

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА имени А. Н. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
к выполнению практических и самостоятельных работ
по дисциплине

«СТРОИТЕЛЬСТВО В СЛОЖНЫХ
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ»
(спецкурс)

(для магистров всех форм обучения по специальности
192 – Строительство и гражданская инженерия)

Харьков – ХНУГХ им. А. Н. Бекетова – 2018

Методические рекомендации к выполнению практических и самостоятельных работ по дисциплине «Строительство в сложных инженерно-геологических условиях» (спецкурс) (для магистров всех форм обучения по специальности 192 – Строительство и гражданская инженерия) / Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова ; сост. С. В. Табачников. – Харьков : ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2018. – 83 с.

Составитель С. В. Табачников

Рецензент канд. техн. наук О. В. Кичаева

Рекомендовано кафедрой механики грунтов, фундаментов и инженерной геологии, протокол № 6 от 01.02.2017.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 НАЧАЛО РАБОТЫ.....	5
1.1 Инсталляция.....	5
1.2 Общие вопросы моделирования.....	5
1.3 Процедуры ввода.....	9
1.3.1 Ввод геометрических объектов.....	9
1.3.2 Ввод текста и значений.....	9
1.3.3 Ввод выбора.....	11
1.3.4 Структурированный ввод.....	12
1.4 Запуск программы.....	14
1.4.1 Общие настройки.....	14
1.4.2 Создание модели.....	16
2 СПЛОШНОЙ ФУНДАМЕНТ НА ПЕРЕУПЛОТНЕННОЙ ГЛИНЕ.....	21
2.1 Геометрия.....	21
2.2 Задание входных данных.....	22
2.3 Выполнение расчетов.....	45
2.4 Просмотр выходных данных.....	54
3 НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ БУРОНАБИВНОЙ СВАИ	57
3.1 Геометрия.....	59
3.2 Задание фаз расчета.....	67
3.3 Расчет.....	71
3.4 Просмотр полученных результатов.....	72
4 СТРОИТЕЛЬСТВО КОТЛОВАНА	74
4.1 Ввод данных.....	77
4.2 Расчеты.....	84
4.3 Вывод данных.....	84
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	83

ВВЕДЕНИЕ

PLAXIS 3D Foundation – это трехмерная конечно-элементная программа, разработанная, в частности, для расчета фундаментов, включая фундаменты морских сооружений. Программа объединяет простые процедуры графического ввода, позволяющие пользователю автоматически создавать сложные конечно-элементные модели, с усовершенствованными средствами вывода данных и надежными методами расчета. Программа разработана таким образом, что пользователь может рассчитывать сложные конструкции всего лишь через несколько часов обучения.

Настоящее *учебное пособие* (далее – *Пособие*) составлено для помощи новым пользователям в ознакомлении с программой. В учебных лекциях рассматривается ряд различных конструкций, что позволяет постепенно знакомить пользователя с различными программными средствами и демонстрировать ему варианты возможного использования программы. Предполагается, что пользователи имеют общее представление о механике грунтов и могут работать в операционной среде Windows. Желательно, но необязательно, чтобы пользователи были знакомы со стандартной программой PLAXIS для расчета двумерных деформаций, т.к. многие из объектов этих программ похожи. Рекомендуется следовать урокам в том порядке, в каком они изложены в *Пособии*. Входные файлы и результаты уроков также имеются в папке примеров в директории программы PLAXIS 3D Foundation и могут использоваться для проверки результатов.

Учебное пособие не содержит вводной информации по теоретическим основам метода конечных элементов или подробных данных по различным моделям грунтов, включенным в программу. Модели грунтов представлены в *Пособии по моделям материалов* в составе полного *Пособия*, а теоретические выкладки даны в *Научном руководстве*.

1 НАЧАЛО РАБОТЫ

Настоящая глава посвящена некоторым обозначениям и основным методам ввода данных, которые используются в программе PLAXIS 3D Foundation. В пособиях, пунктах меню и окнах особые элементы выделены *курсивом*. При нажатии клавиш на панели или текстовых кнопок на экране высвечивается наименование клавиши или кнопки в скобках (например <Enter>).

1.1 Инсталляция

Методика инсталляции изложена в разделе «Общая информация» настоящего *Учебного пособия*.

1.2 Общие вопросы моделирования

Для каждого нового рассчитываемого трехмерного проекта важно в первую очередь создать геометрическую модель. Геометрическая модель – это представление реальной трехмерной задачи. Модель задается рабочими плоскостями и геологическими колонками. Геометрическая модель должна включать слои грунтового основания, структурные объекты, этапы строительства и нагрузки. Модель должна быть достаточно большой, чтобы исключить влияние границ на прогнозируемые результаты. Ниже приводится подробное описание двух различных элементов геометрической модели.

Геологические колонки

Геологические колонки представляют собой точки в геометрической модели, определяющие напластование грунтов и горизонт грунтовых вод. С помощью нескольких геологических колонок можно задать характер

напластования грунтов для конкретного проекта. При построении трехмерной сетки положение слоев грунта определяется путем интерполяции между геологическими колонками. Сетка строится таким образом, чтобы границы между слоями грунта всегда совпадали с границами элементов.

Рабочие плоскости

Рабочие плоскости – это горизонтальные плоскости с различными y -координатами, представляющие вид геометрической модели сверху. Они используются для создания нагрузок и конструкций в модели. Каждая из рабочих плоскостей имеет один и тот же набор геометрических линий, но расстояние между рабочими плоскостями может изменяться в зависимости от введенного значения координаты y . Рабочие плоскости могут использоваться для активирования или деактивирования сосредоточенных, линейных и распределенных нагрузок или конструктивных элементов.

Точки, линии и кластеры в пределах рабочих плоскостей могут использоваться для описания двухмерной геометрической модели. Ниже приводится описание этих трех типов элементов.

Точки

Точки формируют начало и конец отрезков. Точки также могут использоваться для размещения пружин и сосредоточенных усилий и для локального измельчения сетки конечных элементов.

Линии

Линии используются для задания физических границ геометрии, контуров конструкций и разрыва в геометрии, например, стенок или балок, или области выемки грунта. Линия может иметь различные функции или свойства.

Кластеры

Кластеры – это участки, полностью замкнутые линиями. PLAXIS автоматически распознает кластеры, исходя из ввода геометрических линий. В пределах одного кластера свойства грунтов однородны. Следовательно, кластеры могут рассматриваться как однородные части конструкции или слой грунта. Действия, выполняемые на кластерах, применяются ко всем элементам кластера.

После создания в рабочей плоскости двухмерной геометрической модели программа может автоматически генерировать двухмерную сетку конечных элементов, состоящую из 6-узловых треугольников, исходя из состава кластеров и линий геометрической модели. При получении удовлетворительной двухмерной сетки она может быть продолжена в третьем измерении. В трехмерной сетке конечных элементов можно выделить три типа элементов, описанные ниже.

Элементы

При построении сетки геометрическая модель разбивается на 15-узловые клиновидные элементы. Эти элементы имеют 6-узловые треугольные грани в рабочих плоскостях, построенные с помощью двумерной сетки, и 8-узловые четырехугольные грани в направлении оси y . Кроме объемных элементов, которые используются, как правило, для моделирования грунта, могут быть построены совместимые 6-узловые элементы типа «плита» и 16-узловые интерфейсные элементы для моделирования соответственно работы конструкции и взаимодействия грунта с конструкцией.

Узлы

Клиновидные элементы, используемые в программе Plaxis 3D Foundation, состоят из 15 узлов. Распределение узлов по элементам показано на рисунке 1.1. Смежные элементы соединяются через свои общие узлы. При расчете методом конечных элементов перемещения (u_x , u_y и u_z) вычисляются в узлах. Узлы могут быть заранее выбраны для построения кривых зависимости перемещений от нагрузки.

Точки напряжений

В отличие от перемещений, напряжения и деформации рассчитываются не в узлах, а в отдельных интегральных точках Гаусса (или точках напряжений). 15-узловой клиновидный элемент содержит 6 точек напряжений, как показано на рисунке 1.1. Однако точки напряжений используются только вычислительным ядром программы. Для вывода результатов данные в точках напряжений экстраполируются к узлам.

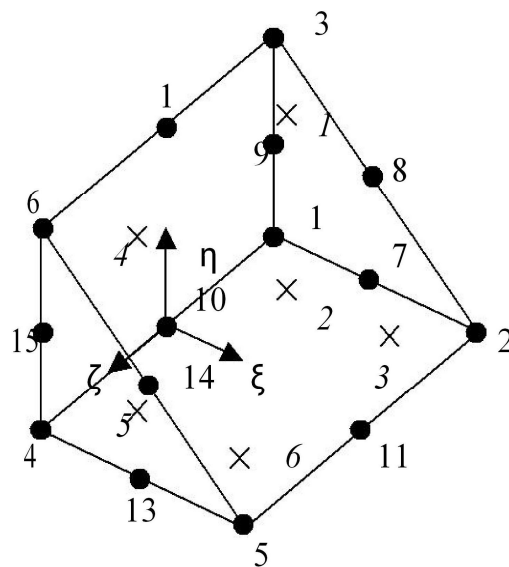


Рисунок 1.1 – Распределение узлов и точек напряжений в 15-узловом клиновидном элементе

1.3 Процедуры ввода

В программе PLAXIS ввод данных осуществляется с помощью мыши и также с клавиатуры. Как правило, различаются четыре типа ввода:

Ввод геометрических объектов (напр. построение геометрической линии)

Ввод текста (напр. ввод названия проекта)

Ввод значений (напр. ввод объемного веса грунта)

Ввод вариантов выбора (напр. выбор модели грунта)

Мышь, как правило, используется для рисования и выбора элемента, в то время как клавиатура – для ввода текста или значений.

1.3.1 Ввод геометрических объектов

Создание геометрической модели основано на вводе точек и линий. Это производится курсором мыши в области рисования. Несколько геометрических объектов могут быть выбраны в меню или на панели инструментов. Ввод большинства геометрических объектов основан на рисовании линий. В любом из режимов рисования линии создаются с помощью щелчка левой кнопкой мыши в области рисования. В результате создается первая точка. При перемещении мыши и еще одном щелчке левой кнопкой мыши создается новая точка с линией, идущей от предыдущей точки к новой. Построение линии завершается путем щелчка правой кнопкой мыши или нажатия на клавиатуре клавиши <Esc>.

1.3.2 Ввод текста и значений

Как и в любой программе, от пользователя требуется ввод некоторых величин и текста. Необходимый текст или величина задаются в полях редактирования. Несколько полей редактирования по конкретному предмету группируются в окна. Необходимый текст или значение могут быть набраны на

клавиатуре с последующим нажатием клавиши <Enter> или <Tab>. В результате введенное значение принимается и высвечивается следующее поле ввода. В некоторых странах, например в Нидерландах, десятичные значения отделяются запятой. Тип представления десятичных чисел, используемый в полях редактирования и таблицах, зависит от региональных настроек операционной системы. Ввод значений должен осуществляться в соответствии с этими настройками.

Многие параметры имеют значения по умолчанию. Эти значения могут использоваться путем нажатия клавиши <Enter> без дополнительного ввода с клавиатуры. Аналогичным образом данные могут вводиться во все поля ввода в окне до тех пор, пока не будет нажата кнопка <OK>. При нажатии на кнопку <OK> все значения подтверждаются и окно закрывается. Как вариант, выбор другого поля ввода с помощью мыши приведет к принятию уже введенного значения. Ввод значений подтверждается путем нажатия на кнопку <OK> левой кнопкой мыши.

При нажатии клавиши <Esc> или щелчке левой кнопкой мыши по кнопке <Cancel> ввод данных отменяется, и перед закрытием окна восстанавливаются прежние значения или значения по умолчанию.

Задание параметров сетки в поле рисования показано на рисунке 1.2. Нужное значение может быть введено с клавиатуры точно так же, как и в обычном поле ввода, однако пользователь может также изменить заданное значение на определенную величину, щелкая левой кнопкой мыши по стрелкам или , расположенным справа от спин-поля.

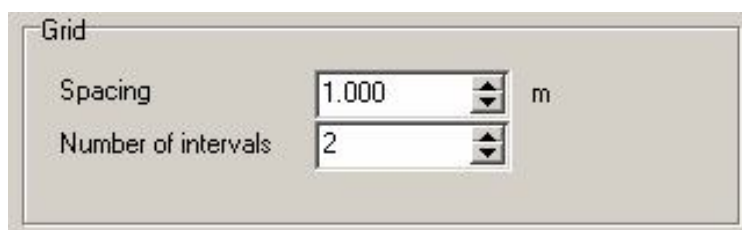


Рисунок 1.2 – Параметры сетки

1.3.3 Ввод выбора

Выбор осуществляется с помощью селекторных кнопок, флаговых кнопок или комбинированных окон, описание которых дается ниже.

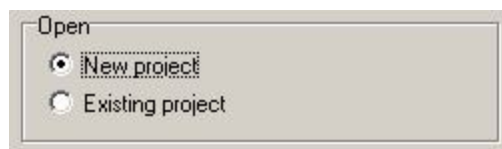


Рисунок 1.3 – Селекторные кнопки

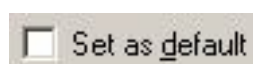


Рисунок 1.4 – Флаговые кнопки



Рисунок 1.5 – Комбинированные окна

Селекторные кнопки

В окне с селекторными кнопками может быть активирована только одна опция. На активный выбор указывает черная точка в белом кружке перед названием опции.

Выбор осуществляется щелчком левой кнопки мыши по белому кружку или при помощи клавиш клавиатуры со стрелками вверх и вниз. При замене существующего выбора на один из других вариантов метка с прежнего выбора снимается. Пример окна с селективными кнопками показан на рисунке 1.3. Согласно рисунку 1.3 для открытия выбран новый проект (*New project*).

Флаговые кнопки

В окне с флаговыми кнопками одновременно может быть выбрано более одного параметра. На выбор указывает черная галочка в белом квадрате. Выбор осуществляется щелчком левой кнопки мыши по белому квадрату или путем нажатия клавиши пробела на клавиатуре. При повторном щелчке по выбранному элементу флажок с флаговой кнопки будет снят. Пример флаговых кнопок показан на рисунке 1.4.

Комбинированные окна

Комбинированное окно используется для выбора элемента из заранее заданного списка возможных вариантов. Пример комбинированного окна показан на рисунке 1.5. При нажатии левой кнопки мыши на находящуюся справа в комбинированном окне стрелку появится выпадающий список с возможными вариантами. Комбинированное окно имеет то же функциональное назначение, что и группа селекторных кнопок, но оно более компактно.

1.3.4 Структурированный ввод

Необходимый ввод данных организуется таким образом, чтобы сделать его по возможности логическим. В операционной среде Windows предусмотрены различные способы визуальной организации и вывода информации на экран. Для облегчения ссылок на типовые элементы Windows в последующих главах описываются некоторые типы структурированного ввода данных.

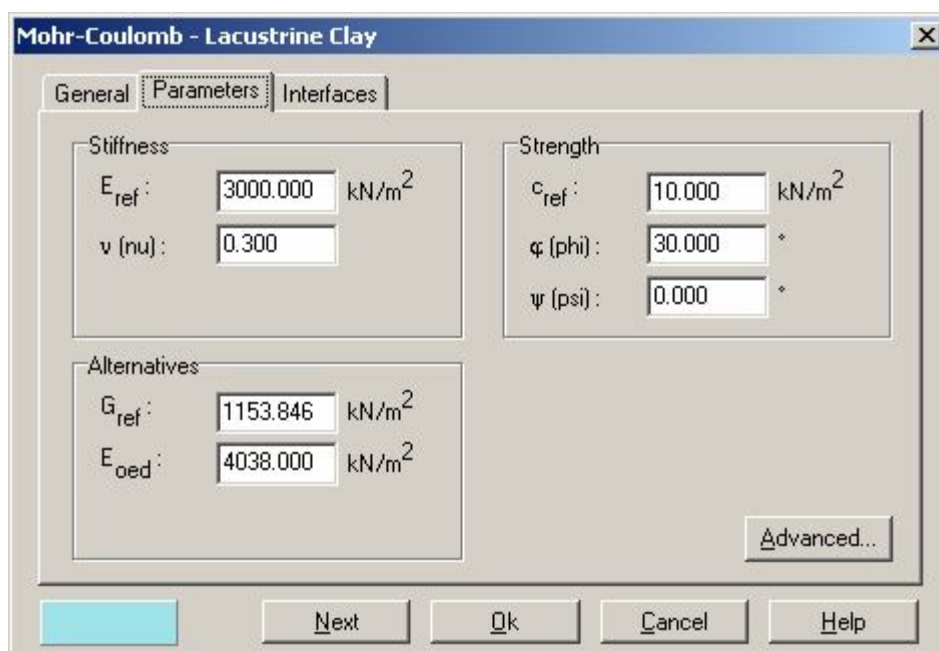


Рисунок 1.6 – Управление страницами и вкладки

Управление страницами и вкладки

Пример управления страницами с тремя вкладками представлен на рисунке 1.6. На этом рисунке активной является вторая вкладка ввода параметров для модели грунта *Кулона-Мора*. Вкладки используются для обработки большого количества различных типов данных, которые не помещаются в одном окне. Вкладки могут быть активированы при помощи щелчка по одной из них левой кнопкой мыши или при помощи клавиш <Ctrl> <Tab> на клавиатуре.

Групповые блоки

Групповые блоки представляют собой прямоугольные блоки с заголовком. Они используются для группирования вводных параметров, имеющих общие свойства. На рисунке 1.6 активная вкладка содержит три групповых блока *Stiffness (Жесткость)*, *Strength (Прочность)* и *Alternatives (Варианты)*.

1.4 Запуск программы

Предполагается, что программа установлена по методике, описанной в разделе «Общая информация» настоящего пособия. Рекомендуется создать отдельную директорию для хранения файлов данных. Программа PLAXIS 3D Foundation может быть запущена путем выбора значка *PLAXIS 3D Foundation input* в программной группе PLAXIS 3D Foundation. Программа просит пользователя либо задать новую задачу, либо загрузить заданный ранее проект. При выборе последнего варианта программа предлагает четыре самых последних проекта, из которых можно напрямую выбрать один. При выборе опции <<more files>> (*пролистать файлы*), которая появляется в начале списка, будет вызван запросчик файлов, в котором пользователь может выбрать для работы любой из заданных ранее проектов.

1.4.1 Общие настройки

При необходимости задания нового проекта появляется окно *General settings* (*Общие настройки*), показанное на рисунке 1.7. Это окно состоит из двух вкладок. На первой вкладке должны быть заданы различные параметры текущего проекта. Имя файла здесь не задается. Это можно сделать при сохранении проекта.

Пользователь может ввести краткое описание задачи в качестве названия проекта, а также более расширенное описание в поле *Comments* (*Комментарии*). Название проекта предлагается в качестве используемого по умолчанию имени файла и фигурирует на выходных диаграммах. Поле комментариев является просто удобным местом для сохранения информации об расчетах. На вкладке также может быть задана стандартная величина силы тяжести (*earth gravity*) и объемный вес воды.

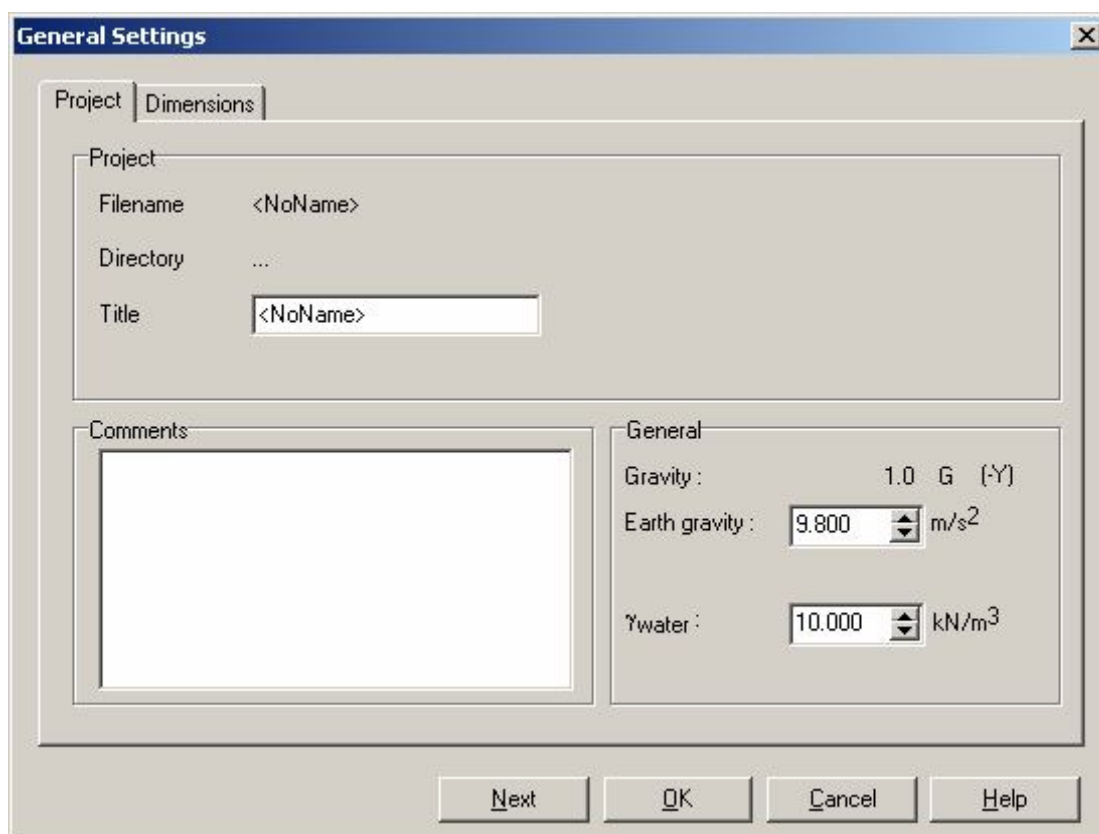


Рисунок 1.7 – Вкладка *Project (Проект)* окна *General settings (Общие настройки)*

Вторая вкладка показана на рисунке 1.8. Кроме основных единиц измерения длины (*Length*), силы (*Force*) и времени (*Time*) здесь должны быть заданы минимальные размеры области рисования так, чтобы геометрическая модель соответствовала ей. Общая система осей такова, что ось *x* направлена вправо, а ось *z* – вниз. X_{\min} – это самая низкая, а X_{\max} – самая высокая *x*-координата модели, Z_{\min} – самая низкая, а Z_{\max} – самая высокая *z*-координата модели. Координаты *y* в диалоговом окне *General settings (Общие настройки)* не вводятся, за исключением случая ввода геологических колонок и рабочих плоскостей.

