская глина (Beaucaire clay)	1.096	1.008	0.98:1	0.986	0.996	1.0
Каолин 1 (Kaolin 1)	1.249	1.123	1.051	1.017	1.003	1.0
Каолин 2 (Kaolin 2)	1.291	1.114	1.031	1.001	0.998	1.0
Коперская илистая глина (Koper silty clay)	1.081	1.021	1.001	0.997	0.998	1.0
Брнойская глина (Brno clay)	1.466	1.274	1.132	1.047	1.008	1.0
Европейский (Хадовка) суглинок	1.106	0.998	0.972	0.981	0.995	1.0
(Evropska (Hadovka) sandy clay)						
GEO МКЭ значения по умолчанию (GEO	1.275	1.132	1.052	1.010	1.1102	1.0
FEM default values)						

Таблица 1: Коэффициент переуплотнения OCR из выбранных грунтов в качестве значения функции Ко

Грунт	φ <sub>cv</sub>	λ	k	N	r
Лондонская глина (London clay)	22.6	0.11	0.016	1.375	0.4
Лондонская глина (сведения по Гаспари) (London clay (data Gasparre)	21.9	0.1	0.02	1.26	0.5
Глина Фудзиномори (Fujinomori clay)	34.0	0.045	0.011	0.887	1.3
Боткеннарская глина (Bothkennar clay)	35.0	0.12	0.01	1.34	0.07
Пизанская глина (Pisa clay)	21.9	0.14	0.01	1.56	0.3
Бокерская глина (Beaucaire clay)	33.0	0.06	0.01	0.85	0.4
Каолин 1 (Kaolin 1)	27.5	0.11	0.01	1.32	0.45
Каолин 2 (Kaolin 2)	27.5	0.07	0.01	0.92	0.67
Коперская илистая глина (Koper silty clay)	33.0	0.103	0.015	1.31	0.3
Трмицевская глина (Trmice clay)	18.7	0.09	0.01	1.09	0.18
Брнойская глина (Brno clay)	19.9	0.13	0.01	1.51	0.45
Европейский (Хадовка) суглинок (Evropska (Hadovka) sandy clay)	32.4	0.0411	0.0078	0.593	0.2
GEO МКЭ значения по умолчанию (GEO FEM default values)	27.0	0.1	0.01	1.2	0.4

Таблица 2: Параметры материалов отобранных грунтов

### Межкристаллическая деформация

Базовая версия модели пригодна при анализе с преобладающим направлением напряженного пути нагружения. В случаях с циклической нагрузкой (загрузка-разгрузка-перезагрузка) целесообразнее использовать

современную формулировку с понятием межкристаллической деформации. Это дает возможность ограничить нежелательный рост остаточной деформации, время небольших повторяющихся изменениях возникающие во нагрузки (прерывистое движение). Введение межкристаллического напряжения дает при моделировании большую жесткости, которую глины испытывают во время малых деформациях. Этот параметр не является частью на каких-либо других моделей, реализованных в ГЕО МКЭ. Понятие межкристаллической деформации предполагает, что общая деформация грунта состоит из небольшой деформации межкристаллического слоя (межкристаллическое натяжения) и деформации, вызванной взаимным скольжением частиц. Изменение пути нагрузки меняет сначала межкристаллическое напряжение. При достижении предельного значения межкристаллическое напряжения, деформация, связанная с движением зерен урегулируется.

# Принимая понятия межкристаллической деформации необходимо пять дополнительных параметров:

- Диапазон упругой межкристаллической деформации R
- Параметры *mR* и *mT* управляют небольшой жесткостью деформации
- Параметры β*r* и χ управляют степенью деградации жесткости с увеличением деформации сдвига

Эти параметры калибруются после осознания материальных данных основной гипопластической модели.

### Предел упругой межкристаллической деформации R

• Он определяет диапазон максимальной межкристаллической деформации

- Это Он может быть определен с помощью параметрического анализа кривой деградации  $G = G(\varepsilon s)$ , рисунок 5
- В качестве альтернативы можно рассматривать как независимую константу  $R = 10^{-4}$

• Наиболее распространенные значения находятся в диапазоне от  $2*10^{-5} - 1*10^{-4}$ 



Рисунок 6: Кривая, описывающая потери жесткости модуля сдвига

# Параметр *mR*

• Он определяет величину модуля сдвига при изменении пути нагрузки в меридиональной плоскости (*σm* - *J*) *о* 180°

• Линейное соотношение между параметром *mR* и начальным модулем сдвига *G0* обеспечивается  $G0 = p^*(mr/(r^*\lambda^*))$ 

• Первоначальный модуль сдвига может быть определен путем измерения распространения сдвиговой волны [2]

• Наиболее распространенные значения находятся в диапазоне 4.0 - 20.0

# Параметр *mT*

• Он определяет величину модуля сдвига при изменении пути нагрузки в меридиональной плоскости (*σm* - *J*) *о* 90°

• Он содержит *mR/mT* = *G0/G90* 

• Соотношение исходных модулей можно оценить из соотношения этих модулей для большей деформации.Значение коэффициента *mR/mT* обычно в диапазоне 1,0 - 2,0

• Наиболее распространенные значения *mT* в диапазоне 2.0 - 20.0

# Параметры βr и χ

• Определение скорости деградации жесткости с увеличением деформации сдвига

• Он может быть определен с помощью параметрического анализа кривой деградации  $G = G(\varepsilon_S)$ 

• Наиболее распространенные значения параметра  $\beta r$  находятся в диапазоне 0,05 - 0,5

• Наиболее распространенные значения параметра  $\chi$  находятся в диапазоне

#### 0.5 - 6

Литература:

[1] D. Mašín, A hypoplastic constitutive model for clays, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics., 29:311-336, 2005.

#### Модели материала в течении анализа

Устойчивый анализ состояния потока управляется законом Дарси с указанием взаимосвязи между скоростью потока и градиента гидравлического напора. Данная версия программы принимает постоянные значения коэффициентов проницаемости независимо от давления в порах.

Программа также требует задания начального коэффициента пористости  $e_0$  для определения текущей пористости п а впоследствии фактической скорости воды, протекающей только через поры  $v_s = v/n$ , где v средняя скорость потока через всю площадь фильтрации.

При введении относительного коэффициента проницаемости  $K_r$  программа позволяет для отслеживания переходной зоны между полностью насыщенной (S = 1,  $K_r = 1$ ) и ненасыщенной ( $K_r => 0$ ) областью тела почвы. В качестве примера мы можем рассмотреть проблему безнапорного потока. Процесс отслеживания переходной зоны регулируется одной из трех моделей переходной зоны, определяющих развитие относительного коэффициента проницаемости Kr в зависимости от напора пор, см. рис.



(а) Логорифмическая модель [1], (б) Модель Ван Генухтена [2]

#### Логорифмическая модель

Логорифмическая модель переходной зоны описаная, например, в [1] определяется по следующим параметрам:

- *h*<sup>*min*</sup> Минимальное значение пор давления главное в полностью насыщенной области [кПа]
- *h*<sub>TZ</sub> Ширина переходной зоны [*м*]
- *R* Параметр уменьшения, достаточно большое число R = 100 до 1000 [-]

Относительный коэффициент проницаемости Kr определяется по формуле:

$$K_r(h_p) = 10 \frac{(h_p - h_p^{\min}) \log R}{h_{TZ}}$$

# Модель Гарднера

Это является эквивалентной моделью зависящая от только одного параметра  $\alpha$  [1/m]. Относительный коэффициент проницаемости  $K_r$  в данном случае задается [4]:

$$K_r(h_p) = e^{\alpha \cdot h_p}$$

# Модель Ван Генухтена

В этом случае величина относительного коэффициента проницаемости *K<sub>r</sub>* определяется по формуле:

$$K_{r}(h_{p}) = \frac{\left\{1 - \left(\mathcal{S}|h_{p}|\right)^{n-1} \left[1 + \left(\mathcal{S}|h_{p}|\right)^{n}\right]^{-m}\right\}^{2}}{\left[1 + \left(\mathcal{S}|h_{p}|\right)^{n}\right]^{m/2}}$$

где  $\delta$  [1/m], n, m = 1 - 1/n параметры модели. Их значения могут быть получены из лабораторных измеренийсохраненных аппроксимируемых кривых:

$$S = S_{irr} + (S_{sat} - S_{irr}) \cdot \Theta$$
$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (-\delta|h_p|)^n}\right]^m$$

где:  $S_{sat}$  степень насыщения полностью насыщенного почвы, значение по умолчанию  $S_{sat} = 1$ 

 $h_{TZ}$  неприводимая степень насыщения, значение по умолчанию Sirr = 0

• нормальзованное содержание воды

Параметр  $\Theta$  в целом обеспечивается:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

где:  $\theta_r$  остаточное содержание воды  $[M^3/M^3]$ 

 $\theta_s$  содержание воды в полностью насыщенного почве [ $M^3/M^3$ ]

В настоящее время степень насыщения *S* может быть выражена как отношение содержания воды *θ* и пористости *n* следующим образом:

$$S_w = \frac{\theta}{n}$$

Логарифмическая и Гарднер модели принимают упрощенную версию модели Ван Генухтена соответствии с [5]:

Размар настин групта	RETC*				Rosetta			
тазмер частиц групта	$\theta_{S}$	θr	$\delta[m^{-1}]$	n [-]	$ heta_{S}$	θr	$\delta[m^{-1}]$	n [-]
Песок	0.43	0.045	14.5	2.68	0.375	0.053	3.5	3.180
Суглинистый песок	0.41	0.057	12.4	2.28	0.39	0.049	3.5	1.747
Песчанистый суглинок	0.41	0.065	7.5	1.89	0.387	0.039	2.7	1.448
Суглинок	0.43	0.078	3.6	1.56	0.399	0.061	1.1	1.474
Ил	0.46	0.034	1.6	1.37	0.489	0.050	0.7	1.677
Иловый суглинок	0.45	0.067	2.0	1.41	0.439	0.065	0.5	1.663
Песчаный жирный суглинок	0.39	0.100	5.9	1.48	0.384	0.063	2.1	1.330
Жирный суглинок	0.41	0.095	1.9	131	0.442	0.079	1.6	1.415
Илистые жирный суглинок	0.43	0.089	1.0	1.23	0.482	0.090.	0.8	1.520
Тощая глина	0.38	0.100	2.7	1.23	0.385	0.117	3.3	1.207
Илистые глины	0.36	0.070	0.5	1.09	0.481	0.111	1.6	1.321
Глина	0.38	0.68	0.8	1.09	0.459	0.098	1.5	1.253

$$\Theta = K_r$$

\* Конференция по скоростной экскавации и проходке горных выработок

Таблица с коэффициентами регрессии для размера зерен МСХ США в соответствии с Ван Генухтена (1991)

Размер части	ц почвы по данным ФАО*	$\theta_{S}$	θr	$\delta[m^{-1}]$	n [-]
Верхний слой	Грубый	0.405	0.025	3,83	1,3774
почвы	Средний	0.439	0,01	3,14	1,1804
	Средне-мелкий	0.430	0,01	0,83	1,2539
	Мелкий	0.520	0,01	3,67	1,1012

Размер частиц почвы по данным ФАО*		$ heta_{S}$	θr	$\delta [m^{-1}]$	n [-]
	Очень мелко	0.614	0,01	2,65	1,1033
Подстилающий	Грубый	0.366	0,025	4,3	1,5206
слои почвы	Средний	0.392	0,01	2,49	1,1689
	Средне-мелкий	0.412	0,01	0,82	1,2179
	Мелкий	0.481	0,01	1,98	1,0861
	Очень мелко	0.538	0,01	1,68	1,073
Минеральный г	рунт органического	0.766	0,01	1,3	1,2039
происхождения					

Метод конечных элементов

\* Организация ООН по вопросам продовольствия и сельского хозяйства

Таблица с коэффициентами регрессии для размер частиц ФАО в соответствии с Ван Генухтена (1998)

Литература:

Подробности можно найти в [2].

[1] D.M. Potts, L. Zdravkovič, Finite element analysis in geotechnical engineering – theory, Thomas Telford, London, 1999.

[2] M. Th. Van Genuchten, A closed formulation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Journal Soil Science Society of America 44, 239-259, 1988.

[3] M. Šejnoha, Finite element analysis in geotechnical design, to appear (2013)

[4] W. R. Gardner, Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation to evaporation from a water table, Soil Science **85(4)**, 228–232, 1958.

[5] I. Fatt, W.A. Kilkoff, Effect of fractional wettability on multiphase flow through porous media, Transactions, AIME 216, 426-424, 1959.

[6] USDA 1951. Soil Survey Manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook No. 18. US Government Printing Office. Washington DC.

[7] Wösten, J.H.M., et. al. 1998. Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation models in environmental studies and in land use planning. Final Report on the European Union Funded project. DLO Winand Staring Centre. Report 156, Wageningen, NL. p. 106. ISSN 0927-04537.

#### Коэффициент проницаемости

Способность пористого тела (грунта, горной породы) для транспортировки воды с заданными свойствами (например грунтовых вод) обозначается как просачивания. Количество воды, протекающей через определенной области могут быть представлены коэффициентом проницаемости. Коэффициент проницаемости представляет собой наклон линейной зависимости скорости потока воды от градиенты общего напора (градиент гидравлического напора) в законе Дарси записывается как:

$$\mathbf{v} = n\mathbf{v}_s = -K_r \mathbf{K}_{sat} \nabla h$$

где: V<sub>s</sub> скорость воды, протекающей через поры

п пористость

*K<sub>r</sub>* коэффициент относительной проницаемости

- *K<sub>sat</sub>* проницаемость кристаллической решетки сохраняет коэффициенты проницаемости полностью насыщенного почвы *kx*, *ky*, который может отличаться по отдельным координатным осям
- $\nabla h$  градиент полного напора

Гидравлический напор при заданной точке области течения определяется как сумма гидростатического давления и вертикальной координаты и в качестве такого оно определяет высоту воды в пьезометре в данной точке:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + y$$

где: <sub>у<sub>w</sub></sub> вес воды

Пример значения коэффициентов проницаемости для различных грунтов

Тип почвы	Коэффициент проницаемости <i>k</i> [ <i>м/день</i> ]	Движение частицы воды на 1 см для градиент гидравлического давления <i>i =</i> за 1 еденицу времени
Мягкий песок	10 <sup>2</sup> - 10	6 c – 10 мин
Глинистый песок	10 <sup>-1</sup> - 10 <sup>-2</sup>	100 мин – 18 часов
Жирный суглинок	10 <sup>-2</sup> - 10 <sup>-4</sup>	18 часов — 70 дней
Суглинок	10 <sup>-4</sup> - 10 <sup>-5</sup>	70 дней — 2 лет
Глинистый грунт	10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-6</sup>	2 лет – 20 лет
Глина	10 <sup>-6</sup> - 10 <sup>-7</sup>	20 лет - 200 лет

Есть несколько способов для определения коэффициента проницаемости *k*. Они сгруппированы следующим образом:

а) Лабораторные измерения

Несколько видов доступны для диапазона *к* 10<sup>4</sup> - 10<sup>-6</sup><sub>м</sub>/день.

б) Полевые измерения

Тесты выдержки или погружения, измерение скорости фильтрации потока,

для диапазона *k* 10<sup>6</sup> - 1*м/день*.

в) На основе эмпирических выражений

Подходит для несвязных грунтов, *k* 10<sup>6</sup> - 10 *м/день*, они дают только ориентировочные значения - например, по Терцаги:

$$k = 100 d_{10}^2 e^2$$

где: *k* коэффициент проницаемости [*см/с*]

*d*<sub>10</sub> эффективный диаметр твердой частицы [*см*]

е коэффициент пористости [-]

г) При расчете с зависимым от времени процессом уплотнения

Надо знать коэффициент уплотнение  $c_v$  и кривую уплотнения (полулогарифмическая зависимость деформации от времени). Это только косвенное определение из выражения:

$$k = \frac{c_v \rho_w g a_v}{1 + e_0}$$

где: *e*<sub>0</sub> начальный коэффициент пористости

*c*<sub>v</sub> коэффициент уплотнения

 $\rho_w$  объемная плотность воды

*g* ускорение свободного падения

*a<sub>v</sub>* коэффициент сжимаемости

### Базовые данные

Для всех материальных моделей задают базовые (основные) параметры грунта.

Объёмная сила тяжести (удельный вес) у – задаётся объёмная сила тяжести грунта выше уровня грунтовой воды, а объёмная сила тяжести грунта под У.Г.В. программой расчитывается по другим параметрам, задаваемым в секции «Противодавление».

# Модуль упругости Е

Модуль упругости описывает жёсткость материала, постоянную во всём диапазоне нагружения. В случае грунтов однако это предположение в силе только в диапазоне небольших деформаций (упругих деформаций). У нелинейных моделей после удовлетворения условию пластичности (изменения вязкости грунта) на поведение грунта не имеет модуль упругости *E* существенного влияния.

Вопрос который из модулей подходит данной материальной модели (начальный, касательный, секущий) и каково его значение не имеет однозначного ответа. Для выбора типа модуля необходимо знать поведение грунта в данной

геомеханической задаче, а для определения величины -итоги **трёхосевого** испытания для соответствующей траектории напряжения. Тем не менее ориентировочные рекомендации определять можно.

За модуль упругости Е можно в материальных моделях подставить:

•мгновенный модуль *E0* при расчётах небольших нагрузок (предполагается линейная зависимость деформация /напряжение) мгновенной осадки

•секущий модуль *E50* предназначен для эталонного напряжения равного 50% напряжения при разрушениях (применяется напр., для расчёта фундаментов неглубокого заложения)

•деформационный модуль  $E_{def}$  определяется из кривой нагружения нагружающего испытания, необходим у модифицированной линейной модели (которая различает разное поведение грунта при нагружении и при снятии нагрузки) – при использовании этого модуля в случае расчёта снятия нагрузки на грунт (напр., подземные сооружения, подъём дна котлована) будут получены деформации побольше, чем при использовании модуля упругости *Eu*, полученного из кривой снятия нагрузки *r* - действует приближённое отношение:

$$E_{ur} = 3.E_{def}$$

•здометрический модуль  $E_{oed}$ , который зависит от напряжения в грунте следовало бы подставлять в зависимости от ожидаемого диапазона напряжения в грунте – перевод между модулем деформации  $E_{def}$  и эдометрическим модулем *Eoed* описан отношением:

$$E_{oed} = \frac{E_{def}}{\beta}$$

$$\beta = 1 - \frac{2 \cdot v^2}{1 - v}$$

где: *v* Коэффициент Пуассона

*E*<sub>def</sub> Модуль деформации

•модуль упругости *E<sub>ur</sub>* выведенный из разгружающей кривой назначен для расчёта при разгрузке грунта (выемки) - его следует задавать в случае

модифицированной эластичной модели.

 $\mathcal{E}_{x}$ 

Значения модулей упругости лучше всего определять с помощью триаксиала. При использовании других методов (пенетрационные испытания, прессиометры и т.п.), необходимо применить коэффициенты корреляции, описание которых дано в специальной литературе.

При самом моделировании рекомендуется выполнить расчёт сперва с помощью эластичной материальной модели и проверить величину деформаций – согласно закона Гоока деформации прямоо пропорциональны нагрузке и заданной модели упругости. При **нереально больших** деформациях рекомендуем **пересмотреть величину заданного модуля упругост**и.

