

Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра механики грунтов и геотехники

ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ И КОНСТРУКЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО И ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Методические указания к практическим занятиям
по дисциплине «Подземные сооружения и конструкции промышленного
и гражданского назначения» для студентов специалитета
всех форм обучения направления подготовки
08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений*

© НИУ МГСУ, 2015

Москва 2015

УДК 624.1
ББК 38.78
П44

С о с т а в и т е л и :

Д.В. Устинов С.А. Казаченко

П44 **Подземные** сооружения и конструкции промышленного и гражданского назначения [Электронный ресурс] : методические указания к практическим занятиям по "Подземные сооружения и конструкции промышленного и гражданского назначения» для студентов специалитета всех форм обучения направления подготовки 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений / М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т, каф. механики грунтов и геотехники ; сост.: Д.В. Устинов, С.А. Казаченко — Электрон. дан. и прогр. (1,73 Мб). — Москва : НИУ МГСУ, 2015. — Учебное сетевое электронное издание — Режим доступа: http://lib.mgsu.ru/Scripts/irbis64r_91/cgiirbis_64.exe?C21COM=F&I21DBN=IBIS&P21DBN=IBIS — Загл. с титул. экрана.

Включает примеры расчета подземных сооружений и конструкций промышленного и гражданского назначения совместно с вмещающим массивом, примеры оценки влияния на прилегающие сооружения при возведении подземных сооружений в соответствии с требованиями СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений».

Для студентов специалитета всех форм обучения направления подготовки 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений.

Учебное сетевое электронное издание

© НИУ МГСУ, 2015

Отв. за выпуск — кафедра механики грунтов и геотехники

Подписано к использованию 03.09.2015 г. Уч.-изд. л 1,71. Объем данных 1,73 Мб

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет» (НИУ МГСУ).
129337, Москва, Ярославское ш., 26.
Издательство МИСИ – МГСУ.
Тел. (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75, (499) 183-97-95.
E-mail: ric@mgsu.ru, rio@mgsu.ru

Содержание

Введение.....	4
1. Подготовительный этап.....	5
1.1 Выбор конструктивно-технологической схемы.....	5
1.2 Выбор расчетной области.....	5
1.3 описание применяемых материалов и моделей.....	6
2. Пример выполнения расчетной части курсового проекта с использованием программного комплекса Z_Soil v.6.....	11
3. Особенности выполнения расчетной части курсового проекта с использованием программного комплекса Z_Soil v.7-v.13.....	21
Библиографический список.....	37
Приложение 1.....	38
Приложение 2.....	40

Введение

При выполнении курсовой работы студент может воспользоваться имеющейся в кафедральном вычислительном классе лицензионной программой Z_Soil версий 6, 7 или скачать с сайта разработчика находящуюся в свободном доступе студенческую версию программы Z_Soil (<http://student.zsoil.com/>).

Целью выполнения курсовой работы является обучение навыкам проектирования и расчета подземных сооружений, а также методам оценки влияния, оказываемого возведением сооружения, с учетом выбранной технологии и строением вмещающего массива.

Компьютерная программа Z_SOIL.PC, основанная на методе конечных элементов и разрабатываемая с 1982 года фирмой ZACE Services Ltd. в г. Лозанне (Швейцария), является результатом длительного тесного творческого сотрудничества Швейцарского федерального технологического института, Краковского технологического университета, Калифорнийского технологического института и частных проектных и исследовательских фирм, работающих в области геотехнического строительства. Этот программный продукт является постоянно обновляющимся инженерным продуктом, направленным на решение большинства геотехнических задач. Он позволяет учитывать свойства грунтов и конструкционных материалов, последовательность возведения сооружений, решать гидростатические и реологические задачи и т.д. с реализацией расчета на персональных ЭВМ.

Исходные данные для проектирования, объем и состав курсовой работы

Курсовая работа выполняется по индивидуальному заданию. Она включает компьютерное моделирование подземной части сооружения совместно с вмещающим массивом.

Результаты оформляются в виде расчетно-пояснительной записки (25-30 с. формата А4).

В записке приводятся текстовый материал и рисунки, включающие:

- исходные данные для проектирования;
- описание выбранного технологического решения и его обоснование;
- краткое описание применяемой методики и используемой модели;
- полученные результаты в графическом виде с их анализом и вывод, включающий оценку принятого технологического решения на основании сравнения полученных величин с нормативными.

Записка должна иметь правильно оформленный титульный лист и содержать список использованной студентом нормативно-технической литературы (СП, учебники, статьи и т.д.).

Выполнение курсовой работы можно разделить на несколько этапов.

1. Подготовительный этап

Описание возводимого сооружения

В качестве примера рассмотрим возведение условного сооружения (25x50 м, шаг колонн – 5 метров), имеющего 2 подземных (высотой 2,5 м) и 14 надземных этажей, возводимого в черте го-

родской застройки на расстоянии 10 метров от существующего 10-этажного жилого дома, относящегося ко II категории состояния. Решение рассматривается в разделе 2.

1.1. ВЫБОР КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Исходя из того, что глубина котлована составляет 7,2 метра (с учетом толщин перекрытий и фундаментной плиты) и грунтовые воды отсутствуют, принимаем в качестве временных ограждающих конструкций ограждение из труб $\varnothing 325 \times 10$ с шагом 1 метр. Отрывку котлована проведем в два этапа с установкой одного яруса распорных конструкций из труб $\varnothing 426 \times 10$ с шагом 5 метров. Первый ярус котлована отрывается до отметки -3,2 метра, распорка устраивается на отметке -2,7 метра.

1.2. ВЫБОР РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Приступая к выполнению курсовой работы, необходимо ознакомиться со всеми разделами исходных данных, приведенных в задании, и проанализировать прилагаемые описание возводимого сооружения и инженерно-геологические условия.

Выбор расчетной области производится из условия отсутствия перемещений на границе. Для предварительной оценки величины возможной зоны влияния воспользуемся рекомендациями п. 9.36 СП 22.13330.2011.

В соответствии с рекомендациями СП 22.13330.2011 ориентировочные значения радиуса зоны влияния $r_{зв}$ в зависимости от метода крепления котлована и его глубины принимаются:

- $5H_k$ при использовании для ограждения "стены в грунте" и креплением анкерными конструкциями;
- $4H_k$ при ограждении завинчивающимися сваями с распорками;
- $3H_k$ при использовании "стены в грунте" с креплением распорками;
- $2H_k$ при использовании "стены в грунте" под защитой верхнего перекрытия.

Исходя из возможности изменения предварительно выбранного технологического решения, принимаем максимальную величину зоны влияния, равную $5H_k$.

Боковую границу расчетной области относим от сооружения на $5H_k$, что с учетом толщины перекрытий и фундаментной плиты составит

$$r_{зв} = ((2,5 + 0,2) \cdot 2 + 0,8) \cdot 5 = 31 \text{ м.}$$

Для определения величины расчетной зоны ниже залегания фундаментной плиты воспользуемся рекомендациями СП 22.13330.2011.

Определение мощности сжимаемой толщи под подошвой плитного фундамента производится согласно прил. Г СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» по схеме линейно-деформируемого слоя. Толщина линейно-деформируемого слоя принимается до кровли грунта с модулем деформации $E \geq 10 \text{ МПа}$ (100 кгс/см^2) и вычисляется по формуле:

$$H = (H_0 + \psi b) \cdot k_p, \quad (1.1)$$

где H_0 и ψ принимаются, соответственно, равными для оснований, сложенных: пылевато-глинистыми грунтами – 9 м и 0,15; песчаными грунтами – 6 м и 0,1;

k_p – коэффициент, равный 0,85 при среднем давлении под подошвой фундамента $p = 150$ кПа (1 кгс/см²); 1,2 при $p = 500$ кПа (5 кгс/см²), а при промежуточных значениях – по интерполяции.

Если основание сложено пылевато-глинистыми и песчаными грунтами, значение H определяется по формуле

$$H = H_s + h_{cl}/3, (1.2)$$

где H_s – толщина слоя, вычисленная по формуле (1.1) в предположении, что основание сложено только песчаными грунтами;

h_{cl} – суммарная толщина слоев пылевато-глинистых грунтов в пределах от подошвы фундамента до глубины, равной h_{cl} – значению H , вычисленному по формуле (1.1) в предположении, что основание сложено только пылевато-глинистыми грунтами.