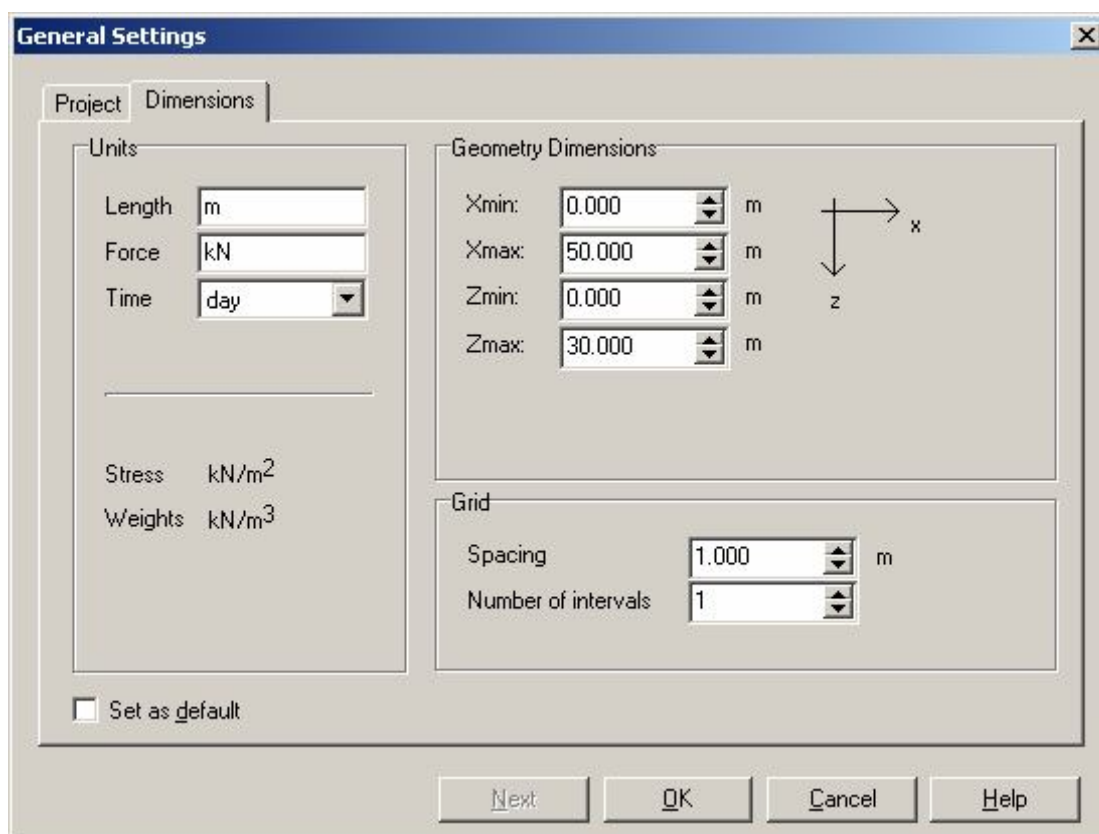


Рисунок 1.8 – Вкладка *Dimensions (Размеры)* окна *General Settings (Общие настройки)*

На практике область рисования, образуемая по заданным значениям X_{\min} , X_{\max} , Z_{\min} и Z_{\max} , будет превышать указанные значения. Это отчасти объясняется тем, что PLAXIS автоматически добавляет небольшой запас по размерам и, отчасти, наличием разницы в отношении ширины к высоте между заданными значениями и экранным изображением.

1.4.2 Создание модели

После ввода общих параметров настройки и нажатия кнопки <OK>, появляется главное окно, показанное на рисунке 1.9. Ниже показаны наиболее важные элементы главного окна и дается их краткое описание. Более подробное их описание пользователь может найти в *Справочнике*.

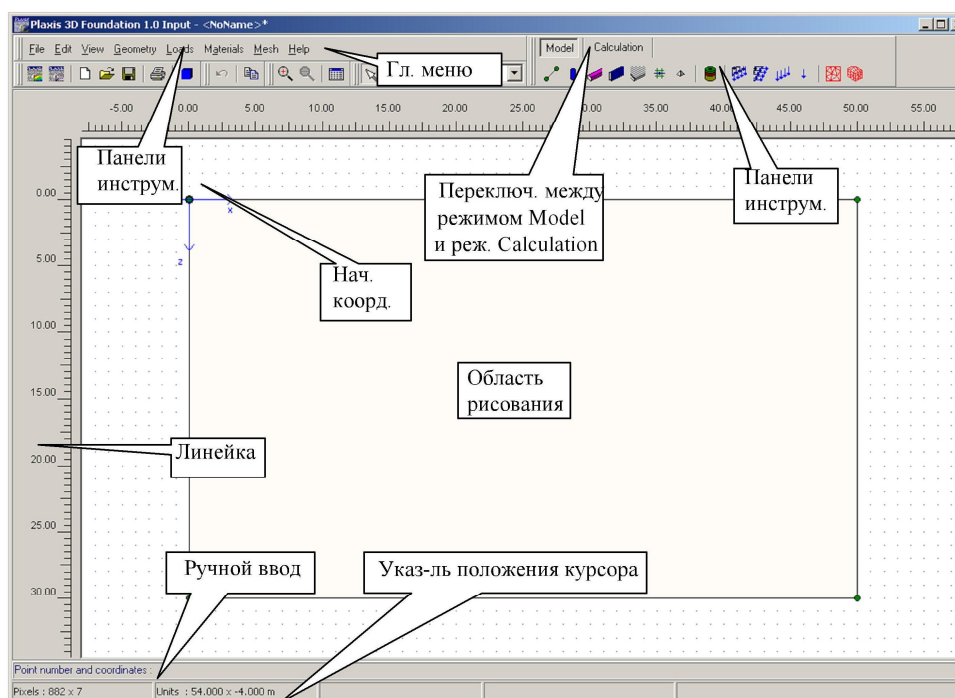


Рисунок 1.9 – Главное окно программы *Input* (Ввод данных)

Меню программы Input (Ввод данных)

Меню программы *Input* (Ввод данных) содержит все опции ввода и рабочие средства программы *Input*. Большинство опций имеется также на панели инструментов в виде кнопок.

Панель инструментов File (Файл)

Эта панель инструментов содержит кнопки для работы с файлами, соответствующие опциям меню *File* (Файл). Здесь также имеются кнопки для запуска других подпрограмм (*Output*, *Curves*) программного пакета PLAXIS 3D Foundation

Панель инструментов Edit (Редактирование)

Эта панель инструментов содержит кнопки редактирования, соответствующие опциям меню *Edit* (Редактирование).

Панель инструментов View (Вид)

Эта панель инструментов содержит кнопки для просмотра изображения и, в частности, для изменения масштаба определенной части области рисования. Кнопки соответствуют опциям меню *View (Вид)*.

Панель инструментов General (Общие команды)

Эта панель инструментов содержит функциональные кнопки, которые применяются в режимах *Model (Модель)* и *Calculation (Расчет)*, и среди прочего - кнопку инструмента выбора и кнопку выбора рабочей плоскости.

Панель инструментов Model (Модель)

Эта панель инструментов содержит кнопки для создания геометрической модели, такие как *Geometry line (Геометрическая линия)*, *Pile (Свая)*, *Beam (Балка)*, *Wall (Стенка)*, *Floor (Перекрытие)*, *Line fixity (Закрепление линии)*, *Spring (Пружина)*, *Borehole (Геологическая колонка)* и *Load (Нагрузка)*, а также опции по построению двумерных и трехмерных сеток.

Панель инструментов Calculation (Расчет)

Эта панель инструментов содержит кнопки для задания фаз расчета.

Линейки

Линейки, расположенные слева и сверху от области рисования, показывают физические координаты, что позволяет напрямую видеть геометрические размеры модели.

Область рисования

Область рисования – это чертежный лист, на котором создается геометрическая модель. Область рисования может использоваться как обычная программа для обработки графических изображений. Имеющаяся в ней сетка из мелких точек позволяет производить привязку объектов к узлам сетки.

Начало координат

Если физическое начало координат находится в пределах заданных размеров, то оно изображается в виде небольшого кружка с указанием направления осей x и z .

Ручной ввод данных

Если рисование с помощью мыши не дает требуемой точности, можно воспользоваться строкой ручного ввода данных. Здесь вы можете ввести значения x – и z – координат напрямую с клавиатуры, разделив их пробелом. Ручным вводом также можно воспользоваться для присвоения выбранной точке новых координат.

Указатель положения курсора

Индикатор положения курсора показывает текущее положение курсора мыши, как в физических единицах, так и в пикселях экрана.

Некоторые из вышеупомянутых объектов могут быть удалены путем отмены выбора соответствующей опции в меню *View (Вид)*.

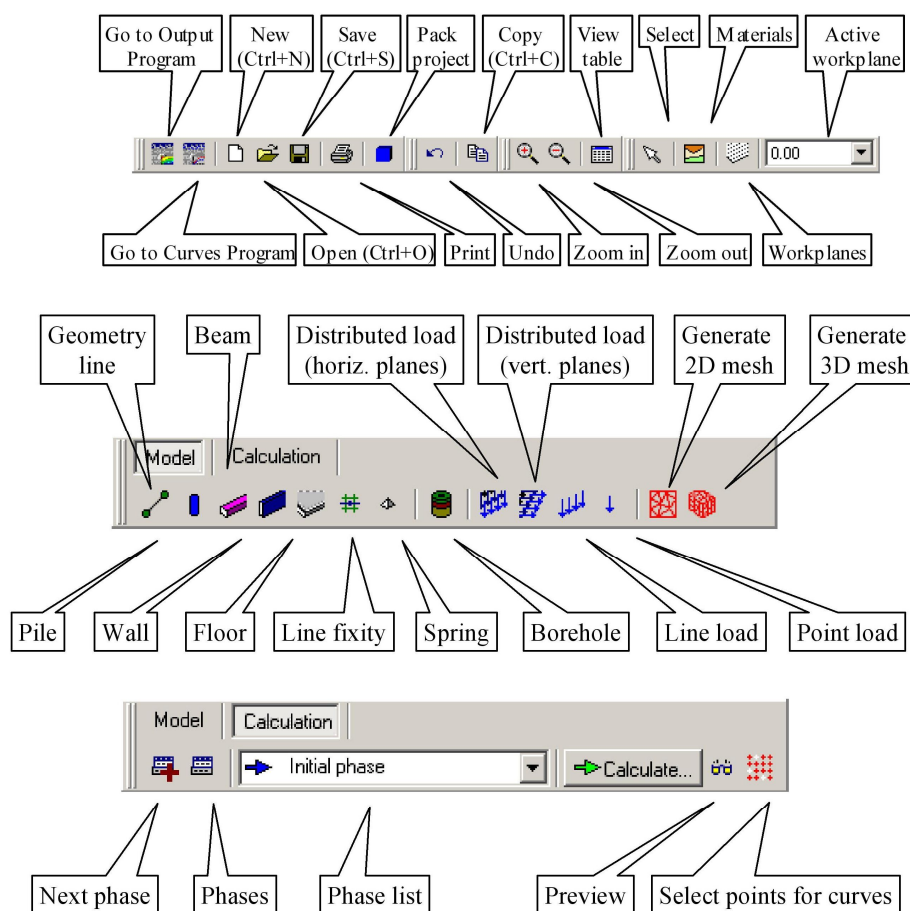


Рисунок 1.10 – Панели инструментов

Для обеих панелей можно посмотреть наименование и функции кнопок, если подвести курсор к соответствующей кнопке и задержать его там примерно на секунду. Подсказка появляется под кнопкой в небольшом желтом прямоугольнике. Подсказки для обеих панелей, показаны на рисунке 1.10. В этом *пособии* мы будем называть кнопки так, как они называются в соответствующих подсказках.

Более подробная информация по созданию полной конечно-элементной модели содержится в различных уроках, рассмотренных в настоящем *пособии*.

2 СПЛОШНОЙ ФУНДАМЕНТ НА ПЕРЕУПЛОТНЕННОЙ ГЛИНЕ

В предыдущей главе были рассмотрены общие аспекты и основные свойства программы PLAXIS 3D Foundation. В этой главе рассматривается первое ее применение, а именно расчет осадки сплошного фундамента, заложенного на глине. Это первый шаг на пути ознакомления с практическим применением этой программы. Здесь дается подробное описание общих методов создания геометрической модели, построения сетки конечных элементов, выполнения расчета методом конечных элементов и оценки полученных результатов. Информация, предоставленная в этой главе, будет использована в последующих уроках. Поэтому прежде, чем переходить к следующим примерам настоящего *Пособия*, необходимо завершить рассмотрение первого урока.

2.1 Геометрия

В данном примере рассматривается конструкция и нагружение сплошного фундамента, заложенного на слегка переуплотненной озерной глине. Под глиной находится жесткий слой скальной породы, образующий естественную границу рассматриваемой геометрической модели. Слой скальной породы в геометрической модели не учитывается. Вместо этого к подошве глинистого слоя применяется соответствующее граничное условие. Целью данного примера является расчет осадки сплошного фундамента и усилий в плите.

Здание состоит из подвального этажа и четырех этажей, расположенных над уровнем земли (см. рис. 2.1). В нашем примере будет моделироваться только подвальный этаж. Нагрузки от верхних этажей передаются на плиту через колонны. Каждая из колонн выдерживает нагрузку в 6000 кН, как это показано на рисунке 2.2.

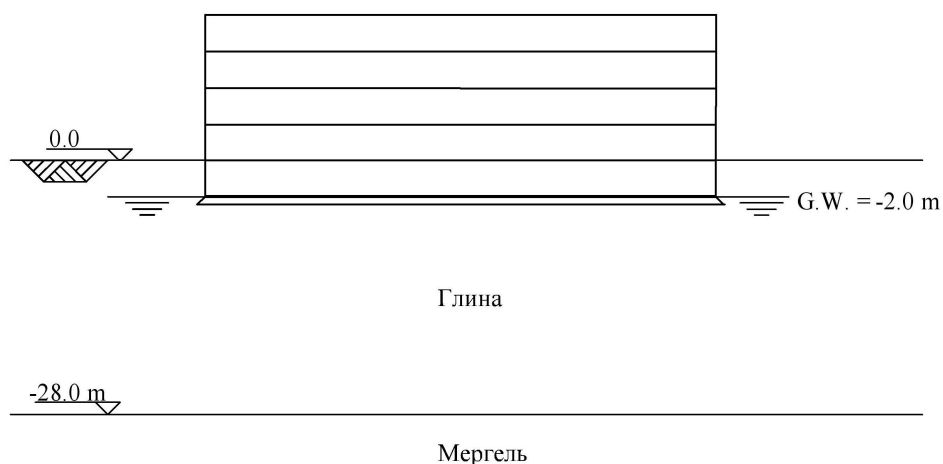


Рисунок 2.1 – Вид сбоку здания на сплошном фундаменте

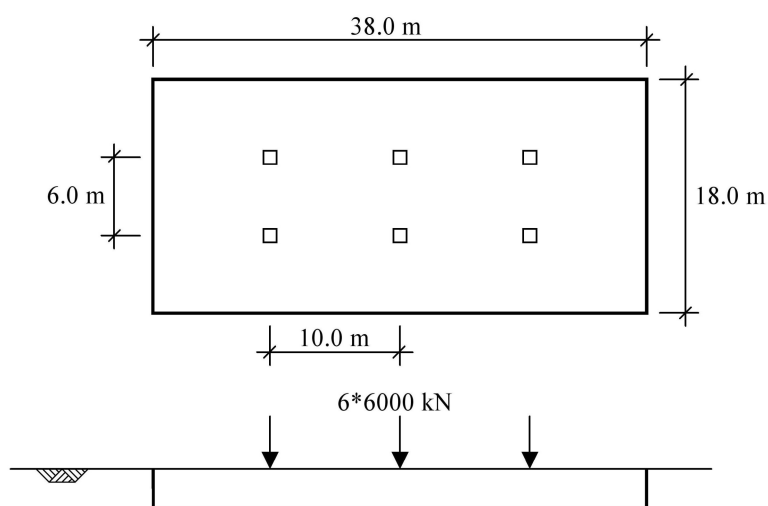


Рисунок 2.2 – Вид сверху и упрощенная геометрия здания

2.2 Задание входных данных

Запустите программу ввода данных PLAXIS 3D Foundation.

Появится диалоговое окно *Create/Open project* (*Создать/Открыть проект*), в котором можно выбрать существующий проект или создать новый. Выберите опцию *New Project* (*Новый проект*) и щелкните по кнопке <ОК>. На экране появится окно *General settings* (*Общие настройки*), состоящее из двух вкладок *Project* (*Проект*) и *Dimensions* (*Размеры*) (см. рис. 2.4–2.5).

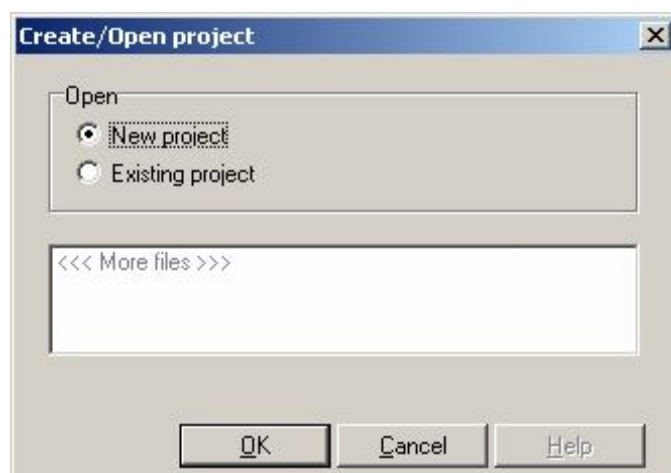


Рисунок 2.3 – Диалоговое окно *Create/Open project* (Создать/Открыть проект)

Общие настройки

Первым этапом любого расчета является задание основных параметров конечно-элементной модели. Это делается в окне *General settings* (*Общие настройки*). К общим настройкам относятся описание задачи, основные единицы измерения и размер области рисования. Для того, чтобы ввести соответствующие параметры, необходимые для расчета сплошного фундамента, выполните следующее:

- В поле *Title* (*Название*) вкладки *Project* (*Проект*) введите «Lesson 1» (*Урок 1*), а в поле *Comments* (*Комментарии*) – «Settlements of a raft foundation» (*Осадка сплошного фундамента*).

- В групповом блоке *General* (*Общие параметры*) задается фиксированное значение силы тяжести, равное $1.0\ G$ и направленное вниз по вертикальной оси ($- Y$). Также в поле *Earth gravity* (*Сила тяжести*) может быть введено ускорение силы тяжести. В текущем примере следует оставить заданную по умолчанию величину $9,8\ \text{м/с}^2$.

- В поле γ_{water} может быть введен объемный вес воды. Оставьте здесь значение, заданное по умолчанию, т. е. $10\ \text{кН/м}^3$. Щелкните по расположенной внизу кнопке *<Next>* (*<Далее>*) или по вкладке *Dimensions* (*Размеры*).

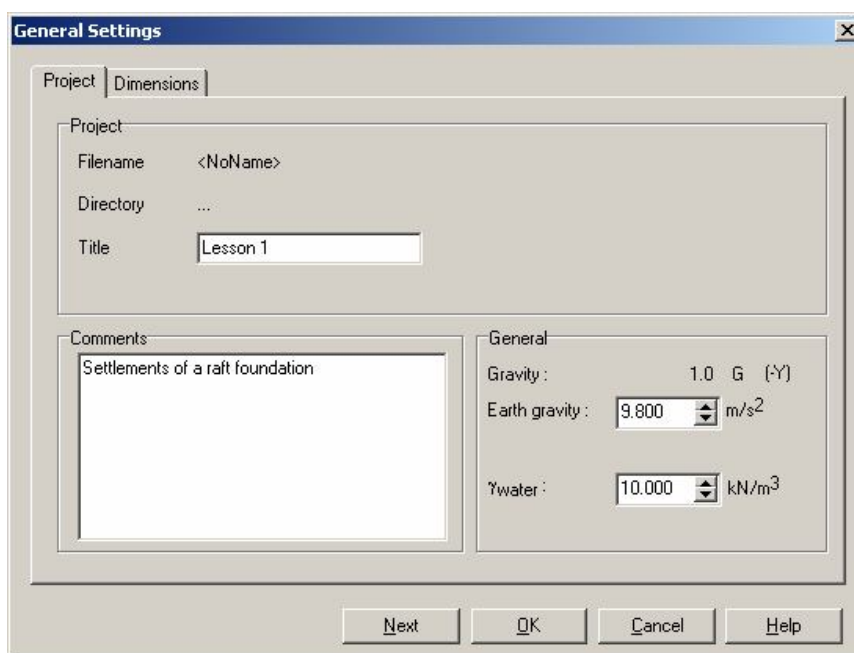


Рисунок 2.4 – Вкладка *Project* (Проект) окна *General settings* (Общие настройки)

- В поле *Units* (Единицы измерения) вкладки *Dimensions* (Размеры) оставьте заданные по умолчанию единицы измерения (длина (*Length*) измеряется в метрах (m), сила (*Force*) - в кН (kN), а время (*Time*) – в сутках (*day*)).
- В групповом блоке *Geometry Dimensions* (Геометрические размеры) должен быть введен требуемый размер области рисования. При вводе значений верхних и нижних координат создаваемой геометрической модели к ним автоматически добавляется небольшой запас с тем, чтобы модель хорошо вписалась в эту область рисования.
 - Введите значения $-50,0$; $50,0$; $-30,0$; $30,0$ соответственно в поля X_{\min} X_{\max} , Z_{\min} , Z_{\max} .
 - В групповом блоке *Grid* (Сетка) задается шаг сетки. Сетка обеспечивает на экране матрицу точек, которые могут быть использованы в качестве базисных. Она также может быть использована для привязки к регулярным точкам при создании геометрической модели. Расстояние между точками задается в поле *Spacing* (Шаг). Расстояние между точками привязки может быть

в свою очередь разбито на более мелкие интервалы с помощью значения, заданного в поле *Number of intervals* (*Количество интервалов*). Введите в поле *Spacing* (*Шаг*) 1.0, а в поле *Interval* (*Интервал*) – число 1.

Для подтверждения введенных параметров щелкните по кнопке <ОК>. На экране появится область рисования, в которой может быть нарисована геометрическая модель.