Коэффициент Пуассона *v* – или коэффициент поперечного сжатия в случае упругой однородной материи, к которой приложена нормальная нагрузка в одном направлении описан отношением:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$$

где: *ε*<sub>y</sub> Вертикальная относительная деформация

Горизонтальная относительная деформация

Коэффициент Пуассона можно определить сравнительно точно. Задавать можно с помощью встроенной в программу базы данных грунтов. При расчётах небольших нагрузок и подставке в расчёт начального модуля упругости *E0*, необходимо учитывать тоже коэффициент Пуассона  $v_0$ , определённый для начальной нагрузки.

#### Геостатическое напряжение, гидростатическое протидавление

Анализ напряжения основан на существовании слоев грунта, определенных пользователем на этапе ввода данных. Затем программа включает воображаемые слои там, где изменяются напряжение и сопутствующее давление (уровень грунтовых вод, точки конструкции и т.д.). Рабочее напряжение в i-ом слое рассчитывается по формуле:

$$\sigma_i = \sum h_i \cdot \gamma_i$$

где: *hi* толщина i-ого слоя

60

#### уі вес единицы грунта

Если слой находится ниже **уровня грунтовых вод**, вес единицы грунта ниже уровня грунтовых вод определяется с помощью введенных параметров грунта следующим образом:

• для опции «Стандартный» из выражения:

$$\gamma_{su} = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

где: *у<sub>sat</sub>* удельный вес насыщенного грунта

*у*<sub>*w*</sub> удельный вес воды

• для опции «Рассчитать из порозности» из выражения:

$$\gamma_{su} = (1 - n) (\gamma_s - \gamma_w)$$

где: п порозность

у удельная масса грунта

*у*<sub>*w*</sub> вес единицы воды

$$\gamma_s = \frac{G_d}{V - V_p}$$

где:	V	объем грунта
	$V_p$	объем пустот
	$G_d$	вес сухого грунта

Удельный вес воды принимается в программе равным 10 кH/м<sup>3</sup> или 0,00625 1000 фунтов/кв. дюйм.

Если поверхность за конструкцией имеет уклон ( $\beta \neq 0$ ), а слойный подгрунт имеет угол  $\beta$ , при расчете коэффициент давления грунта *K* уменьшается в i-ом слое по следующей формуле:

$$tg\beta_i = \frac{\gamma}{\gamma_i} tg\beta$$

где:  $\gamma$  удельный вес грунта в первом слое от поверхности

уі удельный вес грунта і-ом слое от поверхности

β наклон уклона за конструкцией

### Твёрдое тело

В рамке «Твёрдое тело» имеется таблица со списком заданных твёрдых тел.

Программа позволяет задавать твёрдые тела, входным параметром у

которых только объёмная сила тяжести (удельный вес) твёрдого тела. Материал тела рассматривается как **бесконечно твёрдый**. Такие тела служат прежде всего для моделирования массивных бетонных конструкций и стен не только в классических задачах, но также в задачах на устойчивость.

Добавление (правка) грунта выполняется в рамке «Добавление новых твёрды тел».



Рамка «Твёрдое тело»

Добавление новь	іх твёрд.тел	<b>—</b> ×
Идентификация		Отображение
Имя:	Твёрдое тело №. 1	Цвет
Базовые данные Удельный вес :	γ = 22,00 [KH/M <sup>3</sup> ]	Категория узоров GEO Узор
		Твёрдое тело Добавить Отмена



### Привязка

В рамке «Привязка» есть список слоёв (пластов) профиля (разреза) и присвоенных им грунтов. Список грунтов графически отображается при помощи кнопок в планке над таблицей, или к нему открыт доступ в выпадающем списке у каждого слоя (пласта) профиля.

Порядок привязки грунтов см. здесь.

Единственная разница между привязкой грунта в этой и остальных программах отражается на этапах расчёта. Грунты не присваиваются отдельным границам контуров, а областям, которые автоматически образуются после корректировки геометрии.

После изменения в присвоении грунта в топологии новая привязка автоматически передаётся во все области, расположенные в данном геологическом слое.



Программа позволяет импорт привязки грунтов в формате і gINT.

Рамка «Привязка»

# Типы контактов

В рамке «Типы контактов» находится таблица со списком заданных типов

контактов. Добавление (редактирование) контактов производится в рамке «Новые

### типы контактов».

Здесь даны определения типов контактных элементов, которые вводят в модель в рамке «Балки» и «Контакты». Контакт может быть упругого или нелинейного типов.



Рамка "Типы контактов"

Контактные элементы используют для расчётов, в которых должно быть учтено взаимное воздействие конструкции и окружающей её среды – они



Расположение контактных элементов при моделировании гравитационной стены Генерирование ограждающей конструкции моделированной балочным и контактным элементом представльют также удобное средство моделирования разрывов или же границ контуров двух совершенно разных материалов (грунт-породный массив). Типичный пример использования контактных элементов – моделирование ограждающих конструкций, опорных стен или туннельной обделки, где контактный элемент имитирует тонкую область грунта или породы, внутри которой происходит интенсивное нагружение преимушественно сдвигом.

Контакты можно задавать тоже самостоятельно между отдельными границами контуров грунтов.

Контактный элемент – это элемент нулевой толщины, отражающий взаимоотношение между контактным напряжением и относительным изменением перемещений вдоль контакта.

#### Контактные элементы

Контактные элементы могут иметь эластичную материальную модель (возможность изображения контактных напряжений при условии эластичного поведения контакта ), или пластичную материальную модель, основанную на условиях пластичности Мора-Куломба при исключении прочности на растяжение.

Пластичная модель подходит для моделирования сепарации конструкции в случае растягивающего нагружения. Для расчётов **ограждающих конструкций** необходимо всегда принимать только пластичную модель контакта.

Основными параметрами пластичной модели являются когезия c, коэффициент трения  $\mu$ , и угол дилатансии  $\psi$ . Параметры c и  $\mu$  можно задавать и посредством редукции параметров c и  $tan(\phi)$  грунта в контакте. В случае, что контакт происходит между двумя грунтами, то решающими для редукции будут меньшие из значений c и  $\phi$  обоих грунтов (пород).

Параметры контакта будут заданы отношениями:

$$c = \sigma_z . c_{zem}$$
  
 $\mu = \sigma_\mu . \tan(\varphi_{zem})$ 

При отсутствии позволяющей точно определить параметры редукции информации, для стальных конструкций в песчанных грунтах можно принимать 2/3, а для стальных конструкций в глинистых грунтах 1/3. У бетонных

конструкций обычно задают более высокие значения. В обычных случаях коэффициент редукции будет меньше 1. Угол дилатансии имеет подобное значение как в стандартных моделях грунта. Вводя  $\psi = 0$ , предполагаем эластичное поведение контакта при растяжении/сжатии. Пластическая деформация ограничится таким образом только сдвигом.

Следующими параметрами модели контакта - это **нормальная жёсткость** ks и **сдвигающая жёсткость** kn контактного элемента отнесённые к единице длины. Эти величины можно представить как жёсткость пружин в данной границе контура. Выбор адекватных параметров не прост, очевидна зависимость выбора от рассматриваемой проблемы. Выбирая значения величин ks и kn, можно в определённой степени руководствоваться образом, каким эти параметры связаны с материальными характеристиками стыкующихся грунтов. При условии, что стыкуется с обеих сторон тот же материал, можно использовать следующие выражения:

$$K_n = \frac{E}{t}$$
$$K_s = \frac{G}{t}$$

где:

*t* предполагаемая (фиктивная) толщина контактного слоя

G модуль упругости грунта при сдвиге

Е модуль упругости

В случае разных материалов (*E1*, *E2*, *G1*, *G2*) принимается более низкое значение ks и kn.

Хотя при полностью пластичном поведении контакта выбор параметров  $k_s$ и kn не имеет существенного значения, но величина его значений является решающей для успешного решения рассматриваемой нелинейной задачи. Завышенные значения жёсткостей (больше 100000  $kN/m^3$ ) могут приводить к осцилляции численного решения. Наоборот, заниженные значения параметров ks и kn (ниже 10000  $kN/m^3$ ) дают нереальные деформации конструкций.

Стандартная настройка жёсткостей в программе - 10000 kN/m<sup>3</sup>.

# Обделка

В рамке «Обделка» находится таблица со списком заданных обделок. Рамка в программе доступна если в рамке «Настройка» включен режим «Тоннели». Модуль «Обделка - МКЭ» упрощает работу при моделировании и размещении отдельных обделок тоннелей.

Для работы над обделками запускают самостоятельный модуль (приложение) «Обделка - МКЭ». Свободные точки, свободные линии, сгущение линий, анкеры, балки и нагрузка на балки созданные в данном модуле переносятся в программу МКЭ. В программе «**МКЭ**» эти элементы себя ведут стандартным образом, за одним исключением - их нельзя редактировать. Редактирование нужно выполнять только в модуле «Обделка - МКЭ».

Добавление (правка) обделки выполняется в модуле «Обделка - МКЭ». Работать можно в следующих режимах:

- Добавить Нажимая кнопку «Добавить», запускаем модуль «Обделка - МКЭ», в котором можно создавать новые обделки.
- Разместить Нажимая кнопку «Разместить», открываем диалоговое окно «Правка размещения обделки», в котором можно редактировать координаты размещения обделки. Менять размещение обделки можно в программе МКЭ, без использования модуля «Обделка МКЭ».

Правка размещения обделки	l.	×				
Размещение обделки						
Сдвиг:	x = -8,	00 [M]				
	z = 0,	00 [M]				
OK + ▲ OK + ▼	🗹 ок	🗵 Отмена				

Диалоговое окно «Правка размещения обделки»

• Править Нажимая кнопку «Править», запускаем модуль «Обделка -

МКЭ», в котором можно редактировать выбранные обделки.

• Удалить Нажимая кнопку «Удалить», открываем диалоговое окно для подтверждения удаления обделки – после подтверждения выбранная обделка удалена.

Обделку можно редактировать, размещать и удалять также с помощью мыши. Режим выбираем нажатием кнопок на горизонтальной строке «Обделка». После выбора режима левой кнопкой мыши выбираем обделку на рабочем столе. Далее поступаем способом, указанным выше. Порядок действий также описан в главе «Активные объекты».

# Модуль Обделка - МКЭ

Модуль «Обделка - МКЭ» упрощает работу при моделировании и размещении отдельных обделок тоннелей. Модуль имеет характеристики главной программы МКЭ. Модуль располагает режимом «Топология» и этапами проектирования. В режиме «Топология» находится модуль рамки «Свободные точки», «Свободные линии», «Сгущение линий» и «Настройка». Рамки доступные на этапах проектирования описаны в рамки режима этапов проектирования программы «МКЭ».



Рамка «Обделка»

Работу в модуле завершаем с помощью кнопки «**OK**», при этом созданные данные будут перенесены в программу МКЭ, или с помощью кнопки «**Выхо**д» - без перенесения данных.

Программа позволяет производить импорт данных в формате \*.DXF.

Данные модуля обделки можно самостоятельно сохранять и загружать в рамках этого диалога посредством стандартных операций «**Открой**» и «**Сохрани**». Таким образом можно просто переносить обделку между несколькимии решаемыми заданиями, или в рамке одного задания.

Если загружена обделка с меньшим количеством этапов, чем текущее состояние, оставшиеся этапы добавляются. Если загружен файл обделки с числом этапов больше, то такие этапы добавляются в диалог и впоследствии в главное окно. Данные диалога обделки нельзя считывать непосредственно в главном окне.

Метод конечных элементов



Модуль Обделка - МКЭ

### Свободные точки

В рамке «Свободные точки» находится таблица со списком заданных свободных точек. Операции над свободными точками соответствуют операциям в программе «МКЭ» в рамке «Свободные точки».

Рамка отличается функциями на горизонтальной строке, на которой находятся кнопки «Генератор форм обделки» и «Генератор заанкерованных областей». Функция кнопки «Диапазоны» идентична с программой «МКЭ», в рамке «Граница контура».

### Свободные линии

В рамке «Свободные линии» находится таблица со списком заданных свободных линий. Операции над свободными линиями соответствуют операциям в программе «МКЭ» в рамке «Свободные линии».

Рамки отличается функциями на горизонтальной строке, на которой находятся кнопки «Генератор форм обделки» и «Генератор заанкерованных областей».

Метод конечных элементов

_		
0	Odganna MKP - MKG	- <del>2</del>
20	Ал Издененка Здалние Настройка Справка	
1	🖬 🗤 🗤 🖓 🗞 🔍 🤤 🗄 🕂 🛄 🖾 💭 🐯 georologuesee	
эт	n npoekrijosana i 🛞 🗏 [[1]	
	-1.01 0.00 1.01 2.00 3.00 4.00 5.00 0.00 7.00 0.00 5.00 5.00 5.00 12.00 4.00 5.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 2.00 2.00 2.00 2	Percent
8.		Cooli Town
1		/ Croft games
8.		В Стидение диний
9-		В Настройка
183		
83		
8-		
1	1 2	
183	[8, 92; -0, 03] [18, 72, -0, 08]	
ş-1		
9		
2		
183		
왕		
	3	
10	(B.365.14) (B.365.14)	
83	[AL, 49 (AL)	
3		
23		
0.0		
10		
13		
2		
1	Длагазоны Свободные точке: 🛞 добакть 🕐 Правть 🚍 Удалить 🖉 Генератор форм обделки 🦉 Генератор завекироваених областей	
	8 8 Partneres. // / / / / / / / / / / / / / / / / /	
	N <sup>0</sup> x [4] z [4]	
	1 9,42 -0.05	
ō	2 29.72 - 10.08 2 3.836 - 5.14	Управляение _
104	+ 4 20,34 -5.23	E ok
8	•	🛛 Отнена
		,

#### Рамка «Свободные точки»



Рамка «Своободные линии»

# Сгущение линий

В рамке «Сгущение линий» находится таблица со списком заданных сгущений свободных линий. Операции над сгущениями свободных линий соответствуют программе «МКЭ» в рамке «Сгущение линий».



Рамка«Сгущение линий»

# Настройка

В рамке «Настройка» можно изменить расположение точки, которая впоследствии помещена в главное окно программы МКЭ. Положение точки можно определить на выбранную свободную точку, начало системы координат или на любые координаты.Таким способом можно точно поместить данную точку конструкции обделки в главное окно программы «МКЭ».

В правой части рамки можно активировать второй тубус. Второй тубус в рамке «**Настройка**» отобразится для просмотра, а дальше только после переноса данных в программу «**МКЭ**». Второй тубус – это клон заданной обделки, разница только в его расположении относительно первоначально заданной конструкции.
Метод	конечных	элементов
-------	----------	-----------

Jágansa MKP - MKG	
іл Изденення Здрание Настройка Справка	
🖬 🗤 🗤 🗤 🗞 🙉 🤐 🤯 🔂 🛄 🖾 🖾 🥸 🖉 Orošpanesec	
л проектирование I 🛞 🗏 [[[fore]] [1]	
	Image: Procession         ✓ Ceods. Torkow           ✓ Ceods. Torkow         ✓ Ceods. Torkow           Image: Ceods. Torkow         Image:
Позиции разледаетой точкие плаеной консонтальной переог         р/         Вузорой тубур           Начало состельногординат         Разледаеное понсонтальной переог         ×         0,00 [k]           x:         0,00 [k]         z:         0,00 [k]	Versenander
r: [6] 00,0	Ci cu
	EI OK
	Отнена

Рамка «Настройка»

# Генератор форм обделки

Генераторы создают в соответствии с параметрами соответствующие элементы, работа над которыми дальше ведётся самостоятельно, без возможности изменять параметры. Если параметры генерации корректны, то в ходе их редактирования отображается текущий графический вид сгенерированных элементов.

В диологовом окне «Создать форму обделки» происходит генерация свободных точек и свободных линий из шести базовых форм обделки. Каждую форму определяет несколько параметров (диаметры, углы, высота, шаг, количество делений, контрольные точки).

В закладке «**Нижняя** дуга», задавая параметры углом или радиусом, определяем каким будет дно обделки – ровным или дугообразным

В закладке «**Расположение**» можно с помощью координат изменить расположение обделки.

Метод конечных элементов



Диалоговое окно «Создать форму обделки» - закладка «Основная форма»

Создать форму обделки	
Основная форма Нижняя дуга	Расположение
Геометрия нижней дуги	Η ΗΟΚΗΝΗ ΑΥΓΑ         Η ΙΟΚΗΝΗ ΥΓΟΛ         R:       0,00         β:       0,00
	💽 Добавить) 🗵 Отмена

Диалоговое окно «Создать форму обделки»- закладка «Нижняя дуга»

Создать форму обделки	
Основная форма Нижняя дуга Расположение	
Расположение x: 0,00 [M] z: 0,00 [M]	
	• Добавить

Диалоговое окно «Создать форму обделки» - закладка «Расположение»

# Генератор заанкерованных областей

Генераторы по заданным параметрам создают соответствующие элементы, над которыми ведётся работа уже самостоятельно, без возможности задним ходом менять их параметры. Если параметры генерации корректны, то в ходе их редактирования отображается текущий графический вид сгенерированных элементов.

Создать заанкеров.область							
Параметры заанкер.области							
Свобод.линия	№ 3 (дуга)						
Тип:	Вдоль всей л	инии					
Длина анкеров	:	3,00	[M]				
Начальный уго	л:	0,00	[°]				
Угол сегмента	:	0,00	[°]				
Расстояние от	начала ;	0,00	[M]				
Длина сегмент	a ;	0,00	[M]				
Обратная ориентация							
		💽 Доба	вить	🗵 Зав	ершить		

В диалоговом окне «Создать заанкерованную область» идёт генерация свободных точек И свободных линий, но на основании уже заданных линий. В результате получаем замкнутую область, «МКЭ» которой В программе присваивается специальный грунт, характеризующий область с плотной анкеровкой. В диалоговом окне

Диалоговое окно «Содать заанкерованную область»

задают номер линии и параметры соответствующие типу заанкерования (вдоль всей линии, угловой сектор, начало и длина).

## Этапы проектирования

Этапы проектирования в модуле «Обделка - МКЭ» и в программе МКЭ идентичны, только работа над ними отличается в некоторых пунктах.

Разница в поведении этапов в модуле «Обделка - МКЭ»:

• можно переключаться в этапы проектирования из режима «Топология» без генерации сетки

• зтапы проектирования, которые добавляются в модуле «Обделка - МКЭ» после подтверждения изменений, передаются тоже в программу «МКЭ»

• зтапы проектирования, предшествующие этапу, на котором модуль «Обделка - МКЭ» был запущен, не имеют к себе доступа

• зтапы проектирования заданные перед пуском модуля «Обделка - МКЭ», не поддаются удалению



Задание заанкерованной области

### Свободные точки

В рамке «Свободные точки» находится таблица со списком заданных свободных точек. Добавление (редактирование) свободных точек производится в рамке «Создать свободные точки».

Свободные точки можно задавать также с помощью мыши. Режим ввода задаём нажатием кнопок «Свободные точки» на горизонтальной строке. Предлагаются режимы:

- Добавить Кликом левой кнопки мыши на рабочий стол задаём расположение свободной точки.
- Править Кликом левой кнопки мыши на точку открываем диалоговое окно «Правка свойств свободной точки» и отредактируем параметры.
- Удалять Кликом левой кнопки мыши на свободную точку открываем диалоговое окно с подтверждением удаления свободной точки после подтверждения стирается свободная точка.

Заданные свободные точки можно редактировать на рабочем столе с помощью активных объектов.

Программа позволяет задавать любое множество свободных узлов в любом месте конструкции или вне конструкции. Свободные точки выполняют несколько основных функций :

• узлы для определения конструкции (выработки, обделки, ограждения, балки)

- вспомогательные точки вокруг которых будет выполнено сгущение сетки
- точки, в которых будут определены краевое условие, силы и т.п.