Значение H , вычисленное по формулам, должно быть увеличено на толщину слоя грунта с модулем деформации $E < 10$ МПа (100 кгс/см²), если этот слой расположен ниже H и толщина его не превышает $0,2H$. При большей толщине слоя такого грунта, а также если вышележащие слои имеют модуль деформации $E < 10$ МПа (100 кгс/см²), расчет деформаций основания выполняется по расчетной схеме линейно деформируемого полупространства.

При давлении под подошвой фундамента $p = (14 + 2) \cdot 1500$ кгс/м² = 2,4 кгс/см².

$$H = (6 + 0,1 \cdot 50) \cdot 0,94 = 10,34 \text{ м};$$

$$H = 10,34 + 8,3/3 = 13,11 \text{ м}.$$

Таким образом, принимаем нижнюю границу расчетной области, выходящую за величину сжимаемой толщи, равной 13,5 метра.

1.3. ОПИСАНИЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МОДЕЛЕЙ

Ввод параметров используемых в проекте материалов осуществляется в диалоговом окне *Materials* (Материалы) (рис. 1).

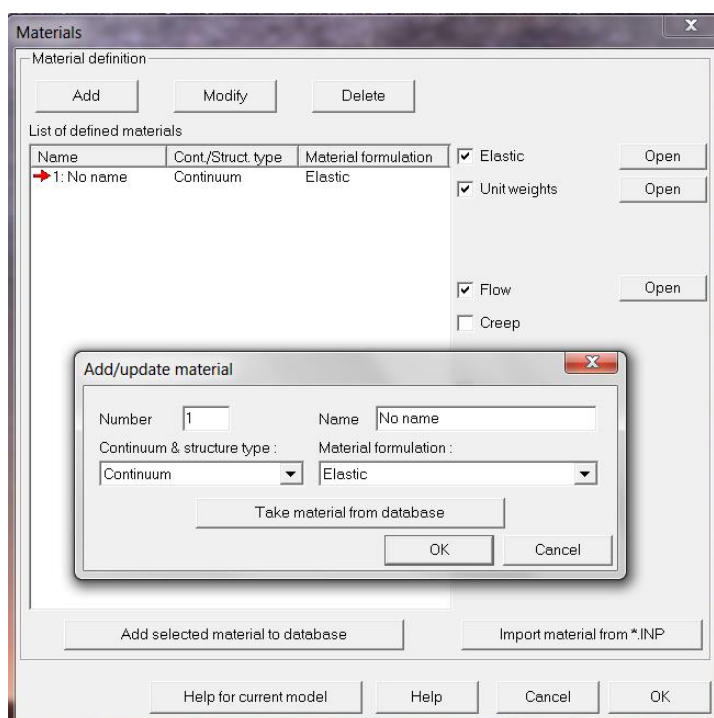


Рис. 1. Окно создания и изменения свойств материалов.

Верхняя часть окна *Materials* предназначена для добавления новых и изменения существующих материалов. Возможно выполнение следующих функций:

Add material - «Добавить материал» – добавляет новый материал в список

Modify - «Изменить» – изменяет свойства материала, включая возможность изменить тип материала и выбрать соответствующую модель

- *Continuum & Structure type* - Определяется тип материала. Задается сплошной материал, элементы конструкций, такие как балки, мембраны, контакты и др.
- *Material formulation* - Выбор модели материала для принятого типа элементов

Delete - «Удалить» – удаляет выбранный материал (помечен красной стрелкой)

Правая часть окна дает возможность назначать различные характеристики у выбранного материала. Список меняется в зависимости от типа материала и выбранной модели. В частности, для сплошных элементов (*Continuum*) доступен упругий расчет и расчет по критериям Друкера-Прагера и Мора-Кулона. Необходимые параметры материалов для них представлены ниже.

Упругая модель (*Elastic*)

- упругие характеристики (модуль деформации E [кН/м²], коэффициент Пуассона ν);
- параметры веса (удельный вес материала γ [кН/м³], а также удельный вес воды γ_F [кН/м³] и коэффициент пористости e_0);
- фильтрация (коэффициенты фильтрации Дарси K_x, K_y [м/день]).

Для расчета, использующего упругопластическую модель с разрушением по критериям Друкера-Прагера (*Drucker-Prager*) и Мора-Кулона (*Mohr-Coulomb*), кроме перечисленных вводятся до-

полнительные параметры нелинейности – удельное сцепление c [кН/м²] и угол внутреннего трения φ [°].

Критерий Мора-Кулона (Mohr-Coulomb)

Критерий прочности Мора-Кулона обычно используется для анализа несущей способности грунтовых массивов. При нагружении грунты работают преимущественно на сдвиг по поверхности с наименьшей несущей способностью. Поэтому сдвиговая прочность является определяющей прочностной характеристикой для грунтов. Разрушение реализуется в тот момент, когда величина сдвигового (касательного) напряжения достигает предела прочности грунта на сдвиг. Поэтому связь между нормальными напряжениями σ и касательными напряжениями τ является критерием прочности для грунтов (рис. 2).

$$|\tau| = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (1.3)$$

где c – сцепление, φ – угол внутреннего трения.

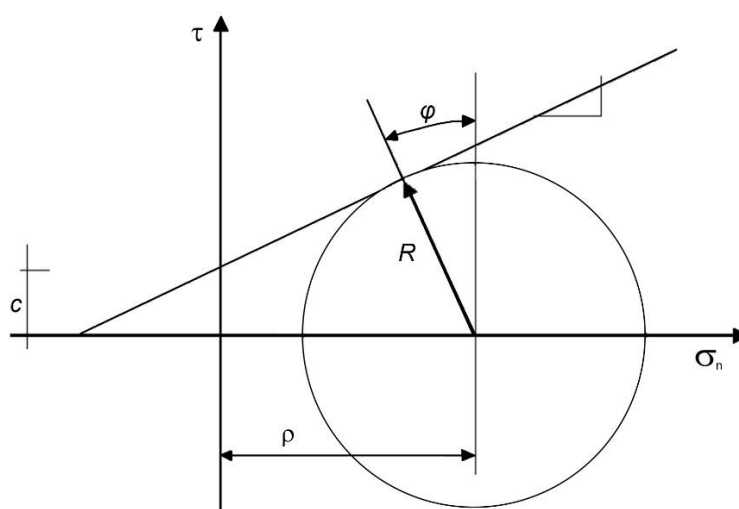


Рис. 2. Графическое изображение критерия Мора-Кулона.

Критерий Друкера-Прагера (Drucker-Prager)

Для использования в расчетах численными методами наиболее удобным и часто используемым критерием является критерий Друкера-Прагера. Это объясняется тем, что в графической форме он представляет собой конус, то есть лишен линий перегиба, как, например, критерий Мора-Кулона (см. рис. 3). Математически критерий Друкера-Прагера записывается следующим выражением:

$$F(\sigma) = \alpha_\varphi I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0, \quad (1.4)$$

где I_1, J_2 – инварианты напряжений;

α_φ, k – являются функциями двух параметров материала φ и c , полученных экспериментальным путем.

Возможны три варианта расположения конуса, описывающего критерий, по отношению к пирамиде критерия Мора-Кулона. Наиболее часто, особенно в расчетах в условиях плоской деформации, рассматривается расположение конуса внутри пирамиды. Простота алгоритмизации обу-

словила широчайшее использование критерия Друкера-Прагера в задачах механики грунтов и механики скальных пород.