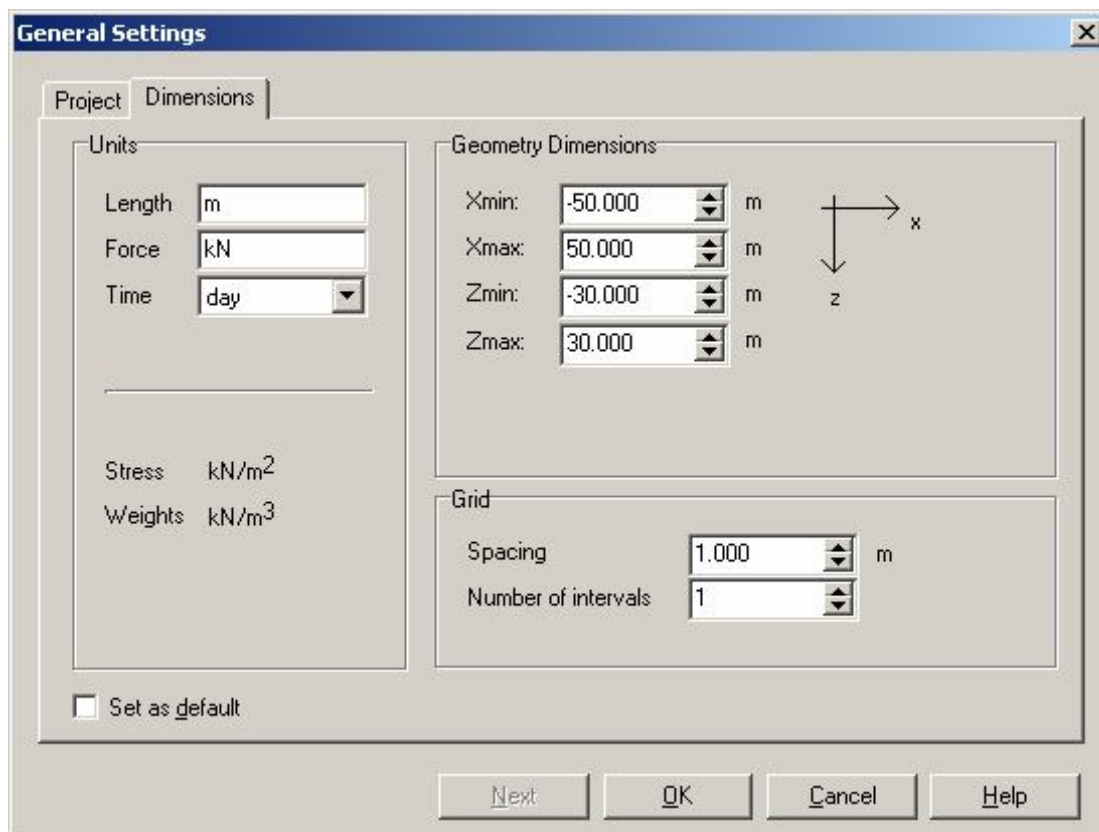


Рисунок 2.5 – Вкладка *Dimensions* (*Размеры*) окна *General settings* (*Общие настройки*)

Совет. Если из-за ошибки или в силу каких-либо других причин Вам потребуется изменить общие настройки, Вы можете получить доступ к окну *General settings* (*Общие настройки*), выбрав эту опцию в меню *File* (*Файл*).

По завершении задания общих настроек появится область рисования с началом отсчета и направлением осей системы координат. На экране ось *x* направлена вправо, а ось *z* – вниз. Ось *y* перпендикулярна к плоскости рисунка

и направлена в сторону пользователя. Программа также автоматически создает первый кластер (область, полностью замкнутую геометрическими линиями) по размерам, заданным в окне *General settings (Общие настройки)*. В этой области рисования может быть создана геометрическая модель, которая будет рассмотрена позднее. Сначала рассмотрим расширение области рисования в вертикальном направлении (в направлении оси y) путем задания рабочих плоскостей.

Рабочие плоскости

Рабочие плоскости представляют собой горизонтальные слои с различными координатами y , в которых могут быть заданы конструктивные объекты, нагрузки и этапы строительства. Рабочие плоскости нужны на каждом уровне, где встречается разрывность геометрической модели или схемы нагружения в начальной ситуации или в процессе строительства. Рабочие плоскости задаются в окне *Work-planes (Рабочие плоскости)*. Это окно может быть открыто с помощью кнопки *Work-planes*, расположенной на панели инструментов слева от комбинированного окна *Active Work-plane (Активная рабочая плоскость)* или с помощью опции *Work-planes* в меню *Geometry (Геометрия)*. Одна рабочая плоскость уже автоматически создана программой на уровне с координатой $y = 0,00$. Для этого первого проекта нам нужно задать две дополнительные рабочие плоскости. Для этого выполните следующее:

- Откройте окно *Work planes (Рабочие плоскости)*, щелкнув на панели инструментов по кнопке *Work-planes*. Появится новое окно, в котором будет показана рабочая плоскость, автоматически сгенерированная на уровне $y = 0$. В окне будет показан вертикальный поперечный разрез, на котором красным цветом будет обозначена выбранная в настоящий момент координата y .

- Щелкните по кнопке *Add (Добавить)*. Новая рабочая плоскость вставляется под текущей рабочей плоскостью на уровне $y = -3,0$ м.

- Выберите новую рабочую плоскость ($y = -3,0$ м), щелкнув по соответствующей ячейке левой таблицы, и введите значение $y = -28,0$ м. Нажмите на клавишу <Enter> для принятия нового значения.

- Щелкните по кнопке <Insert> и замените значение координаты y новой плоскости на $y = -2,0$ м. После принятия этого значения вид рабочих плоскостей обновляется, как показано на рисунке 2.6.

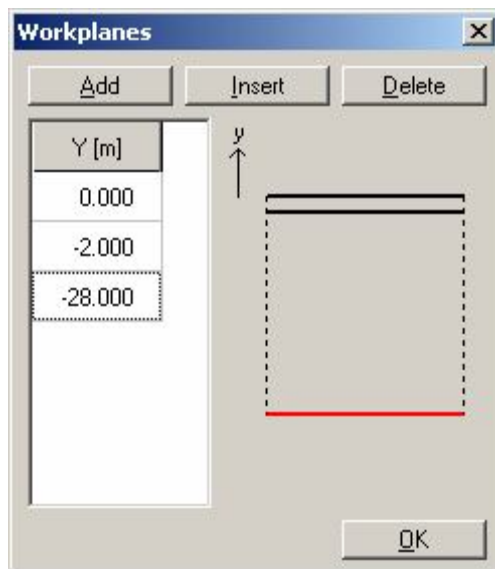


Рисунок 2.6 – Окно *Work-planes* (Рабочие плоскости)

- Щелкните по кнопке <OK> для закрытия окна *Work-planes* (Рабочие плоскости) и возврата в область рисования.

Геометрическая модель здания

Для создания объектов можно воспользоваться как кнопками панели инструментов, так и опциями меню *Geometry* (Геометрия). Для нового проекта кнопка *Geometry line* (Геометрическая линия) уже активирована. Если это не так, эта опция может быть выбрана на нижней правой панели инструментов или в меню *Geometry* (Геометрия). В этом проекте мы начнем с задания стен и плиты подвала.

Сначала нам необходимо выбрать нужную рабочую плоскость:

- В комбинированном окне *Active work-planes* (Активная рабочая плоскость) задайте рабочую плоскость с $y = 0,00$ м. Для этого щелкните сначала по стрелке для открытия списка комбинированного окна, а затем выберите в нем значение 0,00.

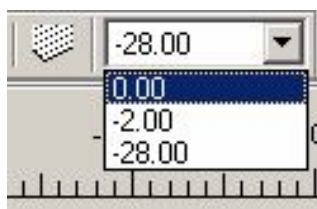


Рисунок 2.7 – Комбинированное окно *Active work-plane*
(Активная рабочая плоскость)

Для построения наружных стен здания выполните следующее:

- Выберите опцию *Wall* (Стенка) (четвертая кнопка на панели инструментов *Geometry*).
- Поместите курсор в точке с координатами $(-19,0; 9,0)$. Убедитесь в том, что в строке текущего состояния имеется запись $-19,0; 9,0$ и щелкните один раз левой кнопкой мыши. Вы создали первую геометрическую точку (номер 4).
- Переместите курсор вправо до положения с координатами $(19,0; 9,0)$. Щелкните левой кнопкой мыши для создания второй точки (номер 5). Одновременно между точками 4 и 5 под текущей рабочей плоскостью создается первая стена показанная жирной синей линией. Интерфейсы автоматически добавляются по обеим сторонам стены. Они обозначены пунктирными линиями черного цвета. Интерфейсы используются для моделирования взаимодействия между грунтом и конструкцией.
- Переместите курсор вверх к точке с координатами $(19,0; -9,0)$ и снова щелкните левой кнопкой мыши.
- Переместите курсор к точке с координатами $(-19,0; -9,0)$ и щелкните еще раз левой кнопкой мыши.

- В завершение, переместите курсор обратно к точке 4 с координатами $(-19,0; 9,0)$ и снова щелкните левой кнопкой мыши. Так как последняя точка уже существует, то новая точка создана не будет, а будет построена дополнительная геометрическая линия между точками 7 и 4.

Щелкните правой кнопкой мыши для завершения процесса рисования.

Совет. При добавлении геометрической линии к рабочей плоскости, эта геометрическая линия будет воспроизведена на всех остальных рабочих плоскостях. При добавлении таких конструктивных элементов, как перекрытия и балки, они появятся только на активной в данный момент рабочей плоскости. Стены будут добавлены под активной в данный момент рабочей плоскостью. Кроме того, соответствующая геометрическая линия появится на всех остальных рабочих плоскостях.

После задания стен можно без труда добавить плиту подвала.

- В комбинированном окне *Active work-planes (Активные рабочие плоскости)* задайте рабочую плоскость с $y = -2,00$ м.
- Выберите на панели инструментов *Geometry* опцию *Floor (Перекрытие)*.
- Щелкните левой кнопкой мыши в любом месте внутри области, замкнутой стенами. Эта область теперь должна окраситься в оливковый (зеленый) цвет, указывая на то, что добавлено перекрытие.

Совет. Неправильно расположенные точки и линии можно откорректировать или удалить, выбрав сперва на панели инструментов кнопку *Selection (Выбор)*. Для перемещения точки или линии выберите эту точку или линию и перетащите их в нужное место. Для удаления точки или линии выберите эту точку или линию и нажмите на клавишу $\langle \text{Del} \rangle$ (*Удалить*) на клавиатуре.

> Ненужные операции рисования могут быть отменены путем нажатия на панели инструментов кнопки *Undo (Отмена)* или путем выбора в меню *Edit (Правка)* опции *Undo (Отмена)* или путем нажатия на клавиатуре клавиш $\langle \text{Ctrl} \rangle \langle \text{Z} \rangle$.

> Для рисования строго горизонтальных или строго вертикальных линий следует при перемещении курсора мыши удерживать нажатой клавишу $\langle \text{Shift} \rangle$.

Нагрузки

После того, как геометрическая модель подвала полностью задана, должна быть смоделирована нагрузка от здания. Нагрузка передается от верхних перекрытий на плиту подвала через колонны. В этом примере нет необходимости моделировать сами колонны. Нагрузки могут быть смоделированы с помощью сосредоточенных нагрузок, действующих непосредственно на плиту подвала. Так как программа PLAXIS 3D Foundation не может обрабатывать отдельные несвязанные точки при создании сетки, то перед вводом фактических нагрузок необходимо добавить несколько дополнительных геометрических линий.

- Выберите на панели инструментов *Geometry* опцию *Geometry Line* (Геометрическая линия)
- Убедитесь в том, что выбрана рабочая плоскость с $y = -2.00$ м. Переместите курсор к точке $(-19,0; -3,0)$ и щелкните левой кнопкой мыши.
- Теперь переместите курсор к точке $(19,0; -3,0)$ и опять щелкните левой кнопкой мыши.
- Щелкните правой кнопкой мыши для завершения процесса рисования данной геометрической линии.
- Аналогичным образом нарисуйте геометрическую линию между точками $(-19,0; 3,0)$ и $(19,0; 3,0)$.

Колонны располагаются через 10 м, как показано на рисунке 2.2. Для ввода нагрузок выполните следующее:

- Выберите на панели инструментов *Geometry* опцию *Point load* (Сосредоточенная нагрузка).
- Переместите курсор к точке $(-10,0; 3,0)$ и щелкните левой кнопкой мыши для добавления сосредоточенной нагрузки. Сосредоточенная нагрузка, равная по умолчанию 1 кН, действует вниз по оси y , перпендикулярно к рабочей плоскости. Такая нагрузка обозначается синим кружком с буквой *A*.

- Повторите указанную операцию для точек $(-10,0; -3,0)$, $(0,0; 3,0)$, $(0,0; -3,0)$, $(10,0; 3,0)$ и $(10,0; -3,0)$.

Таким образом, все заданные нагрузки имеют значение по умолчанию 1 кН и действуют вниз по оси y . Позднее, при задании фаз расчета значения всех нагрузок будут заменены на требуемые величины.

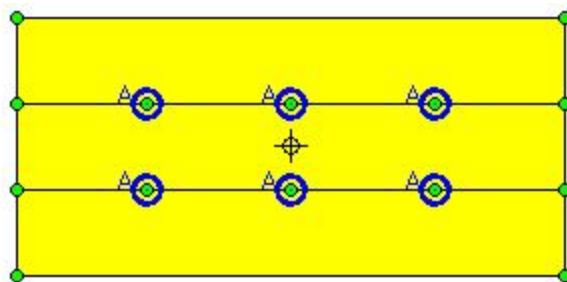


Рисунок 2.8 – Просмотр ввода нагрузок

Геологические колонки

Вся информация по геометрической модели в вертикальном направлении была введена с помощью рабочих плоскостей. Информация по слоям грунта и горизонту грунтовых вод вводится другим способом: с помощью так называемых *геологических колонок* (*Boreholes*). Геологические колонки представляют собой наборы точек в области рисования, в которых дана информация по характеру напластования грунтов и уровню грунтовых вод. Если задано несколько геологических колонок, то программа PLAXIS 3D Foundation будет автоматически интерполировать данные между колонками для определения характера напластования грунтов в промежуточных точках.

Совет. Кроме слоев грунта, которые, простираются через всю область рисования, программа PLAXIS 3D Foundation может также обрабатывать прерывающиеся слои. В таких случаях используются так называемые вырожденные элементы.

В данном примере имеется только один слой грунта и для его задания необходима только одна геологическая колонка. Для задания геологической колонки выполните следующее:

- выберите на панели инструментов *Geometry* опцию *Borehole* (Геологическая колонка);
- щелкните мышью в месте расположения геологической колонки на кластере, который представляет грунт. Предлагается щелкнуть мышью по точке с координатами $(-40,0; -20,0)$.

В результате программа разместит геологическую колонку в точке $(-40,0; -20,0)$ и откроет окно *Borehole* (Геологическая колонка). Верхняя и нижняя границы геологической колонки будут заданы автоматически. Им соответствует координата $y = 0,00$ и координата самой нижней рабочей плоскости модели $y = -28,0$ м. В нашем примере это правильные значения и нет необходимости их изменять.

В поле *Water level* (Уровень воды) задайте уровень воды, равный $y = -2,00$. Не закрывайте пока окно.

Теперь заданы все геометрические элементы. До построения сетки всем элементам должны быть присвоены свойства материалов.

Наборы данных по материалам

Для моделирования поведения грунта и конструкций должны быть присвоены соответствующие свойства и модели материалов элементам геометрической модели. В PLAXIS свойства грунтов собраны в наборах данных по материалам, хранящихся в базе данных. Набор данных из базы данных может быть присвоен одному и более кластерам или конструктивным элементам. Различные элементы имеют разные типы наборов данных, и пользователь должен следить, чтобы не перепутать их.

PLAXIS 3D Foundation различает наборы данных по материалам для грунтов и интерфейсов (*Soils & Interfaces*), балок (*Beams*), стенок (*Walls*), перекрытий (*Floors*) и пружин (*Springs*).

Ввод наборов данных по материалам, в основном, выполняется после ввода всех геометрических элементов. Перед построением сетки необходимо присвоить наборы данных по материалам всем кластерам и конструкциям.

Наборы данных по материалам могут быть заданы с помощью кнопки *Properties* (Свойства) на панели инструментов, опций меню *Properties* или кнопки *Properties* окна *Borehole* (Геологическая колонка).

Грунты и интерфейсы

Для создания набора данных для глинистого слоя с помощью последнего из трех вышеуказанных методов выполните следующее:

- Окно *Borehole* (Геологическая колонка) должно быть по-прежнему открыто. Если оно закрыто, выберите на панели инструментов опцию *Select* (Выбрать) и дважды щелкните мышью по геологической колонке с координатами (−40, −20).

Таблица 2.1 – Свойства материала глинистого слоя

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
1	2	3	4
Модель материала	<i>Model</i>	Кулона-Мора	—
Тип поведения материала	<i>Type</i>	Дренированный	—
Объемный вес грунта выше уровня грунтовых вод	γ_{unsat}	17,0	кН/м ³
Объемный вес грунта ниже уровня грунтовых вод	γ_{sat}	18,0	кН/м ³
Модель Юнга (константа)	E_{ref}	3000	кН/м ²
Коэффициент Пуассона)	ν	0,3	—
Сцепление грунта (константа)	c_{ref}	10,0	кН/м ²
Угол трения	ϕ	30,0	°
Угол дилатансии	ψ	0,0	°

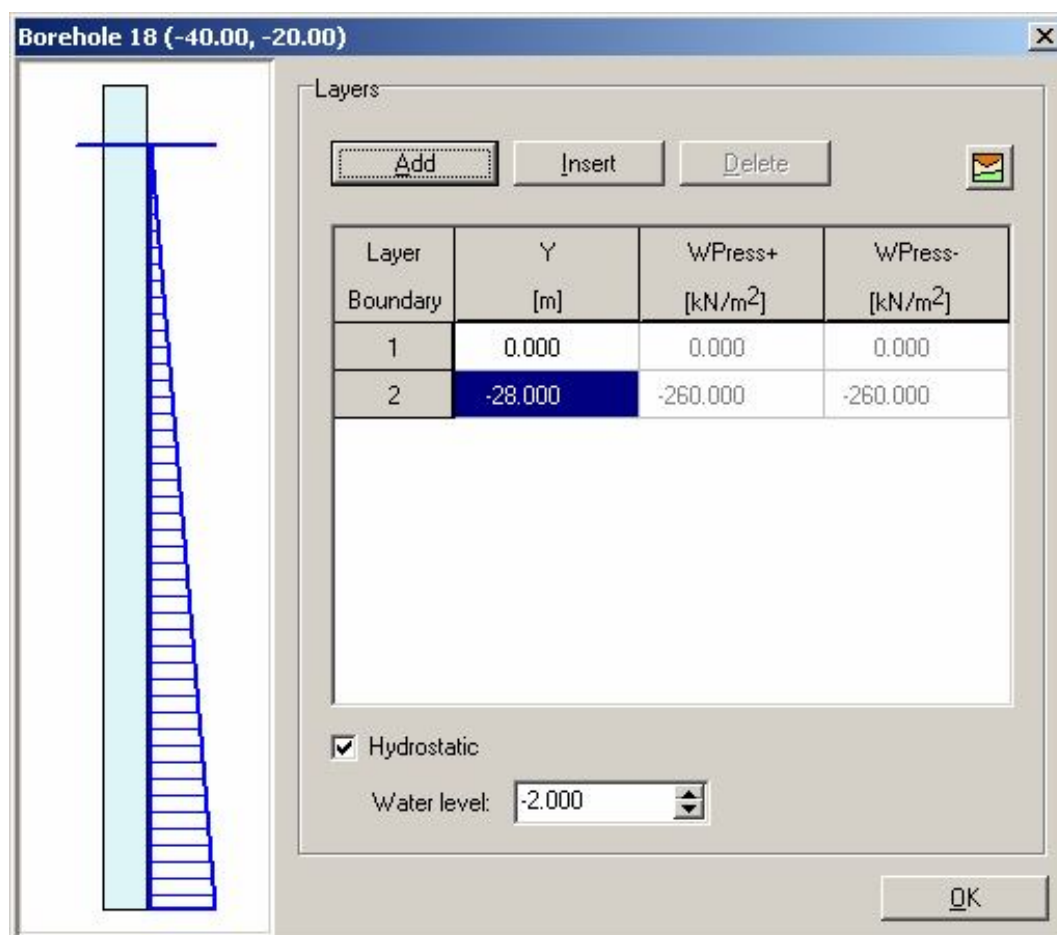


Рисунок 2.9 – Окно *Borehole* (Геологическая колонка)

В результате откроется окно *Borehole* (Геологическая колонка), в котором будут показаны слои грунта в выбранной геологической колонке. В нашем случае присутствует только один слой с нижней отметкой – 28 м и верхней отметкой 0 м.

Откройте окно *Material Sets* (Наборы данных по материалам), щелкнув по кнопке *Material Sets*.

Нажмите на кнопку <New> (<Новый>), находящуюся внизу окна *Material Sets* (Наборы данных по материалам). Появится новое диалоговое окно с тремя вкладками: *General* (Общие настройки), *Parameters* (Параметры) и *Interfaces* (Интерфейсы) (см. рис. 2.10 – 2.11).

В поле *Identification* (Идентификация) группового блока *Material Set* (Набор данных по материалу) вкладки *General* (Общие настройки) введите название грунта «Lacustrine Clay» (Озерная глина).

Выберите в комбинированном окне *Material model* (Модель материала) модель Кулона-Мора (*Mohr-Coulomb*) в качестве модели материала, а в комбинированном окне *Material type* (Тип материала) тип грунта *Drained* (Дренажный) (параметры, используемые по умолчанию).

Введите в групповом блоке *General properties* (Общие свойства) объемный вес согласно набору данных по материалам, представленному в таблице 2.1.

Щелкните по кнопке <Next> (<Далее>) или по вкладке *Parameters* (Параметры) для продолжения ввода параметров модели. Параметры, появившиеся на вкладке *Parameters* (Параметры), зависят от выбранной модели материала (в нашем случае модели Кулона-Мора). Модель Кулона-Мора содержит только пять основных параметров (E , ν , c , ϕ , ψ).

Введите параметры модели из таблицы 2.1 в соответствующие поля редактирования вкладки *Parameters* (Параметры).