В свободный узел внутри или с края заданной конструкции, генератор сетки автоматически помещает узел сетки. Таким способом можно вручную редактировать сетку, или с помощью этого приёма создать модель своей пользовательской сетки.



Рамка«Свободные точки»

#### Метод конечных элементов



#### Сетка сгенерирована без свободных точек



Сетка со свободными точками

# Свободные линии

В рамке «Свободные линии» находится таблица со списком заданных

свободных линий. Добавление (редактирование) свободных линий производится в рамке «Новые свободные точки».

Линии задают **между отдельные точки** (отрезки, дуги, окружности) или вокруг отдельных точек (окружности). Линии задают как между свободные точки, так между точки границы контуров или территории (профиля).

Линии могут произвольно соприкасаться или пересекаться – точки пересечения заданных линий программа автоматически находит при корректировке заданной геометрии. На свободные линии можно задавать балочные элементы.

Свободные линии можно вводить тоже **мышью**. Режим ввода с помощью мыши задаём нажатием кнопок на горизонтальной строке «Свободные линии». Выбираем режим:

- Добавить Кликом левой кнопки мыши на рабочий стол задаём расположение свободной линии.
- Тип линии В выпадающем списке выбираем тип нужной линии (отрезок, дуга, окружность).
  - отрезок Кликом левой кнопки мыши на точки задаём расположение линии.
  - В выбираем - дуга выпадающем списке способ задания дуги (третья точка, центр, радиус, высота, образ.угол) и кликом левой кнопки мыши на рабочий стол задаём точки, определяющие дугу. Если дугу задаём с помощью центра, радиуса, образования угла, то в выпадающем списке выбираем знак направления (положительный, отрицательный).
  - окружность В выпадающем списке выбираем способ задания окружности (центр,радиус, три точки) и кликом левой кнопки мыши на рабочий стол задаём точки, определяющие окружность. В выпадающем списке выбираем знак направления

79

(положительный, отрицательный).

- Править Кликом левой кнопки мыши на точку открываем диалоговое окно «Правка свойств свободной точки», в котором можно редактировать параметры.
- Удалять Кликом левой кнопки мыши на свободную точку открываем диалоговое окно для подтверждения удаления свободной точки после подтверждения свободная точка удалена.

Заданные свободные линии можно отредактировать также на рабочем столе с помощью активных объектов.



Рамка«Свободные линии» – разные типы свободных линий

# Сгущение точек

В рамке "Сгущение точек" находится таблица со списком заданных сгущений точек. Добавление (редактирование) сгущения точек производится в рамке "Создать сгущения точек".

Сгущение сетки конечных элементов вокруг точек - важный вспомогательный инструмент для построения адекватной сетки конечных элементов. Сгущение можно выполнять вокруг свободных точек, а также точек границ контуров или территории (профиля).

Сгущение точек можно задать тоже **мышью**. Режим ввода с помощью мыши задаём нажатием кнопок на горизонтальной строке "Сгущение точек". Выбираем режим:

- Добавить Кликом левой кнопки мыши на рабочий стол определяем точку для сгущения. В диалоговое окно "Создать сгущение точек" вводим параметры сгущения.
- Править Кликом левой кнопки мыши на сгущенную точку открываем диалоговое окно "Правка свойств сгущений точки": в нём можно редактировать параметры.
- Удалить Кликом левой кнопки мыши на сгущённую точку открывается диалоговое окно, подтверждающее удаление сгущения точек после подтверждения сгущение точек удалено.

Заданное сгущения точек можно редактировать на рабочем столе с помощью активных объектов.



Рамка"Сгущение точек"

# Сгущение линий

В рамке «Сгущение линий» находится таблица со списком заданных сгущений линий. Добавление (редактирование) сгущений линий производится в

Создать сгущ.точек						
Точка						
Источник точек :	свободные то	очки				
Свободная точка Сгущение	Nº 1(-8,69;	-10,44)				
Радиус действия :	r	=	1,00	[M]		
Длина :	1	=	0,30	[M]		
	C	🗈 Добавить		Отмена		

рамке «Создать сгущенные линии».

Сгущение сетки КЭ вокруг линий - важный вспомогательный инструмент для построения адекватной сетки конечных элементов. Сгущение можно проводить вокруг свободных линий а

Диалоговое окно "Создать сгущения точек

также линий границ контуров или территории (профиля).

Сгущение линий можно задать тоже **мышью**. Режим ввода с помощью мыши задаём нажатием кнопок на горизонтальной строке «Сгущение линий». Выбираем режим:

- Добавить Кликом левой кнопки мыши на рабочий стол на линии, где должно быть сгущение. В диалоговое окно "Создать сгущене линий " вводим параметры сгущения.
- Править Кликом левой кнопки мыши на существующую сгущённую линию открыть диалоговое окно «Правка свойств сгущения линий», в котором можно параметры отредактировать.
- Удалить Кликом левой кнопки мыши на сгущённую линию открывается диалоговое окно для подтверждения удаления сгущения линии – после подтверждения сгущение линии удалено.

Заданные сгущения линий можно редактировать на рабочем столе с помощью активных объектов.

GE05 v17 - MK3 (CAUsers)Public(Documents)Fine)GE05 v17 Pfildady/Demo01.gmk *)				
Файл Издинения Зддание Изображения Настройка Справка				
🗅 🚅 📓 🗠 • 🗤 🖏 🎭 🐚 🍭 Q 🤯 🔶 🖽 🗮 🖸 🖏 🜉 Drofpers	anna Illafinon DOF : 🕑 Peconaria 🕽	E Damm.		
Этап проектарования : 🗶 😑 [Toro] [1] [2] [3]				
500 400 300 -200 400 000 100 200 300 400 500	5.08 7.08 5.80 5.80 18.08	1 FUIO 12-00 F3-00 T4-00 T4-00	. M300 TTXT	
				1 marca -
		1		ji ipoliki Museu žes
		i	<b>`</b>	y nacipova
			4	Пран. контура
		i		Грунты
				Твёрдые тела
		i i		Присязка
				🖲 Типы контактов
1월 2일 : 1월 2일 <sup>-</sup> 일말 일말 가 드러 있다. (1월 2일 - 1월 22 - 19 22 - 19 22 - 19 22 - 19 22 - 19 22 - 19 22 - 19 2 - 19 20 - 19 20 - 19 20 - 19 20 - 19 20 - 19 20 - 19 20 - 19 20 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 -	이야기 소리 아파 아파 가	그는 그는 그는 그는 그는		C005.T0494
ويتبيهوه بمتراجع بالمتواجين والمتروكين والمتار والمتار والمتار والمتار والمتار والمتار	وللدية بمادة المساية المساية الم		1 and 1	C005.0444
승규는 학교에 관계	지금 가슴 가슴 가슴 가슴	+ $     -$	6	Огушение точек
전문 방법이는 아프가 물건을 가 많을 것을 수 있는 것을 것을 수 있는 것이 없다. 이 하는 것을 수 있는 것을 수 있다. 것을 것 같이 것 같이 않는 것을 수 있는 것을 수 있는 것을 수 있는 것을 수 있는 것이 없다. 것을 것 같이 같이 같이 않는 것 않는 것 같이 않는 것 않는	국가는 가는 가는 것은		6	Э Огушение линий
지난 귀엽 가면 가지 않는 것 같 것 같 것 같 것 같 것 같다.	이 집에 가지 않는 것이 없다.	리고 한 번 한 번 한 것 같 것 같	10	Пенерирование сетки
요즘 소리수가 수가 보지보지 수가 소재요가 수가 보기	김 의장 의장 의장 실장 :	부장 노장부장 수장 소장		
아님이 물다 물란을 만들었는 것을 가득하는 것을 가득했다.	그는 그는 것은 것은 것을 했다.	나는 아는 아는 아는 아는		
"아파 동안 모양 아파 집에 집에 가지 않는 것이다.	じたいだいたいてい	이 아이는 아들이 많다.		
다 집 방법방법이 가지 않는 것이 가지 않는 것 같아.	ದ ವರ್ಷವರ್ಷ ವಿಶ್ವಾಸಕ್ಕೆ	いたいさいたいさい		
(고) (고) (고) (고) (고) (고) (고) (고) (고)	한 가 봐 주 가 다	요구 전기 전기 전기 전기		
승규는 방송 방송 방송가 의견의 것은 가슴 감옥 방송가	(승규는 것은) 승규가 생	- 이슈이슈이슈 아슈이		
동안들이 물건을 만들는 물건을 가들고 물건을 만들었다.		사용가 공가 공기를 제		
승규는 수가 물건을 잘 못 하는 것 같아. 여러 가슴 가슴 것을 못 수 있는 것을 가 없는 것을 가 없다.	지금 가득 가득하는 것			
승규는 가슴이 물려 들어 물리 물리 물리 물리 물리 물리	아프라 물이 운영을 했다.	비사는 사람이 문제		
승규는 사람이 물러 부가 물러 가지 않는 것 같이 있다.	していたりでもてくた	1977년 전 17 17 1		
Стущение линий   В добавить В Править В Удавить				
Instances I Instances	Descent of America		Contamét	
N2 INCOME.	r [n]	10	(W. dofer	
1 Граница контура № 1, лания № 2.	1,00	0,50	Con Margare	
			В Править Ри	CYTRM
5			🗏 Хаалиты 👔	Добевить рис.
				NAMES IN COLUMN 2
24500			80	ero i
		-	- 0	
			and the second sec	arrow barrier and

Рамка «Сгущение линий»

## Генерация сетки

В рамке «Генератор сетки» в левой части находится исходная настройка

Создать сгущение	линий			×
Линии				
Источник линий :	грани	ца контура 1		
Линии границы ко	Nº 2			
Сгущение				
Радиус действия :		r =	1,00	[M]
Длина :		=	0,50	[M]
		💽 Доб	авить	Отмена

Диалоговое окно «Создать сгущенные линии»

для генерирования сетки, а в правой части – поле отображающее информацию о сгенерированной сетке.

#### Успешной генерацией сетки

завершается работа над топологией конструкции – дальше идёт создание модели, расчёты отдельных этапов проектирования. Программа,

генерируя сетку, сгенерирует автоматически и стандартные краевые условия. Информация о сгенерированной сетке будет отображена в правом нижнем окне вместе с предостережением о проблемных местах.

Правильно сгенерированная сетка конечных элементов - основная предпосылка получения корректных результатов. В программу GEO МКЭ встроен

автоматический генератор сетки, который в значительной мере облегчает эту задачу. Однако необходимо соблюдать определённые правила:

• Основную плотность сетки задают в окне «Генератор сетки». Чем плотнее сетка, тем точнее результаты будут получены, однако будет значительно замедлён расчёт и вырисовка задачи. Следовательно, нужно находить оптимальную плотность сетки, что прежде требует опытность пользователя. В начале можно присматриваться к сеткам сгенерированным в ранее решаемых задачах.



Рамка «Генерация сетки» – сетка без локального сгущения

•Сетка конечных элементов должна иметь адекватную плотность, прежде всего в тех местах рассматриваемой области, в которых можно предполагать большие градиенты напряжений (сосредоточенная опора, острые углы, выработки и т.п.). Сгущение сетки можно задать вокруг отдельных точек или линий. Необходимо, чтобы радиус сгущения составлял по крайней мере 3-5 кратную плотность в центре сгущения и чтобы оба значения в точках (плотность, радиус действия) были в разумном сооношении с плотностью сетки, заданной для соприкасающейся области. Этим можно гарантировать плавный переход между областями с разной плотностью. Аналогичным образом нужно обращаться с сингулярными линиями. У более сложных задач целесообрано предварительно рассчитать грубую сетку КЭ и на основании результатов анализа создать локальное сгущение сетки.

Программа стандартно работает с шестиузловыми треугольными элементами с автоматическим сглаживанием сетки. Это гарантирует точность

Создать сгущение линий						
Линии						
Источник линий :	свободные линии					
Свобод.линия:	№ 1 (окружность)	•				
Сгущение						
Радиус действия :	r = 3,00	[M]				
Длина :	l = 0,30	[M]				
	💽 Добавить	Отмена				

Задание сгущения сетки вокруг круговой линии

результатов, которая была бы получена у сетки плотностью примерно вдвое больше построенной из классических трехузловых треугольников.

Для исследовательских целей и наладок программа оставляет возможность проводить расчёты с классическим треузловым треугольником (кнопка

"Многоузловые элементы"). Кнопка доступна только в режиме «Расширенный ввод». Расчёты на устойчивость можно выполнять только с шестиузловым треугольником. Для расчётов нелинейных задач следовало бы использовать исключительно эти элементы.

В режиме «Расширенный ввод» программа позволяет генерацию смешанной сетки (треугольники и четырехуглоники).



Новая сетка после сгущения вокруг круговой линии

### Генератор сетки - предостережения

В окошке «Предостережения-возможны проблемные места на конструкции» пользователя предупреждают о критических местах для генератора сетки. После наводки курсора на предостережение соответствующее место на конструкции отобразится красным цветом. Производится контроль:

• расстояния двух узлов – оно должно быть больше чем одна десятая (1/10) длины ребра сетки

• расстояния узла от линии – оно должно быть больше чем одна десятая (1/10) длины ребра сетки

- величины поверхности области должна быть больше квадрата длины сетки
- узлы, линии должны находиться внутри конструкции (грунта)

Предостережения предупреждают о местах, на которых могут быть сложности при генерации сетки. В таких случаях существуют два варианта:

• сетка не сгенерируется => и необходимо скорректировать задание

• сетка сгенерируется => и пользователю самому нужно решать насколько адекватна сгенерировання сетка - в любом случае на предостережение можно не обращать внимания и продолжать вычисления



Предостережение о критических местах на сетке КЭ

#### Метод конечных элементов



Критическое место после увеличения – две точки очень близко друг к другу

# Корректор заданной геометрии

В программу встроен **автоматический корректор заданной геометрии**, т.е. перед генерацией сетки КЭ программа находит пересекания линий, все замкнутые области и строит адекватную модель.

Вновь созданные области программа или удаляет из расчёта, или присваивает им новый грунт. Преимущества такой системы пользователь осознаёт прежде всего при расчётах туннелей и конструкций с креплением. Задавать даже очень сложную конструкцию не представляется сложным и не занимает много времени.

После автоматической корректировки некоторые точки сети могут оказаться на очень близком расстоянии друг от друга, т.е. могут образоваться достаточно малые области. В таком случае программа выдаёт предостережения в правом нижнем окне.

#### Стандартные краевые условия

В программу встроен автоматический генератор краевый условий, т.ч. в обычных задачах пользователю вообще не надо краевыми условиями заниматься.

Стандартная настройка краевых условий:

•несдвигающийся шарнир в узлах сетки на нижнем горизонтальном крае

•сдвигающийся шарнир в узлах сетки на вертикальном левом и правом краях



Области для выполнения автоматической корректировки



Стандартные краевые условия

# Программа МКЭ - Этап проектирования

После задания топологии конструкции и сгенерирования сетки конечных элементов собственно вычисления выполняются на этапах проектирования. Для переключения между этапами и режимом "Топология" служит кнопка на горизонтальной строке управления.



режимом "Топология" и этапами проектирования

Этапы проектирования конструкции соответствуют последовательности возведения объекта, следовательно очень важно правильное задание и увязка этапов. Расчёт каждого этапа (кроме расчётов на устойчивость) исходит из результатов предшествующего

этапа. Между отдельными этапами сохраняется информация об объектах и их свойствах - при редактировании или задании этапа применяется правило наследственности свойств.

В некоторых рамках («Вода», «Активация», «Привязка») в правой части строки находится кнопка «Принять». Кнопка становится активной в момент когда заданные в рамку данные не соответствуют данным предшествующего этапа. После нажатия кнопки эти данные («Вода», «Активация») заимствуются от предшествующего этапа.

	Задание во	оды отличается от преды	цд.этапа		
		То	чки У.Г.В		
		x [M]	z [M]		Точка:
	1	-15,00	-9,92	*	🖷 Добавь
	2	-0,54	-11,17		
	3	10,73	-10,99		🕐 Править
	> 4	15,00	-10,41		
<u>e</u>					В удалить
凝				Ŧ	

Чтобы изменить установленное данные - передача данных из предыдущей фазы строительства

массиве, а не деформацию.

Первый этап проектирования (расчёт геостатического напряжённого состояния) представляет первоначальное состояние массива ДО начала строительных работ – т.е. результат расчёта показывает напряжение В Проблемой при расчётах по методу конечных элементов иногда становитсянеконвергенция некоторого этапа проектирования. Отсутствие результатов одного из этапов не позволяет продолжать расчёт последующего этапа. Для правильного моделирования рекомендуем соблюдать рекомендуемую последовательность моделирования объекта.

### Активация

Программа позволяет убирать (деактивировать) грунт в отдельных областях. Допустим, расчёт касается насыпи: задаём его топологию и для первого этапа отмечаем его неактивность. Подобным образом поступаем при разработке тоннеля или ограждающих конструкций. В случае, что неактивная область находится ниже уровня грунтовой воды нужно очень аккуратно задавать данную область или моделировать её края.



Моделирование насыпи – 1-й этап проектирования

Насыпь будем активировать только на последующих этапах проектирования.

#### Метод конечных элементов



Моделирование – активация тела насыпи

Используя буфер Geo, копируем границы контура текушего профиля и переносим их в другую программу. Программа сама автоматически отредактирует скопированные границы так, чтобы они соответствовали требованиям 2D профиля, задаваемого сверху вниз.

# **GWT** Активность областей ниже УГВ

В случае, что деактивированная область находится ниже УГВ, могут иметь место два случая:



Распределение поровых давлений после удаления грунта из области ограниченной активными балками

 Деактивированная область полностью замкнута балками. В таком случае предполагаем водонепроницаемость балки и грунт удаляем вместе с водой (убираем полное напряжение – неактивная

область не затоплена водой). Учитывая водонепроницаемость балочных элементов, распределение поровых давлений не меняется, см. рисунок.





2) Удаляемая область не замкнута балками. В таком случае предполагаем, что в данной области воздействие воды продолжается и Такое после удаления грунта. состояние очевидно по расположению поровых давлений на рисунке.

Воздействие воды аннулируем путём изменения уровня грунтовой воды.

# Привязка

В рамке «Привязка» находится список слоёв профиля и присвоенных им грунтов. Его функция аналогична как в случае присваивания грунтов при вводе топологии конструкции.

На этапах проектирования грунты присваиваются уже не отдельным границам контура, а областям, которые автоматически появились после коррекции геометрии при генерации сетки конечных элементов.



Рамка «Привязка»

### Обделка

В рамке «Обделка» находится таблица со списком заданных обделок. Доступ в рамку в программе открыт только при включенном режиме «Тоннели» в рамке «Настройка» На этапах проектирования обделку можно только редактировать.

Для редактирования обделки запускается модуль «Обделка - МКЭ», функции которого подробно описаны в режиме «Топология». На этапах проектирования в модуле «Обделка-МКЭ» находятся рамки «Балки», «Анкеры» и «Нагрузка на балки».

#### Балки

В рамке «Балки» находится таблица со списком заданных балок. Операции над балками соответствуют операциям на этапах проектирования в программе МКЭ в рамке «Балки».

Типы контактов для определения контактов на балках заимствуются в программе МКЭ.