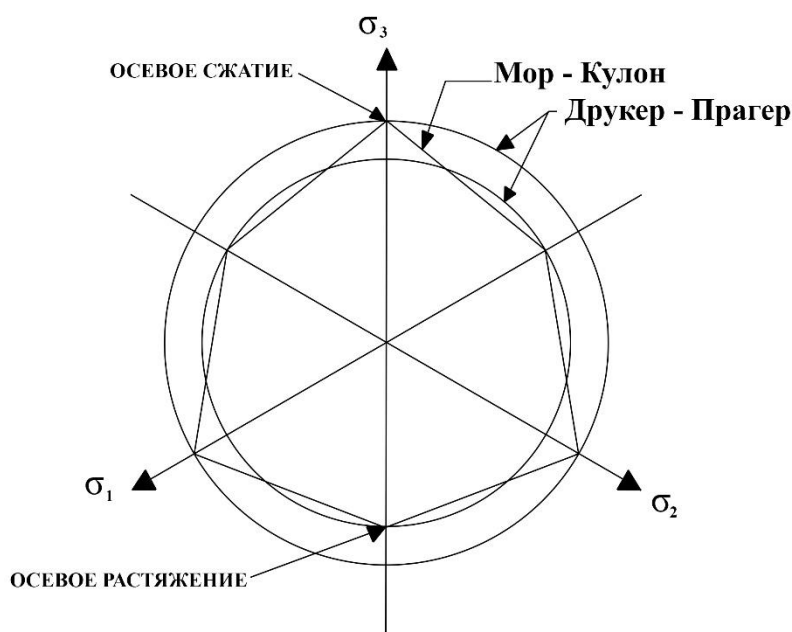


Рис. 3. Графическое изображение критериев Мора-Кулона и Друкера-Прагера.

Критерий Хоека-Брауна (Hoek-Brown)

С помощью критерия Хоека-Брауна описывается поведение скальных пород и бетонов, т.е. хрупких материалов. Критерий основан на утверждении, что хрупкое разрушение происходит вследствие концентрации напряжений у вершин существующих в материале микродефектов. Применение его возможно как для ненарушенных пород, так и для пород, ослабленных трещинами.

Критерий Хоека-Брауна для ненарушенных горных пород представлен нелинейной зависимостью между максимальными осевыми напряжениями σ_1 , которые способен выдержать образец, и величиной бокового обжатия σ_3 . Зависимость может быть определена следующим параболическим законом:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}, \quad (1.5)$$

где σ_{ci} – предел прочности на одноосное сжатие образца без приложения боковой нагрузки, m_i – параметр, определяемый по отношению σ_1 к σ_3 для каждой отдельной породы.

Балочный (стержневой) структурный элемент (Beams)

Данный элемент при построении плоских сеток применяется для идеализации объемной модели здания и задания непосредственно балочных элементов. Примером может послужить моделирование с помощью стержневых элементов ограждающих конструкций котлованов (как сплошных – «стена в грунте»), так и дискретных (ограждение из металлических труб с забиркой), элементов распорной системы (расстрелы, подкосы), колонн и перекрытий здания. Создание элемента в расчетной схеме производится по двум узлам (Create → 2 nodes) либо на выбранных гранях (On

edge(s)). Кроме положения в пространстве, балочный элемент характеризуется следующими параметрами:

- упругими характеристиками (Elastic) – модулем деформации E [кН/м²], коэффициентом Пуассона ν);
- параметром веса (Unit Weights) – удельным весом материала γ [кН/м³];
- характеристиками сечения (Geometry) (возможны 3 варианта задания сечения – выбор из сортамента, задание линейных размеров для 8 предварительно заданных сечений и указание моментов инерции и площади вручную).

2. Пример выполнения расчетной части курсового проекта с использованием программного КОМПЛЕКСА Z_Soil v.6

При моделировании распорные и ограждающие конструкции, а также колонны здания будут задаваться при помощи стержневых элементов. Остальные конструкции будут задаваться элементами типа *Continuum*.

При запуске программы (рис. 4) выбирается тип задачи (*Analysis type*) плоская (*Plane Strain*).

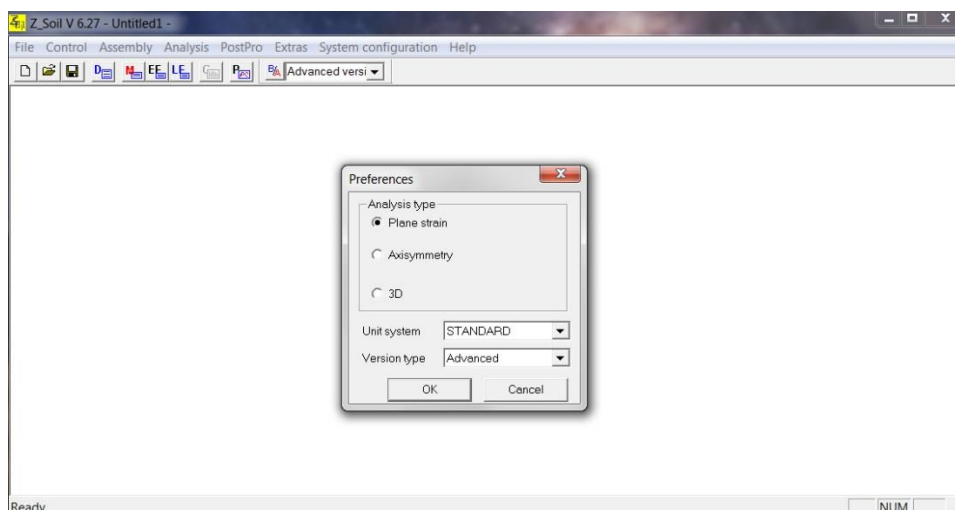


Рис. 4. Вид окна выбора режима работы программы.

Подготавливаем расчетную схему в программе AutoCAD. Вычерчиваем расчетную схему при помощи команды «*Отрезок*». Расчетная область и конструкции разделяются на укрупненные четырехугольники. При этом важно аккуратно вычерчивать пересечения с использованием привязок. При помощи команды *Boundary* создаем области, которые впоследствии станут основой последующей сетки (рис. 5).

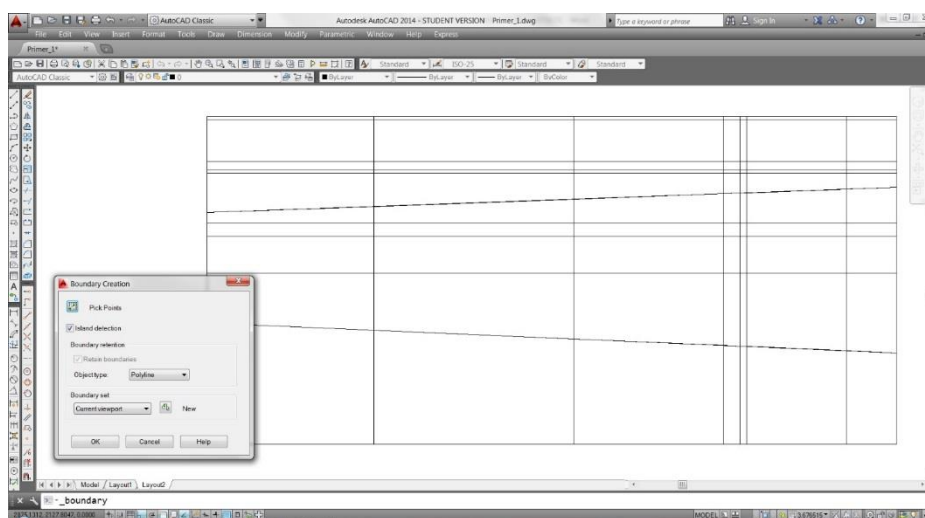


Рис. 5. Расчетная схема, подготовленная для переноса в программу Z_Soil.

Присваиваем имя проекту, сохранив проект в выбранную папку. Для открытия окна предпроцессора и создания сетки конечных элементов выбираем *Assembly* → *Prepro 2D* (рис. 6).

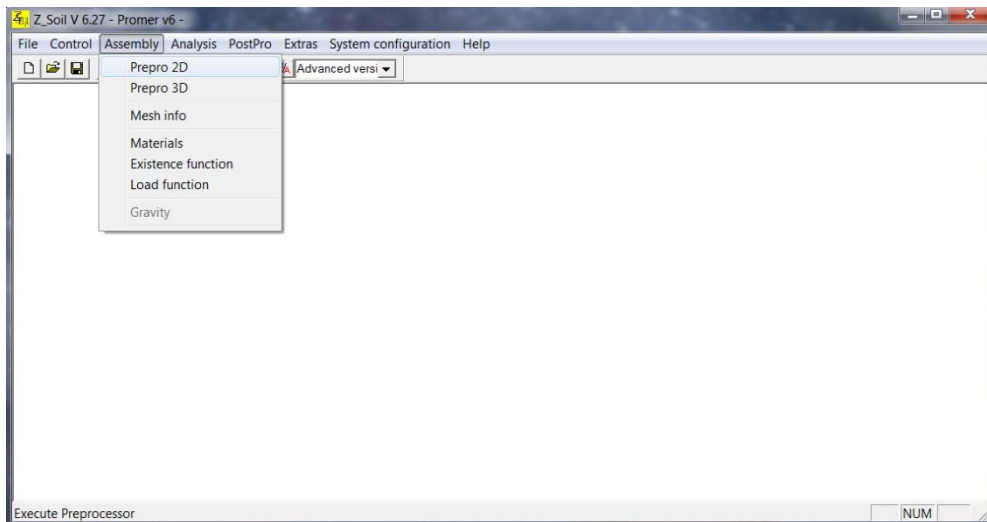


Рис. 6. Вид основного рабочего окна программы.