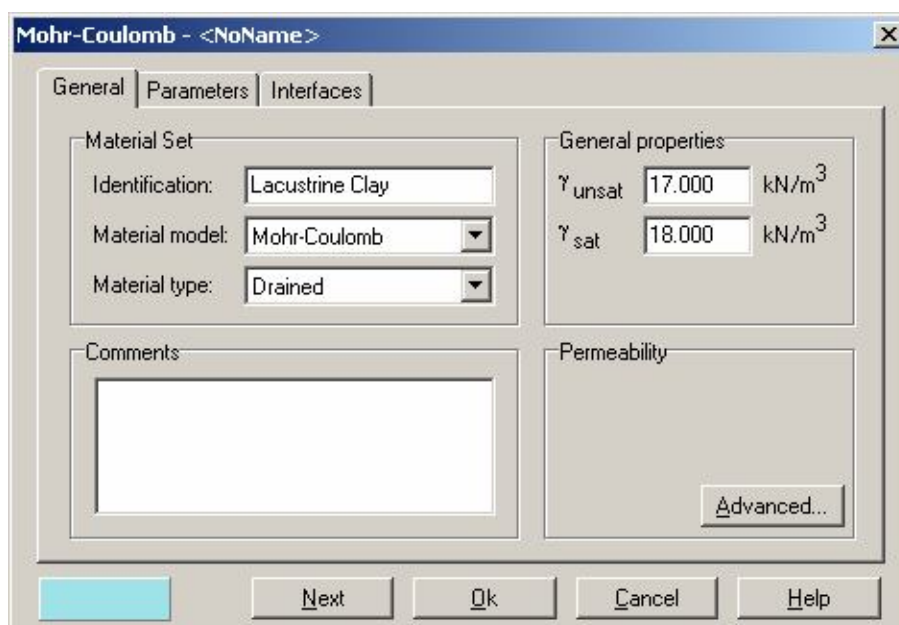


Рисунок 2.10 – Вкладка *General* (Общие настройки) окна с набором данных по грунту и интерфейсу

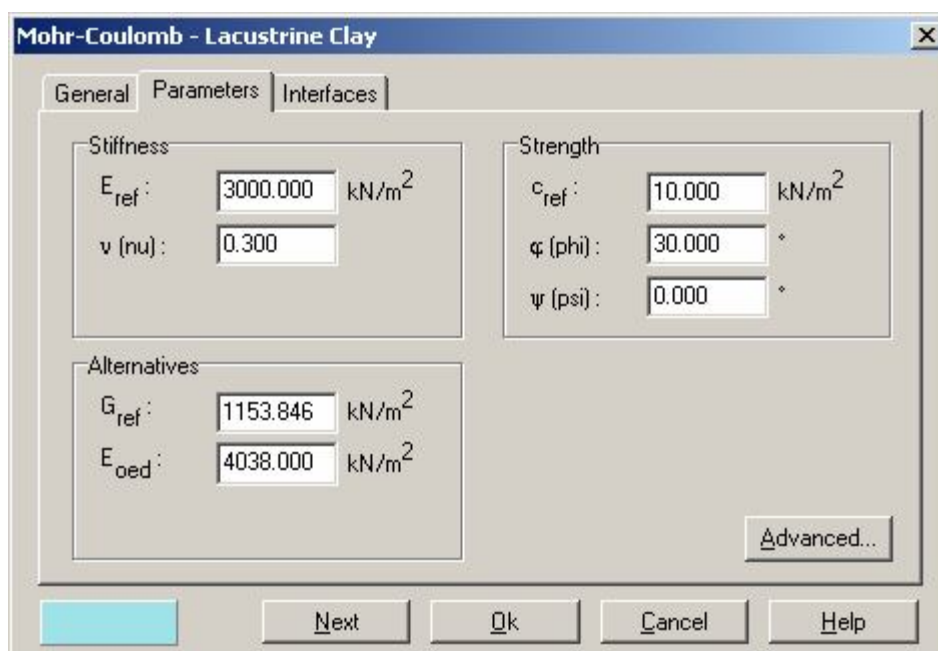


Рисунок 2.11 – Вкладка *Parameters* (Параметры) окна с набором данных по грунту и интерфейсу

На третьей вкладке *Interfaces* (Интерфейсы) вводятся параметры для интерфейсов. Щелкните по вкладке *Interfaces* или кнопке <Next> (<Далее>) для продолжения ввода данных. В этом примере в поле *Strength* (Прочность) вкладки *Interfaces* будет оставлен параметр по умолчанию *Rigid* (Жесткий). Нажмите на кнопку <OK> для подтверждения ввода текущего набора данных по материалам. Заданный набор появится на древовидном списке наборов данных в окне *Material Sets* (Наборы данных по материалам).

Перетащите набор данных «Lacustrine Clay» из окна *Material Sets* (Наборы данных материалов) в колонку окна *Borehole* (Геологическая колонка) и отпустите его здесь (отпустив левую кнопку мыши). Обратите внимание на то, что курсор меняет свою форму в зависимости от того, есть или нет возможность отпустить набор данных. При правильном задании набора данных слой грунта меняет цвет.

Щелкните по кнопке <OK> в окне *Material Sets* (Наборы данных по материалам) для закрытия базы данных.

Щелкните по кнопке <OK> в окне *Borehole* (Геологическая колонка) для возврата в область рисования.

Совет. PLAXIS различает проектную и глобальную базы данных по материалам. Наборы данных одного проекта могут быть заменены на наборы данных другого проекта с помощью глобальной базы данных. При установке программы наборы данных по всем урокам *Учебного пособия* сохраняются в глобальной базе данных. Для копирования существующего набора данных щелкните по кнопке <Global> (<Глобальная база данных>) в окне *Material Sets (Наборы данных по материалам)*, перетащите необходимый набор данных (в нашем случае «Lesson 1. Lacustrine Clay») из глобальной базы данных в проектную базу данных и отпустите его здесь. Теперь набор данных из глобальной базы доступен для текущего проекта. Аналогичным образом, наборы данных, созданные в проектной базе данных, могут быть перенесены в глобальную базу.

> Для изменения существующих наборов данных откройте с помощью панели инструментов *General* окно *Material sets (Наборы данных по материалам)*.

> Программа проверяет параметры материалов на непротиворечивость и в случае обнаружения проблемы выдает предупредительное сообщение.

Стенки

Для стенок и перекрытий также необходим набор данных по материалам. Для создания набора данных для стенок выполните следующее:

- Задайте в окне *Active work-plane (Активная рабочая плоскость)* значение $y = 0,00$.

- Откройте окно *Material sets (Наборы данных по материалам)* с помощью соответствующей кнопки на панели инструментов. В поле *Set type (Тип набора)* окна *Material set (Набор данных материалов)* задайте тип набора данных *Walls (Стенки)*. Щелкните по кнопке <New> (<Новый>). В поле *Identification (Идентификация)* группового блока *Material set (Набор данных по материалам)* введите «Basement Wall» (*Подвальная стена*).

- В групповом блоке *Properties (Свойства)* окна *Wall (Стенка)* выберите опцию *Linear (Линейный)* и введите значения параметров из Таблицы 2. Так как материал считается однородным, необходимо указать одинаковые значения для каждой из трех составляющих параметров E , G и ν . Для этого сначала установите метку на флаговой кнопке *Isotropic (Изотропный материал)*.

- Теперь введите изотропные значения в полях E_I и ν_{I2} . Программа автоматически определит значение G_{I2} .
- Щелкните по кнопке <ОК> для закрытия окна набора данных.
- Перетащите на стенку в области рисования набор данных *Basement Wall* (Подвальная стена). Если окно *Material sets* (Наборы данных по материалам) частично закрывает стенки и перекрытие здания, то окно можно отодвинуть в сторону. Когда курсор достигнет места, где можно отпустить набор данных, он изменит свою форму.
- Стенки на какое-то мгновение станут красными, а затем поменяют свой светло-синий цвет на темно-синий, показывая тем самым, что им успешно был присвоен набор данных.

Совет. Для проверки того, правильно ли присвоен конструктивному элементу набор данных по материалам, щелкните дважды по этому элементу и выберите его в появившемся окне. На экране появится окно (см. рис. 2.13), в котором будет показан тип элемента и присвоенный ему набор данных по материалам. Кнопка *Change* (Изменить) используется для присвоения данному элементу другого набора данных по материалам.

Таблица 2.2 – Свойства материалов подвальной стены (wall)

Параметр	Обозначение	Подвальная стена	Единицы измерения
Тип поведения	<i>Type</i>	Линейный	–
Толщина	<i>d</i>	0,3	м
Вес	γ	24	кН/м ³
Модуль Юнга	<i>E</i>	$1 \cdot 10^7$	кН/м ²
Модуль сдвига	<i>G</i>	$4\,167 \cdot 10^6$	кН/м ²
Коэффициент Пуассона	ν	0,2	–

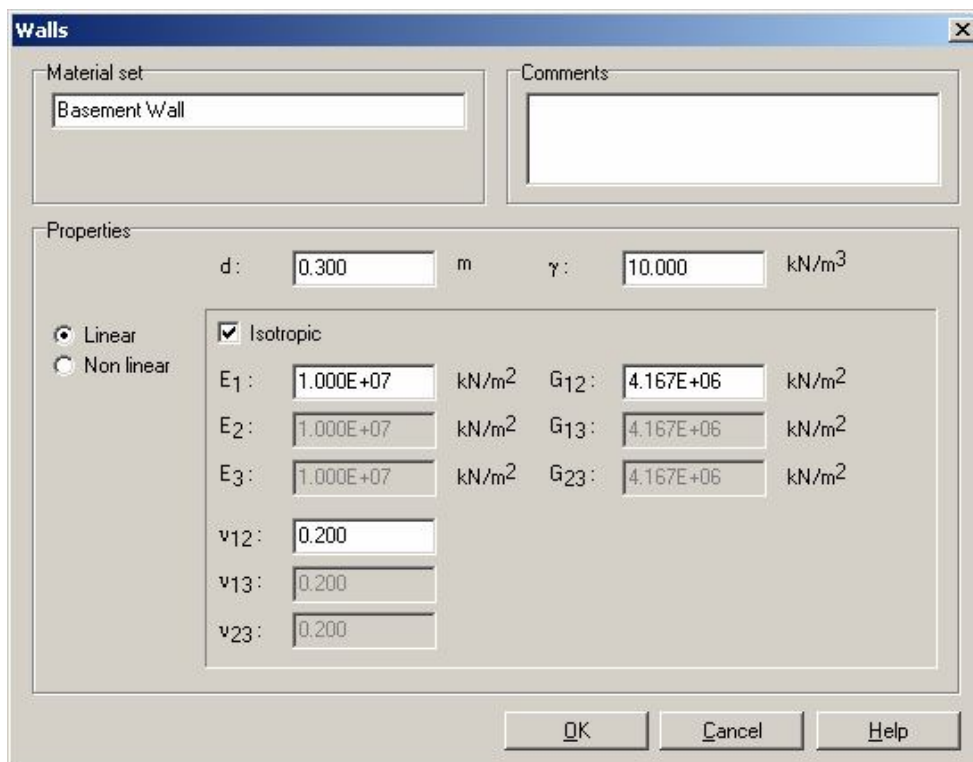


Рисунок 2.12 – Ввод набора данных по материалам стенок (*Walls*)

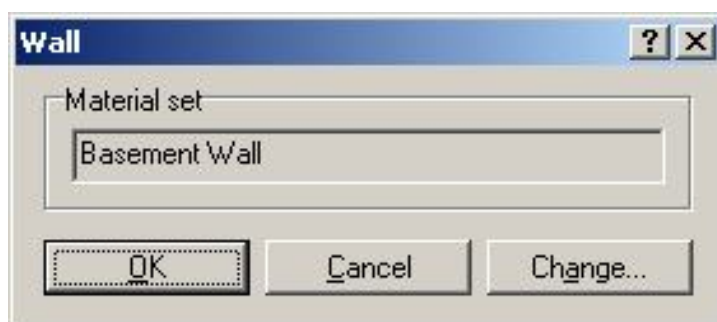


Рисунок 2.13 – Проверка набора данных по материалам для конструктивного элемента

Перекрытие

Аналогичным образом, вводятся свойства материалов для перекрытия. Не закрывая окна *Material sets* (*Наборы данных по материалам*) выполните следующее:

- Задайте в окне *Active work-plane* (*Активная рабочая плоскость*) значение $y = -2,00$.

- Задайте в поле *Set type (Тип набора)* окна *Material sets (Наборы данных по материалам)* тип элемента *Floors (Перекрытия)*. Щелкните по кнопке <New> (<Новый>). В поле *Identification (Идентификация)* группового блока *Material set (Набор данных по материалам)* введите «Basement Floor» (*Перекрытие подвала*). Введите свойства из таблицы 2.3 и щелкните по кнопке <OK> для закрытия окна набора данных.

- Перенесите набор данных *Basement Floor* в каждый из трех кластеров перекрытия, находящихся в области рисования. Перекрытие на какое-то мгновение станет красным, а затем поменяет свой цвет с бледно-зеленого на темно-зеленый. Закройте окно *Material sets (Наборы данных по материалам)* щелкнув по кнопке <OK>.

Таблица 2.3 – Свойства материалов перекрытия подвала (*Floor*)

Параметр	Обозначение	Подвальная стена	Единицы измерения
Тип поведения	<i>Type</i>	Линейный	–
Толщина	<i>d</i>	0,5	м
Вес	γ	24	кН/м ³
Модуль Юнга	<i>E</i>	$1 \cdot 10^7$	кН/м ²
Модуль сдвига	<i>G</i>	$40 \cdot 10^6$	кН/м ²
Коэффициент Пуассона	ν	0,2	–

Построение двухмерной сетки

После завершения построения геометрической модели и ввода информации по всем геологическим колонкам рекомендуется до построения полной трехмерной сетки построить двухмерную сетку конечных элементов. PLAXIS 3D Foundation позволяет выполнить построение сетки в полностью автоматическом режиме. Во время этой процедуры геометрическая модель

делится на объемные элементы и совместимые конструктивные элементы, если таковые имеются. При построении сетки учитывается положение всех линий и точек геометрической модели, так что сетка конечных элементов учитывает точное положение слоев, нагрузок и конструкций. Процесс построения двумерной сетки основан на устойчивом принципе триангуляции, с помощью которого находятся оптимальные размеры треугольников, и строится неструктурированная сетка. Несмотря на то, что неструктурированные сетки не формируют регулярные структуры элементов, они дают лучшие численные результаты, чем структурированные сетки с регулярным расположением элементов. Кроме построения самой сетки, выполняется преобразование входных данных (свойств, граничных условий, наборов данных по материалам и т. д.) из геометрической модели (точек, линий и кластеров) в данные сетки конечных элементов (элементы и узлы).

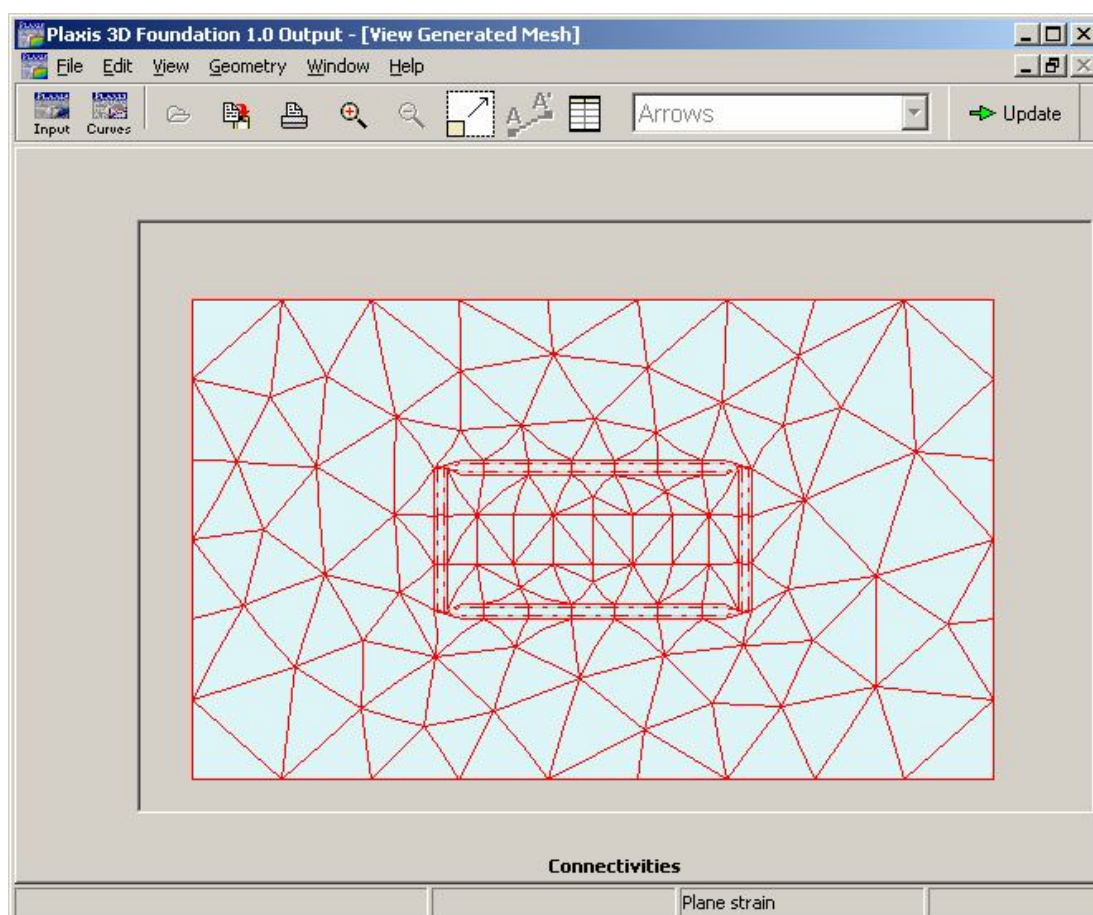


Рисунок 2.14 – Двухмерная сетка конечных элементов геометрической модели

Для построения сетки выполните следующее:

- Щелкните по кнопке *Generate 2D mesh* (*Построить 2D сетку*) на панели инструментов или выберите опцию *Generate 2D mesh* в меню *Mesh* (*Сетка*).

После построения сетки откроется новое окно *Output* (*Вывод данных*) с построенной сеткой (см. рис. 2.14). Это окно может быть использовано для проверки построенной сетки и, при необходимости, для ее измельчения.

- Нажмите на кнопку *<Update>* (*<Обновить>*) для возврата в окно *Input* (*Ввод данных*).

- Вокруг подвала и под ним можно ожидать возникновение больших градиентов перемещений. Следовательно, вокруг здания и под ним целесообразно иметь более мелкую сетку. Выберите 3 кластера, которые представляют плиту подвала (для выбора нескольких кластеров щелкните мышью по каждому из них, удерживая нажатой клавишу *<Shift>*). Перекрытие изменит свой цвет на красный, как это показано на рисунке 2.15. Выберите в меню *Mesh* (*Сетка*) опцию *Refine cluster* (*Измельчить кластер*). В результате в созданной сетке будет видно локальное измельчение указанного кластера. Щелкните по кнопке *<Update>* (*<Обновить>*) для возврата в окно *Input* (*Ввод данных*).

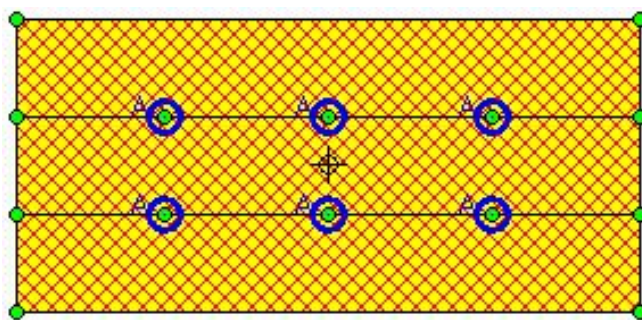


Рисунок 2.15 – Выбранные кластеры перекрытия

При необходимости сетка может быть далее оптимизирована за счет глобального или локального измельчения. Измельчение сетки будет

рассмотрено в одном из следующих уроков. Здесь мы предлагаем принять текущую сетку конечных элементов.

Совет. По умолчанию в поле *Global coarseness* (Глобальная крупность) для сетки устанавливается параметр *Coarse* (Крупная), что во многих случаях является нормальным для первого приближения. Параметр *Global coarseness* (Глобальная крупность) может быть изменен в меню *Mesh* (Сетка). Кроме того, имеются опции по глобальному или локальному измельчению сетки.

> На данном этапе ввода данных еще возможно изменить части геометрической модели или добавить геометрические объекты. При внесении изменений на этом этапе сетка конечных элементов должна быть построена повторно.

Построение трехмерной сетки

После построения двумерной сетки модель должна быть расширена до полной трехмерной сетки. Это можно сделать, щелкнув по кнопке *3D mesh generation* (Построение 3D сетки) или выбрав соответствующую опцию в меню *Mesh* (Сетка). Информация в вертикальном направлении по границам слоев, строительным отметкам и изменениям геометрической модели уже была введена с помощью рабочих плоскостей и геологических колонок. Никакой дополнительной информации для построения трехмерной сетки не требуется. Трехмерная сетка создается путем соединения вершин двумерных треугольных элементов с соответствующими точками элементов следующей рабочей плоскости. Таким образом, создается трехмерная сетка, состоящая из 15-узловых клиновидных элементов.

При необходимости программа автоматически вводит дополнительные уровни элементов с тем, чтобы размер элементов в направлении оси *y* был приблизительно равен среднему размеру элемента, заданному для двумерной сетки. Если используется несколько геологических колонок, и не все слои присутствуют во всех колонках, то для перехода между различными слоями вводятся так называемые вырожденные элементы.

Для построения трехмерной сетки выполните следующее:

- Щелкните на панели инструментов по кнопке *Generate 3D Mesh* (*Построить 3D сетку*) или выберите опцию *Generate 3D mesh* в меню *Mesh (Сетка)*. Программа запустит процедуру построения трехмерной сетки и выведет ее в окне *Output (Вывод данных)*. Для уменьшения размера элементов в направлении оси *y* между рабочими плоскостями с координатами – 2 м и –28 м автоматически вводится дополнительный уровень. Трехмерная сетка и различные конструктивные элементы показаны в двух разных окнах. Клавиши клавиатуры со стрелками позволяют пользователю поворачивать модель так, чтобы можно было ее просмотреть с любого направления (см. рис. 2.16).
- Нажмите на кнопку *<Update>* (*<Обновить>*) для возвращения к программе *Input (Ввод данных)*.

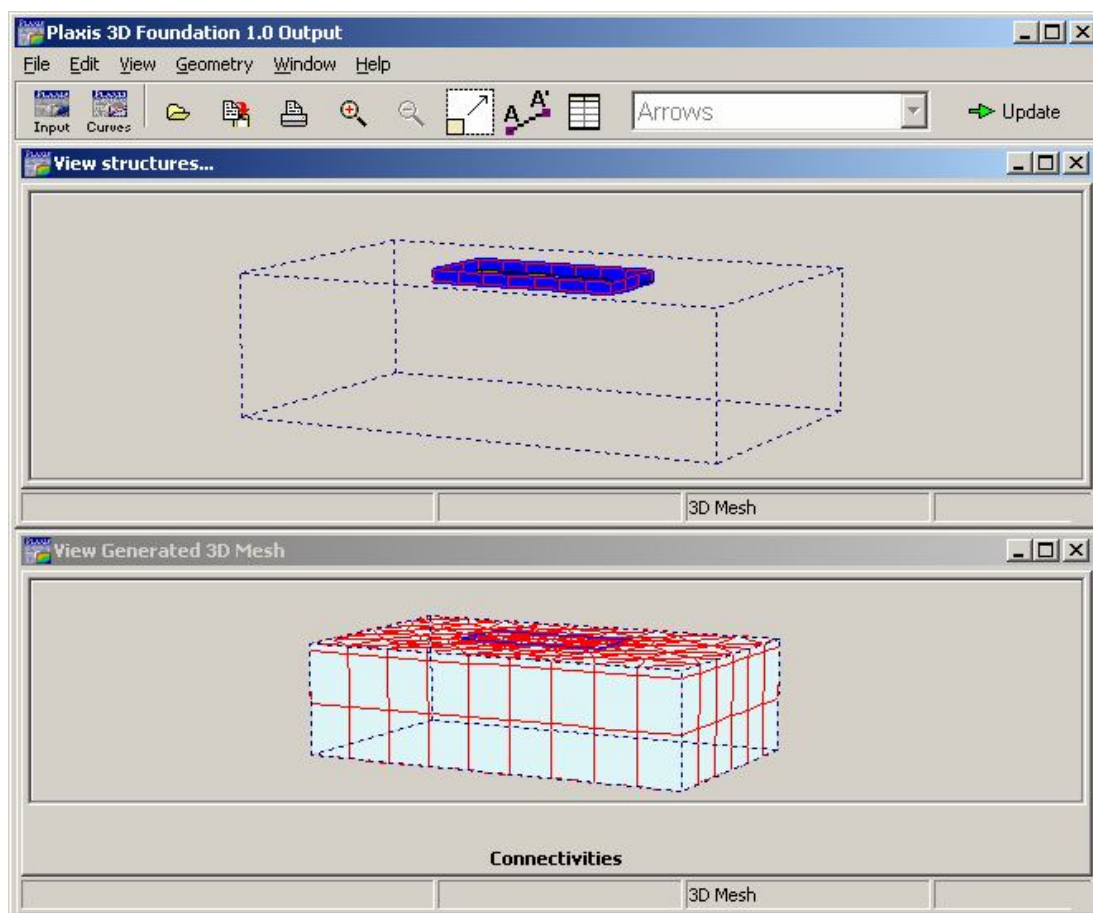


Рисунок 2.16 – Трехмерная сетка в окне *Output (Вывод данных)*

Совет. Если расстояние между двумя соседними рабочими плоскостями значительно превышает средний размер (двухмерного) элемента, то во получения плохо обусловленных элементов в процессе создания трехмерной сетки будут автоматически сгенерированы промежуточные уровни элементов (см. рис. 2.16).