Рамка «Обделка»

Метод конечных элементов



Рамка «Балки»

# Анкеры

В рамке «Анкеры» находится таблица со списком заданных анкеров. Операции над анкерами аналогичны операциям на этапах проектирования в программе МКЭ, в рамке «Анкеры».

Отличается рамки функцией на горизонтальной строке – на ней находится кнопка «Генератор анкеров на свободной линии».

# Нагрузка на балки

В рамке «Балки» находится таблица со списком заданных нагрузок на балки. Операции над нагрузкой на балки аналогичны операциям на этапах проектирования в программе МКЭ, в рамке «Нагрузка на балки».

Метод конечных элементов



Рамка «Анкеры»



Рамка «Нагрузка на балки»

### Генератор анкеров на свободной линии

В соответствии с параметрами генераторы создают соответствующие элементы, работа над которыми дальше ведётся самостоятельно, без возможности

Создать анкеры							
– Размещение анке	ров						
Свобод.линия № 1 (отрезок)							
Тип: Вдо	Вдоль всей линии 💌						
Длина анкеров :		0,00	[M]				
Начальный угол :		0,00	[°]				
Угол сегмента :		0,00	[°]				
Расстояние от нача	ла:	0,00	[M]				
Длина сегмента :		0,00	[M]				
🗖 Обратная ориен	пация						
Тип размещения ан	кера чи	слом					
Кол-во акнеров на	отсек :	N =		10			
Жёсткость анкер	а						
Способ задания :	ДИ	аметр анкер	a				
Диаметр:		d =		[MM]			
Модуль упругости	:	E =		[MПа]			
Сопротивление раз	рыву:	F <sub>c</sub> =		[KH]			
🗌 Учесть действи	е в сжат	ии					
Сила в анкере							
Сила:		F =		[ĸH]			
		🕒 Доба	вить	🗵 Отмена			

Диалоговое окно «Создать анкеры»

параметры. изменять Если параметры корректны, генерации то В ходе их редактирования отображается текущий графический сгенерированных вид элементов

Диалоговое "Создать окно анкеры" – это стандартное диалоговое окно c добавлением регулярного размещения нескольких одинаковых анкеров на линиию. Интервал размещения анкеров генерируется таким же образом как у генератора заанкерованных областей (вдоль всей линии, углом или длиной определённого отрезка) . Количество анкеров задают тремя способами: количеством В интервале, углом ИЛИ расстоянием между отдельными анкерами.

Сгенерированные анкеры в программе МКЭ зацепляются за соответствующую свободную линию.

## Балка

Окно «Балка» состоит из таблицы с перечнем балок. Добавление (редактирование) балок возможно в диалоговом окне «Новые балки» «Настройка параметров балок». Балки могут быть так же введены с помощью мыши. Этот метод ввода активируется кликом на соответствующую кнопку на горизонтальной панели инструментов «Балки». Возможны следующие режимы:

**3. Добавление** Балки вводятся и представляются кликом левой клавиши мыши на желаемую позицию рабочего стола

96

- 4. Настройка Кликните левой клавишей мыши на созданную заранее открытую свободную точку и откройте диалоговое окно «Настройка параметров балок», которое позволяет изменять эти параметры
- **5. Удаление** При нажатии на левую кнопку мыши на уже существующую балку, открывает диалоговое окно «Удаление балок» принимая это действие, удаляется выбранная балка.
- 6. Расположение Расположение балки выбирается из блока (линии сетки, сегмент территории)

Построенная балка может так же быть отредактирована на рабочем столе с помощью активных объектов. Программа задействует при этом следующую ситему координат.

Элементы балок служат для моделирования балок, линий, стен котлованов и т.д. Распростроение внутренних сил таких как моменты нормальной и распределенной силы развивается вдоль оси балки может получать от балки и окончания силы.

Важным шагом в процессе моделирования балок - это определение контактных элементов характеризующий интерфейс поведения между балкой и грунтом. Контакт (интерфейс) элементов может быть ассигнованно на обе стороны балки. Правильное определение контактов необходимо особенно при моделировании раскатывания стены.

Типы конечных точек соединений могут быть определены для каждой балки.

В последующих этапах балка может быть либо усилена или разрушена.

Программа автоматичски включает собственный вес балок в анализ. Эта опция может, однако быть выключена в процессе определения балки. Балки моделируются с использованием элементов балок с трех степенях свободы в каждом узле.

Элементы балки сформулированы на основе теории Миндлин. Теория предполагает, что плоскости сечения нормали к оси балки до деформации

97

остается плоскостью после деформации, но не обязательно нормалью к деформированной оси балки. В настоящее время внутренние силы оцениваются в узлах элементов и от конечных сил балки.

Новые балки					<b>—</b>
Топология		- Имя			
Расположение :	свободная линия	Имя:			
Свободная линия	Свободная линия № 1 💽	Посадка			
Параметры		Начало:			
🔽 Учесть собств.	вес	Конец:			
- Сечение и матери	ал				
Тип сечения :	прямоугольная стена	•	Тип материала :	бетон	
Высота сечения :	h =	0,50 [M]	Имя: В 25	5	
Ширина сечения :	b =	1,00 [M]		Каталог	Пользоват.
	I <sub>V</sub> = 1,04Е-02 м <sup>4</sup> /м; А =	5,00E-01 m <sup>2</sup> /m; E	= 30000,00 MПа; G :	= 12600,00 M∏a	
Контакты					
🗍 Учесть контакт	слева	ſ	Учесть контакт с	права	
ТЗип контакта ;		7	ГЗип контакта :		
				重 Добавить	Отмена

Диалоговое окно «Новая балка»

🧖 GEOS V17 - MK3 (ChUsers) Publici.Documents/Finel.GEOS V17 Pilkindy/Demot3.gmk ")	
Файл Илиенения Задание Изобрасканая Настройка Справка	
🗅 🚅 📓 🗤 • 🗤 • 💺 🗞 🗞 🔍 😳 🔶 🔶 💷 🧮 🐼 😲 💭 Ordpassee Wedney 007 : 🗵 Pacearts 🗾 Opamore	
37an ngookreposaases : 🕷 😑 [Tono] [1] [2] [3]	
, 31,01 , 31,01 , 45,10 , 31,01 , 32,10 , 31,01 , 45,01 , 45,01 , 45,01 , 52,01 , 54,00 , 55,01 , 55,00 , 31,01 , 52,00 , 31,01 , 52,00 , 31,01 , 52,00 , 31,01 , 52,00 , 31,01 , 52,00 , 31,01 , 52,00 , 31,01 , 52,00 , 31,01 , 52,00 , 31,01 , 52,00	II Peserei -
	на Астонация
	🚍 Примяния
	🚥 Вода
	Fin Server
2	<b>же Контакты</b>
	Cocpeg. onopei
ita di	Спонебные оторы
	🔎 Анкеры
	П Распорни
	J= Арнатуры Вокстирка
	📇 Нагр. на балки
	W Danale
	Monettopel
	Грефы
	🌙 Устайн.
10 <sup>-</sup>	"
• Банки і авідозанть во і розніть	
Revenue Revenu	
Consequences and the second sec	•
E Dose	To PACYTRON
	ть Добавить рис.
	Sanor: 0
8	Bcero I a
8	Список рисучире
-0,11; -0,82 [w]	

Рамка «Балка»

#### Типы поперечных сечений

Программа позволяет пользователю либо осуществить ввод параметров поперечного сечения цифровой или выбрать один из предопределенных типов поперечного сечения. Тип материала из поперечном сечении выбирают из каталога материалов или вводят в цифровом виде с помощью редактора материалов. В программе реализованы следующие виды сечений:

7. прямоугольная бетонная стена - толщина стенки балки должна быть указана

8. свайная стена - диаметр сваи и расстояние между ними должно быть указано

9. шпунтовая стена - выбирается из встроенной базы данных

10. стальное сечение (сечение стальной двутавровой балки) - тип сечения выбирается из встроенной базы данных, расстояние между ними должны быть указаны (тип сечения выбирается из "Каталог сечений", или определяется в "Редактор сечений", тип материалавыбирают из" Каталог "или материалы указаны в цифровом виде в" Редактор материалов ")

Все введенные сечения автоматически пересчитываются на 1 п.м. Результаты внутренних сил, действующих вдоль балок, также представлены на 1 п.м. структуры. Таким образом, если необходимо, для свай или двутавровых балок они должны быть отрегулированы в зависимости от их расстояния пользователем. Если вы обратитель с техподержку мы вышлем для вас базу данных шпунтовых свай, которые еще не встроенны в программу (hotline@fine.cz.)

Новые балки					×
Топология Расположение : Свободная линия Параметры V Учесть собств. в	свободная линия 💌 Свободная линия № 1 💌 чес	Имя Имя : Посадка Начало : Конец :			
<ul> <li>Сечение и материа</li> <li>Тип сечения :</li> <li>Высота сечения :</li> <li>Ширина сечения :</li> </ul>	л прямоугольная стена прямоугольная стена свайная стена шлунтовая свая стальное сечение числовое задание	T	Тип материала : Имя : В 25	бетон	Каталог Пользоват.
I <sub>y</sub> = 1,04E-02 м <sup>4</sup> /м; А = 5,00E-01 м <sup>2</sup> /м; Е = 30000,00 МПа; G = 12600,00 МПа Контакты Учесть контакт слева					
ТЗип контакта ;		Ţ.	Зип контакта :		Добавить     Отмена

Диалоговое окно «Новые балки» - выбор типа поперечного сечения

#### Балка с защемленным концом

Программа позволяет работать с тремя типами балок с защемленным концом:

	фиксированный	Стандартный тип
○— ▼	шарнир	применяется для введения внутреннего шарнира между балками - в местах с нулевым изгибающим моментом
<b>⊳</b> — <b>■</b>	опирание	

Основание представляет собой особый тип опоры балки конечной точки в грунте. Он применим для пучка конечной точки, расположенной грунте. При фиксированном типе соединения предполагается, что балка и элемент грунта



вызывает развитие пластических деформаций в окружающем грунте И потери сходимости. Основание дает более возможность реалистичного перераспределить контактных напряжений предотвращает балку И OT "проникноввения" в грунт, следовательно,

связаны в одной точке (особая связь) часто

Соединение (а) без основания и (b) с основанием

стабилизации процесса сходимости. По умолчанию длина основания предполагается равной ширине балки и его можно произвольно регулировать (например, чтобы увеличить основания сваи).

## Разрушение и усиление балок

В последующих этапах введенные балки не могут быть отредактированы стандартным образом. Таким образом, один из следующих вариантов должен быть выбран, чтобы изменить их:

- удаление выбранной балки из анализа
- ухудшения выбранной балки (только в режиме расчета "туннеля")
- укрепление сечения выбраной балки
- модификации балок, связанные со свойствами

Тип модификации выбран из диалогового окна "Устанвока Свойств балки". Степень уплотнения балки задается в процентах, где сто процентов соответствует слому балки. Усиление элемента балки с прямоугольным поперечным сечением может быть достигнуто путем увеличения его ширины (например, увеличение толщины торкрет). Другие сечения модифицируются непосредственного после ввода новых (увеличенных) значений параметров поперечного сечения.

Редактир.свойств балки	
Топология Расположение: свободная линия ▼ Свободная линия Свободная линия № 1 ▼ Параметры	Имя Имя : Посадка Начало :
Учесть собств. вес Сечение и материал	Конец:
Параметры балки на этапе задания 1 прямоугольная стена 1,00 (b) x 0,50 (h) м бетон В 25 Параметры балки на предыдущем этапе 1 h = 0,50 м E = 30000,00 МПа G = 12600,00 МПа	Тип изменения :         усиление           Высота сечения :         h = [m]           Мод уль упругости :         E = [m]           Мод уль упругости при сдвиге :         G = [m]
I <sub>Y</sub> = M	$M^4/M$ ; $A = M^2/M$ ; $E = M\Pi a$ ; $G = M\Pi a$
Контакты Изменение параметров	
Учесть контакт слева ТЗип контакта :	Учесть контакт справа     ТЗип контакта :
	ОК + 🛋 ОК + 🛒 🖌 ОК 🔀 Отмена

Диалоговое окно «Установка свойств балки» - усиление балки

# Каталог профилей

В случае стальных сечений программа позволяет выбрать конкретное сечение из каталога профилей. Только тип сечения должен быть указан в диалоговом окне. Тип материала в поперечном сечении выбран, как и в других поперечных сечений (прямоугольная стена, свайная стена, шпунтовая стена и пр.) из "Каталога материалов", или определены в "Редакторе материалов". Тип поперечного сечения (балки) выбран в диалоговом окне "Новые балки".

Каталог сечений		×
Класс профиля Стержень сечения I(IPN) Стержень сечения IE Стержень сечения IE Стержень сечения HE Стержень сечения HD Стержень сечения HD Стержень сечения W Стержень сечения W Стержень сечения UB Стержень сечения UB Стержень сечения J Стержень сечения J Стержень сечения J	Профиль IE 80 IE 100 IE 120 IE 140 IE 160 IE 180 IE 220 IE 220 IE 220 IE 300 IE 330 IE 360 IF 400	0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,0
Норма CSN 42 5551		115,0
		ОК Отмена

Диалоговое окно «Каталог профилей»

# Редактор поперечных сечений

В случае стальных сечений программа позволяет выбрать конкретное сечение из каталога профилей. Только тип сечения должен быть указан в диалоговом окне. Тип материала в поперечном сечении выбран, как и в других поперечных сечений (прямоугольная стена, свайная стена, шпунтовая стена и пр.) из "Каталога материалов", или определены в "Редакторе материалов". Тип поперечного сечения (балки) выбран в диалоговом окне "Новые балки".

Редактор сечения - С	троительная сталь, цельн	ый сва	арной		×
	Описание сечения				htt
название	I-сечение 0,1x0,3				
примечание					
	Размеры сечения				
высота сечения		h =	300,0	MM	
ширина верхнего пояс	ta b	b <sub>ft</sub> =	150,0	MM	
ширина нижнего пояса	a b	ofb =	150,0	MM	
толщина стойки	t	t <sub>w</sub> =	12,0	MM	ــــــــــــــــــــــــــــــــــــــ
толщина верхнего поя	яса	t <sub>ft</sub> =	15,0	MM	, tw
толщина нижнего пояса		t <sub>fb</sub> =	15,0	MM	
					e e
					bfb
					🕑 ОК 🛛 Отмена

Диалоговое окно «Редактор сечения - твердые сварные»

# Каталог материалов

Программа содержит встроенный каталог материалов для бетона и стали.

Только тип материала должен быть указан в диалоговом окне. Форма поперечного сечения выбирается из "Каталог профилей", или определены в "Редакторе сечений". Для других типов сечений (прямоугольный стены, свайные стены, шпунтовые сваи ...) тип сечения выбирается в диалоговом окне "Новая балка".

Каталог материалов - Строительная сталь	×
Выбор материала из каталога	
Сталь ЕС 3 Коррозионно-стойкая сталь ЕС 3	EN 10025 : Fe 360 EN 10025 : Fe 430 EN 10025 : Fe 510 prEN 10113 : Fe E 275 prEN 10113 : Fe E 355 EN 10210-1 : S 235 EN 10210-1 : S 275 EN 10210-1 : S 355
	🗹 ОК 🔀 Отмена

Диалоговое окно «Каталог материалов» - сталь

# Редактирование материалов

Помимо использования "Каталога материалов" программа позволяет пользователю вводить параметры для стали и бетона. Только тип материала

Каталог материалов - Бетон	<b>X</b>
Выбор материала из каталога	
C 12/15 C 16/20 C 20/25 C 25/30 C 30/37 C 35/45 C 40/50 C 45/55 C 50/60 C 55/67 C 60/75	
C 70/85 C 80/95 C 90/105	
	🖉 ОК 🛛 🔀 Отмена

Диалоговое окно «Каталог материалов» - бетон

(параметры материала) должен быть указан в диалоговом окне. Форма поперечного сечения выбирается из "Каталог профилей", или определены в "Редакторе сечений". Для других типов сечений (прямоугольный стены, свайные стены, шпунтовые сваи ...) тип сечения выбирается в диалоговом окне "Новая балка".

Редактор материала - Строительная сталь			×
Описание материала			
Название: EN 10025 : Fe 430			
Характеристики материала			
Основные характеристики материала			
Модуль упругости	E =	210000,00	МПа
Модуль упругости при сдвиге	G =	81000,00	МПа
Коеффициент теплового растяжения	α <sub>t</sub> =	0,000012	1/K
Удельный вес	γ =	78,50	кН/м <sup>3</sup>
Специальные характеристики материала			
Предел текучести	f <sub>y</sub> =	275,00	МПа
Предел текучести при растяжении	f <sub>u</sub> =	430,00	МПа
Коррозионно-стойкая		])	
		] ок 🛛 🕻	🗙 Отмена

азвание:	C 30/37			
(арактеристик	и материала			
Основные хара	актеристики материала			
Модуль упруго	сти	E <sub>cm</sub> =	32836,57	МПа
Модуль упруго	сти при сдвиге	G =	13681,90	МПа
Коеффициент	теплового растяжения	α <sub>t</sub> =	0,000010	1/K
Удельный вес		γ =	25,00	кН/м³
Специальные »	арактеристики материала			
Прочность цил	индра на сжатие	f <sub>ck</sub> =	30,00	МПа
Прочность на р	растяжение	f <sub>ctm</sub> =	2,90	МПа

Диалоговое окно «Редактор материалов – строительная сталь Диалоговое окно «Редактор материалов – бетон

### Контакты

Рамка "Контакты" содержит таблицу со списком контактов. Добавление (редактирование) контактов выполняется в диалоговом окне "новые контакты".

Контактные элементы используются в приложениях, которые требуют надлежащего представительства взаимодействия структуры почвенного покрова. Они могут быть дополнительно использованы для моделирования места соединения или поверхности раздела двух различных материалов (поверхность раздела грунт-скальный грунт). Контакты назначены на уже определенные линии – свободные линии или линии петли (поверхность раздела). Контакт определяется его типом. Контакты могут быть также введены с помощью мыши. Этот режим ввода активизируется нажатием соответствующей кнопки на горизонтальной полосе инструмента "Контакты". Следующие режимы:

- Добавить Контакт вводится, нажав левую кнопку мыши в нужном месте на рабочем столе.
- Редактирование Щелчок левой кнопкой мыши на уже существующий контакт открывается диалоговое окно "Редактирование свойств контакта", которое позволяет измененять его параметры.
- Удаление Щелчок левой кнопкой мыши на уже существующий контакт открывается диалоговое окно «Удаление контакта». Принимая данное действие удаляется выбранный контакт.
- Расположение расположение контактов выбирается из выпадающего списка (сетка линий, сегмента местности).

Введенный контакты также могут быть отредактированы на рабочем столе

#### с помощью активных объектов.



Рамка «Контакты»

# Контакты и балки (фильтрация воды)

Рамка "Контакты" ("Балки") содержит (в режиме "Фильтрация воды") таблицу со списком контактов (балки). Добавление (редактирование) контактов (балок) выполняется в диалоговом окне "Новых контактах" ("Новые балки").

Контактные элементы используются в приложениях, которые требуют надлежащего представительства взаимодействия структура почвенного покрова. Они могут быть дополнительно использованы для моделирования суставы или интерфейсы двух различных материалов (почвы - Интерфейс рок). Контакты присваиваются уже определеным линиям - свободным линиям или сетке линий (интерфейсы).Контакт определяется его типом.