Для импорта заранее подготовленной расчетной схемы необходимо воспользоваться командой *Edit* → *Import *.dxf* (рис. 7).

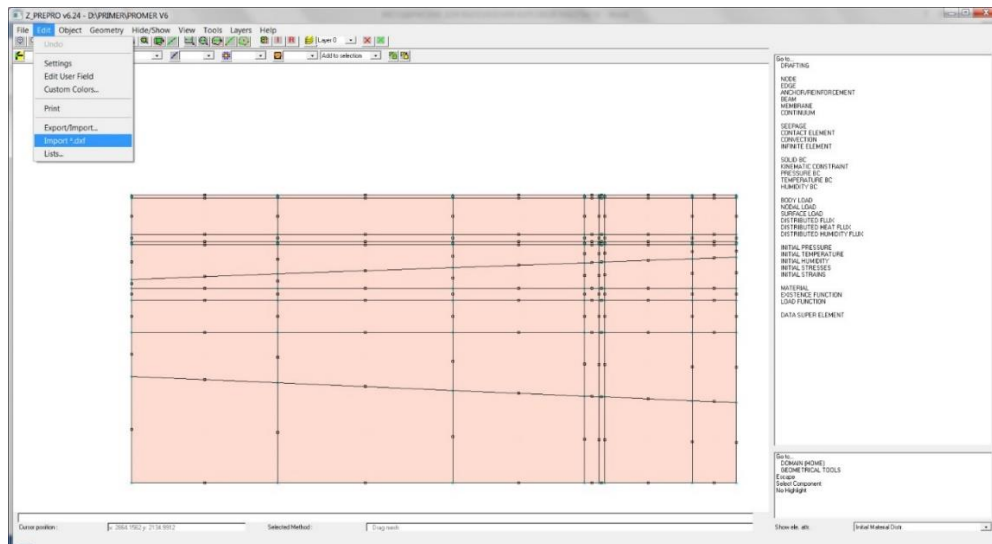


Рис. 7. Результат импорта начальной сетки из Автокада.

При помощи команды *CONTINUUM* → *Set highlighted Continuum's* → *Parameters* назначаем порядковые номера инженерно-геологических слоев (рис. 8) и последующие свободные номера присваиваем материалам для зон заменяемых элементов конструкции и обратной засыпки (рис. 9).

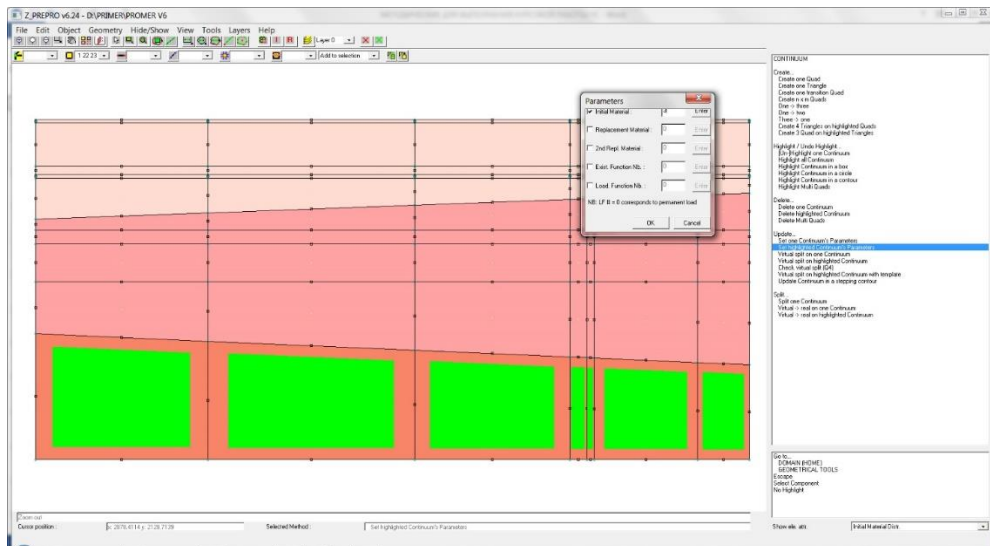


Рис. 8. Назначение инженерно-геологических элементов.

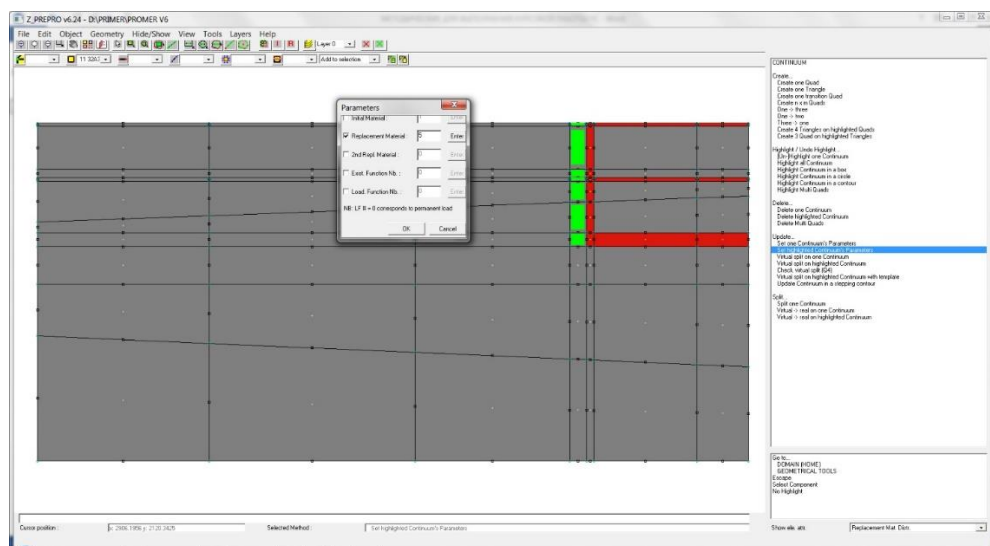


Рис. 9. Назначение свойств конструктивно-технологическим элементам.

Для задания очередности ведения работ присваиваем порядковые номера зонам сетки, для которых необходимы операции по удалению или замещению элементов. При этом номера присваиваются, начиная с «1» в свободном порядке с соблюдением правила, при котором каждой из зон элементов, над которой проводятся одновременно идентичные действия, присваивается единый номер. В случае совпадения «первой» операции и необходимости для части элементов задания другой последовательности ведения работ присваиваемые значения должны быть различны (рис. 10). Задание времени выполнения будет расписано далее.

Учитывая отсутствие информации о глубине и типе фундаментов прилегающего строения, принимаем его условно как превышающую глубину промерзания.

Далее необходимо провести дополнительное разбиение сетки, исходя из условия, что элементы, примыкающие к сооружению, должны быть меньше и увеличиваться по мере приближения к границам сетки. При «дроблении» базовой сетки необходимо учитывать, чтобы конструктивные элементы, такие как стены и перекрытия, по толщине состояли из нескольких (двух или более при необходимости) элементов.