2.3 Выполнение расчетов

Построение сетки завершает создание конечно-элементной модели. Перед выполнением фактического расчета должны быть заданы фазы расчета. На первой фазе задаются начальные условия. На остальных фазах может быть задана выемка грунта и строительство подвального этажа или активирование нагрузок.

Задание таких фаз расчета, как включение и отключение частей геометрической модели, присвоение кластерам или конструктивным элементам различных наборов данных по материалам или изменение величины нагрузок выполняется в режиме расчета (*Calculation*) программы *Input* (*Ввод данных*). При нажатии на кнопку *<Calculation>* (*<Расчет>*) панель инструментов *Geometry* (*Геометрия*) скроется и появится панель инструментов *Calculation* (*Расчеты*). Эта панель инструментов (см. рис. 2.17) состоит из комбинированного окна фаз расчета и нескольких кнопок для задания фаз, выполнения расчета и запуска программы *Output* (*Вывод данных*), предназначенной для просмотра результатов. Режим расчета программы *Input* представляет собой отдельный режим, в котором задаются фазы расчета и могут быть запущены вычисления.



Рисунок 2.17 – Панель инструментов Calculations (*Расчеты*)

При щелчке по кнопке *Phases* (*Фазы*) откроется окно *Phases* (см. рис. 2.18). Им можно воспользоваться для добавления и удаления фаз расчета и задания

параметров для процедуры расчета. Все заданные фазы расчета показываются в списке, находящемся в нижней части окна.

PLAXIS 3D Foundation, как и все программы семейства PLAXIS, имеет удобные процедуры для автоматического пошагового нагружения, активирования и деактивирования нагрузок частей геометрической модели (поэтапное строительство), которые могут иметь широкое практическое применение. Поэтапное строительство – это очень удобный способ ввода нагрузок. С помощью этой особой функции программы PLAXIS возможно изменить конфигурацию геометрической модели и схему нагружения путем деактивирования или повторного активирования нагрузок, объемных элементов или конструктивных объектов, созданных при вводе геометрической модели. Поэтапное строительство предусматривает точное и реалистическое моделирование различных процессов нагружения, строительства выемки грунта. Эта опция может также использоваться для переназначения наборов данных по материалам кластерам или конструктивным элементам.

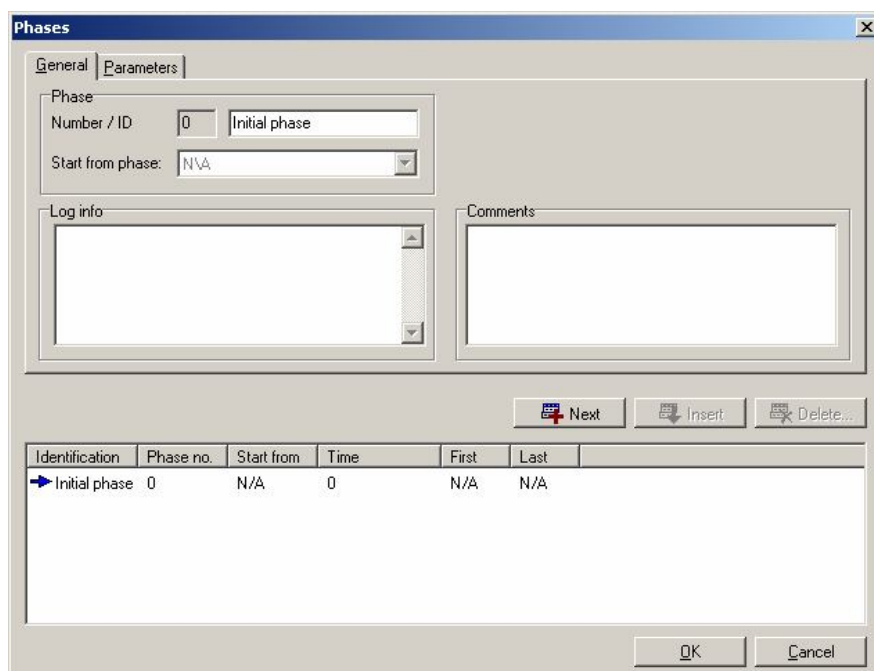


Рисунок 2.18 – Окно *Phases* (Фазы) с вкладкой *General* (Общие настройки)

Начальные условия

До начала фактических расчетов должны быть сгенерированы начальные условия. В целом, начальные условия включают в себя начальную конфигурацию геометрической модели и начальное напряженное состояние. Начальные гидравлические условия для глинистого слоя были уже введены в окне *Borehole (Геологическая колонка)*. Эти условия также учитываются при расчете начального эффективного напряженного состояния:

- Щелкните по кнопке *Calculation (Расчет)* для включения режима расчетов.
- Программа предложит сохранить модель. Нажмите на кнопку *<Yes> (<Да>)* и сохраните модель под заданным именем (*Lesson 1.PF3*).

После щелчка по кнопке *<Calculation> (<Расчет>)* режим расчетов программы *Input* станет активным и появится панель инструментов *Calculation*. После задания нового проекта автоматически создается первая фаза расчета под названием «Initial phase» (*Начальная фаза*), которая задается в комбинированном окне *Phase list (Список фаз)*. Все конструктивные элементы и нагрузки, присутствующие в геометрической модели, изначально автоматически отключаются, за исключением кластеров грунта, которые с самого начала являются активными.

За исключением генерирования начальных условий никаких дополнительных действий в нашем примере не требуется. Однако перед началом расчетов будут добавлены две дополнительных фазы.

Задание этапов строительства

После задания начальных условий может быть смоделировано строительство фундамента и схема нагружения. Это будет выполнено на двух отдельных фазах расчета, которые необходимо добавить.

Для добавления фаз выполните следующее:

- Щелкните по кнопке *Next phase (Следующая фаза)*. В результате будет добавлена новая фаза и откроется окно *Phases (Фазы)*, в котором будет создана новая фаза расчета под названием <Phase 1> (*Фаза 1*). Эта фаза будет автоматически выбираться программой.

- В поле *ID (Идентификатор)* вкладки *General (Общие настройки)* введите (но это необязательно) подходящее название для новой фазы (например, «Excavation» (*Выемка грунта*)) и задайте фазу, после которой должна начинаться текущая (в нашем случае расчет может начинаться только с нулевой, т.е. начальной фазы (*Initial phase*), которая содержит начальное напряженное состояние).

- Щелкните по вкладке *Parameters (Параметры)* для того, чтобы открыть ее.

- Вкладка *Parameters* (рис. 2.19) содержит управляющие параметры расчета. Сохраните в групповом блоке *Iterative procedure (Итерационная процедура)* параметры, задаваемые по умолчанию, а в поле *Additional steps (Дополнительные шаги)* задайте число 250. Проверьте, чтобы была включена флаговая кнопка *Reset displacements to zero (Обнулить перемещения)*, чтобы сбросить на ноль (нереалистичные) деформации, которые будут получены при расчете начальных напряжений на начальной фазе.

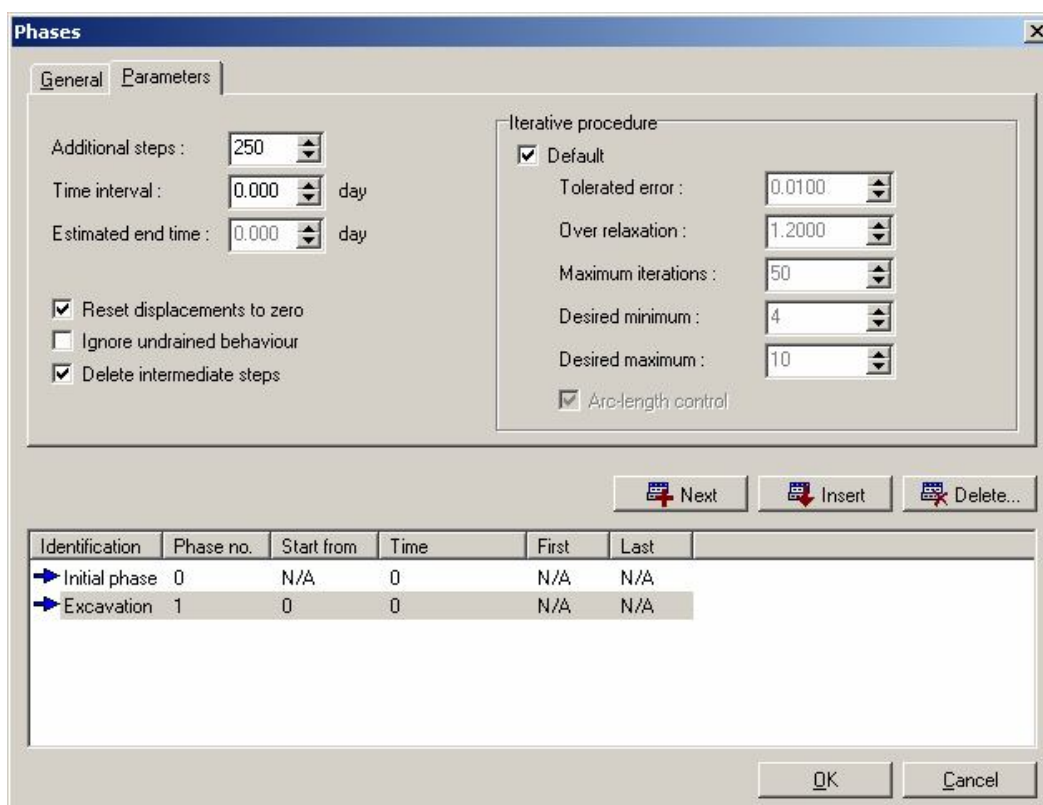


Рисунок 2.19 – Вкладка *Parameters* (Параметры) окна *Phases* (Фазы)

• Теперь для первой фазы заданы параметры расчета. Щелкните по кнопке <OK> для закрытия окна *Phases* (Фазы).

Вернитесь в главное окно программы *Input*. Теперь для задания этапов строительства в текущем проекте можно использовать область рисования. Для этого выполните следующее:

- В списке фаз должна быть активирована фаза 1 «Excavation».
- Задайте в комбинированном окне *Active work-plane* (Активная рабочая плоскость) рабочую плоскость с $y = 0,00$.
- Щелкните по геометрической линии, которая представляет подвальную стену.
- Это должно привести к активированию подвальной стены. Активные стенки имеют синий цвет, неактивные стенки – серый.
- Щелкните также по кластерам грунта, заключенным между стенками. Появится диалоговое окно, в котором вы можете отключить опцию *Soil below* (Грунт ниже). Щелкните по флаговой кнопке с галочкой для

отключения кластера. Нет необходимости в отключении опции воды, так как вода начинается на уровне $y = -2,00$. Щелкните по кнопке <ОК> для закрытия этого диалогового окна. Кластер грунта окрасится в белый цвет, указывая на то, что он отключен.

- Повторяйте эту процедуру до тех пор, пока не будут отключены все 3 кластера грунта, находящиеся в пределах подвальных стен.
- Теперь выберите рабочую плоскость с $y = -2,00$.
- Щелкните по элементу перекрытия для его активирования. Появится диалоговое окно с флаговой кнопкой *Floor (Перекрытие)*. Щелкните по флаговой кнопке *Floor* для включения перекрытия. Затем по кнопке <ОК> для закрытия этого диалогового окна. Перекрытие должно окраситься в темно-зеленый (оливковый) цвет, указывая на то, что оно активировано.
- Повторяйте эту процедуру до тех пор, пока не будут включены все 3 кластера перекрытия.



Рисунок 2.20 – Окно *Select items (Выбор опций)* с активированным элементом перекрытия

На этом задание первой фазы расчета завершается. Для задания второй фазы расчета выполните следующее:

- Щелкните по кнопке *Next phase (Следующая фаза)* для ввода второй фазы расчета. Откроется окно *Phases (Фазы)*, в котором будет добавлена новая фаза с названием по умолчанию <Phase 2> (*Фаза 2*). Присвойте этой фазе имя

«Loading» (*Нагружение*) и убедитесь в том, что она начинается после фазы 1 «Excavation».

- Проверьте, чтобы опция *Reset displacements to zero* (*Обнулить перемещения*) на вкладке *Parameters* (*Параметры*) **не была включена**.
- Сохраните для остальных опций параметры, заданные по умолчанию.
- Убедитесь в том, что в списке фаз выбрана фаза 2 «Loading» (*Нагружение*).
- Убедитесь в том, что выбрана рабочая плоскость с $y = -2,00$.
- Дважды щелкните по зеленому кружку, указывающему на неактивную сосредоточенную нагрузку в точке $(-10,0; -3,0)$. В результате откроется окно *Point load* (*Сосредоточенная нагрузка*), в котором могут быть введены величина и направление действия нагрузки. Введите нагрузку $y = -6000$ кН (нагрузка 6000 кН, действующая вниз по оси y) и щелкните по кнопке <OK>. Убедитесь в том, что нагрузка активирована, на что указывает наличие синей стрелки. При необходимости, щелкая по нагрузке, можно ее попеременно активировать или деактивировать.
- Повторите эту процедуру для всех сосредоточенных нагрузок так, чтобы все они имели значение $y = -6000$ кН.

После того, как все этапы строительства будут полностью заданы, можно посмотреть трехмерное изображение ситуации с помощью кнопки *Preview* (*Предварительный просмотр*). Это позволяет выполнить прямую визуальную проверку до начала вычислений. В окне предварительного просмотра должна быть показана выемка под подвал со стенами и активированные нагрузки, действующие на перекрытие подвала. Если нагрузки не видны, то геометрическую модель можно повернуть с помощью клавиш со стрелками на клавиатуре. Проверьте также, чтобы была выбрана опция *Loads* (*Нагрузки*) в меню *Geometry* (*Геометрия*).

Для проверки заданных фаз расчета щелкните по кнопке *Preview* (*Предварительный просмотр*). После предварительного просмотра нажмите на кнопку <Close> (<Заккрыть>) для возврата в главное окно. Если Вас что-то не

устраивает, щелкните по кнопке <Close> (<Заккрыть>) и исправьте ситуацию в главном окне.

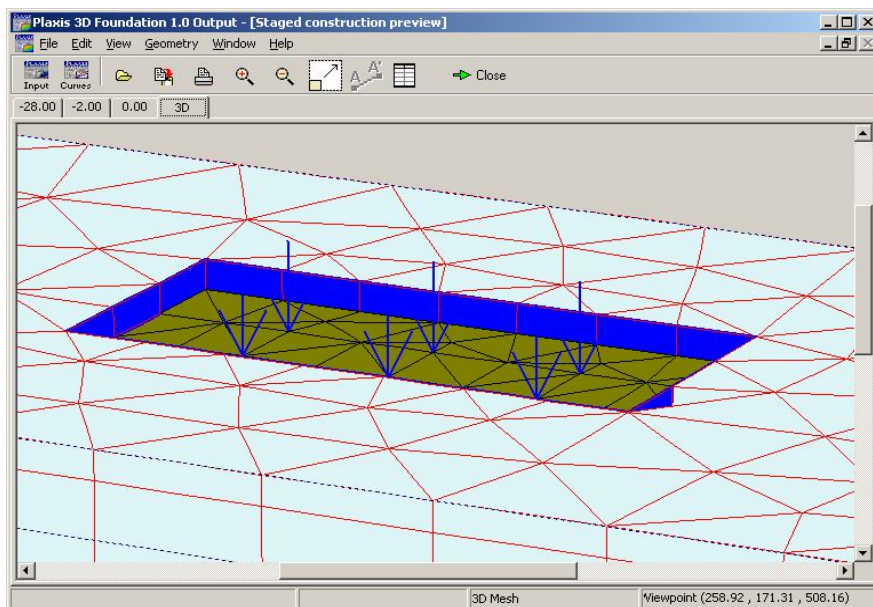


Рисунок 2.21 – Предварительный просмотр геометрической модели и активированных нагрузок

Теперь задание процесса расчета полностью завершено и можно начинать вычисления.

Щелкните по кнопке *Calculate (Расчет)*. С этого момента начнется процесс вычислений. Все фазы расчета, отмеченные синей стрелкой (в нашем случае три фазы), в принципе будут выполняться в порядке, установленном с помощью параметра *Start from phase (Начать с фазы)*.

Во время расчетов на экране появляется окно с информацией о ходе выполнения текущей фазы расчета (см. рис. 2.22). Постоянно обновляемая информация в этом окне содержит, среди прочего, данные о ходе процесса расчета, номере текущего шага вычислений, полной погрешности текущей итерации и количестве точек пластических деформаций на текущем шаге расчета.

Выполнение расчета займет несколько минут. По завершении расчета окно закроется, и программа перейдет в главное окно. Кроме того, будет обновлен список фаз (*Phase list*), в котором появится «галочка» зеленого цвета, указывающая на успешное завершение расчета.

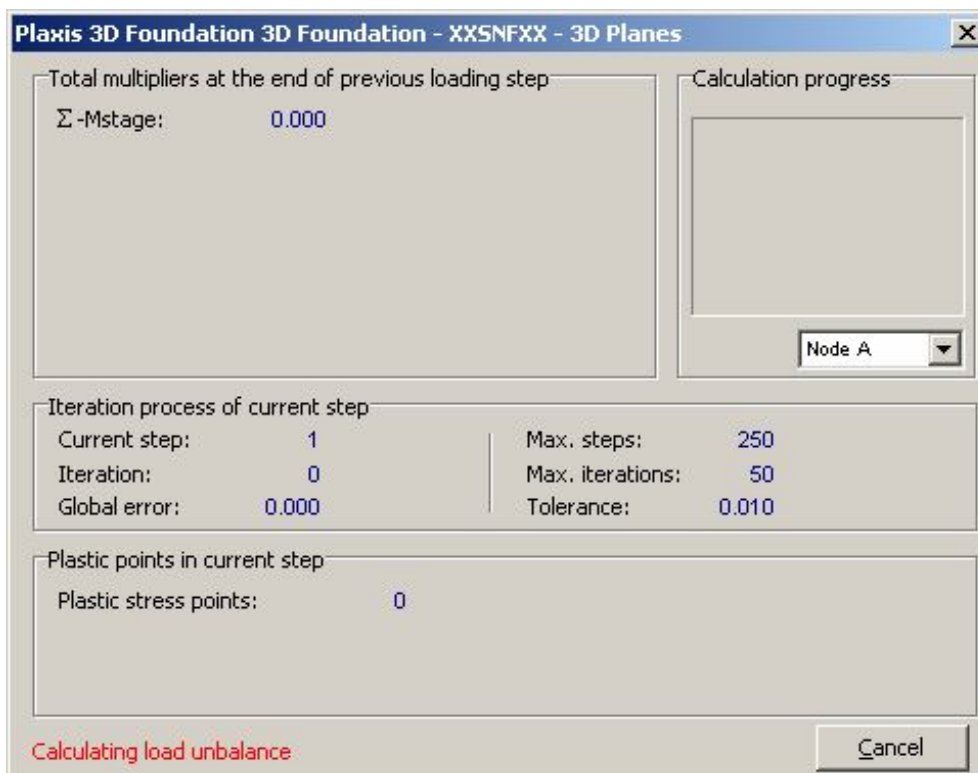


Рисунок 2.22 – Окно с информацией о расчетах

Совет. Фазы расчета могут быть добавлены, вставлены или удалены с помощью кнопок <Next> (<Далее>), <Insert> (<Вставить>) и <Delete> (<Удалить>), находящихся в окне *Phase list* (Список фаз).

> Каждый раз после выполнения расчета (серии расчетов) тщательно проверяйте список фаз расчета. Успешно заверченный расчет помечается в списке зеленой «галочкой» (✓), а неудачный – красным крестиком (×). Фазы, заданные для выполнения, обозначены синей стрелкой.

2.4 Просмотр выходных данных

По завершении расчета можно оценить полученные результаты с помощью программы *Output* (Вывод данных). Эта программа позволяет посмотреть перемещения и напряжения во всей трехмерной модели, а также в отдельных рабочих плоскостях или конструктивных элементах. Результаты расчетов могут быть также выведены в табличной форме.

Для просмотра результатов текущих вычислений выполните следующее:

- Выберите в комбинированном окне *Phase list* (Список фаз) последнюю фазу расчетов. Для открытия программы *Output* (Вывод данных) щелкните по

кнопке *Output*. По умолчанию программа *Output* выведет трехмерную деформированную сетку в конце выбранной фазы расчета. Деформации выводятся в таком масштабе, чтобы их было хорошо видно.

- Выберите в меню *Deformations (Деформации)* опцию *Total displacements (Полные перемещения)*. Полные перемещения всех узлов будут показаны в виде стрелок с указанием их величины.

- В комбинированном окне панели инструментов в настоящее время выбрана опция *Arrows (Стрелки)*. Выберите в этом комбинированном окне опцию *Shadings (Затенение)*. Теперь полные перемещения будут показаны зонами с различными цветовыми оттенками. Значения перемещений на границах цветовых переходов указаны на шкале. Если на рисунке показано перекрытие, оно будет частично скрывать перемещения грунта. Для получения показанного ниже изображения отключите перекрытие, выбрав в меню *Geometry (Геометрия)* опцию *Structures (Конструкции)*.