Контакты могут быть также введены с помощью мыши. Этот режим ввода активизируется нажатием соответствующей кнопки на турнике инструмент "Контакты". Доступны следующие режимы:

• Добавить - Контакт вводится, нажав левую кнопку мыши в нужном месте

на рабочем столе

- Редактирование Щелчок левой кнопкой мыши на уже существующий контакт открывается диалоговое окно "Редактирование свойств контакта", которое позволяет измененить его параметры.
- Удилить Щелчок левой кнопкой мыши на уже существующий контакт открывается окно диалога Удаление контакта - принимая данное действие вы удаляет выбранный контакт.

Введенные контакты также могут быть отредактированы на рабочем столе с помощью активных объектов. Ширина или контактный элемент может быть определена как:

• проницаемой

- непроницаемой
- частично проницаемой

Контактные элементы позволяют моделировать определенную преграду для потока в теле грунта. Рассмотрим, например, простыни стену представленую в расчет напряжений на балочных элементов. Листовой материал стены закреплены внутри области можно рассматривать либо как полностью



Частично проницаемый контакт

проницаемым, непроницаемым ИЛИ полностью или частично проницаемым. Хотя первые два случая также можно лечить c помошью контактных элементов расположены вдоль соответствующей линии, они обрабатываются с помощью

программы автоматически без необходимости эти элементы. Третий случай представляет собой задачу потока в тонком зоне, имеющей данную толщины d, (см. рисунок).

Соответствующих потоков в касательной направлении (*s* -направление) *qs* и нормальном направлении (*n* -направление) *qn* даются:

$$q_{s} = -k_{s} \frac{1}{2} \frac{\partial \left(h^{t} + h^{b}\right)}{\partial_{s}}$$
$$q_{n} = -k_{n} \frac{h^{t} + h^{b}}{d}$$

Определение контактных элементов, следовательно, требует ввода следующих параметров:

- *ks* проницаемость в направлении касательной (проницаемость продольная), (м/день)
- *kn* проницаемость в нормальном направлении (проницаемость поперечной), (м/день)

### Точки опоры

Рамка "Точки опоры" содержит таблицу со списком точек опоры. Добавление (редактирование) точек выполняется в диалоговом окне "Новые точки опоры". Точки также могут быть введены с помощью мыши. Этот режим ввода активизируется нажатием соответствующей кнопки на горизонтальной панель инструментов "точки опоры". Доступны следующие режимы:

- Добавление Позволяет ввести точку опоры, нажав левую кнопку мыши в нужном месте на рабочем столе. Требуемые параметры вводятся в диалоговом окне «Новые точки опоры".
- Редактирование Щелчок левой кнопкой мыши на уже существующей точке опоры открывает диалоговое окно "Редактирование точки опоры", которое позволяет измененить его параметры.
- Удаление Щелчок левой кнопкой мыши на уже существующей точке опоры открывает диалоговое окно Удаление точки опоры - принятие этого действия удаляет выбранную точку.

Введенную точку опоры также можно редактировать на рабочем столе с помощью активных объектов. В программе применяется следующее системах координат. Программа содержит встроенный автоматический генератор стандартных граничных условий. Таким образом, в большинстве задач не требуется указывать граничные (вспомогательная) условия. Расчитываются

#### следующие типы точек опор:

- свободные
- фиксированные
- пружины
- предписанные деформации

Опоры задаются в глобальной системе координат.

🖉 GEOS v17 - MK3 (ChUsers)Publici.Documents)Finel.GEOS v17 Pfildadyl.Demo03.gmk ")	
Файл Илияниния Задания Изображения Настройка Справка	
D 🚅 🛃 🖬 • • • • • 🖏 🖏 🐘 🔍 🐼 🔶 🖶 🗮 🖾 🖏 💭 💭 💭 Orofopenees IIIafinos III7 : 🗵 Paccente ∠ Transme Этап проектарования : 🕷 🗃 (Torn) (1) [3] (3)	
$\mu_0$ , 22.04 , 20.05 , 90.05 , 90.04 , 90.05	Ремны _
ра 220 300 300 400 400 400 40 40 40 40 20 00 20 00 20 00 00 00 00 00 00 00 00	Peoses
Content Content Content	
I lovewale onopoi i Bi jooderte El i poerte El poerte	
Vel Na I van de la compania pacificación de la compania de la comp	
	Рисунки Добевить рас. Своряд. опоры : 0 Всего I 0 Спесок расунков
-0,24; 0,26 (M)	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

Рамка «Поддержка точек»

## Точка потока

Рама "Точка поток" содержит таблицу со списком точечных потоков. Добавление (редактирование) поток точки выполняется в "Новом точки потока" диалоговое окно. Поток точка также может быть введена с помощью мыши. Этот режим ввода активизируется нажатием соответствующей кнопки на турнике "поток Пойнт" инструмента. Следующие режимы:

• Добавить - Поток точку вводится, нажав левую кнопку мыши в нужном месте на рабочем столе. Требуемые параметры вводятся в диалоговом окне "Новая точка потока".

• Редактировать - Щелчок левой кнопкой мыши на уже существующей
точке потока открывается " Редактирование реологические свойства точечных" диалоговое окно, которое позволяет изменять его параметры.

• Удалить - Щелчок левой кнопкой мыши на уже существующей поддержке точке открывает диалоговое окно Удаление. Принимая это действие удаляет поток в выбранной точке.

Введенные точки потока также можно редактировать на рабочем столе с помощью активных объектов. Могут быть указаны следующие граничные условия:

### а) Порового давления в точке

- 11. Численно значение порового давления в данной точке задается [кПа, ksf]
- **12.** Указав местоположение грунтовых вод (общий напор) указываются координаты УГВ

### б) Точка притока/оттока

Указывается скорость откачки/впрыска [ $M^3$ /*день/м*,  $ft^3$ /*day/ft*]

# Линейные опоры

Рамка "Линейные опоры" содержит таблицу со списком линий опор. Добавление линии (редактирование) выполняется в диалоговом окне "Новые линии опор". Линии также могут быть введены с помощью мыши. Этот режим ввода активизируется нажатием соответствующей кнопки на горизонтальной Панели инструментов "Линии опоры". Доступны следующие режимы:

- Добавить Ввод линии опоры, нажав левую кнопку мыши в нужном месте на рабочем столе. Требуемые параметры вводятся в диалоговом окне "Новый линии опоры".
- Редактировать Щелчок левой кнопкой мыши на уже существующей линии опоры открывает диалоговое окно "Редактирование свойств линии опоры", которое позволяет измененить его параметры.
- Удалить Щелчок левой кнопкой мыши на уже существующей линии опоры открывает окно диалоговое удаления принимая это действие удаляет выбранную линию.
- Расположение Расположение линии опоры выбирается из выпадающего

списка (Свободная линия, сегмента местности, сетки линии).

Введенные линии опоры также можно редактировать на рабочем столе с помощью активных объектов. В программе применяется следующие системы координат. Программа содержит встроенный автоматический генератор стандартных граничных условий. Таким образом, в большинстве задач не требуется указывать граничные условия. При назначении опоры к линии в первую очередь необходимо выбрать тип линии (свободные, интерфейс, сетки линия).

Следующие типы линий опор считаются:

- свободная
- фиксированная
- деформированная



Рамка «Линия опоры»

# Линия потока

Рамка "линия потока" содержит таблицу со списком линии потоков. Добавление (редактирование) выполняется в диалоговом окне "Новая линия потока". Линия потока также может быть введена с помощью мыши. Этот режим ввода активизируется нажатием соответствующей кнопки на горизонтальной Панель инструментов. Доступны следующие режимы:

• Редактирование - Щелчок левой кнопкой мыши по уже существующему линии потока откроет соответствующее диалоговое окно, которое позволяет изменять параметры.

Введенные линии потока также можно редактировать на рабочем столе с помощью активных объектов.

Граничные условия потока должны быть определены на всех граничных линий. Могут быть указаны следующие граничные условия:

а) Непроницаемый

б) Проницаемый Поровое давление на данной линии равно нулю

## в) Поровое давление

- 13. распределение порового давления р может быть задан численно
- 14. распределение порового давления может быть задано путем ввода расположение грунтовых вод (предписывая общий напор *h*)

**г)** Приток/отток на линии q - указано в единицах скорости, например, [м/сут, м/день] - указана скорость потока в/из области. Значение по умолчанию соответствует непроницаемой границей, для которой q = 0.

д) Фильтрационные поверхности - это граничное условие вводится обеспечивая границы, которые не однозначно разделены на части с заданным давлением пор и части с заданным приток / отток (точка выхода не известна). В таком случае анализ проводится в два этапа. На первом этапе программа находит точку выхода. Фактический анализ потока с заданными граничными условиями затем проводят на второй стадии. В некоторых случаях обе стадии необходимо повторить несколько раз. При расширенном вводе считается что программе требуется ввод фиктивной проницаемость kv в единицах [м/день]. По сути, это срок штрафа, достаточно большого числа в целом, гарантируя, что наряду с непроницаемой границой значение общего h будет равна (q = 0) y-координаты данной точки. Для части границы с отсутствующим потоком мы имеем kv = 0. Переменные q и h после этого связаны:

$$\overline{q}_n = k_v (h - y)$$
 если  $h > 0 (S = 1)$  в теле грунта

 $\overline{q}_n = 0$ 

#### если h < 0 (S < 1) в теле грунта

#### Анкеры

Рамка "Анкеры" содержит таблицу со списком анкеров. Добавление (редактирование) анкера выполняется в диалоговом окне "Новые анкеры" ("Редактирование свойств анкера"). Анкеры могут быть также введены с помощью мыши. Этот режим ввода активизируется нажатием соответствующей кнопки на панели инструментов «Анкеры». Доступны следующие режимы:

- 15. Добавить Нажав левую кнопку мыши на рабочем столе мы определяем начальную и конечную точку анкера. Используя функцию сетки может упростить этот шаг. Отправной точкой установки в грунте и ее координаты округляются до второго знака с помощью мыши или клавиатуры, следовательно, идентичны.
- 16. Редактирова Кликая левой кнопкой мыши на уже созданный анкер
  ть открывает диалоговое окно «Редактирование свойств анкеров», которое позволяет изменять параметры.
- 17. Удалить Кликая левой кнопкой мыши на уже созданны анкер открывается диалоговое окно «Удаление анкера», что позволяет удалить анкер

Введенные анкеры также могут быть отредактированы на рабочем столе с помощью активных объектов. В программе применяется следующая система координат.

Головка анкера (начальная точка) могут быть автоматически подключены к земле, произвольной интерфейс или открытия (тоннельной обделки). Головка анкера затем автоматически устанавливается в пересечение анкерной линии, определяемой введенными точками и выбранной линией. Анкер также может быть введен непосредственно, указав координаты двух конечных точек.

Анкеры как стабилизационные или усиливающие элементоы представлены упругой растяжение-сжатие стержневого элемента с постоянной нормальной жесткости. Максимально допустимая сила натяжения элемент может выдержать

указательные растяжение провал стержневого элемента анкера. Анкер стоит в грунте только на своих смотрела и конечной точками. Взаимодействие между грунтом и анкером вдоль длины анкера не обсуждается.

Анкеры определяются их начальной и конечной точеками и их жесткостью. Программа автоматически связывает анкер элементами степеней свободы с фактическими степенями свободы предопределенного конечно-элементной сетки. Таким образом, анкеры могут быть введены в любом месте конструкции.

Жесткость анкера определена в терминах модуля упругости и ее площади. Программа позволяет также ввести диаметр анкера - площадь Затем определяется стабильности автоматически. В задачах анализа анкера жесткость не рассматривается. Его действие реализуется только через предварительное напряжение введенной автоматически внешней силы, силы на сжатие, действующего на головку анкера.

Другими важными параметрами являются предварительное напряжение сила и прочность на разрыв (анкерные перерывы, когда предел прочности при растяжении превышен). Для элементов, не имеющих предварительного напряжения предварительного напряжения сил устанавливается равным нулю. Достаточно большая величина силы растяжения анкера может быть указана, чтобы избежать неудачи анкера.

По умолчанию анкер не поддерживает сжимающее силы - анкерные элементы, нагруженные на сжатие в течение определенного этапа расчета будут временно отключены. Если напряжение происходит в последующий анализ перспективе (в связи с изменением нагрузки, геометрии или материальных параметров грунта), программа автоматически вводит эти элементы обратно в анализе. Программа делает также возможным включить сжатие реакцию анкера. Тем не менее, для элементов, загруженных в первую очередь при сжатии мы рекомендуем определить эти элементы, как реквизит. Анкер деформируется во время анализа. Такая деформация вместе с деформацией окружающего грунта может привести к уменьшению указанного

Создать анкер				<b>—</b>
Располоени анкера				
Начало:	прицепить на линию №. 1			
	x =	0,00	[M]	ъ.
	z =	-1,44	[M]	[×,z]
Конец:	задать дл	ину и наклон ан	кера 💌	
Длина :	=	10,64	[M]	
Угол наклона :	α =	19,98	[°]	
Шаг анкеров :	b =	1,00	[M]	
Жёсткость анкера				
Способ задания :	диаметр а	нкера		
Диаметр:	d =	40,0	[мм]	
Модуль упругости :	E =	80,00	[M⊓a]	
Сопротивление разрыву	: F <sub>c</sub> =	150,00	[ĸH]	
Учесть действие в ожатии				
Усилие в анкере				
Сила:	F =	85,00	[ĸH]	
			<b>N</b> 0k	🛛 🛛 Отмена

Рамка «Создать анкер»

предварительного напряжения силы в Мы хотим анкере. достичь определенного предварительного напряжения силы в анкере, надо либо постстрессовый анкер к данному значению в следующем этапе расчета или использовать достаточно большое величину предварительного напряжения силы с самого начала, чтобы компенсироватьвозможно падение (в результате яанкер силы после завершения этапа расчета отображается в

анкерной головке ниже установленного предварительного напряжения силы).

В последующих этапах программа позволяет только для постнапряженного анкера изменение начального предварительного напряжения сил, или для удаления анкера из анализа.

Введение в предварительно напряженных анкеров в грунт может привести к пластической деформации грунта в непосредственной близости от головы анкера или корня. Некоторые модификации исходного входа являются, чем требуется, чтобы избежать часто произошла потеря сходимости.

### Конечная точка анкера

Введение в предварительно напряженных анкеров в почву может привести к пластической деформации грунта в непосредственной близости от головы анкера или корня - анализ затем часто не сходятся. В таком случае мы рекомендуем следующие модификации исходного входа:

- разместить элемент луча под анкера голове (это приводит в лучшем перехода нагрузки в грунт),
- поместить корень анкера в достаточно жестком гуренте (использовать

эластичный или модифицированную модель упругого материала для слоя гурнта вокруг анкера).



Область пластичности в непосредственной близости от анкерной головы или корня

## Анкеры в анализе устойчивости

При выполнении анализа устойчивости фактических предварительно напряженных анкеров автоматически заменены соответствующими сжимающие точкой силы, действующие на головку анкера.

Грунт В точке приложенной силы, однако, может претерпевать пластическую деформацию. Поэтому следует тщательно оценить полученный распределение пластических деформаций. Следует отметить, что локализация эквивалентной пластической деформации идентифицирует местоположение Поэтому, потенциальной поверхности скольжения. если пластические деформации на головку анкера могут стать решающим, необходимо ввести некоторые модификации исходного входа.





Моделирование анкера в анализе устойчивости откоса

# Распорка

Рамка "Распорка" содержит таблицу со списком анкеров. Добавление (редактирование) реквизит выполняется в "Новых реквизита" диалоговом окне ("Редактироание свойств распороки"). Реквизит также могут быть введены с помощью мыши. Этот режим ввода активизируется нажатием соответствующей кнопки на панели инструментов "Реквизит". Доступны следующие режимы:

- 18. Добавить Нажав левую кнопку мыши на рабочем столе мы определяем начальную и конечную точку опору. Используя функцию сетки может упростить этот шаг
- 19. Редактирова При нажатии на левую кнопку мыши на уже существующей
  ть опоры открывает диалоговое окно "Редактирвоание свойств", что позволяет измененить его параметры.
- 20. Удалить При нажатии на левую кнопку мыши на уже существующей опоры открывает диалоговое окно удаление принимая это действие вы удаляете выбранную распорку.

Введенный параметр можно редактировать на рабочем столе с помощью активных объектов. В программе применяется следующее системах координат. Распорка конечные точки которой могут быть автоматически подключены к грунту, произвольной интерфейс или открытия (тоннельной обделки). Эти точки затем автоматически устанавливается в в пересечениях опоры линии, определяемой введенного точек и выбранных линий. Распорка также могут быть

Создать распорку			×
Расположение распорки			
Точка 1:	прицепить на линию №. 1		
	x =	-5,72	[M]
	z =	-1,28	[M]
Точка 2 :	прицепить на	алинию №. 3	
	x =	5,03	[M]
	z =	-1,28	[M]
Шаг между раскосами :	b =	1,00	[M]
— Жёсткость распорки —			
Поверх. :	A =	200,0	[мм <sup>2</sup> ]
Модуль упругости :	E =	210,00	[MПа]
		ОК	Отмена

Создать распорку

введена непосредственно, указав координаты конечных двух точек. Распорки которые представлены упругой сжатие стержневого элемента С постоянной нормальной жесткости. Распорки могут выдержать лишь сжатие нагрузки. Когда найден в напряжении они удаляются из анализа.

Распорка связаная с конечноэлементной сетки в его двумя конечными точками. Взаимодействие не считается, что между почвой и опору вдоль его

длины, когда места в почву. Параметр определяются их начальной и конечной точкой и их жесткостью. Программа автоматически связывает опору градусов элемент свободы с фактическими степенями свободы предопределенного конечноэлементной сетки. Таким образом, опора могут быть введены в любом месте конструкции. Жесткость распорки определены в терминах модуля упругости и ее площади. Программа делает также можно ввести опоры диаметром - площадь Затем определяется автоматически. В последующих этапах опора не может быть изменен - он может быть либо удалены, либо вводится снова.



Метод конечных элементов

Распорка - анализ

# Армировка

Рамка "Армирование" содержит таблицу со списком. Добавление (редактирование) элементов армирования осуществляется в диалоговом окне "Новое армирование" («Изменить параметры армирования"). Армирование также могут быть введено с помощью мыши. Этот режим вменяя активизируется нажатием соответствующей кнопки на панели инструментов "подкрепления". Доступны следующие режимы:

- 21. Добавить Нажав левую кнопку мыши на рабочем столе мы определяем начальную и конечную точку опору. Используя функцию сетки может упростить этот шаг
- 22. Редактирова При нажатии на левую кнопку мыши на уже существующей
  ть опоры открывает диалоговое окно "Редактирвоание свойств", что позволяет измененить его параметры.
- 23. Удалить При нажатии на левую кнопку мыши на уже существующей опоры открывает диалоговое окно удаление принимая это действие вы удаляете выбранную распорку.

Введенноре армирование также можно редактировать на рабочем столе с помощью активных объектов. В программе применяется следующее системах координат. В армировании конечные точки могут быть автоматически подключены к земле, произвольной интерфейс или открытия (тоннельной обделки). Эти точки затем автоматически устанавливается в в пересечениях опоры линии, определяемой введенного точек и выбранных линий. Армирование может также быть введены непосредственно, указав координаты двух конечных точек.

Создать армировку				
Расположение армировки				
Точка слева :	абс. позици	19		
	x =	-9,76	[M]	
	z =	-2,97	[M]	
Точка справа :	абс. позици	19		
	x =	9,44	[M]	
	z =	-2,97	[M]	
Длина :	L =	19,20	[M]	
Параметры .армировки				
Жёсткость :	E <sub>h</sub> =	50,00	[кН/м]	
Прочность арматуры :	задать			
Прочность арматуры :	R <sub>t</sub> =	50,00	[кН/м]	
Г Учесть возд.в скатии				
ОК Отмена				

#### Создать армировку

Растяжение армирующих элементов (геотекстили, геосетки), которые определяются их начальной и конечной точеками и их жесткостью.