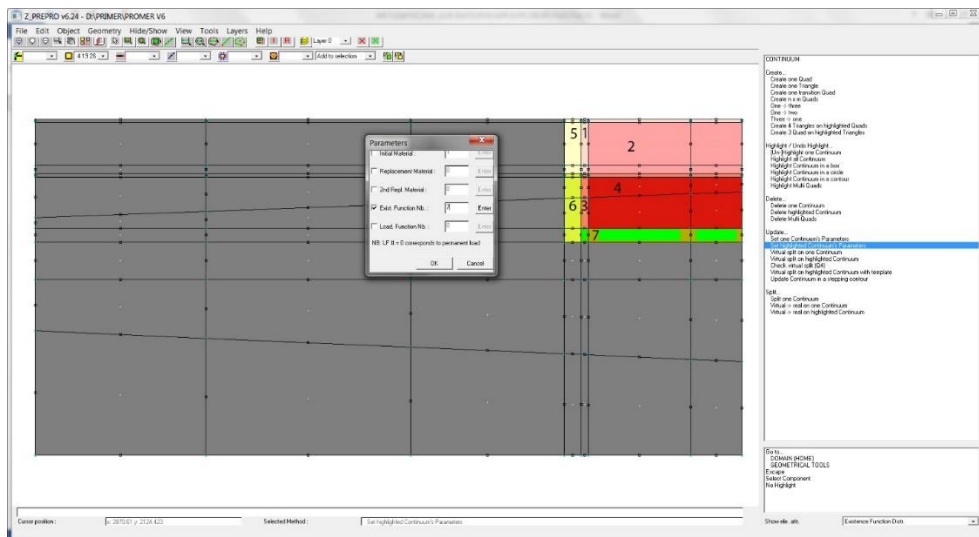


Рис. 10. Присвоение порядковых номеров по видам работ: 1 – зона конструкций 1-го подземного этажа; 2 – зона выемки грунта (1-й подземный этаж); 3 – зона конструкций 2-го подземного этажа; 4 – зона выемки грунта (2-й подземный этаж); 5 – зона обратной засыпки (верхний ярус); 6 – зона обратной засыпки (нижний ярус); 7 – зона фундаментной плиты.

Деление элементов можно проводить как поштучно, так и в соответствии с принятым алгоритмом для выделенных элементов. При выполнении данной операции для группы выделенных элементов первоначально создается виртуальная сетка **CONTINUUM** → **Virtual split on highlighted Continuum**. При этом сохраняется возможность изменения шага виртуальной сетки. В некоторых случаях возможна ситуация, когда на одном или нескольких элементах ориентация элемента не совпала с остальными. При этом их разбиение будет не совпадать с соседними. Для корректировки необходимо воспользоваться командой **Virtual split on one Continuum**, заменив значения по направлениям. При достижении желаемого результата необходимо перевести виртуальную сетку в реальную при помощи команды **Virtual** → **Real on highlighted Continuum** (рис. 11).

При возникновении необходимости дополнения уже созданного ранее фрагмента расчетной схемы можно воспользоваться инструментами, заложенными в оболочке предпроцессора программы Z_Soil.

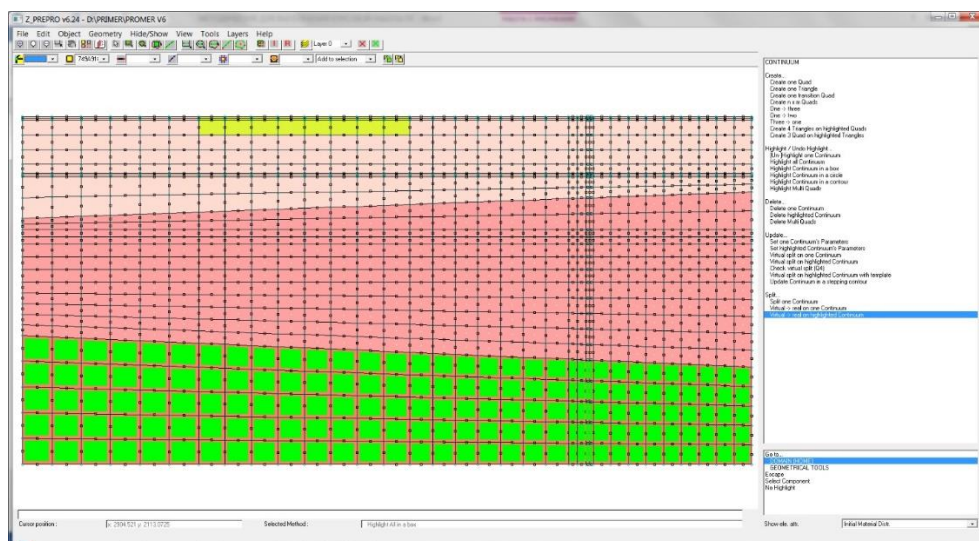


Рис. 11. Разбиение сетки до окончательного вида.

Одной из таких возможностей является создание сетки в выбранной области. При этом необходимо соблюдать правило равенства количества граней элементов на противоположных сторонах четырехугольника. В случае несоответствия количества граней на противоположных сторонах есть возможность использования переходных элементов, позволяющих разбивать элемент с соотношением сторон 1 к 3. Для создания сетки необходимо каким-либо образом выделить грань контура, в котором создается сетка, а также узлы по 4 вершинам и воспользоваться командой **GEOMETRICAL TOOLS** → **Mesh inside** (рис. 12).

Другим способом построения сетки может быть наращивание от выделенной грани. Для этого необходимо выделить какую-либо из граней и воспользоваться командой **GEOMETRICAL TOOLS** → **Extend Highlighted Edges**. В открывшемся окне необходимо указать вектор приращения, указав необходимые величины по осям X и Y с учетом направления (знака), а также требуемого количества элементов и шага регрессии. Использование шага регрессии > 1 приводит к увеличению шага разбиения начиная от выделенной грани, < 1 – соответственно, к уменьшению.

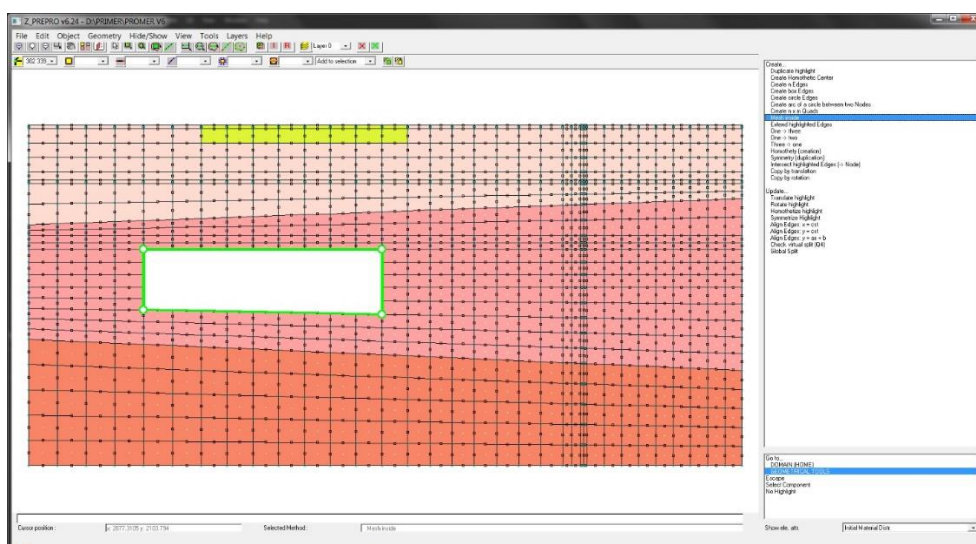


Рис. 12. Альтернативные варианты создания сетки.

После подготовки основной сетки необходимо создать стержневые элементы для ограждающих, распорных и конструктивных (колонны) элементов. Для этого необходимо воспользоваться командой **BEAM** → **Create one Beam** – для создания стержневого элемента между двумя узлами (в случае создания подкоса или распорки) или командой **BEAM** → **Create Beam on Highlighted Edges** – для создания стержневых элементов на выделенной грани (рис. 13). Далее при необходимости можно изменить характеристики стержневых элементов при помощи команды **BEAM** → **Set one Beam Parameters** или разделить стержневой элемент командой **BEAM** → **Split one Beam** на несколько частей.

Следующим шагом необходимо сформировать граничные условия. Для этого переходим в меню **SOLID BC** и при помощи команды **SOLID BC** → **Create box-Shaped Solid BC** создаём стандартное закрепление сетки (рис. 14).

В случае если у части боковой грани будут отсутствовать закрепления, необходимо проверить правильность задания координат граничных узлов. Отсутствие стандартного закрепления свидетельствует о том, что один или несколько узлов выступают за общую грань.