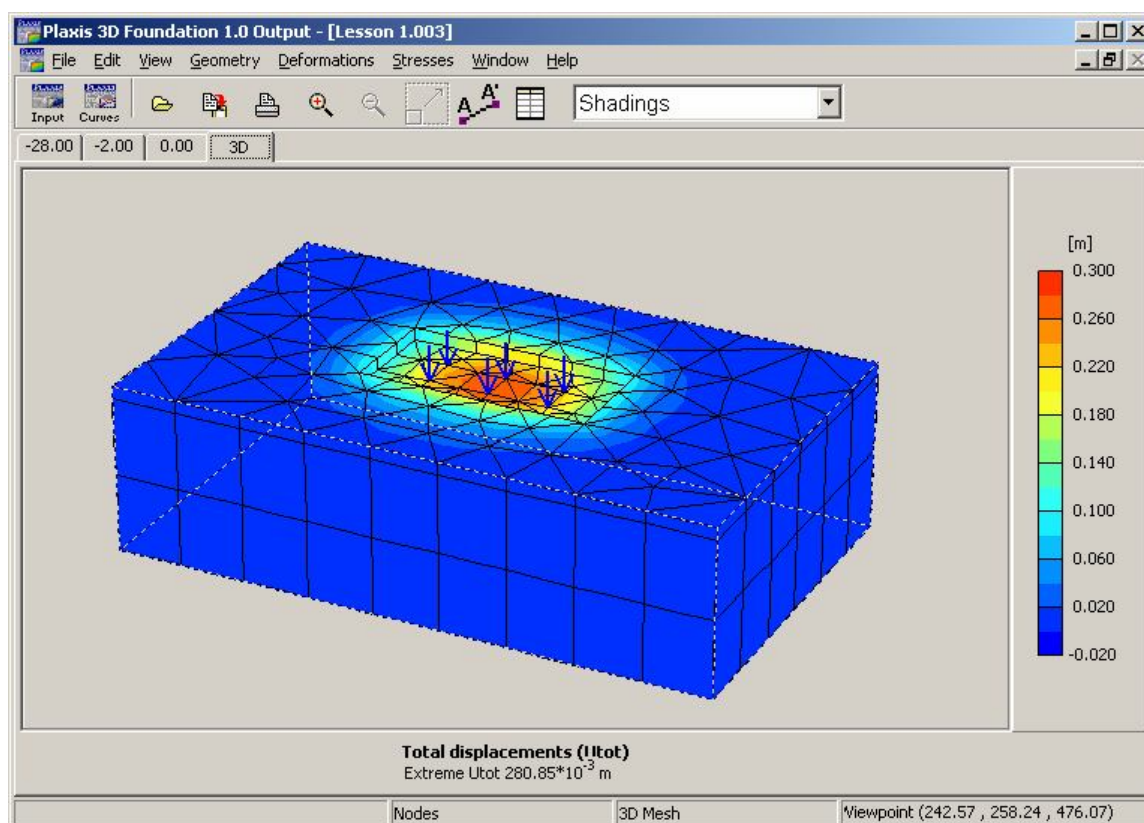


Рисунок 2.23 – Показ полных перемещений с помощью затенения

Совет. Для изменения ориентации трехмерной модели на экране можно воспользоваться клавишами со стрелками. По умолчанию задается такая ориентация, при которой положительная ось X направлена вправо, ось Y – вверх, а ось Z – в сторону пользователя. Клавиши со стрелками \leftarrow и \rightarrow могут быть использованы для поворота модели вокруг оси Y , а клавиши со стрелками \uparrow и \downarrow – для поворота модели в ее текущей ориентации вокруг горизонтальной оси экрана.

- Выберите в комбинированном окне панели инструментов опцию *Contour lines* (Контурные линии). Теперь полные перемещения будут показаны контурными линиями. Значения перемещений, соответствующие проставленным меткам, указаны на шкале.

Выходные данные могут быть получены не только для всей трехмерной геометрической модели, но также и для отдельных рабочих плоскостей. Рабочие плоскости могут быть выбраны с помощью вкладок в верхней части окна *Output* (Вывод данных). Каждая вкладка, соответствующая рабочей плоскости, помечена координатой Y этой плоскости. Крайняя правая вкладка с меткой 3D показывает трехмерное изображение геометрической модели.

- Выберите среднюю рабочую плоскость ($y = -2,00$), щелкнув по второй вкладке. На экране появятся контурные линии полных перемещений в рабочей плоскости с метками, соответствующими обозначениям.

Совет. Кроме полных перемещений, меню *Deformations* (Деформации) позволяет вывести на экран *приращения перемещений* (*Incremental displacements*) и *фазовые перемещения* (*Phase displacements*).

Приращение перемещений – это перемещения, которые происходят за один шаг вычислений (в нашем случае это последний шаг). *Приращения перемещений* могут быть полезны при представлении механизмов разрушения. *Фазовые перемещения* – это перемещения, которые происходят за одну фазу расчета (в нашем случае это последняя фаза). *Фазовые перемещения* могут использоваться для проверки последствий отдельного этапа строительства без необходимости сброса на ноль перемещений до начала выполнения этого этапа.

- При активной средней плоскости дважды щелкните по одной из плит перекрытия. Откроется новое окно с деформированной плоскостью перекрытия. Для представления изгибающих моментов, возникающих вдоль

наибольшей длины плиты перекрытия, выберите в меню *Forces* (Силы) опцию *Bending moments M11* (Изгибающие моменты *M11*). Если перекрытия не видно, его нельзя выбрать. В этом случае включите в меню *Geometry* (Геометрия) опцию *Structures* (Конструкции).

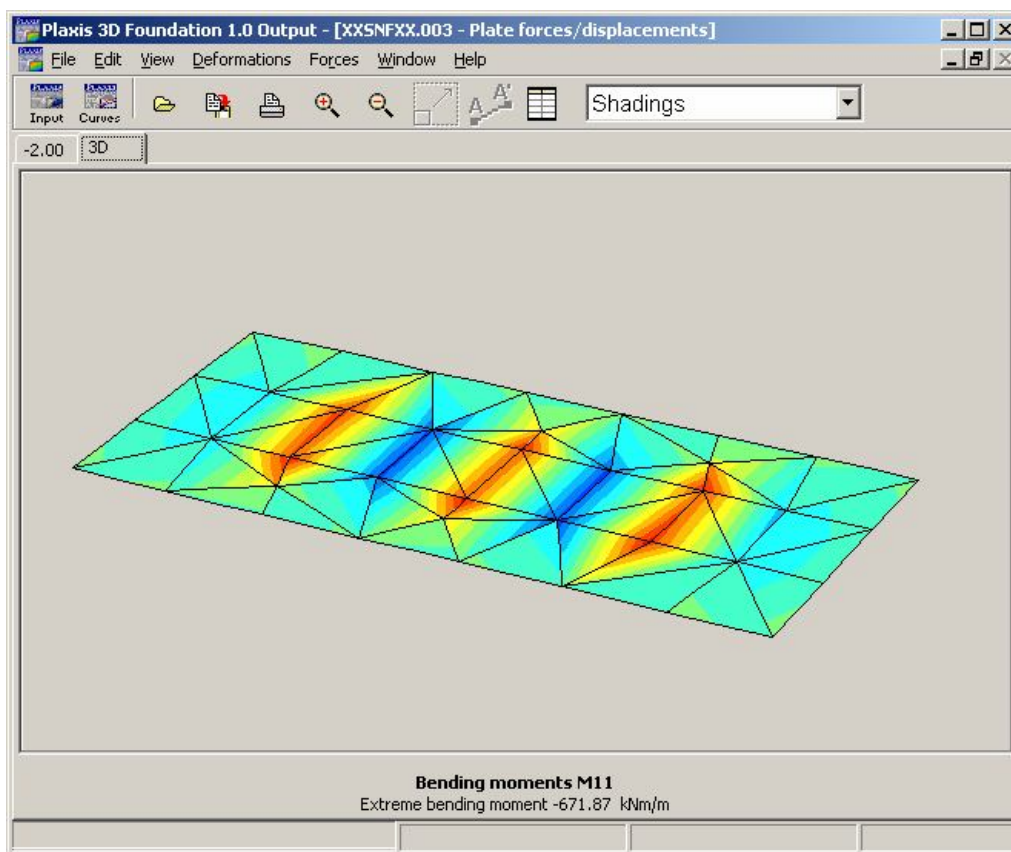


Рисунок 2.24 – Изгибающие моменты в плите перекрытия

Для просмотра изгибающих моментов в табличной форме щелкните по кнопке *Table* (Таблица). Откроется новое окно с таблицей, в которой даны значения изгибающих моментов в каждом узле перекрытия.

3 НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ БУРОНАБИВНОЙ СВАИ

В этом уроке будет моделироваться испытание буронабивной сваи нагрузкой. При полномасштабных полевых испытаниях в Бразилии было испытано 6 свай диаметром 35–50 см, к которым прикладывались как сжимающие, так и растягивающие нагрузки. За сваями велось тщательное наблюдение с помощью датчиков нагрузки и перемещений.

Одна из свай диаметром 40 см и длиной 10 м подвергалась сжимающей нагрузке до достижения предела прочности. Свая была установлена в илистых и глинистых песках, которые можно разделить на несколько слоев, как схематически показано на рисунке 3.1. Уровень воды находится сразу же под нижним концом сваи.

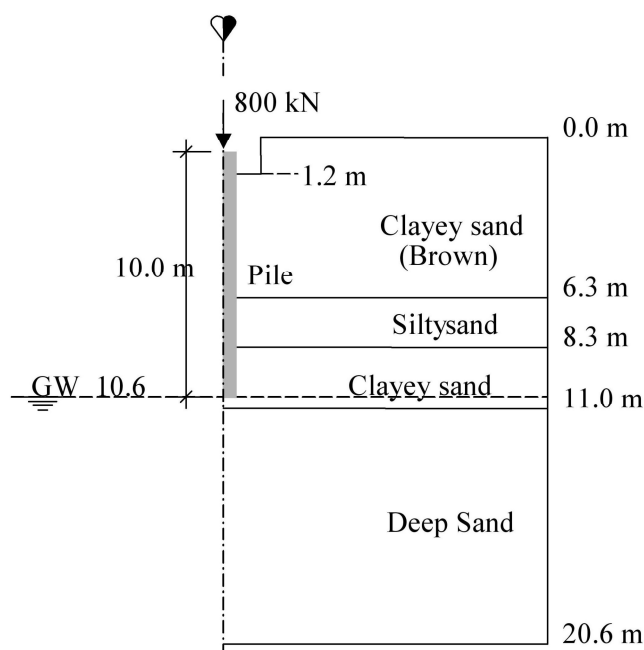


Рисунок 3.1 – Поперечный разрез испытательного участка

Целью данного расчета является демонстрация общей постановки трехмерной модели, включающей сваю в виде объемных элементов. Для ограничения необходимого времени расчета модель должна использовать достаточно крупную сетку, но в то же время отражать характер развития осадки буровой сваи под нагрузкой.

3.1 Геометрия

Свая размещена в центре небольшой выемки глубиной 1,20 м. Оголовок сваи выступает на 60 см над дном выемки. Грунтовое основание может быть разделено на четыре слоя. Горизонт воды находится над кровлей глубинного слоя песка, который залегает чуть ниже пяты сваи. Во избежание влияния граничного эффекта размеры модель увеличиваются на 10 м ниже пяты сваи и на 10 м во все стороны.

Для создания геометрической модели и сетки конечных элементов выполните следующее:

Общие настройки

Запустите программу *Input (Ввод данных)* и выберите в диалоговом окне *Create/Open project (Создать/Открыть проект)* опцию *New project (Новый проект)*.

На вкладке *Project (Проект)* окна *General settings (Общие настройки)* введите название проекта и оставьте остальные параметры заданными по умолчанию.

На вкладке *Dimensions (Размеры)* сохраните стандартные единицы измерения *Length (Длина) = m (м)*, *Force (Сила) = kN (кН)*, *Time (Время) = day (сутки)* и введите координаты геометрической модели $X_{\min} = -10$, $X_{\max} = 10$, $Z_{\min} = -10$, $Z_{\max} = 10$. Введите в поле *Spacing (Шаг)* группового блока *Grid (Сетка)* значение, равное 1 м, а в поле *Number of intervals (Количество интервалов)* – число 2.

Щелкните по кнопке <ОК>, чтобы появилась область рисования.

Рабочие плоскости

Откройте окно *Work planes (Рабочие плоскости)*. Вставьте 4 новые рабочие плоскости. Присвойте им значения $y = 10,0; 19,4; 20,0$ и $20,6$ м. Для этого щелкните в таблице по уровню рабочей плоскости и введите необходимое значение. Обратите внимание на то, что после нажатия на клавишу <Enter> или после щелчка по другой рабочей плоскости таблица автоматически сортируется.

Щелкните по кнопке <OK> для того, чтобы закрыть окно *Work planes (Рабочие плоскости)*.

Геометрия сваи

Убедитесь в том, что выбрана рабочая плоскость с $y = 20,6$ м. Выберите опцию *Pile (Свая)* и на экране появится окно конструктора свай (см. рис. 3.2). Выберите в качестве типа сваи (*Type of pile*) опцию *Massive Circular pile (Сплошная круглая свая)*.

В поле *Diameter (Диаметр)* задайте диаметр сваи, равный $0,4$ м.

Свая состоит из секций, которые могут быть заданы дугой окружности (*Arc*) или прямой линией (*Line*). В поле *User-defined pile (Пользовательская свая)* могут быть заданы и дуги и отрезки. С помощью кнопок со стрелками, находящихся справа внизу блока *Section (Секция)*, можно переключаться между различными секциями. Вместо этого для выбора нужной секции можно просто щелкнуть по ней в окне предварительного просмотра сваи.

В поле *Angle (Угол)* для каждой секции сваи сохраните значение, заданное по умолчанию, т. е. 60° .

Выберите опцию *Outside interface (Внешний интерфейс)* и проверьте, чтобы интерфейс был задан по всей длине окружности сваи.

Щелкните по кнопке <OK> для закрытия конструктора свай.

Теперь курсор примет форму сваи, указывая на то, что свая готова к размещению на геометрической модели. Положение курсора соответствует положению оси сваи. Переместите курсор к точке с координатами (0,0) и щелкните по ней один раз. Теперь свая размещена на геометрической модели между активной рабочей плоскостью и расположенной под ней рабочей плоскостью.

Сделайте активной рабочую плоскость с координатой $y = 20,0$ и щелкните еще раз по точке (0,0) для добавления сваи также между этой новой рабочей плоскостью и плоскостью, расположенной под ней. Аналогичным образом, добавьте сваю к рабочей плоскости с $y = 19,4$.

Щелкните правой кнопкой мыши для завершения операции добавления свай к геометрической модели.

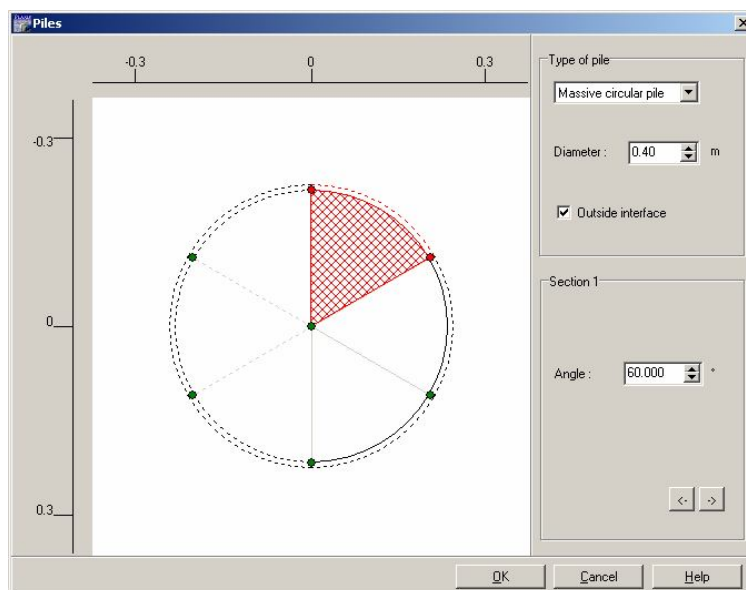


Рисунок 3.2 – Конструктор свай

Совет. Точка вставки сваи на рабочей плоскости, называется базисной точкой. Существующая свая может быть отредактирована с помощью двойного щелчка по базисной точке. В результате появится окно конструктора свай которым будет представлена существующая свая.

Выемка грунта вокруг головы сваи

Для того, чтобы облегчить доступ к голове сваи при проведении испытания нагрузкой, вокруг сваи делается небольшая выемка. Для моделирования этой выемки должен быть задан дополнительный кластер. Для построения этого кластера сначала увеличьте масштаб изображения вокруг сваи.

Выберите на панели инструментов опцию *Zoom in (Увеличить масштаб)*. Щелкните по точке с координатами $(-2,0; -2,0)$ и удерживайте кнопку мыши нажатой. Теперь переместите курсор к точке $(2,0; 2,0)$ и отпустите кнопку. Это приведет к увеличению масштаба изображения непосредственно вокруг сваи.

Выберите опцию *Geometry line (Геометрическая линия)*.

Нарисуйте квадратный кластер вокруг сваи с координатами $(-1,0; -1,0) - (-1,0; 1,0) - (1,0; 1,0) - (1,0; -1,0)$ и щелкните опять по точке $(-1,0; -1,0)$ для его закрытия. Щелкните правой кнопкой мыши для завершения режима рисования новых геометрических линий.

Нагрузка

Для моделирования испытания нагрузкой к голове сваи должна быть приложена сосредоточенная нагрузка. Так как голова находится немного ниже поверхности грунта, то для добавления нагрузки на нужном уровне выполните следующее:

- Сначала в окне *Active work plane* выберите активную рабочую плоскость с координатой $y = 20,0$ м.
- Постройте дополнительную геометрическую линию между точками $(0; 0)$ и $(-1,0; 0,0)$. Выберите опцию *Point load (Сосредоточенная нагрузка)* и добавьте нагрузку в центре сваи. Щелкните один раз по точке с координатами $(0; 0)$ для добавления сосредоточенной нагрузки.

Геологическая колонка и свойства материалов

Для задания слоев грунта необходимо добавить геологическую колонку и присвоить свойства материалов.

Щелкните по кнопке *Borehole* (Геологическая колонка) и добавьте геологическую колонку к точке с координатами $(-5,0; 0,0)$.

Грунт состоит из четырех отдельных слоев. Поэтому необходимо добавить 4 дополнительные границы слоя. Выберите верхнюю границу слоя ($y = 0$ м) и щелкните по кнопке *Insert* (Вставить) для добавления четырёх дополнительных границ слоев.

Щелкните в столбце таблицы Y [м] по координате y границы верхнего слоя. Для этой границы введите значение, равное 20,6 м.

Аналогичным образом, введите значения для других границ слоев: 14,30 м; 12,30 м; 9,6 м и 0,0 м. Информация по геологической колонке показана на рисунке 3.3.

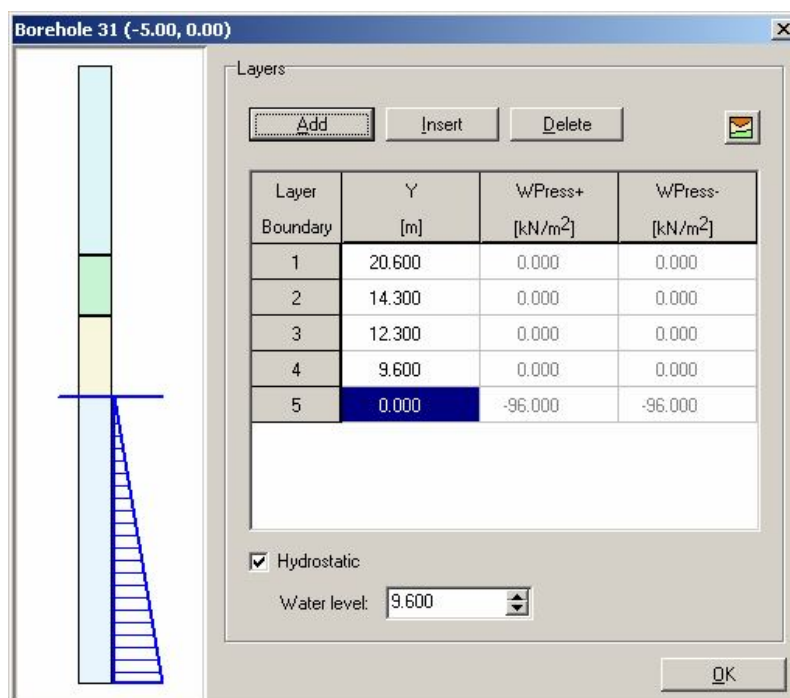


Рисунок 3.3 – Окно *Borehole* (Геологическая колонка)

Введите в поле *Water level (Уровень воды)* значение, равное $y = 9,6$.

Щелкните по кнопке набора данных по материалам и введите свойства материалов для слоев, представленных в таблице 3.1. Для открытия диалогового окна *Choose colour (Выбрать цвет)* щелкните по цветному прямоугольнику, находящемуся в нижнем левом углу диалогового окна и показывающему текущий цвет набора данных. Этим окном можно воспользоваться для изменения цвета, присвоенного набору данных по материалам. Например, поменяйте цвет набора данных для сваи на серый, щелкнув в нижнем левом углу разноцветного прямоугольника, находящегося в этом окне.

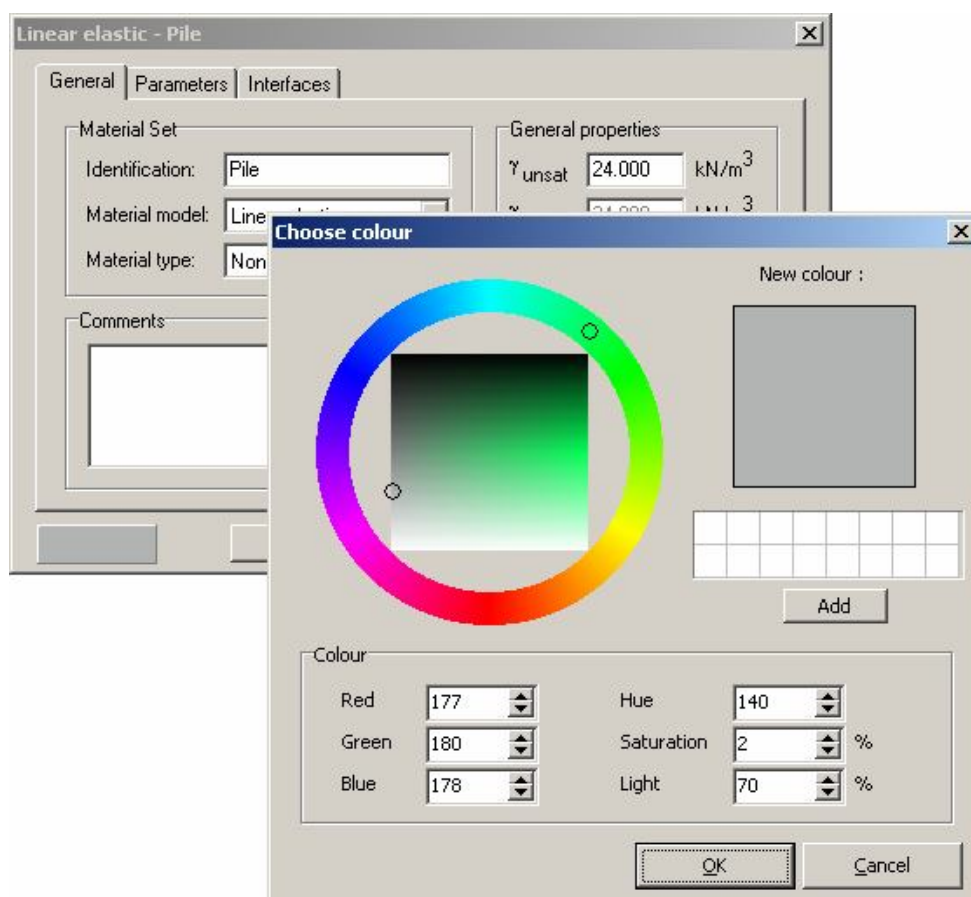


Рисунок 3.4 – Изменение цвета набора данных по материалам

Присвойте свойства материалов четырем слоям грунта, перетаскив их в окно геологической колонки и отпустив на нужных слоях. Набор данных по материалам для сваи будет использован позже при задании фаз расчета.