В отличие от анкера или распорки, армирование связано с основной сетки конечных элементов по всей ее длине. Однако, как и анкеры программу вводит арматуры конечных точек в конечноэлементной сетки автоматически, поэтому усиление может быть указан в любом месте сетки. Подобно анкеру подкрепление моделируется на

растяжение / сжатие стержневого элемента с возможностью передачи только нормальную силу. Благодаря его геометрическим характеристикам, укрепление призывает к входу поперечного сечения жесткости принятых на 1 погонный метр его ширины. Пользователь должен связаться с производителем для прояснения этой информации. В последующих этапах усиление не может быть изменен - он может быть только удалено.

Программа позволяет рассматривать укрепление также при сжатии - по умолчанию, однако, часть арматуры найдено на сжатие отключено для анализа. Это состояние моделируется на рисунке, показывающий распределение нормальных растягивающих активными частями сил над отдельных подкреплений. На сжатие часть арматуры временно исключен из анализа. Подобно

якорей, однако, он может быть автоматически активируется после загрузки снова в

# напряжении.



Предел текучески армирования

## Анкерное геоукрепление

При внедрении подкрепление в тело грунта надо иметь в виду, достаточное закрепление арматуры, так как программа не проверяет подкрепление против разрушения при сдвиге. Внезапное увеличение нормальной силы, как показано на рисунке показывает, особенность в контактных напряжений и вероятного отказа сдвига арматуры. С этой точки зрения отображаемые результаты вводят в заблуждение и, по сути нереально. В таком случае, укрепление должны быть либо исключены из анализа или обеспечить ее достаточную крепление, как нанесены на рисунке.

#### Метод конечных элементов







Достаточное анкерное армирование

#### Осевая жесткость геосинтетических материалов

Геосинтетические материалы являются растягивающие усилительные

элементы (геотекстиль, геосетки), определенные по их начальной и конечной точкой и осевой (нормальный) жесткости *J<sub>z</sub>* [*кH*/*м*].

Для нетканых материалов осевой жесткости, как правило, не рассматривается, так как эти элементы обычно служат разделения слоев. Тканый геотекстиль опыт при малых деформациях очень низкая начальная жесткость - в малой области деформации (до 5%) мы сталкиваемся значительное увеличение деформаций под постоянной нагрузке.

При проектировании с применением геотекстиля это его свойство должно быть принято во внимание. Таким образом, мы признаем, как длительной прочности натяжения в зависимости от частных коэффициентов сокращения (отражающий повреждения элементов, вызванных установкой, ползучести геосинтетических биологических поведения материалов, И химических области воздействий) И начальное нормальное жесткость В небольшой деформации в интервале 0,5% до 2%.

Чтобы определить минимальную осевую жесткость геоукрепления можно использовать следующее выражение, где для прочности, соответствующей выбранной деформации мы принимаем максимально 10% отклонение от линейной части испытания на растяжение:

$$T_{z-x} \ge \frac{0.9 \cdot \varepsilon \cdot T_{max}}{\varepsilon_{max}}$$

где:

Tz

tensile strength at strain Предел прочности при *x*% деформации [к*H*/м]

*x*% деформация (относительное удлинение) в соответствии с EN ISO 10 319 [%]

*Tmax* - максимальный предел прочности на разрыв в соответствии с EN ISO 10 319 [*кH/м*]

*єтах* - максимальная деформация (относительное удлинение) в соответствии с EN ISO 10 319 [%]

Поставщики и производители геотекстиля обычно предоставляют значение прочности на растяжение при 2% деформации. Выражение становится:

$$T_{z-2\%} \ge \frac{1.8 \cdot T_{max}}{\varepsilon_{max}}$$

Минимальная (начальная) осевая жесткость геотекстиля из краткосрочного

эксперимента (скорость нагружения в соответствии с EN ISO 10 319) для *х-%*деформации определяется по формуле:

$$J_{\varepsilon=x} \approx E \cdot A = \frac{T_{\varepsilon=x}}{\varepsilon}$$

где: ε - *х%*-деформация (относительное удлинение) в соответствии с EN ISO 10 319 [-]

Максимальная (теоретически достижимая) осевая жесткость геотекстиля для краткосрочного осевой силы определяется следующим образом:

$$J_{\varepsilon max} \approx E \cdot A = \frac{T_{max}}{\varepsilon_{max}}$$

где: *єтах* - максимальная деформация (относительное удлинение) в соответствии с EN ISO 10 319 [-]

Интервалы рекомендованных значений осевых (нормальных) жесткостей геосинтетических *J*<sub>Z</sub> [кH / м], перечислены в следующей таблице:

Описание переменных	Начальная осевая жесткость геотекстиля для $\varepsilon = 2\%$	Теоретическая (максимальная) осевая жесткость геотекстиля
Обозначение (блок)	$J\varepsilon = x [\kappa H/M]$	<i>Jɛmax</i> [кН/м]
Категория гео усилители		
Нетканый геотекстиль	-	-
Тканый геотекстиль	250 ÷ 500	1000
Одноосные геосетки	500 ÷ 1000	1500
Двухосные георешетки	100 ÷ 500	2500
	for $\varepsilon = 0.5\%$	
Трехосные георешетки	250 ÷ 500	5000
	for $\varepsilon = 0.5\%$	
Геоматы	100 ÷ 500	1000
Дренажные геокомпозиты	-	-
Композиты	100 ÷ 500	1500
Геосетки	-	-
Геоячейки	-	-

## Пригрузки

Рамка "Пригрузки" содержит таблицу со списком. Добавление (редактирование) выполняется в диалоговом окне "Новые пригрузки" Дополнительно также можно редактировать на рабочем столе с помощью активных объектов. В программе применяется следующее системах координат.

Эта рамка служит для введения пригрузки, применяема только к телу грунта.Пригрузка применяется к элементу балки вводится в рамки - нагрузки балки.

Произвольное число пригрузок могут быть указаны в отдельных этапах. Пригрузки могут действовать также на существующих поверхностях (включая поверхности земли) или могут быть применены в любой части тела грунта.

В последующих этапах мы вольны либо удалить введенную пригрузки или изменить его величину.

Следует отметить, что применение пригрузки непосредственно на поверхности земли может привести к чрезмерной пластической деформации в непосредственной близости от пригрузки и анализ может не сойтись. В таком случае, можно либо поместить элемент балки под действием приложенной пригрузки, или выбрать эластичную или модифицированную модель упругого материала для грунта ниже пригрузки.



Рамка «Пригрузка»

Метод конечных элементов

Новые пригрузки	1				×
Имя пригрузки					
Имя:	Пригру:	зка 1			
- Характеристики	и пригруз	ки			
Тип:		полосовая			
Распол. :		на поверхности			
Нач.:	x =	-2,00	[M]	₩	
Дл.:	=	4,00	[M]	q  /+α	
Накл. :	α =	0,00	[°]		
Величина пригр	узки				
Величина :	q =	250,00	[ĸH/м²]		
				💽 Добавить 🛛 От	мена

Диалоговое окно «Новая пригрузка»

### Нагрузки балок

Рамка "Нагрузки Балок" содержит таблицу со списком нагрузок. Добавление (редактирование) нагрузки пучка выполняется в "Новая нагрузока балоки" Диалоговое окно нагрузки. Балки также можно ввести с помощью мыши. Этот режим ввода активизируется нажатием соответствующей кнопки на горизонтальной панели инструментов "Нагрузка балки". Доступны следующие режимы:

24. Добавить Нажав левую кнопку мыши на рабочем столе мы определяем начальную и конечную точку опору. Используя функцию сетки может упростить этот шаг

25. Редактирова При нажатии на левую кнопку мыши на уже существующей

- **ть** опоры открывает диалоговое окно "Редактирвоание свойств", что позволяет измененить его параметры.
- 26. Удалить При нажатии на левую кнопку мыши на уже существующей опоры открывает диалоговое окно удаление принимая это действие вы удаляете выбранную распорку.

Рамка "Нагрузки Балок" содержит таблицу со списком нагрузок.

Добавление (редактирование) нагрузки пучка выполняется в "Новая нагрузока балоки" Диалоговое окно нагрузки. Балки также можно ввести с помощью мыши. Этот режим ввода активизируется нажатием соответствующей кнопки на горизонтальной панели инструментов "Нагрузка балки". Доступны следующие режимы:



Рамка «Нагрузки балок»

Создай нагрузки на балки			
— Нагруженная бали	ka		
Расположение :	Балка "Балка 1"		
— Характеристики н	агрузки		
Тип нагрузки :	равномерно распредел.по всей балк 💌		
Направление нагр	перпендик. к балке		
Угол:	α = 0,00 [°]		
	* Juli + q V		
Величина нагрузк	И		
Величина :	q = -62,00 [kH/m <sup>2</sup> ]		
	💽 Добавить 🗵 Отмена		

# Вода

Есть три варианта в программе по внедрению в грунтовые воды:

- 27. Уровень грунтовых вод может быть указан в виде непрерывной границы раздела ниже и выше поверхности земли. В таком случае, программа автоматически регулирует собственных вс почвы ниже уровня грунтовых вод.
- 28. Значения давления пор вводятся с помощью изолинии. Ввод такой же, как ввод границы раздела. Значения давления пор вводятся в таблицу "Список границ разделов» в левой нижней части экрана. Значения между изолиниями следуют из линейной интерполяции.
- 29. Коэффициент давления пор *ru* представляет собой соотношение между давлением пор и геостатического напряжения в почве. Значения коэффициента *ru* указаны для отдельных изолиний. Первая изолиния всегда совпадает с поверхностью земли. Остальные изолинии вводятся таким же образом, как границы раздела между отдельными слоями грунта. Значения вводятся в таблицу "Список границ разделов» в левой нижней части экрана. Значения между изолиниями следуют из линейной интерполяции.

При вводе значения давлением пор или коэффициенты значения *ru* основная масса грунта предполагается во всем теле равным объемной массе *у* независимо от значений давления пор или коэффициентов *ru*.

Самый простой способ проверить ввод воды является участок распределение давлением пор в окне вывода.

Метод конечных элементов



Визуализация давления пор

### Анализ

Анализ проводится для отдельных этапов расчета в рамке "Анализ" после нажатия кнопки "Анализ".

Во время анализа программа пытается прийти к такому решению, которое удовлетворяет для данной нагрузки и граничных условий глобального равновесия. В большинстве случаев данный шаг приводит к итерационному процессу. Процесс итерации и сходимости решения отображается на экране.

Анализ может быть остановлен в любой момент, нажатием кнопки "Прервать". Результаты будут доступны для последней конвергентной ступени нагрузки.

Правильные результаты получаются, когда 100% из приложенной нагрузки достигается. Из-за отказа конвергенции программа может остановиться до достижения желаемого уровня нагрузки - лишь часть общей приложенной нагрузки будет достигнута. В таком случае можно регулировать стандартные параметры настройки анализа.

При моделировании более сложных инженерных задач мы рекомендуем

пользователю придерживаться рекомендованной процедурой моделирования.

Анализ кратковременного потока может быть выбран в рамке "Настройки".

Результаты анализа вместе с информацией о ходе анализа появляются на экране сразу же после завершения анализа.

Подробная информация о фактическом методе моделирования представлена в разделе "Настройка и анализа описания". Способ вывода результатов на экране можно установить в диалоговом окне "Настройки стиля визуализации".

В случае рассмотрения воды при анализе, в большинстве случаев есть возможность скопировать анализ УГВ в буфер обмена Geo и вставьте его в другую программу.



Экран после завершения анализа

### Анализ переходных процессов потока

Фактические анализ протекает в две и более ступеней ("Поток воды"), где на первом этапе предлагается задать начальные условия, т.е. распределение начального давления пор, начальный напор, степень насыщения и относительной проницаемости в начале переходного процесса анализ потока. Существует несколько вариантов для установки начального давления в порах:

- 30. С помощью грунтовых вод
- 31. Непосредственно с помощью границы разделов давления пор
- 32. Выполнение устойчивого анализа состояния потока

Первый вариант предполагает, гидростатическое (линейное) распределение давления пор по высоте. Ниже УГВ программа генерирует положительные давления пор, в то время как выше УГВ отрицательные давления пор (всасывание) генерируются. Второй вариант позволяет при рассмотрении сухой почвы, области предписывая, например, отрицательное давление пор BO всей инфильтрации. Третий вариант требует запуска устойчивого состояния анализа. На основании назначенной модели материала программа тогда определяет начальную степень насыщения и относительной проницаемости в зависимости от исходного давления пор. На рисунке 1 показано распределение начального пор, представленного устойчивого давления состояния анализа ДЛЯ предполагаемых гидравлических условий. Очевидно, что ниже УГВ только давление представлено. Начальное состояние в ненасыщенной или частично насыщенной области можно судить частично путем построения например распределение начальной степени насыщения, как показано на рисунке 2. При выборе опции «Нет воды» начальные значения давления пор устанавливаются равными нулю.

#### Метод конечных элементов



Рисунок 1 - Первый этап расчета: Распределение начального давления пор



Рисунок 2 - Первый этап: Распределение начальной степени насыщения

Анализ кратковременного потока выполняется со второй стадии от того, где следующий этап следует за предыдущим. Каждый этап требует установки времени анализа, зависит от времени изменения границы (гидравлического)

состояния и длину шага. Текущая версия программы позволяет либо ввести всю нагрузку сразу в начале стадии расчета или предположить, что она линейно возрастает со временем в ходе расчета стадии ("Расход воды"). В первом случае начальный шаг времени установлен на 1/10 от назначенного временного шага. Далее, продолжается вычисление С назначенным временным шагом. Целесообразно, отрегулировать шаг времени в ходе анализа. Короткий временной шаг рекомендуется в начале анализа. При продолжительном времени, когда решение приближается к условиям устойчивого состояния, временной шаг может быть значительно увеличен (например, от 1/10 суток до нескольких дней). На рисунках 3 и 4 показано промежуточное состояние и стационарное решение, соответственно, что соответствует внезапному увеличению УГВ на втором этапе расчета. На рисунке 5 и 6 показны аналогичные состояния, связанные с последующей быстрой просадкой моделируемой путем сброса первоначального уровня УГВ на седьмом этапе расчета.



Рисунок 3 - Второй этап расчета: Распределение давления пор в заданное время анализа

#### Метод конечных элементов



Рисунок 4 - Шестой этап расчета: Распределение устойчивого состояния давления пор



Рисунок 5 - Седьмой этап расчета: Распределение давления пор в заданное время анализа

Метод конечных элементов



Рисунок 6 - Восьмой этап расчета: Распределение устойчивого состояния давления пор

#### Рекомендуемый порядок моделирования

Решение геотехнических задач с использованием метода конечных элементов является относительно сложной задачей. Но все же, большинство пользователей пытаются проанализировать всю сложную структуру с самого начала - найти причину возможных потерь сходимости может тогда становятся весьма сложно. Поэтому мы рекомендуем следующий подход:

1) Определение всей топологии структуры

2) Предположим, упругий отклик почв и контактных элементов (использовать линейные модели)

3) Создать грубую сетку

4) Определите все этапы расчетов

5) Выполнить анализ всех этапов расчета (достаточнозапустить анализ последней стадии строительства - анализ всех предыдущих стадии осуществляются автоматически).

6) Оценить ход анализа

Если анализ не удался, вычислительная модель неверно определена -

например балки имеют слишком много внутренних петель в результате в кинематически неопределенной структуре, стойку не правильно подключили к структуре и т.д. Программа содержит ряд встроенных процедур проверки, чтобы предупредить пользователя о возможных недостатках в определении модели. Некоторые ошибки, однако, не могут быть раскрыты до запуска программы.

Если все этапы были успешно проанализированы, мы рекомендуем пользователю проверить результирующие смещения и таким образом также объективность используемых параметров почвы и структуре жесткости. Заметим, что использование нелинейных моделей всегда приводит к более крупным смещениям по сравнению с чисто упругой реакцией - следует, упругие смещения могут быть чрезмерно большими, мы должны сначала отрегулировать вычислительную модель, прежде чем принять любую из доступных моделей пластичности.

Если анализ удался и смещения являются разумными, мы можем действовать следующим образом:

1) Заменить линейные модели соответствующими пластическими моделями (Мора-Кулона, Друкер-Прагер)

2) Выполнить анализ и оценить результаты в соответствии со стадией 6

3) Добавить нелинейные контактные элементы

4) Выполнить анализ и оценить результаты в соответствии со стадией 6

5) Уточнить и отрегулировать конечно-элементную сетку и выполнять окончательный анализа.

Хотя этот подход может показаться довольно громоздким и сложным, он может сэкономить значительное количество времени при поиске причины отказа (потери сходимости) анализа сложных проблем.

#### Потеря сходимости нелинейного анализа

Потеря сходимости решения нелинейного анализа требует определенных модификаций базовой модели вычислений - следующие этапы могут быть приняты:

33. Увеличение жесткости конструкции

- 34. Уменьшить прилагаемые нагрузки
- 35. Разделить выемку грунта в несколько этапов
- 36. Улучшение материальных параметров уже существующих грунтов
- 37. Изменить материальную модель почв в местах пластичности
- 38. Добавить армирующие элементы (балки, якоря)
- 39. Добавить опоры
- 40. Изменить значения параметров, влияющие на итерационный процесс (увеличить число итераций).

Распределение пластических деформаций может обеспечить какое-то объяснение тому, почему анализ не сходится. Следует отметить, что распределение эквивалентной пластической деформации определяет местонахождение области вероятного развития критических поверхностей обрушения.



Анализ не сходится - участок эквивалентной пластической деформации

# Настройка и описание анализа

Значения параметров по умолчанию, которые оптимизируют результат анализа, обеспечивают достаточно точный и эффективный анализ. Тем не менее,

опытный пользаватель может изменить настройки по умолчанию и изучить влияние параметров на точность и ход анализа. Настройки параметров можно регулировать в диалоговом окне "Параметры анализа".

Тем не менее, изменение стандартной настройке заслуживает слов предостережения. До внесения изменений, пользователь должен быть хорошо осведомлен о возможных последствиях. В частности, ненадлежащее установка может существенно замедлить процесс вычислений, может вызвать расхождение и в конечном итоге привести к неверным результатам.

41. Метод решения

42. Изменения в матрице жесткости

43. Начальный этап решения

44. Максимальное число итераций

45. Критерий сходимости

46. Настройки метода Ньютона-Рафсона

47. Метод настройки длины дуги

48. Метод поиска линии

49. Пластичность

Настройка по умолчанию может быть всегда восстановлен нажатием кнопки "Стандартный".

# Метод решения

Программа МКЭ служит для анализа геотехнических проблем, характеризующихся нелинейным откликом грунта или тела скальной породы. Успешный анализ большинство из таких задач требует итерационного решения данной краевой задачи. Применение метода конечных элементов (МКЭ) приводит к некоторым условиям равновесия, записанных как:

$$K_{\mathrm{T}}.\Delta u = \Delta f$$

где:

*КТ*- мгновенная матрица жесткости

Ди - вектор приращений узловых смещения

 $\Delta f$  - вектор приращений из собственного баланса сил

Это уравнение можно решить лишь приближенно с помощью подходящего

численного метода. Цель этого метода состоит в том, чтобы прибывать, в процессе итерации, в таком состоянии стресса и напряжения, удовлетворяющее условию  $\Delta f= 0$ , для этого программа предлагает два основных метода.:

- Метод Ньютона-Рафсона NRM.
- Метод длины дуги ALM.