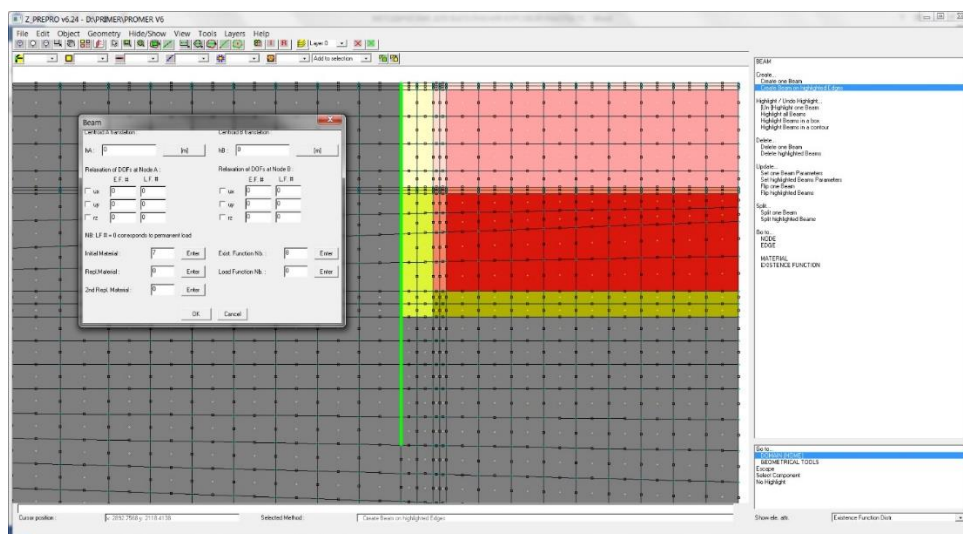


Рис. 13. Создание стержневых элементов.

В случае необходимости закрепления какого-либо узла или группы узлов могут быть изменены при помощи команды **SOLID BC** → **Update Solid BC on one Node**. Подобная операция может пригодиться в случае изменения закрепления в месте установки распорки.

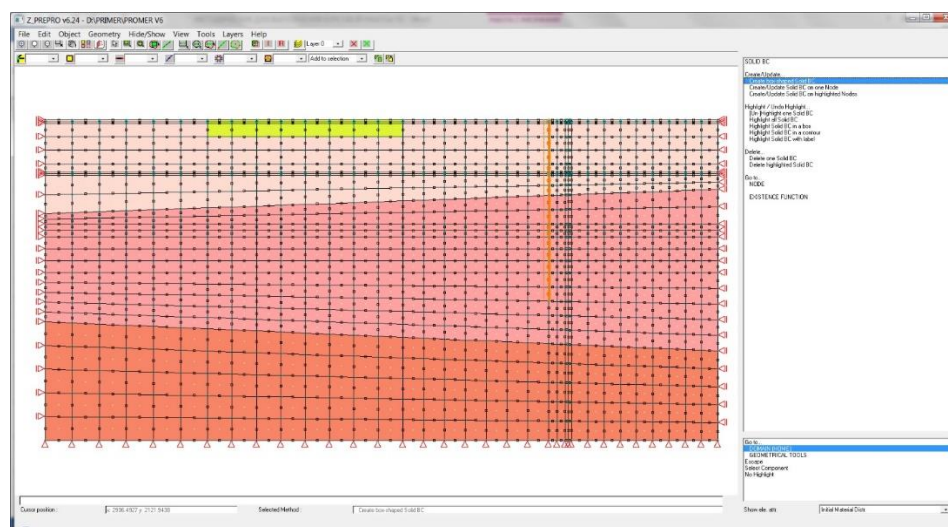


Рис. 14. Создание закрепления.

Далее прикладываем эквивалентные нагрузки от верхних частей строений:

- нагрузку к фундаменту существующего здания. Прикладывается из расчета на 1 пог. м из условия 15 кН/м^2 с каждого этажа здания. Для приложения нагрузок необходимо воспользоваться командой **SURFACE LOAD** → **Create one SL (pressure)**.

- нагрузку к строящемуся сооружению необходимо задавать с использованием функции нагружения, позволяющий изменять величину нагрузки по времени (рис. 15). Нагрузка от не модели-

руемого верхнего строения передается на стены и колонны, с учетом их геометрических размеров.

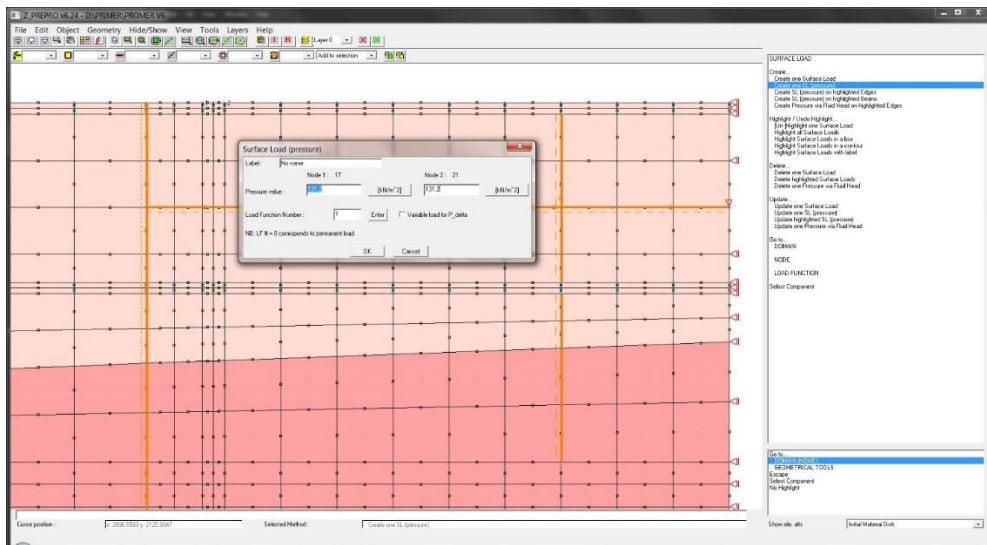


Рис. 15. Приложение нагрузки.

Следующим шагом в создании расчетной схемы будет задание прочностных и деформационных характеристик для всех задействованных материалов (рис. 16). Задание характеристик материалов возможно из основного окна программы по ссылке *Assembly* → *MATERIAL*, а также и в окне предпроцессора при помощи команды *MATERIAL* → *Edit Material*. Характеристики грунтового массива принимаются из задания, а материалов конструктивных элементов – из справочников.

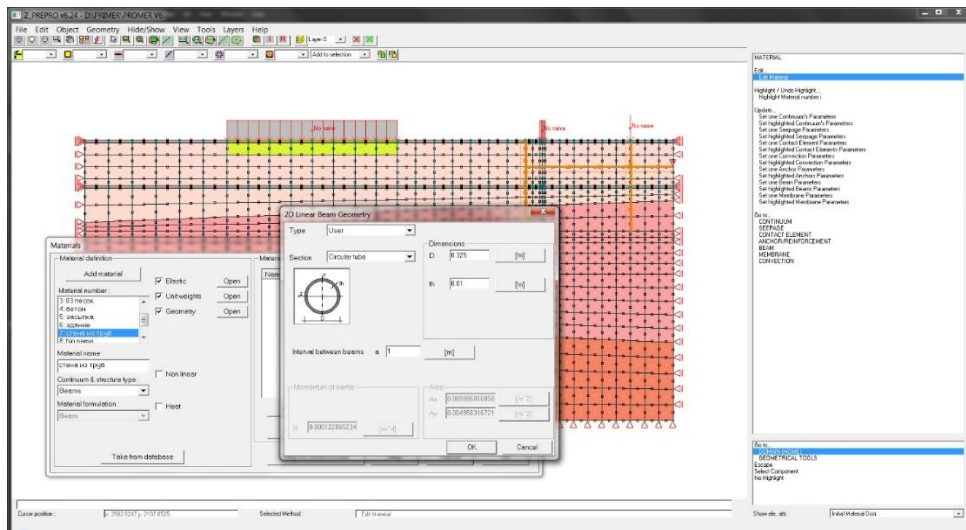


Рис. 16. Задание прочностных и деформационных свойств.