Таблица 3.1 – Свойства материалов слоев грунта

Параметр	Обозначение	Глинистый песок (коричне-вый)	Илистый песок	Глинистый песок (красный)	Глубоко залегающий песок	Свая	Единицы измерения
Модель материала	<i>Model</i>	Кулона – Мора	Кулона – Мора	Кулона – Мора	Кулона – Мора	Линейно-упругая	–
Поведение грунта	<i>Type</i>	Дренированный	Дренированный	Дренированный	Дренированный	Непористый	–
Вес в ненасыщенном водой состоянии	γ_{unsat}	16,7	18,8	19,8	17,6	24	кН/м ³
Вес в насыщенном водой состоянии	γ_{sat}	16,7	18,8	19,8	20,0	-	кН/м ³
Модуль Юнга	<i>E</i>	9150	13000	13500	19000	29,2* 10 ⁶	кПа
Коэффициент Пуассона	ν	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	–
Сцепление	<i>c</i>	13	12	14	17	-	кПа
Угол трения	φ	26	23	23	23	-	°
Угол дилатансии	ψ	0	0	0	0	-	°
Коэффициент снижения прочности в интерфейсе	R_{inter}	1	1	1	1	1	–

Построение двумерной сетки

При включении элемента типа сваи в геометрическую модель программа будет автоматически выполнять локальное измельчение сетки вокруг контура сваи. В нашем примере необходимо выполнить дополнительное локальное измельчение сетки. Для построения соответствующей сетки выполните следующее:

- Щелкните по кнопке *Generate 2D mesh (Построить 2 D сетку)*, в окне *Output (Вывод данных)* появится сетка. Проверьте сетку и щелкните по кнопке *<Update> (Обновить)* для возврата в программу *Input*.
- Вернувшись в программу *Input*, выберите кластер вокруг сваи, представляющий выемку. Выберите в меню *Mesh (Сетка)* опцию *Refine cluster (Измельчить кластер)*. Снова появится окно *Output (Вывод данных)* с измельченной сеткой вокруг сваи. Вернитесь в программу *Input (Ввод данных)* и еще раз выполните измельчение кластера выемки.

Построение трехмерной сетки

Построение трехмерной сетки не вызывает затруднений.

Щелкните по кнопке *Generate 3D mesh (Построить 3D сетку)*. В результате снова появится программа *Output (Вывод данных)*, но теперь уже с трехмерным изображением построенной сетки. Щелкните по кнопке *<Update> (Обновить)* для возврата к режиму ввода геометрической модели.

3.2 Задание фаз расчета

Зададим три фазы расчетов, включающие генерирование начальных условий, установку сваи и нагружение сваи. Фаза расчета, на которой задаются начальные условия, уже автоматически сгенерирована программой.

Для задания двух остальных фаз расчета выполните следующее.

Установка сваи

Щелкните по кнопке *Next phase (Следующая фаза)* для добавления новой фазы.

Появится окно *Phase list (Список фаз)*. Проверьте, установлен ли флажок во флаговой кнопке *Reset displacements to zero (Обнулить перемещения)* вкладки *Parameters (Параметры)*. Это необходимо для обнуления деформаций, полученных при расчете начальных напряжений.

Оставьте заданные по умолчанию (*Default*) настройки для итерационной процедуры (*Iterative procedure*).

Щелкните по кнопке <ОК> для закрытия окна.

Убедитесь в том, что в окне *Phase list (Список фаз)* задана фаза 1 (*Phase 1*).

В комбинированном окне *Active work-plane (Активная рабочая плоскость)* выберите рабочую плоскость с $y = 20,0$ м.

Щелкните по кластеру, представляющему сваю. При необходимости увеличьте масштаб изображения сваи для правильного задания кластера. Воспользуйтесь для этой цели кнопкой *Zoom in (Увеличить масштаб)* на панели инструментов. После задания кластера сваи появится диалоговое окно *Select items (Выбор опций)* с активными опциями *Soil above (Грунт выше)* и *Soil below (Грунт ниже)*.

Щелкните по флаговой кнопке *Soil above (Грунт выше)*, чтобы снять в ней галочку и отключить кластер грунта, находящийся выше активной рабочей плоскости.

Щелкните по флаговой кнопке *Soil below (Грунт ниже)*, а затем по кнопке *Change (Изменить)* для изменения набора данных по материалам для кластера сваи. В окне *Material sets (Набор данных по материалам)* задайте набор данных материалов свай и щелкните по кнопке <ОК>.

Совет. Вместо одного щелчка по опции *Soil above (Грунт выше)* или *Soil below (Грунт ниже)*, а затем по кнопке <Change> (<Изменить>), можно дважды щелкнуть по нужной опции *Soil above* или *Soil below*. В результате сразу же откроется окно *Material sets (Наборы данных по материалам)*.

Нажмите на кнопку <ОК> для закрытия окна *Select items (Выбор опций)*.

Щелкните по кластеру грунта, подлежащего выемке вокруг сваи. Для моделирования выемки отключите обе опции *Soil above (Грунт выше)* и *Soil below (Грунт ниже)*, убрав галочки.

Щелкните по кнопке <ОК> для возврата в программу *Input (Ввод данных)*.

Совет. Для проверки правильности задания фазы расчета щелкните по кнопке *Preview (Предварительный просмотр)*. В результате появится трехмерное изображение геометрической модели. Эта опция может быть использована, чтобы проверить, какие кластеры являются активными и какие свойства материалов были присвоены этим кластерам.

Теперь свойства материала сваи присвоены только той части сваи, которая находится между рабочей плоскостью $y = 20,0$ и первой находящейся под ней рабочей плоскостью с координатой $y = 19,4$ м. Для присвоения свойств оставшейся части сваи выполните следующее:

- Сделайте активной рабочую плоскость с координатой $y = 19,4$ м.
- Щелкните по кластеру сваи и выберите опцию *Soil below (Грунт ниже)*.

Щелкните по кнопке *Change (Изменить)* и присвойте свойства сваи также этому кластеру.

- Теперь закройте окно *Material sets (Наборы данных по материалам)* и окно *Select items (Выбор опций)* для возврата в программу *Input (Ввод данных)*.

Нагружение сваи

Мы задали первую фазу расчета. Для задания второй фазы расчета выполните следующее:

- Щелкните по кнопке *Next phase (Следующая фаза)* для добавления новой фазы. Убедитесь в том, что во флаговой кнопке *Reset displacements to zero (Обнулить перемещения)* вкладки *Parameters (Параметры)* галочка **снята**. В групповом блоке *Iterative procedure (Итерационная процедура)* отмените выбор опции *Default (Значение по умолчанию)*, а в поле *Tolerated error (Допустимая погрешность)* поменяйте значение на 0,0005, т.е. на величину, которая в двадцать раз меньше значения по умолчанию. Закройте окно.

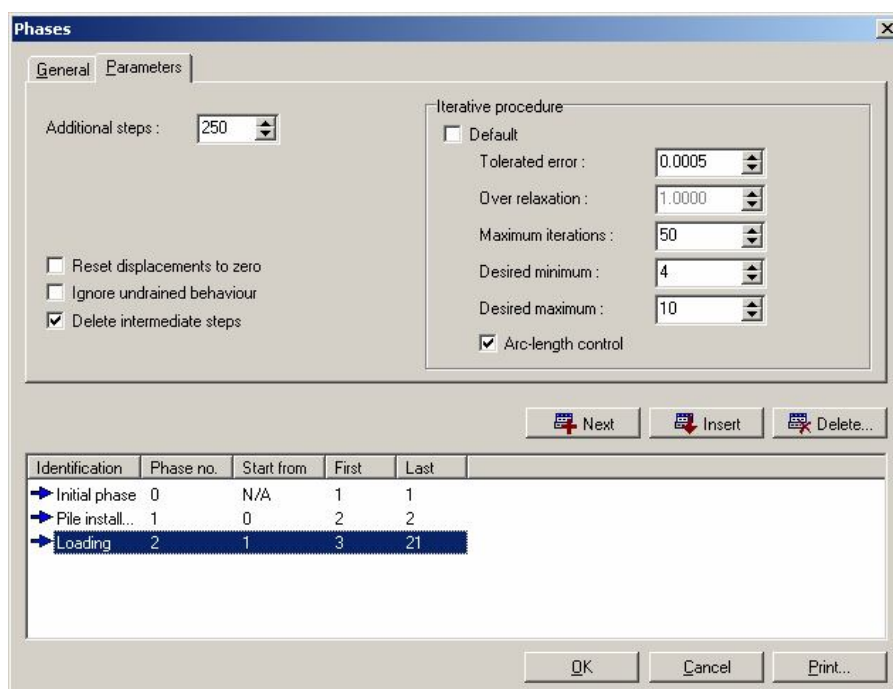


Рисунок 3.5 – Окно с параметрами итерационной процедуры (*Iterative procedure*)

- Выберите в качестве активной плоскости рабочую плоскость с координатой $y = 20,0$.
- Щелкните дважды по сосредоточенной нагрузке в центре сваи для ее активации. Откроется окно, позволяющее изменять направление действия силы

и ее величину. Введите силу величиной – 800 кН, действующую по оси y .

- Щелкните по кнопке <OK> для закрытия этого окна и возврата к программе *Input (Ввод данных)*.

На этом задание фаз расчета завершается. Перед запуском расчета выберите узловую точку на голове сваи для последующего построения кривой зависимости перемещений от нагрузки.

- Щелкните по кнопке *Select points for curves (Выбрать точки для кривой)* для открытия программы *Output (Вывод данных)*. Программа выведет все узлы, присутствующие в геометрической модели. Выберите узел на голове сваи в точке (0; 0) на рабочей плоскости с координатой $y = 20,0$ м. Возможно понадобится увеличение масштаба области вокруг сваи для правильного выбора точки.

- Закройте программу *Output (Вывод данных)* для возврата в программу *Input (Ввод данных)*.

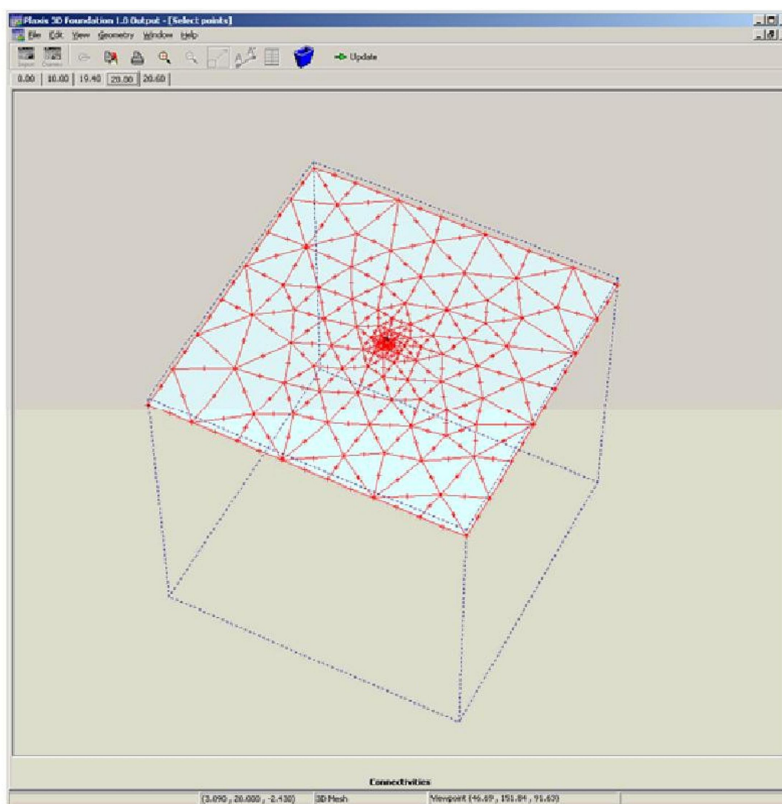


Рисунок 3.6 – Выбор точки на свае для построения кривых

3.3 Расчет

Теперь после задания геометрической модели и фаз расчета можно начинать вычисления.

Нажмите на кнопку *Calculate (Расчет)* для запуска расчета.

С этого момента должен начаться процесс вычислений. Программа начинает расчет с первой помеченной фазы, которая в нашем случае является начальной (*Initial phase*).

3.4 Просмотр полученных результатов

После выполнения расчетов для просмотра результатов испытаний нагрузкой выберите в списке фазу расчета и нажмите на кнопку <Output> (<Вывод данных>), которая появляется вместо кнопки *Calculate (Расчет)* при успешном завершении выбранной фазы расчета.

Задайте конечную фазу расчета и щелкните по кнопке *Output*. Откроется окно программы *Output (Вывод данных)*, в котором будет показана деформированная сетка, полученная в конце испытания нагрузкой. Для просмотра напряжений и деформаций в рабочих плоскостях щелкните по соответствующей вкладке и выберите в меню требуемые выходные данные. Например, для просмотра напряжений, возникающих вокруг конца сваи, выберите рабочую плоскость с $y = 10,0$.

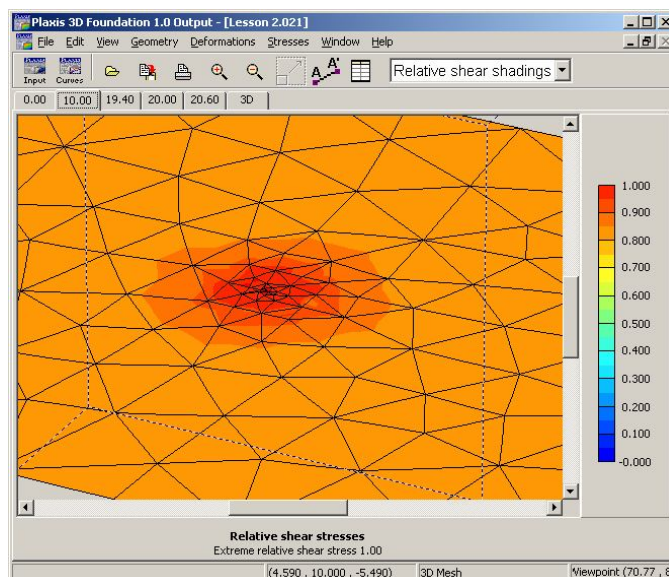


Рисунок 3.7 – Напряжения, возникающие вокруг конца сваи
в рабочей плоскости с $y = 10,0$

Для оценки напряжений и деформаций, возникающих внутри геометрической модели, выберите опцию *Cross section* (Поперечный разрез). Программа представит вид сверху геометрической модели. Нарисуйте линию, проходящую через всю геометрическую модель. На экране появится вертикальный поперечный разрез. Этот разрез можно поворачивать таким же образом, как и трехмерное изображение геометрической модели. В случае испытания нагрузкой наибольший интерес представляет поперечный разрез, проходящий через сваю. Нарисуйте поперечный разрез, проходящий через начало координат и выберите в меню *Deformations* (Деформации) опцию *Vertical displacements* (Вертикальные перемещения).

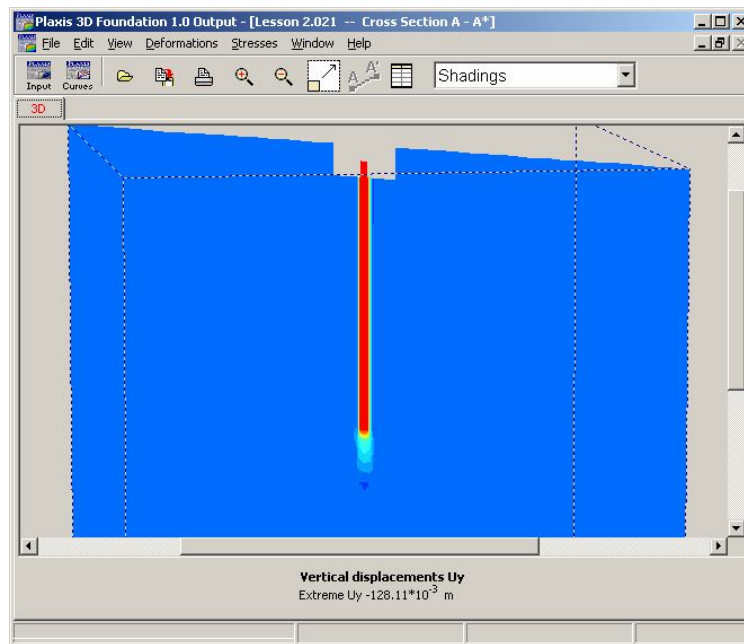


Рисунок 3.8 – Поперечный разрез вертикальных перемещений

Для случая испытания сваи нагрузкой в программе *Curves* (*Кривые*) может быть построена кривая зависимости перемещения сваи от нагрузки. Для этого выполните следующее:

- Запустите программу *Curves* (*Кривые*), щелкнув по соответствующей кнопке в верхнем левом углу панели инструментов.
- Щелкните по кнопке <OK> для создания новой диаграммы.
- Выберите проект нагружения сваи и нажмите на кнопку <Open> (<Открыть>).
- В групповом блоке X-Axis (*Ось X*) окна *Curve generation* (*Построение кривой*) выберите опцию *Multiplier* (*Коэффициент*), а в комбинированном окне *Type* (*Тип*) – параметр *Sum-Mstage*.
- В групповом блоке Y-Axis (*Ось Y*) выберите опцию *Displacement* (*Перемещение*) и задайте в поле *Type* (*Тип*) вертикальное перемещение u_y . Проверьте, чтобы в комбинированном окне *Point* (*Точка*) была задана точка, расположенная на голове сваи. Это должна быть точка A с координатами (0,00 / 20,00 / 0,00).
- Щелкните по кнопке <OK> для построения графика.

На экране появится график зависимости вертикальных перемещений от

параметра Σ -Mstage. Σ -Mstage – это параметр, указывающий, какая часть нагрузки уже обчислена на текущей фазе расчета. Эта величина возрастает от 0 в начале фазы до 1 в конце при успешном завершении расчета. На последней фазе значение параметра Σ -Mstage соответствует величине фактически активированной части сосредоточенной нагрузки, равной 800 кН. Для построения кривой зависимости перемещений от нагрузки выполните следующее:

- Щелкните правой кнопкой мыши по графику и выберите в «всплывающем» меню опцию *Format (Формат)*. Выберите в появившемся подменю опцию *Curve (Кривая)*. Вместо этого можно выбрать опцию *Curve (Кривая)* в меню *Format (Формат)*.
- Щелкните по кнопке *Phases (Фазы)* в верхнем правом углу окна *Curves settings (Параметры кривых)* для вызова окна *Select phases (Выбрать фазы)*.
- В окне *Select phases* уберите галочку из опций *Initial Phase (Начальная фаза)* и *<Phase1> (Фаза 1)*. Щелкните по кнопке *<OK>* для закрытия этого окна и еще раз по кнопке *<OK>* для обновления графика.

Теперь на графике будет показано только перемещение, полученное в результате нагружения свай. На графике значение параметра Σ -Mstage = 1 соответствует нагрузке 800 кН.

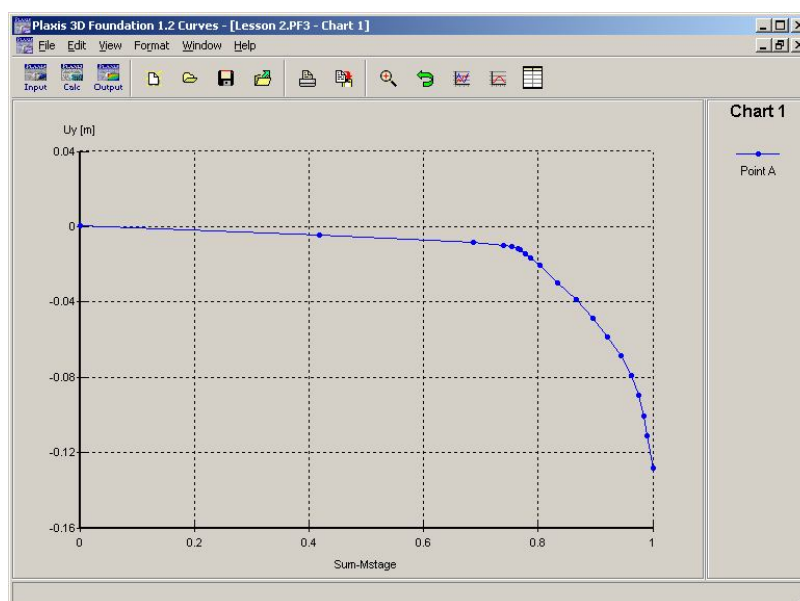


Рисунок 3.9 – Кривая зависимости перемещения от нагрузки

4 СТРОИТЕЛЬСТВО КОТЛОВАНА

В этом уроке рассматривается строительство котлована в слоях пластичной глины и торфа. Строительство котлована было выполнено в рамках научно-исследовательской программы по изучению поведения шпунтовых стенок в слабом грунте, описанной подробно в работе Корта (2002). Здесь мы рассмотрим эту задачу в весьма упрощенном виде. Опытный котлован – это относительно небольшой котлован размером 12 м на 14 м и глубиной 7,5 м. После окончательной выемки грунта к одной из сторон котлована прикладывается дополнительная поверхностная нагрузка.

Несмотря на то, что стенки данного опытного котлована содержали шпунтовые сваи различного типа, здесь мы будем моделировать только один тип шпунтовых свай. Кроме того, рассматривается только первый этап выемки и нагружения при испытании котлована.