Настройка расчёта	×		
Общее Newton - Raphson Line search Пластичность			
Метод : Newton - Raphson			
Макс.число итераций на один шаг расчёта : 100			
Начальный шаг расчёта : 1,00 [-]			
Редукция параметров грунта : уменьшить с, fi			
Начальный шаг редукции : 0,90 [-]			
Допуски на ошибки смещения : 0,0100 [-]			
Допуск на отклонения неравных сил : 0,0100 [-]			
Допуски на ошибки энергии : 0,0100 [–]			
🔽 Учитывать границы контуров материала			
Стандартная настройка	ена		

Настройки анализа - Настройки методов решений

### Изменение матрицы жесткости

Полный метод Ньютона-Рафсона предполагает, что мгновенная касательная матрица жесткости образована в начале каждой новой итерации.

Формирование новой касательной матрицы жесткости только в начале новой ступени нагрузки приводит к так называемому модифицированному методу Ньютона-Рафсона.

Если матрица жесткости формируется только один раз в начале анализа решения получаем так называемый метод первоначального напряжения.

Отдельные методы могут быть выбраны из "Параметры анализа" раздела диалогового окна "обновление жесткости". Соответствующие настройки:

1. Сохранить упругость - первоначальный метод напряжения,

2. Каждая итерация - полный метод Ньютона-Рафсона,

#### 3. Каждый шаг нагрузки - модифицированный метод Ньютона-Рафсона.

Значение по умолчанию предполагает полный алгоритм Ньютона-Рафсона (обновление жесткости после каждой итерации). Обратите внимание, что формулировка матрицы жесткости соответствует алгоритму обновления напряжения. Такой состав обеспечивает то квадратичную сходимость полного Ньютона-Рафсона (NRM) в отличие от модифицированной NRM или начальный метод напряжения, что, по сравнению с полной NRM, требует значительно больших взаимодействий для достижения равновесия.

С другой стороны, было бы справедливо отметить, что вычислительные затраты на итерацию определяется главным образом расчетом и факторизацией касательной матрицы жесткости. Предполагая, упругую характеристику структуры становится очевидно бессмысленно создать структурную матрицу жесткости более чем один раз (обновление жесткости - поддерживать упругость). степень нелинейности предполагает Напротив. увеличивая более частые жесткости переформулировок (обновления жесткости - каждой итерации).

Настройка расчёта	×		
Общее Newton - Raphson Line search Пл	пастичность		
Метод : Newton - Raphson	💌 🗹 Line search		
Изменение матрицы жёст после каждой и	терации 💽		
Макс.число итераций на о после каждой и	терации		
Начальный шаг расчёта :	шага расчёта 2,999 [-]		
Редукция параметров грунта : уменьши	пь с, fi 💌		
Начальный шаг редукции :	0,90 [-]		
Допуски на ошибки смещения :	0,0100 [-]		
Допуск на отклонения неравных сил :	0,0100 [-]		
Допуски на ошибки энергии : 0,0100 [-]			
Учитывать границы контуров материала			
Стандартная настройка	🗹 ОК 🗵 Отмена		

Метод Ньютона-Рафсона - матрица жесткости параметры обновления

# Начальный шаг решения

Фактический анализ проводится постепенно в несколько этапов нагрузки,

пока общая нормативная нагрузка не будет достигнута.

Программа требует установки только начального шага нагрузки.

Этот параметр представляет собой соотношение между нагрузкой, приложенной в заданной нагрузке шага к общей предписанной нагрузки. В зависимости от хода итерации этот параметр адаптивно регулируется.

Значение по умолчанию предполагает 25% от общей предписанной нагрузки. Подобно тому, как мы уже упомянули, что это справедливо, что повышает сложность решения из нелинейного точки отклика зрения требует сокращения этого параметра. Тем не менее, в случае упругого отклика этот параметр может быть равным 1, что соответствует решению данной проблемы в один шаг нагрузки.

### Максимальное количество итераций

Этот параметр представляет собой максимальное число итераций, допустимых для одного шага нагрузки для достижения состояния равновесия.

Превышение этого значения, предлогаемого программой, автоматически уменьшает текущее значение предпологаемого шага нагрузки и перезапускает решение от последнего уровня нагрузки, которая соответствует состоянию равновесия. Аналогичные меры принимаются тогда, когда колебание или дивергенция программы является неизбежным.

# Критерий сходимости

Для дополнительных стратегий решения основе одного на ИЗ чтобы быть эффективным, необходимо итерационных выбрать методов подходящие критерии (заранее заданных допусков для достижения равновесия) для прекращения итерационного процесса.

Обратите внимание, что свободные критерии конвергенции могут привести к ошибочным результатам в то время как слишком жесткие допуски конвергенции могут привести к неоправданному увеличению вычислительной стоимости чтобы прийти к результатам избыточной точности.

В программе сходимость сверяется с изменением приращений узловых перемещений, смены вне сбалансированных сил, а также изменения внутренней

140

энергии. Последний критерий дает определенное представление о том, как оба перемещения и силы подходят к своим равновесным значениям. Соответствующие настройки:

1. Допуск ошибки смещения - допуск для изменения приращения смещения нормы.

2. Допуск вне сбалансированных сил - допуск для изменения вышедшего из баланса сил нормы.

3. Допуск ошибки энергии - допуск изменения внутренней энергии.

По умолчанию установлено значение 0,01 для всех конвергенции допусков.

# Настройка метода Ньютона-Рафсона

С помощью метода Ньютона-Рафсона ход итерации можно управлять, задав следующие параметры:

1) Фактор релаксации - это представляет собой значение сокращения текущего шага нагрузки для перезагрузки, обеспечивающей решение не сходится. Новое значение предполагаемого шага нагрузки определяется из выражения:

Новый шаг нагрузки = шаг старой нагрузки / коэффициент релаксации.

2) Максимальное количество релаксаций для одного шага нагрузки этот параметр определяет, сколько раз можно ссылаться на вышеупомянутые действия в течение всего анализа. Превышение этого значения подсказывает программе прекратить анализ. Результаты будут доступны для последнего успешно конвергентного уровня нагрузки.

**3)** Минимальное количество итераций для одного шага нагрузки - этот параметр позволяет возможности ускорения анализа. В частности, обеспечение числа итераций, сходятся в последнем шаге нагрузки меньше, чем минимум одного набора, шаг нагрузки для нового прироста нагрузка увеличивается следующим образом:

Новый шаг нагрузки = шаг старой нагрузки \* коэффициент релаксации.

Значение по умолчанию из перечисленных выше параметров

#### соответствуют значениям отображаемых на рисунке:

Настройка расчёта
Общее Newton - Raphson Line search Пластичность
Фактор релаксации шага расчёта : 2
Максимальное количество релаксаций шага расчё 0
Фактор релаксации шага редукции : 2
Максимальное количество релаксаций шага редук 3
Минимальный шаг редукции : 0,99 [-]
Стандартная настройка 🕢 ОК 🗵 Отмена

Параметры ввода итерационного процесса

#### Настройка метода длины дуги

Метод длины дуги (ALM) относительно надежный метод особенно подходит для решения задач, которые требуют поиска коллапса нагрузки структуры. Анализ устойчивости земляных сооружений (откосы, склоны) является лишь одним конкретным примером такой задачи. В отличие от NRM, где решение приводится исключительно, предписывая приращения нагрузки, ALM вводит дополнительный параметр, представляющие определенное ограничение на стоимость приращения нагрузки в данной нагрузке шагом. Значение шага нагрузки таким образом, зависит от хода итерации и имеет непосредственное отношение к выбранной длины дуги.

Основное предположение метода является то, что предписано нагрузке пропорционально изменяться при расчете. Это означает, что конкретный уровень приложенной нагрузки может быть выражен как:

# $\overline{\mathbf{F}} = \boldsymbol{\lambda}.\mathbf{F}$

где: *F* - текущая доля от общей приложенной нагрузки

- λ коэффициент пропорциональности
- *F* общая предписанная нагрузка

Обратите внимание, что с ALM вектор загрузки **F** представляет только определенный опорный груз, который поддерживается постоянным в течение всего расчета отклика. Фактическое значение нагрузки в конце расчета равна  $\lambda$  кратного **F**;  $\lambda < l$  представляет состояние, когда фактическая несущая способность конструкции меньше предписанной контрольной нагрузки; если  $\lambda$  в конце расчета отклика превышает 1, программа автоматически регулирует длину дуги для того, для решения сходится к значению  $\lambda = 1$  в пределах выбранного допуск, равным 0,01 (1% максимальная загрузки применяется). Это значение не может быть изменено.

В литературе предлагает ALM формулировок. Программа ряд Крисфилд поддерживает метод, предложенный И последовательно линеаризованным методом, предложенным Рамм.Последний значительно прост, по крайней мере, от разработки точки зрения, чем метод Крисфилд. С другой стороны, как сообщается, менее надежными. Настройка по умолчанию является метод Крисфилд.

Другие важные параметры метода "Настройка длины дуги» и «Автоматическое управление длиной дуги".

Настройка расчёта			<b>—</b>
Общее Arc - length	Line search Пластичн	ость	
Метод:	Crisfiled Crisfiled	•	2 0005-03 [-]
Оптимизация	консистентно линеа Оптимальное число и	ризована итераций в 1.ш	are r 8
Соотношение нагрузк	ка/смещение:	0,000	
🗌 Оптимизация			
Макс.число шагов рас	счёта:	100	
Фактор релаксации ш	ага расчёта :	2	
Максимальное количе	ество релаксаций шага	расчё 0	
Фактор релаксации ш	ага редукции :	2	
Максимальное количе	ство релаксаций шага	редук 3	
Минимальный шаг ред	дукции:	0,99	H
Стандартная настройк	a		🗹 ОК 🛛 🖾 Отмена

Метод конечных элементов

Длина дуги - настройки типа метода длины дуги

# Установка длины дуги

Длина дуги является основным параметром, влияющим на расчет отклика. Индикатором для выбора длины дуги может быть ход итерации в предыдущем этапе решения. Независимо от того, что программа позволяет следующий параметр:

1. Определить из стадии нагрузки – длина дуги определяется автоматически с начального шага нагрузки.

2. **Принять из предыдущего этапа** – значение длины дуги в конце предыдущей стадии расчета используется в качестве исходного значения для нового этапа. Эта опция становится активной на втором этапе строительства.

3. Ввод – значение длины дуги может быть непосредственно предписано.

Обеспечение реакции структуры не может быть определена предварительного мы рекомендуем использовать первый вариант. В
зависимости от курса расчета можно отрегулировать значение длины дуги и повторить расчет. В любом случае, однако, это возможно для обеспечения сходимости для произвольного значения выбранной длины дуги. Аналогично NRM, если возникают проблемы конвергенции программа позволяет уменьшить текущие длины дуги и перезапускает расчет.

Следующий параметр запуска итерационного процесса является максимальное число уровней нагрузки. Программа всегда проводит в предписанном количестве уровней нагрузки, обеспечивающих:

50. параметр  $\lambda$  превышает 1,

51. максимальное число релаксаций длины дуги превышен.

Проведение анализа прекращается из-за превышения максимального количества предписанных уровней нагрузки и параметр *λ* меньше 1, необходимо увеличить количество шагов и перезапустить анализ.

Настройка расчёта		×			
Общее Arc - length Li	ne search Пластичность				
Метод:	Crisfiled				
Длина дуги :	определить из шага расчёт	a 🔽 2,000E-03 [-]			
Оптимизация	определить из шага расчёт взять из предыдущего этаг	aa are f. 8			
Соотношение нагрузка, смещение . 0,000 [-]					
Оптимизация	П Оптимизация				
Макс.число шагов расчёта: 100					
Фактор релаксации ша	га расчёта :	2			
Максимальное количество релаксаций шага расчё 0					
Фактор релаксации шага редукции : 2					
Максимальное количество релаксаций шага редук 3					
Минимальный шаг реду	кции:	0,99 [-]			
Стандартная настройка	]	🗹 ОК 🗵 Отмена			

Длина дуги - установка длины дуги

### Автоматического управления длиной дуги

Автоматическая стратегия управления длины дуги составляет очень важную часть реализации любого численного метода. Программа позволяет адаптивно регулировать текущую длину дуги для нового шага нагрузки в зависимости от курса итерации в предыдущем шаге по активации опции Оптимизировать. Программа будет пытаться выбрать значение длины дуги, которая держит нужное количество итераций на каждом этапе нагрузки, необходимой для конвергенции - опция Оптимальное количество итерации в одну стадию нагрузки.

Следующий параметр запуска процесса итерации является Коэффициент нагрузки/смещения. Этот параметр представляет собой скалярный множитель, который регулирует масштабы нагрузки параметром  $\lambda$  и вектор перемещений *и*. предоставляя этот параметр достаточно большим анализом в основном за счет увеличения нагрузок. При установке этого параметра равным 0 (по умолчанию), получим так называемую цилиндрическую ALM и анализ будет зависеть от прироста смещения. Этот подход является более стабильным и рекомендован авторами. Тем не менее, программа позволяет оптимизировать этот параметр путем активации опции "Оптимизировать". В таком случае текущее значение данного параметра устанавливается равным текущему параметру жесткости Берган, что обеспечивает скалярную меру степени нелинейности. С увеличением степени нелинейности этот параметр уменьшается. В непосредственной близости от коллапса значение этого параметра равно нулю и решение обусловлено приращением смещения. Эта стратегия, которая поддерживает использование цилиндрического метода, имеющего параметр нагрузки/смещения, равном нулю.

Настройка расчёта 🗾	٢.	
Общее Arc - length Line search Пластичность	_	
Метод : консистентно линеаризована		
Длина дуги : взять из предыдущего этапа 💌 2,000Е-03 [-]		
Оптимизация Оптимальное число итераций в 1.шаге г 8		
Соотношение нагрузка/смещение : 0,000 [-]		
Оптимизация		
Макс.число шагов расчёта: 100		
Фактор релаксации шага расчёта: 2		
Максимальное количество релаксаций шага расчё 0		
Фактор релаксации шага редукции : 2		
Максимальное количество релаксаций шага редук 3		
Минимальный шаг редукции : 0,99 [-]		
Стандартная настройка	•	

Метод конечных элементов

Длина дуги – автоматическое управление длиной дуги

### Метод поиска линии

Основная цель метода поиска линии является определение скалярного множителя  $\eta$ , который используется для масштабирования текущего прироста смещения так, что равновесие удовлетворяется в заданном направлении. Фактический вектор смещения в конце i-той итерации таким образом, становится:

$$\mathbf{u}_{i} = \mathbf{u}_{i-1} + \eta \Delta \mathbf{u}$$

Следовательно, процесс расчета либо ускоряется,  $\eta > 1$ , или затухают,  $\eta < 1$ . Очевидно, что при поиске линии осуществляется каждая итерация, расход итераций увеличивается. С другой стороны, этот недостаток компенсируется меньшим числом итераций, необходимых для сближения и по возможности избежать расхождение или колебание процесса итерации. По умолчанию использование линейного поиска включено.

Неопытному пользователю рекомендуется использовать настройку по умолчанию, видно из рисунка.

Метод конечных элементов

Настройка расчёта				×
Общее Arc - length Lir	ne search Пластичн	юсть		
Способ решения :	выполнить итераци	110	]	
Допуск на отклонения	неравных сил :	0,8000	[-]	
Макс.число итераций д	ля line search :	3		
Line search limit - миниму	M :	0,100	[-]	
Line search limit - максим	ум:	1,000	[-]	
Стандартная настройка	]	C	✓ OK	🛛 Отмена

Настройки метода поиска линии

# Пластичность

Диалоговое окно Пластичность служит, чтобы установить параметры, управляющие процедурой обновления напряжения.

Параметр Вернуться дают допуск поверхности указывает на допуск для удовлетворения выбранного условия текучести. Предполагая, нелинейное упрочнения / смягчение, как и в случае модифицированной модели Сат глины отображение возвращения напряжения требует итерационный процесс.

Максимальное число допустимых итераций тогда задается Макс. Кол-во итераций для одного пластического шага параметра. При использовании жесткопластического варианта Мора-Кулона, Друкер-Прагер или модифицированной модели Мора-Кулона, эти параметры не будут применяться.

Значение по умолчанию, показанные на рисунке, рекомендуется.

Метод конечных элементов

Настройка расчёта 🗾	3
Общее Arc - length Line search Пластичность	_
Допуск на отклонение возврата на поверх 0,00100 [-]	
Максимальное число итераций на один пластичесн 20	
Стандартная настройка	

Параметры запуска сопоставления возвращаемого напряжения

## Ход анализа

Ход анализа можно просматривать в нижней части экрана.

Эластичный анализ будет завершен в одном расчетном шаге. Нелинейный анализ выполняется в несколько этапов - внешняя нагрузка постепенно увеличивается в несколько загружающих (расчетных) шагов. Анализ завершается успешно, если нет потери общей конвергенции, так что 100 % от требуемой нагрузки будет достигнута.

Значение параметров по умолчанию, которые управляют анализом решения, оптимизированы, чтобы гарантировать достаточную точность и эффективность анализа. Тем не менее опытный пользователь может потребовать, чтобы изменить настройки по умолчанию или исследовать влияние параметров на точности и курсе анализа. Настройка параметров можно регулировать в диалоговом окне "Параметры анализа":

- 52. Процент параметра приложенной нагрузки дает процент полной нагрузки (исключенное значение) в конце текущего шага загрузки, принимающего успешную сходимость для текущего шага загрузки.
- 53. Параметр размера Шага обеспечивает текущий масштабный коэффициент

для определения инкремента загрузки на текущем шаге загрузки.

54. Параметр Запаса прочности соответствует математическому ожиданию запаса прочности, принимающего успешную сходимость для данных параметров *c*, *φ*.

Ход итерации в пределах заданной нагрузки шага характеризуется изменением параметров конвергенции:

- 55. *η* Параметр метода поиска линии
- 56. изменение приращения смещения нормы
- 57. изменение вышедшего из баланса силы нормы
- 58. изменение внутренней энергии

Если все три ошибки меньше, чем предусмотренные допуски ошибок (можно редактировать в диалоговом окне "Настройки"), анализ на этапе расчета прекращается.

Кнопка "Прерывание" служит для завершения процесса вычисления. Результаты будут доступны для последнего уровня нагрузки, которая соответствует состоянию равновесия.

Расчёт		Итерация	Eta	Ошибка переме	Ошибка несбал	Ошибка эне
Степень устойчивости :	1,69 [-]				0.000.00	
Шагредукции:	7	6	0,7696	0,00799	0,03841	0
Величина шага релукции :	0.90000 [-]	7	0,1000	0,00045	0,03255	C
Число релаксаций на шаг редук	0	8	1,0000	0,00059	0,00782	0
Шаграсчёта:	1	Прошла конвергенция	данного шага рас	чёта.		
Длина шага расчёта :	1,00000 [-]	Прошла конвергенция	расчёта для данн	юго шага редукции.		
Число итераций :	1	Шаг редукции 7				
Процент достигнутой нагрузки	100,0 [%]	Шаг расчета 1				
Количество релаксаций на шаг	0	•				

Ход анализа

# Результаты

Визуализация (построение) результатов является одной из наиболее важных особенностей программы. Программа позволяет выбрать из нескольких основных стилей графических выходов, которые определяются в диалоговом окне "FEM - настройки визуализации результатов".