После присвоения характеристик всем материалам переходим к заданию последовательности выполнения «работ». Необходимо присвоить времена и функции существования для каждой из выделенных ранее зон и замоделированных элементов конструкции. Это возможно из основного окна программы: *Assembly* → *Existence function*, а также в окне предпроцессора: *EXISTENCE FUNCTION* → *Edit Existence function* (рис. 17).

Поскольку нагрузка от строящегося здания должна прикладываться после завершения возведения нулевого цикла и нами при задании этих нагрузок была принята функция загрузки **Load Function** = 1, необходимо задать график для данной функции. Задание возможно из основного окна программы по ссылке **Assembly** → **Load Function**, а также в окне предпроцессора **LOAD FUNCTION** → **Edit Load Function**. В качестве времени начала приложения нагрузки выбираем следующий шаг после завершения выполнения обратной засыпки (рис. 18). При этом вводимый параметр **LOAD** является коэффициентом к величине заданной нагрузки.

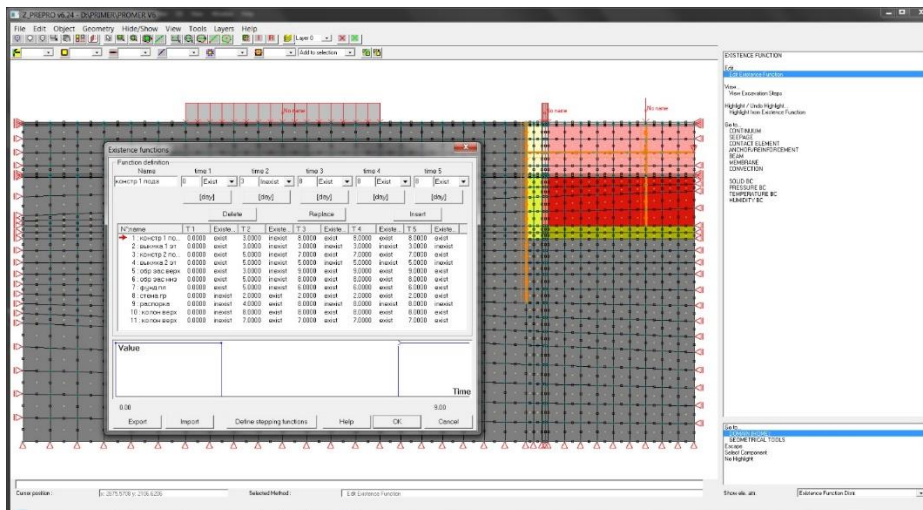


Рис. 17. Задание EXISTENCE FUNCTION.

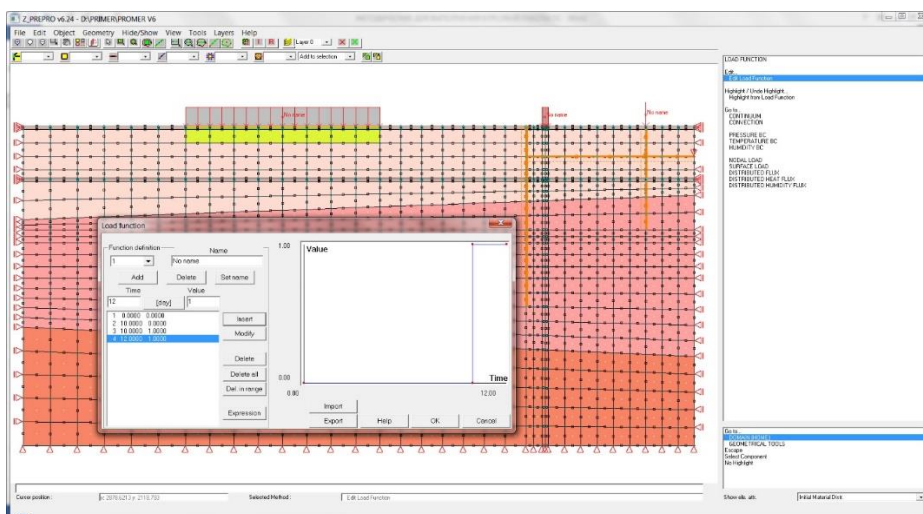


Рис. 18. Задание LOAD FUNCTION.

Для проведения расчета необходимо выбрать тип решаемой задачи, а также сформировать порядок расчета. При этом необходимо воспользоваться командой **Control** → **Analysis and Drivers** из главного окна программы **Control / Analysis and Drivers**.

В меню **Analysis** из списка можно выбрать одну из следующих постановок задачи:

- **3D** – Пространственная (доступно в студенческих версиях начиная с Z_SOIL.PC v.7);
- **Plane Strain** – Плоская деформация;

- *Axisymmetry* – Осесимметричная.

Дополнительно среди типов решаемых задач (*Problem Type*) можно выбрать из:

- *Deformation* – Деформации для однофазного анализа;

- *Deformation+Flow* – Для двухфазного анализа;

- *Flow* – Однофазный анализ фильтрации;

- *Heat* – Анализ распространения температуры;

- *Humidity* – Анализ распространения влажности.

В меню *Driver* необходимо сформировать порядок расчета:

- **Initial State** – расчет начального напряженного состояния;

- **Time Dependent** – вычисление напряженно-деформированного состояния (НДС) в каждый шаг (реальный или условный) времени;

- **Stability** – добавляется при необходимости расчета коэффициента надежности в текущий момент (времени) путем последовательного уменьшения поверхности текучести либо пропорциональным возрастанием нагрузки до разрушения.

Для решения нашей задачи необходимо произвести расчет начального напряженного состояния массива **Initial State** и выполнить расчет заданной последовательности выполнения работ **Time Dependent**. Принимаем диапазон счета от 1 до 11, так как последнее действие выполнялось на времени 10 (рис. 19).

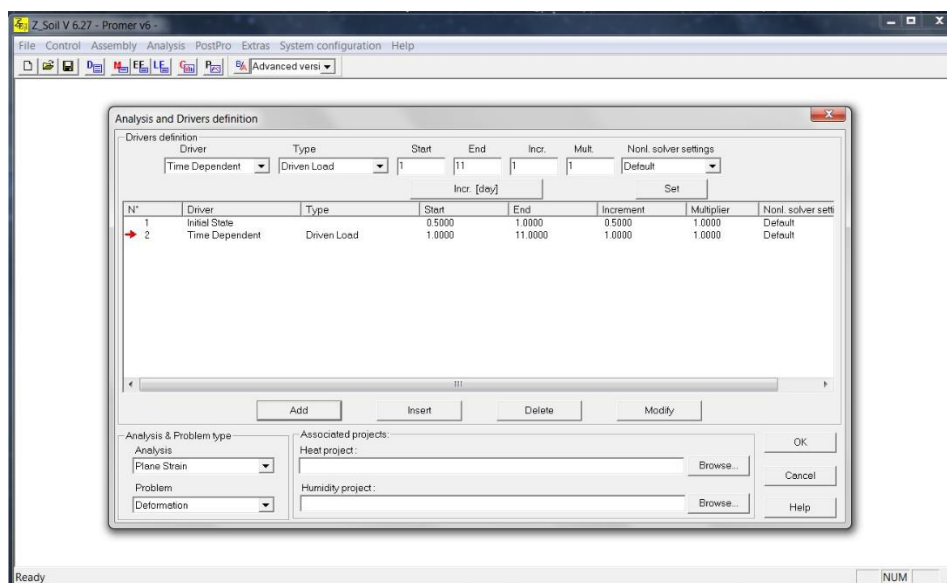


Рис. 19. Выбор типа задачи и формирование порядка расчета.

Проведя вычисление, выбрав *Analysis* → **Run Analysis** и проверив предварительную сетку, можно переходить к заданию контакт-элемента на границе ограждающей конструкции котлована и грунтового массива. Для создания контакт-элемента необходимо выделить лицевую грань элементов: *CONTACT ELEMENT* → **Highlight Element Face...** и при помощи команды *Create Con-*

tact Elem. on Highlighted Faces создать контакт-элемент. Присваиваем ему тип материала 10 и функцию существования, аналогичную функции ограждающих конструкций (рис. 20).