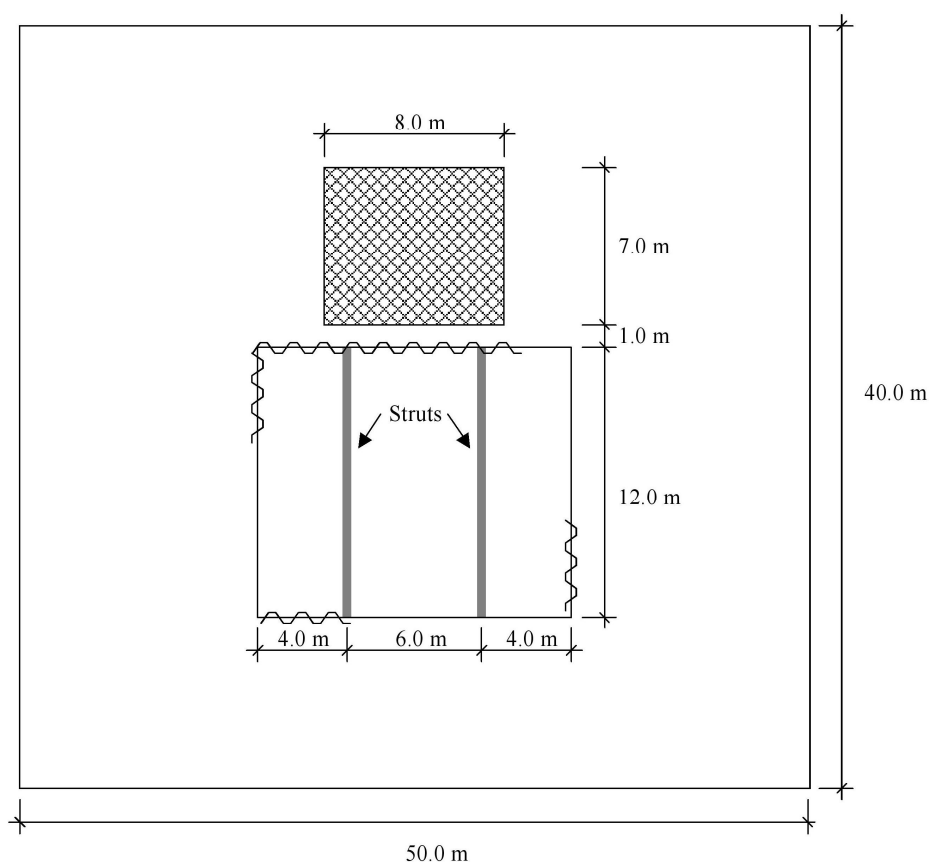


Рисунок 4.1 – Геометрическая модель котлована

4.1 Ввод данных

Предложенная для этого примера геометрическая модель имеет ширину 50 м и длину 40 м, как показано на рисунке 4.1. Котлован шириной 12 м и длиной 14 м расположен в центре геометрической модели. Рядом с котлованом нужно создать дополнительный кластер для поверхностной нагрузки.

После ввода общих настроек для этой задачи добавьте рабочую плоскость с $y = -19,0$ м. Также поменяйте уровень второй рабочей плоскости на $y = 0,5$ м.

В рабочей плоскости $y = 0,5$ м добавьте к геометрической модели шпунтовые стенки, используя одну цепочку стенок. После этого добавьте рабочие плоскости на уровнях $y = -0,5$ м; $y = -5,0$ м и $y = -7,0$ м. Убедитесь в том, что шпунтовые стенки находятся между уровнями $y = 0,5$ м и $y = -19,0$ м.

Добавьте к геометрической модели балку на плоскости $y = 0,5$ м с помощью опции *Beam* (Балка), находящейся на панели инструментов. Щелкните по точке (22,0; 14,0) для задания начала балки. Щелкните по точке (22,0; 26,0) для добавления второй точки. Щелкните правой кнопкой мыши для завершения рисования балки.

Также добавьте балку между точками (28,0; 14,0) и (28,0; 26,0). Эти балки представляют собой распорки между шпунтовыми стенками.

В рабочей плоскости $y = -0,5$ м добавьте к геометрической модели кластер с угловыми точками (21,0; 6,0), (21,0; 13,0), (29,0; 13,0) и (29,0; 6,0).

Выберите на панели инструментов распределенную нагрузку (в горизонтальных плоскостях) и добавьте нагрузку к только что добавленному кластеру.

Свойства материалов

Так как в этом примере все слои грунта являются горизонтальными, то нужна только одна геологическая колонка. Добавьте геологическую колонку к геометрической модели и вставьте 4 дополнительных границы слоя. Отметки

границ слоя даны в таблице 4.1. Задайте для уровня грунтовых вод значение $y = -2$ м и откройте окно свойств материала.

Добавьте пять наборов данных из таблицы 4.1 и присвойте их соответствующим слоям грунта.

Установите флажок во флаговой кнопке *Hydrostatic* (Гидростатическое давление) и измените на границе 5 значение давления воды в колонках *WPress+* и *WPress-* соответственно на -160 кПа и -160 кПа.

Аналогичным образом, измените значение давления воды на нижней границе 6 на -310 кПа.

Закройте окно *Borehole* (Геологическая колонка) и вернитесь в основную область рисования.

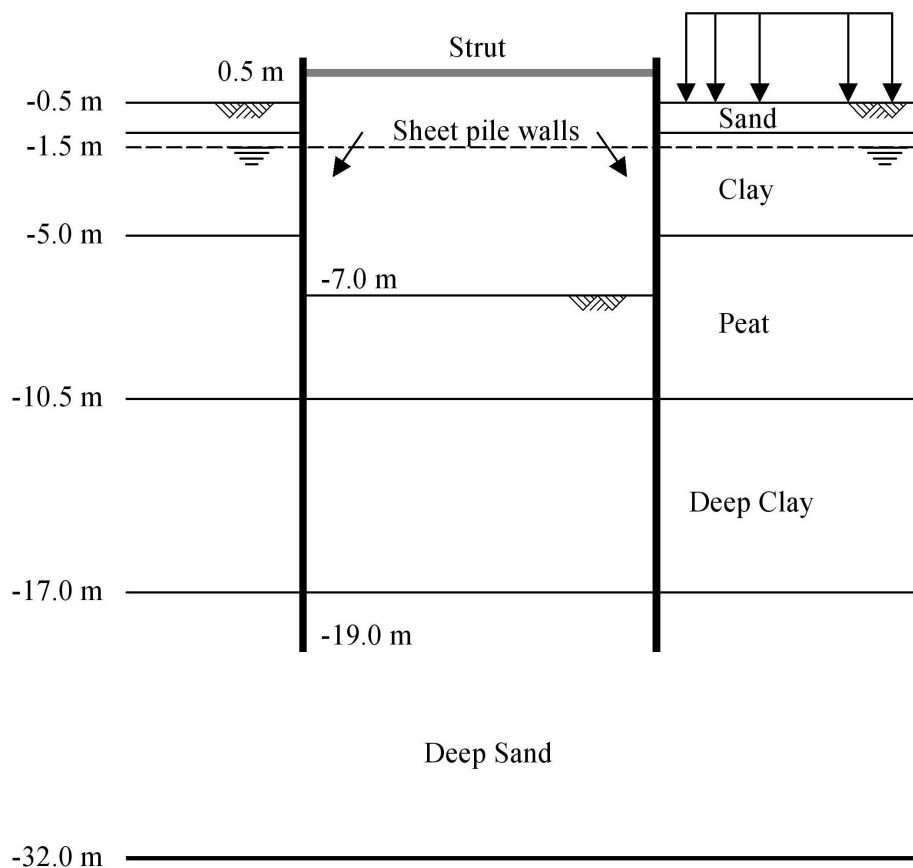


Рисунок 4.2 – Геологическая колонка со слоями грунта

Таблица 4.1 – Свойства материалов для слоев грунта

Параметр	Обозначение	Глинистый песок (коричневый)	Илистый песок	Глинистый песок (красный)	Глубокозалегающий песок	Свая	Единицы измерения
1	2	3	4	5	6	7	8
Верхний слой		– 0,5	– 1,5	– 5,0	– 10,5	– 17,0	м
Модель материала	<i>Model</i>	Кулона – Мора	Кулона – Мора	Кулона – Мора	Кулона – Мора	Кулона – Мора	–
Тип поведения материала	<i>Type</i>	Дрениро- ванный	Дрениро- ванный	Дрениро- ванный	Дрениро- ванный	Дрениро- ванный	–
Вес грунта выше уровня грунтовых вод	γ_{unsat}	16	17	8	15	17	кН/м ³
Вес грунта ниже уровня грунтовых вод	γ_{sat}	20	18	10,5	16	20	кН/м ³
Модуль Юнга	E_{ref}	$1.6 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^4$	кН/м ²
Кэф- фициент Пуассона	ν	0,3	0,35	0,35	0,35	0,3	–
Сцепление	c_{ref}	1	10	10	10	0,1	кПа
Угол трения	φ	32	30	25	30	34	°
Угол дилатансии	ψ	2	0	0	0	4	°
Кэф- фициент снижения прочности в интерфейсе	R_{inter}	1	1	1	1	1	–

Аналогичным образом создайте наборы данных по материалам для шпунтовых стенок и распорок и присвойте их конструктивным элементам. Проследите за тем, чтобы набор данных по материалам для стенок был присвоен элементам стенок на каждой из четырех рабочих плоскостей между уровнями $y = 0,5$ и $y = -19,0$ м.

При создании набора данных по материалам для шпунтовых стенок геометрическая ортотропия шпунтовых свай и распорок преобразуется в ортотропные модули Юнга и модули сдвига в наборах данных по материалам шпунтовых стенок. Используя равенство $E_I = 12 E_{steel} I_I/d^3$, момент инерции шпунтовой стенки, предоставленный изготовителем, может быть присвоен к характерному модулю Юнга. Аналогичные равенства выполняются и для других направлений. Более подробная информация и пример для шпунтовой стенки содержатся в *Пособии по моделям материалов*, глава 4.

Таблица 4.2 – Свойства материалов для шпунтовых стенок

Параметр	Обозначение	Шпунтовая стенка	Единицы измерения
Модель материала	<i>Model</i>	Линейная	–
Толщина	<i>d</i>	0,14	м
Объемный вес	γ	7,85	кН/м ³
Модуль Юнга	E_I	$1,8 \cdot 10^8$	кН/м ²
	E_2	$1,8 \cdot 10^7$	кН/м ²
	E_3	$2,1 \cdot 10^8$	кН/м ²
Модуль сдвига	G_I	$2 \cdot 10^7$	кН/м ²
	G_2	$1 \cdot 10^7$	кН/м ²
	G_3	$3 \cdot 10^7$	кН/м ²
Коэффициент Пуассона	ν_{ii}	0	–

Таблица 4.3 – Свойства материалов для распорок

Параметр	Обозначение	Распорка	Единицы измерения
Модель материала	<i>Model</i>	Линейная	—
Площадь полперечного сечения	<i>A</i>	0,027	м ²
Объемный вес	γ	78,5	кН/м ³
Модуль Юнга	<i>E</i>	2,1*10 ⁸	кН/м ²
Момент инерции	<i>I₂</i>	1,37*10 ⁻³	м ⁴
	<i>I₃</i>	1,31*10 ⁻⁴	м ⁴
	<i>I₂₃</i>	0	м ⁴
Коэффициент Пуассона	ν	0,1	—

The image shows a 'Beam Properties' dialog box. It has a 'Material set' field with 'Strut' entered. Below it is a 'Comments' text area. The 'Properties' section contains several input fields: 'A' (0.027 m²), 'γ' (78.500 kN/m³), 'E' (2.100E+08 kN/m²), 'I₂' (1.370E-03 m⁴), 'I₃' (1.310E-04 m⁴), 'I₂₃' (0.000 m⁴), and 'ν' (0.100). There are two radio buttons: 'Linear' (selected) and 'Non linear'. At the bottom are 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons.

Рисунок 4.3 – Набор данных по материалам для распорок

Построение сетки

В этом примере мы воспользуемся сеткой средней крупности с дальнейшим измельчением кластеров выемки грунта.

Для построения этой сетки выполните следующее:

- Выберите в меню *Mesh (Сетка)* опцию *Refine global (Глобальное измельчение)*. После глобального измельчения сетки откроется программа *Output* для вывода полученных результатов. Щелкните по кнопке <Update> (<Обновить>) для возврата в основную область рисования и выберите три кластера котлована и один кластер зоны нагрузки. Удерживайте нажатой клавишу <Shift> при выборе нескольких кластеров. Выберите в меню *Mesh (Сетка)* опцию *Refine cluster (Измельчение кластера)*. После этого в программе *Output (Вывод данных)* будет показана сгенерированная сетка.

- Вернитесь в основную область рисования для построения трехмерной сетки. Щелкните по кнопке <Update> (<Обновить>) для возврата в основную область рисования.

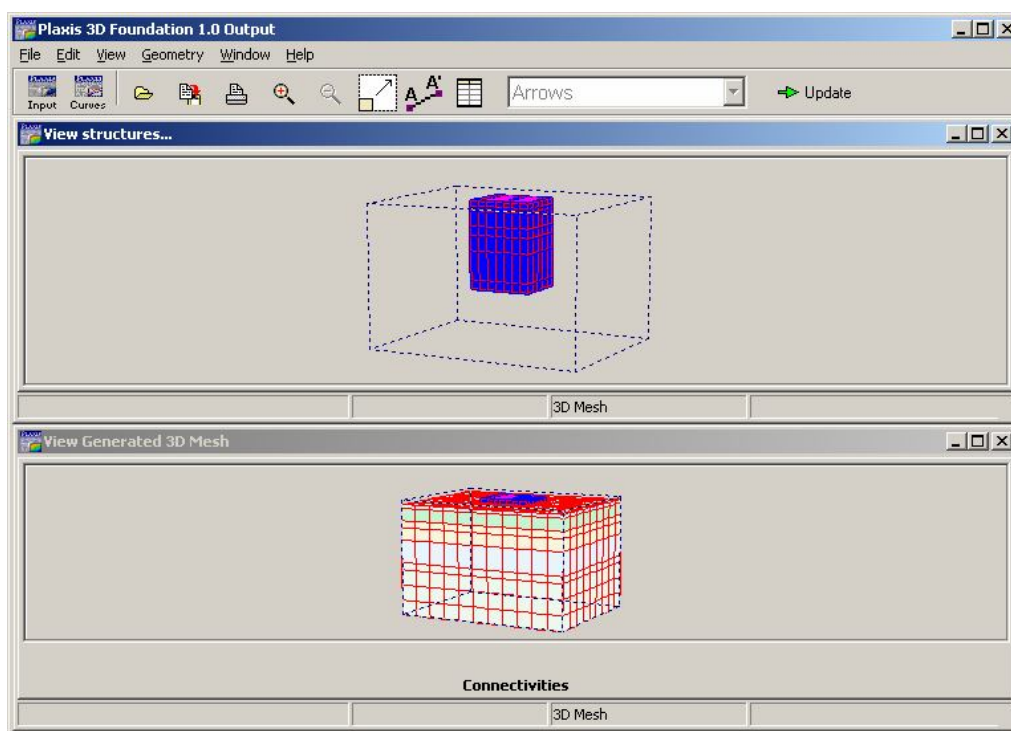


Рисунок 4.4 – Предварительный просмотр сгенерированной трехмерной сетки

4.2 Расчеты

Расчет состоит из 4 фаз. Начальную фазу можно оставить заданной по умолчанию. Вторая и третья фазы включают в себя установку шпунтовых свай и последующее устройство котлована. Конечная фаза представляет собой этап приложения дополнительной нагрузки рядом с котлованом :

- Добавьте новую фазу и активируйте на ней все стенки и балки. Проследите за тем, чтобы стенки были активированы во всех четырех рабочих плоскостях между $y = 0,5$ и $y = -19,0$ м. Это будет моделировать установку шпунтовых свай и распорок.
- Добавьте следующую фазу и деактивируйте три кластера грунта внутри котлована между уровнями $y = -0,5$ и $y = -7,0$. Это будет моделировать строительство котлована.
- Добавьте четвертую фазу расчета и активируйте поверхностную нагрузку на уровне $y = -0,5$. Задайте нагрузку, равную -100 кПа и действующую вниз по оси y .
- Запустите процесс расчета.

4.3 Вывод данных

Деформации и изгибающие моменты в шпунтовой стенке, полученные на конечной фазе расчета, могут быть просмотрены, если открыть программу *Output (Вывод данных)* сперва для конечной фазы:

- Выберите конечную (четвертую) фазу и щелкните по кнопке <Output> (<Вывод данных>) для открытия этой фазы в программе *Output*.
- Выберите стенки и откройте их по отдельности. Перейдите к опции затенения деформаций (*Shadings*), а затем выведите на экран затененные изгибающие моменты.

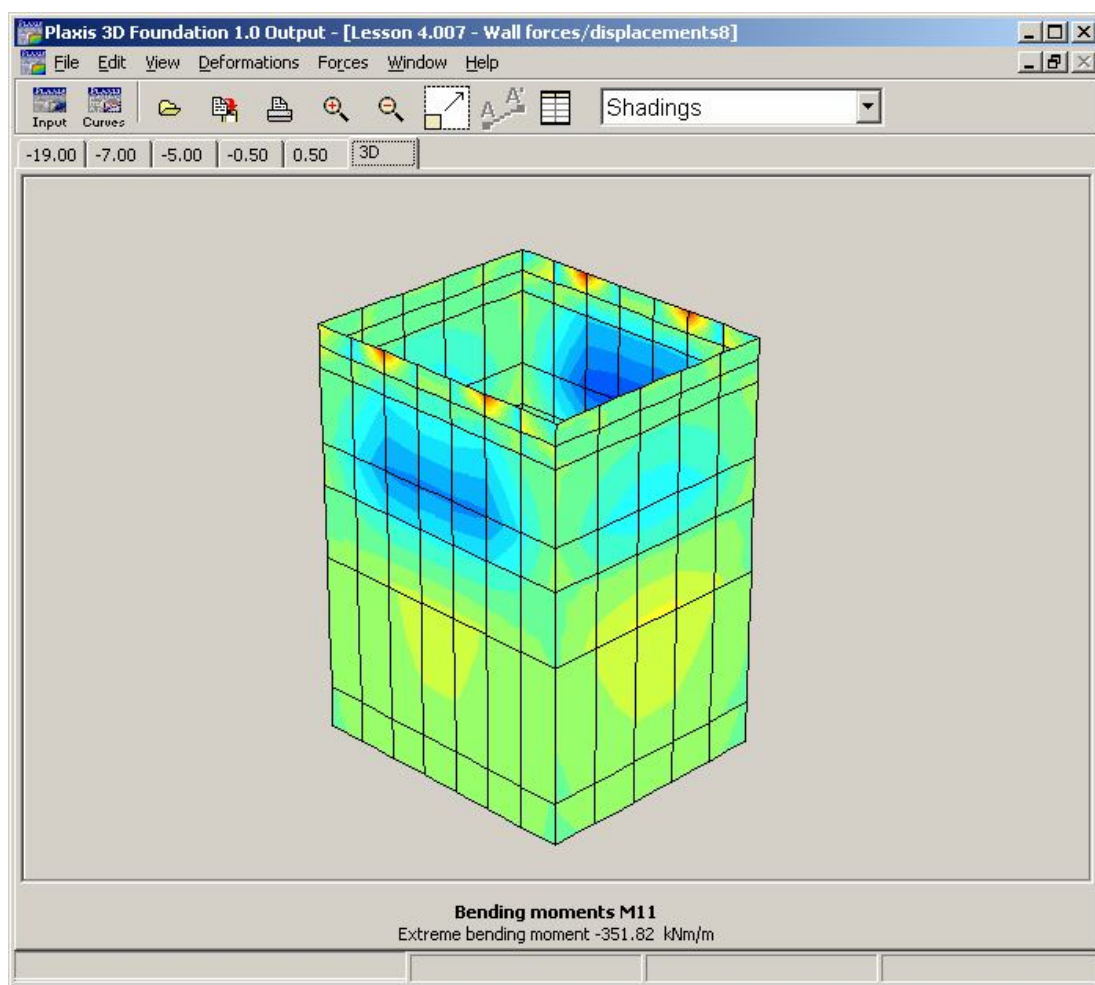


Рисунок 4.5 – Изгибающие моменты в шпунтовой стенке в конце последней фазы расчета

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ИСТОЧНИКОВ

1. ДБН А.2.1-1-2014 Інженерні вишукування для будівництва / Мінрегіонбуд України. – Київ : 2014. – 126 с.
2. ДСТУ Б В. 2.1-2-36. Ґрунти. Класифікація. Київ : Укрархбудінформ. 1997. – 20 с.
3. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. – Київ : Мінрегіонбуд України. 2009. – 104 с.
4. Зміна № 1 до ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. – Київ : Мінрегіонбуд України. 2011. – 55 с.
5. ДСТУ Б В.2.1-1-95. Ґрунти. Методи польових випробувань палями. Київ : Укрархбудінформ, 1997. – 58 с.
6. ДСТУ Б В.2.1-27:2010. Палі. Визначення несучої здатності за результатами польових випробувань. – Київ : Мінрегіонбуд України. 2011. – 11 с.
7. Примеры расчета оснований и фундаментов / М. В. Берлинов, Б. А. Ягунов. – Москва : Стройиздат. 1986. – 173 с.
8. Фундаменти будівель і споруд / Ю. Л. Винников та ін. / – Київ : Урожай. 2002. – 432 с.
9. Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти : підручник / В. Б. Швець, І. П. Бойко, Ю. Л. Винников та ін. – Дніпропетровськ : «Пороги». 2012. – 196 с. : іл.
10. Механика грунтов, основания и фундамента. Учебное пособие для строит. спец. вузов / С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский и др. / Под ред. С. Б. Ухова. – 3-е издание, испр. – Москва : Высш. шк. 2004. – 566 с.
11. Тер-Мартirosян З. Г. Механика грунтов / З. Г. Тер-Мартirosян / – Изд. АСВ. Москва : 2005. – 488 с.
12. Основания, фундамент и подземные сооружения: Справочник проектировщика / М. И. Горбунов-Посадов, В. А. Ильичев, В. И. Крутов и др. / Под общ. ред. Е. А. Сорочана, Ю. Г. Трофименкова. – Москва : Стройиздат. 1985. – 480 с.
13. Гидротехнические сооружения / Л. Н. Рассказов, В. Г. Орлов и др. / ч. 1, ч. 2. – Москва : Стройиздат, 1996. – 128 с.
14. Основания, фундаменты и подземные сооружения / Под ред. Е. А. Сорочана / Справочник проектировщика. – Москва : 1985. – 325 с.
15. Самарин И. К. Расчет оснований гидротехнических сооружений / И. К. Самарин / Москва : 1971. – 188 с.
16. . Лучковский И. Я Взаємодія конструкцій з основою / І. Я. Лучковский / Бібліотека ІТЕ. Том 3. – Харків : ХДАМГ. 2000. – 264 с.
17. PLAXIS 3D Foundation. Учебное пособие . Версия 1. – 74 с.
18. M. das Neves et al. (2001) Étude du comportement de pieux forés. Bulletin des Laboratoires de Ponts et Chaussées (231), pp. 39 – 54 & 55 – 67

Виробничо-практичне видання

Методичні рекомендації

до виконання практичних та самостійних робіт
з дисципліни

**«БУДІВНИЦТВО У СКЛАДНИХ
ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ**

(спецкурс)»

*(для магістрів усіх форм навчання
за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія)*

(Рос. мовою)

Укладач **ТАБАЧНИКОВ** Сергій Володимирович

Відповідальний за випуск *О. В. Кічаєва*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2017, поз. 9 М

Підп. до друку 15.06.2017. Формат 60×84/16
Друк на ризографі Ум. друк. арк. 2,4
Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: rektorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК 5328 від 11.04.2017.