- 59. рисовать деформированную сетку
- 60. Поверхность участка переменных развитых внутри тела почвы / скальной породы (суммарные значения или их приращения в отношении другой стадии

расчета могут отображаться)

61. внутренние силы распределены вдоль балки, контактов

- 62. силы анкеров и силы реакции
- 63. кривая депрессии
- 64. наклонные участки переменных
- 65. векторы и направления переменных

Для отображения результатов программы работают следующие системы координат.

Панель инструментов "Итоги" в верхней части экрана служит для выбранных переменных, которые будут отображаться и то, как они должны появиться на экране. Цветовая схема показана в правой части рабочего стола. Ее особая настройка может регулироваться с помощью "Цветовая схема" панель инструментов.

Потому что правильная настройка выходов может часто занимать много времени, программа располагает удобной системой хранения и управления различных параметров.

Все выходы и отдельные результаты могут быть дополнительно распечатаны из протокола анализа.

# Панель инструментов - Результаты

Панель инструментов содержит следующие элементы управления:



Панель инструментов "Настройка визуализации графических выходов"

Отдельные элементы работают следующим образом:

🍃 🌽 Показать	Построение	открывает - диалоговое окно "FEM
	параметра стиля	настроек результаты визуализации",
		которая позволяет пользователю быть
		более точным в определении стиль
		графика
Вид 1 🔻	Список участков	комбинированный список, содержащий
		имена участков сохраненных

		пользователем
•	Сохранить	сохранение текущего участка
	участок	отображается на рабочем столе,
		диалоговое окно служит для ввода
		названия участка
F	Менеджер	открывает диалоговое окно "Менеджер
	участков	участков", которое служит для
		управления (удаление, изменение
		порядка, переименовывать) уже
		сохраненых участков
Значения: сумммар. 🔻	Значения в	отображает вычисленные значения
	этапах анализа	(можно увидеть либо всего или
		дополнительных значений по отношению
		к выбранной стадии строительства)
Величина : Осадка d <sub>Z</sub> ▼	Тип переменной	отображает выбранную переменную
Плоско : 🌠	Площадь	включает/выключает построение
	участка	изолиний, изоповерхностей
Сеть: 😽	Сети	включает/выключает стиль построение
		FE сети (только края, или в соответствии
		с настройкой в диалоговом окне - "FEM
		настройки результатов визуализации")
Сеть:	Перемещения	выбирает стиль построения
	участка	деформированной сетки -
		недеформированная / деформируется
		(деформируется по величине,

деформированного на коэффициент)

Панель инструментов содержит наиболее часто используемые элементы управления, необходимые для просмотра результатов на рабочем столе. Детальная настройка для стиля графики результатов доступен в диалоговом окне "FEM - настройки результатов визуализации".

Подобно другим нашим программам результаты можно сохранить и распечатать. Стиль построения можно регулировать в диалоговом окне "Настройки стиля визуализации".

# Настройки результатов визуализации

В "FEM - Настройки результатов визуализации" диалоговое окно служит для выбора типа переменной, который будет отображаться и как она должна появиться на экране. Индивидуальная настройка впоследствии может быть сохранена с помощью «Результаты» на панели инструментов.

Подменю "Основные" служит для установки основных параметров запуска визуализации поверхностных переменных и FE сети - другие вкладки страницы используются для определения других типов выходов.

МКЭ - установка изображения результата					<b>—</b>						
Основная	Конструкь	ция	Значения на по	верхности	Повёрнутые сече	ния М	Мульда оседания	Эпюры	Силы и реакции	Векторы и наг 🔹 🕨	
- Горизонт	Горизонтальная проекция Сеть					🗹 ОК					
Значения	a: [	сумм	мар.	•	Отображение :	(не от	гображать) 💽	•			🛛 Отмена
Величина	a:	Sigm	a z, eff.	-							
Отображ	ение :	изоп	оверхности								
Рисов	ать активн	ные о	бласти								
Точки	1 нарушени	я усл	ювия растяжен	ия							
Предупр	еждение										
Все настр	ойки резул	пьтат	ов корректно о	трисовыван	отся.						
L											

Диалоговое окно «Свойства FEM - Настройки результатов визуализации" - подменю "Базовый"

Из-за четкости графического представления не возможно построить некоторые результатов В тоже время. He ИЗ возможно построить деформированную сетку вместе с распределениями внутренних сил вдоль балки только один вариант должен быть выбран. Если выбрано недопустимое сочетание, дисплей выдаст предупреждающее сообщение в нижней части диалогового окна. В результате четкости графического представления не возможно графически изобразить некоторые результаты одновременно. Настоящий пример показывает, неприемлемое сочетание деформированных сетей/значение защитных сетей, установленные в подменю "Базовая".

Метод конечных элементов

ИКЭ - установка изо	бражения результата	а								×
Основная Конструн	кция Значения на по	верхности	Повёрнутые с	ечения Му	льда оседан	ия 3	Эпюры Силы и	реакции	Векторы и наг 💶 🕨	
— Значения на площ	ади		Растр значений	i ———						🗹 ОК
Значения :	в точках растра	•	Начало:	x =	0,00	[M]	z =	0,00	) [M]	🛛 Отмена
		L	Шаг:	ōx =	1,00	[M]	δz =	1,00	) [M]	
		г	Поворот:	α =	0,0	[°]				
Предупреждение										
Не отрисовывае Причина : Дефорг - Значения в точ	ется: мированная сетка ках растра									

Предупреждение о конфликте в построении результатов

# Список переменных

Следующие переменные могут быть отображены (значения в теле грунта/скальной породы):

Список переменных, отображаемые программой, - основные переменные

Обозначения	Описание	Переменная	Единица осадки
Settlement DZ	Смещение в направлении Z.	dz	(мм)
Settlement DZ	Смещение в направлении Х.	dx	(мм)
Sigma Z, tot.	Общее нормальное напряжение в направлении Z.	σz,tot	(кПа)
Sigma Z, eff.	Эффективное нормальное напряжение в направлении Z.	σz,eff	(кПа)
Pore pressure <i>u</i>	Давление пор	u	(кПа)
Sigma X, tot.	Общее нормальное напряжение в направлении Х	σx,tot	(кПа)
Sigma X, eff.	Эффективное нормальное напряжение в направлении X.	σx,eff	(кПа)
Tau <i>X</i> , <i>Y</i> .	Напряжение сдвига	τχζ	(кПа)
Epsilon <i>eq</i> .	Эквивалентное напряжение	εeq	[-]
Epsilon <i>eq.</i> , <i>pl</i> .	Эквивалентная пластическая деформация	εeq,pl	[-]

# Chyba! Záložka není definována.Список переменных, отображаемых

# программой - Переменные доступные в режиме "Расширенный ввод".

Обозначения	Описание	Переменная	Единица осадки
Epsilon vol.	Объемное напряжение	εvol.	[-]

Метод коне	ечных элементов
------------	-----------------

Sigma <i>m</i> , tot.	Среднее общее нормальное напряжение	σm,tot	(кПа)
Sigma <i>m</i> , <i>eff</i> .	Среднее общее нормальное напряжение	σm,eff	(кПа)
Sigma <i>eq</i> .	Эквивалентный девиатор напряжения	J	(кПа)
Epsilon vol., pl.	Объемная пластическая деформация	Evol.pl	[-]
Epsilon X	Нормальная деформация в направлении Х	EX	[-]
Epsilon Z	Нормальная деформация в направлении Х	EZ	[-]
Gama XZ	Деформации сдвига в XZ плоскости	yxz.	
Epsilon 1, princ.	Максимальная главная деформация	ε1,princ	[-]
Epsilon 2, princ.	Промежуточная главная деформация	ε2,princ	[-]
Epsilon <i>3</i> , <i>princ</i> .	Минимальная главная деформация	ε3,princ	[-]
Sigma 1, princ.	Максимальная главное напряжение	σ1,princ	(кПа)
Sigma 2, princ.	Промежуточное главное напряжение	σ2,princ	(кПа)
Sigma <i>3, princ</i> .	<i>3, princ.</i> Минимальное главное напряжение		(кПа)
Epsilon <i>X</i> , <i>pl</i> .	<i>X, pl.</i> Нормальная пластическая деформация в направлении Х		[-]
Epsilon Z, pl	Нормальная пластическая деформация в направлении Z.	εz,pl	[-]
Gama XZ, pl.	Сдвиг пластической деформации в XZ плоскости	yxz,pl	

# Диспетчер

Рамка "Диспетчер" содержит таблицу со списком введенных диспетчеров. Добавление (редактирование) диспетчеров выполняется в диалоговом окне "Новые диспетчеры".

Либо точка или линия-диспетчер могут быть введены. Окно диалога затем служит для указания координат диспетчера и деятельности.

Диспетчеры могут быть также введены с помощью мыши. Этот режим ввода активизируется нажатием соответствующей кнопки на турнике инструмент "Диспетчер". Следующие режимы:

- 66. Добавить Диспетчер вводится, нажав левую кнопку мыши в нужном месте на рабочем столе.
- 67. **Изменить** При нажатии на левую кнопку мыши на уже существующий диспетчер открывается "Регулировка диспетчера" диалоговое

окно, которое позволяет измененить его параметры.

68. Удалить При нажатии на левую кнопку мыши на уже существующего диспетчера открывается окно диалога Удаление диспетчера принимая это действие удаляется выбранная свободная точка.

Диспетчеры также можно редактировать на рабочем столе с помощью активных объектов.

Программа позволяет вводить произвольное количество точек и линийдиспетчеров в любом месте в структуре, а также вне его. Диспетчеры имеют несколько функций:

69. отображения значений переменных в данной точке (точка-диспетчер),

70. отображения значений разности расстоянии двух точек по сравнению с предыдущим этапом *d*[*N*] или по сравнению с входным каскадом, где *N* является номером этапа (линия-диспетчер).

Точки диспетчеры хранят также значения переменных, зарегистрированных во время анализа на отдельных этапах. Они могут быть записаны в протокол вывода или использовать для создания графика.

Список переменных, построенных для отдельных диспетчеров устанавливается в диалоговом окне "Настройка диспетчеров". Чтобы открыть окно с помощью кнопки "Настройки" в горизонтальной панели инструментов "Диспетчеры".

#### Метод конечных элементов



#### Рамка "Диспетчеры"

### Настройки диспетчеров

Диалоговое окно "Настройка диспетчеров" служит для установки переменных, значения которых будут построены для данного диспетчера (точкадиспетчеров). Настройки для данного списка переменных может быть принят от предыдущего этапа строительства с помощью кнопки "Принять из предыдущего этапа". Четыре переменные отображаются по умолчанию. Дополнительные переменные могут быть добавлены в список с помощью кнопки "Добавить". Переменная может быть удалена из списка с помощью кнопки "Удалить".

Для линии-диспетчеров диалоговое окно служит для активации участка значений по сравнению с предыдущем этапом или стадии ввода, соответственно.

Для точечных и линейных-диспетчеров можно указать цветовой диапазон построенных значений.

Метод конечных элементов

№       Величина       Цвет         > 1 Осадка d z       ✓       ✓         2 Осадка d x       ✓       ✓         3 Sigma z, tot.       ✓       ✓         4 Sigma x, tot.       ✓       ✓

Диалоговое окно "Настройки диспетчеров"

# Графики

Рамка "Графики" содержит таблицу со списком введенных графиков. Добавление (редактирование) диспетчеров выполняется в диалоговом окне "Новые графики". Окно диалога служит для ввода номера диспетчера, для которых график будет создан и переменные, принятые для X и Y -оси соответственно.

Графики могут быть также введены с помощью мыши. Этот режим ввода активизируется нажатием соответствующей кнопки на горизонтальной панеле инструментов "Графики". Следующие режимы:

- 71. Добавить Расположение графика вводится, нажатием левой кнопки мыши на требуемый диспетчер.
- 72. **Изменить** При нажатии на левую кнопку мыши на уже существующем графике открывается диалоговое окно "Регулировка графика", которое позволяет модификации его параметров.
- 73. Удалить Щелчок левой кнопкой мыши по уже существующему графику открывает диалоговое окно удаления графика признающий, что это действие удаляет выбранный график.

Графики также можно редактировать на рабочем столе с помощью активных объектов.

Программа допускает ввод произвольного числа графиков в точках введенных диспетчеров. Графики допускают графическое изображение взаимной зависимости отдельных переменных, сохраненных в диспетчерах в течение анализа.

🦉 GEOS v17 - MIC3 [CAUSers/Public/Documents/Fine/GEOS v17 Pfildady/Demo01.gml	k"]				- 8 2
Outor Housewood     Задание     Инображения     Настройка     Справка       □ <th>тображание Ш</th> <th>аблон DXP : 🕑 Риссиать 🗍</th> <th>🖉 Npanoma</th> <th></th> <th></th>	тображание Ш	аблон DXP : 🕑 Риссиать 🗍	🖉 Npanoma		
	кол Создать графе — Харастерист Монитор I Ось X I	201 4.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5.0 5	-9,79 k)	NAN 201 101 101 101 101 101	Posses     Posses
	- A - A - A	Supra X, soc. Spirito X, eff. Tau 12 Spirito neu. gl Spirito neu. gl Sparito neu. gl Sparito neu. Spirito n			<ul> <li>✓ Apratrypel</li> <li>✓ Tpartypel</li> <li>✓ Tpartypel</li> <li>▲ Harp, na Senne</li> <li>✓ Parentr</li> <li>✓ Monoropel</li> <li>✓ Tpapel</li> <li>✓ Versiles</li> </ul>
Графи I              € Добекть               € Удахить                 В (3) В)             Граф               Заченее               Графи I                 №             Заченее               Ось Х               Ось У               Г                 №               №               Ось Х               Ось У               Г                 №               №               Ось Х               Ось У  <	рафы і ў і і і і і і і і і і і і і і і і і	Signa 2, ef. Bara 1, ef. Epsilon x, el. Epsilon x, el. Gano yz, el. Vacna roperactiva 7 14 15 15 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10		1 2 0,9 1,0 1,1 1,1 2,1 1,4 2,1 1,4 2,1 1,4 1,1 Octore 62[m]	PKCYNKH = Addesvra pac. Tasdar : d Concor pacywcze Dracor pacywcze

Метод конечных элементов

Рамка "Графики"

# Устойчивость

В анализе устойчивости (коэффициент запаса) программа снижает первоначальные прочностные параметры - угол внутреннего трения и сцепления пока не произойдет сбой. Анализ затем приводит коэффициент безопасности, который соответствует классическому методу предельного равновесия.

Анализ коэффициента безопасности требует использования элементов шести узлов. Поскольку пластическое скольжение является основным механизмом отказа, мы также требуем, чтобы Мора-Кулона, модифицированный Мора-Кулона или модель пластичности Друкера-Прагер использовались для всех грунтов. Значения по умолчанию могут быть скорректированы в диалоговом окне "Параметры анализа".

В режиме анализа стабильности единственные переменные, доступные для графического представления являются смещения (в Z и X-направлений) и эквивалентных полных и пластических деформаций. Деформация тела грунта соответствует состоянию отказа, полученного для приведенных параметров грунта - поэтому он не соответствует реальному положению деформации тела

грунта. Вместо этого, он обеспечивает хорошее представление обо всей реакции наклона структуры земли в целом в момент начала выхода из строя.

Подходящий способ представления результатов анализа устойчивости векторы смещений нанесены вместе с эквивалентной пластической деформации. Локализованная пластическая деформация обеспечивает видимое доказательство о возможном месте критической поверхности скольжения.



Рамка "Устойчивость"



Метод конечных элементов

График эквивалентной пластической деформации - скольжение поверхности

# Настройки основных параметров анализа устойчивости склонов

Анализ коэффициента безопасности основан на предположениичто общая нагрузка, приложенная к телу грунта/горной породы вводится в одну стадию нагрузки. Фактический коэффициент запаса оценивается с использованием метода снижения прочностных параметров c,  $\varphi$ . По этому поводу коэффициент безопасности определяется как скалярный множитель, что снижает первоначальные параметры c,  $\varphi$  чтобы прибыть в положение отказа.

Математически коэффициент безопасности выражается как:

$$F = \frac{\tan \varphi^{orig}}{\tan \varphi^{failure}}$$

где:

 $\varphi^{original}$  исходное значение угла внутреннего трения

ofailure величина угла внутреннего трения при отказе

Поиск критического значения коэффициента запаса требует системного изменения (уменьшение) прочностных параметров с, ф приводит к неудаче. В рамках NRM состояние отказа определяется как состояние, при котором решение

не сходится. Процесс поиска для критической с, ф приводится по следующим параметрам.

**1.** Снижение - понижающий коэффициент (скалярный множитель), чтобы уменьшить параметры с, φ. В ходе анализа этот параметр постепенно обновляется.

**2.** Минимальный понижающий коэффициент - предельное значение, ниже которого значение коэффициента уменьшения не должна опускаться в процессе поиска. Этот параметр гарантирует, что вычисление не будет продолжаться в течение ненужных низких значениях коэффициента уменьшения. Это один из параметров, чтобы прервать процесс поиска.

**3.** Снижение параметров грунта - этот параметр позволяет определить, какой из параметров с,  $\phi$  должн быть уменьшен. Значение по умолчанию предполагает, что оба параметра уменьшаются одновременно.

ŀ	Настройка расчёта							
[	Общее	щее Newton - Raphson Line search Пластичность						
	Метод : Newton - Raphson			✓ Line search				
	Изменение матрицы жёст 🛛 после каждого шага расчёт; 💌							
	Макс.число итераций на один шаг расчёта : 100							
	Началь	ный шаг расчёта :				0,25	[-]	
	Редукция параметров грунта : уменьши			шить с, fi	•			
	Начальный шаг редукции : уменьши уменьши			шить с шить fi		[-]		
	Допуски на ошибки смещения :			шить с, fi	0,0100	[-]		
	Допуск на отклонения неравных сил :				0,0100	[-]		
	Допуски на ошибки энергии :				0,0100	[-]		
🔽 Учитывать границы контуров материала								
	Стандартная настройка						🗹 ОК 🛛 🚺	🛛 Отмена

Основные параметры анализа устойчивости склонов

# Настройка запуска параметров релаксации понижающего коэффициента

Подобно стандартному анализу программа адаптивно регулирует величину понижающего коэффициента. Предоставленое решение не сходится для данного набора параметров *c*, *φ*, понижающий коэффициент смягчается, и анализ будет

перезапущен. Такой подход обусловлен параметрами, установленных в разделе "Настройки анализа" - вкладка Ньютон Рафсон.

"Фактор расслабления" служит для уменьшения текущего значения коэффициента уменьшения показателей c,  $\varphi$ . Анализ прекращается, как только величина коэффициента уменьшения падает ниже минимальной еденицы или максимального числа допустимых вычетов превышении. При выборе NRM программа позволяет определить параметры c,  $\varphi$  которые приводят тело грунта в стабильное состояние в случаях, когда решение с оригинальными параметрами c,  $\varphi$  не было найдено. Программа тогда предшествует противоположным способом так, чтобы параметры c,  $\varphi$  были систематически увеличены, пока стабильное решение не найдено.

Настройка расчёта	<b>×</b>
Общее Newton - Raphson Line search Пластично	сть
Фактор релаксации шага расчёта :	2
Максимальное количество релаксаций шага расчё	2
Фактор релаксации шага редукции :	2
Максимальное количество релаксаций шага редун	3
Минимальный шаг редукции :	0,99 [-]
Стандартная настройка	ОК Отмена

Параметры запуска процесса сокращения прочностных параметров с,  $\phi$