Характеристики контакт-элемента можно принять в соответствии с табл. 9.1 п. 9.16 СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» (см. приложение 2).

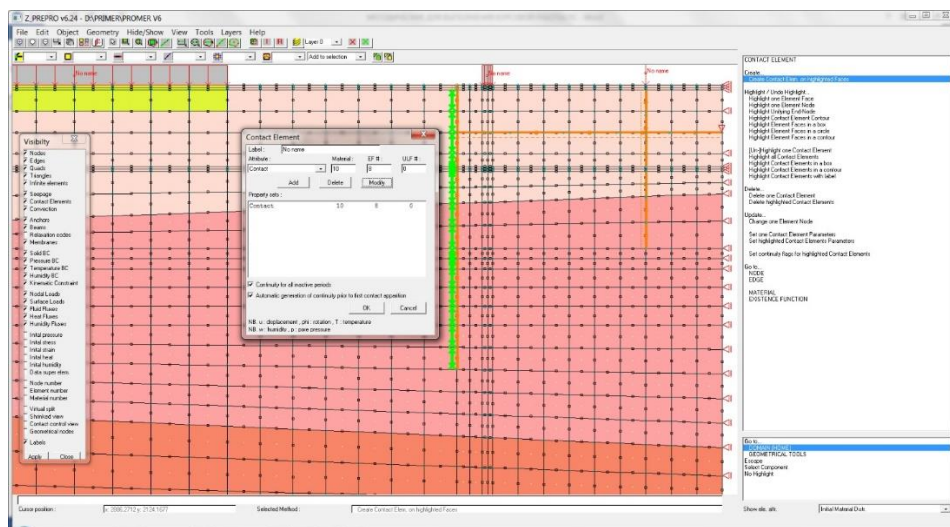


Рис. 20. Задание контакт-элемента.

Проведя вычисление, выбрав **Analysis** → **Run Analysis** в основном окне программы, можно приступить к анализу полученных результатов, запустив постпроцессор **PostPro**.

Необходимо оценить эффективность принятой ограждающей и распорной конструкции, а также правильность принятой схемы ведения работ.

Необходимо выписать величины максимальных горизонтальных перемещений ограждающей конструкции, величины дополнительных осадок и высчитать крены прилегающего строения на период отрывки котлована и завершения моделирования.

- величина максимальных горизонтальных перемещений ограждающей конструкции – 1,67 см.
- величина максимальных дополнительных осадок существующего строения на период отрывки котлована – 1,09 см.
- относительная разность осадок на период отрывки котлована $\Delta s/L$ – 0.00042.
- величина максимальных дополнительных осадок существующего строения на период завершения моделирования – 1,84 см.
- относительная разность осадок на период завершения моделирования $\Delta s/L$ – 0.00076.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что принятые распорная конструкция и конструкция ограждения котлована эффективны. Возведение сооружения по принятой технологической схеме возможно, и полученные величины прогнозных дополнительных осадок прилегающего строения на период завершения отрывки котлована и завершения строительства не превышает максимально допустимых значений, предусмотренных в Приложение Л СП 22.13330.2011 (приложение 1).

При оформлении отчета приводятся следующие графические материалы:

- расчетная схема (рис. 21);
- эпюра распределения перемещений на период отрывки котлована (рис. 22);
- распределение горизонтальных перемещений на период отрывки котлована (рис. 23);
- распределение вертикальных перемещений на период отрывки котлована (рис. 24);
- распределение вертикальных перемещений на период завершения моделирования (рис. 25).



Рис. 21. Расчетная схема.

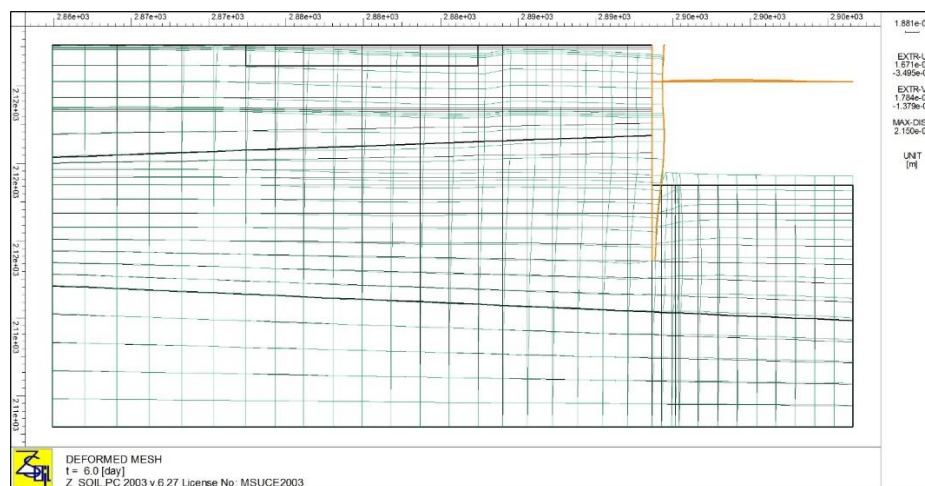


Рис. 22. Эпюра распределения перемещений на период отрывки котлована.

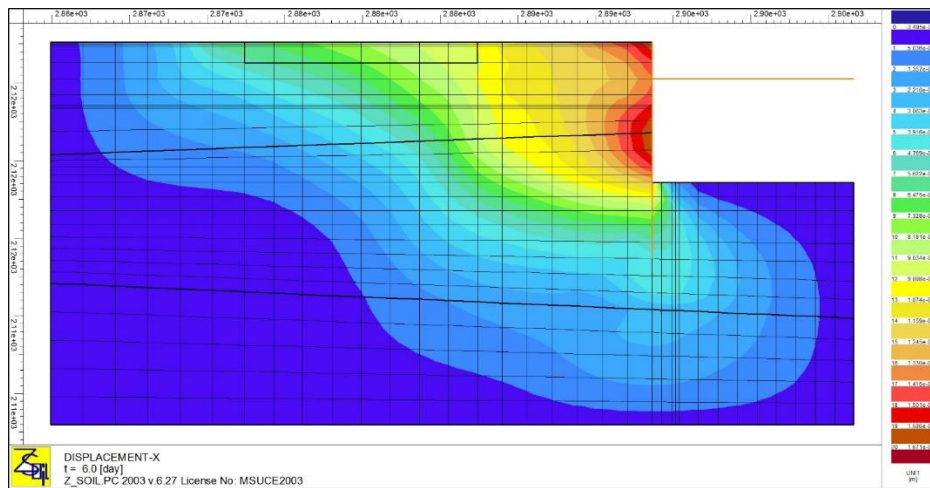


Рис. 23. Распределение горизонтальных перемещений на период отрывки котлована.

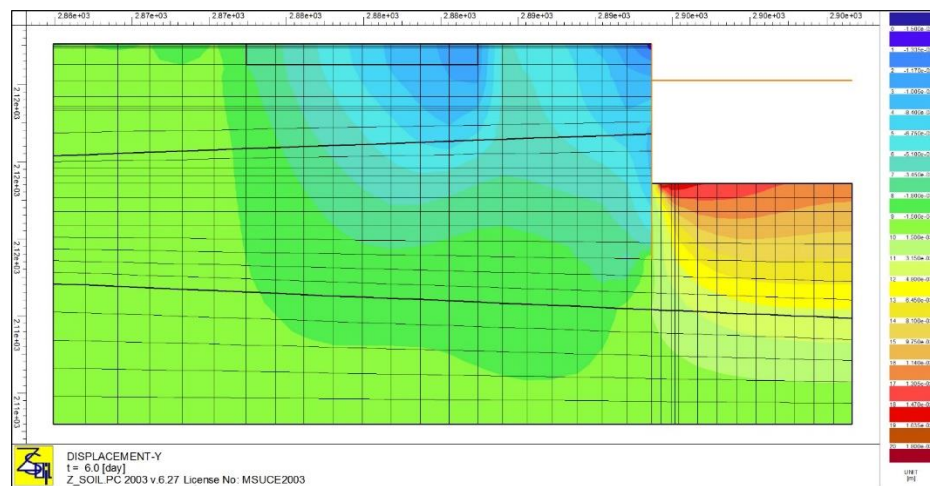


Рис. 24. Распределение вертикальных перемещений на период отрывки котлована.

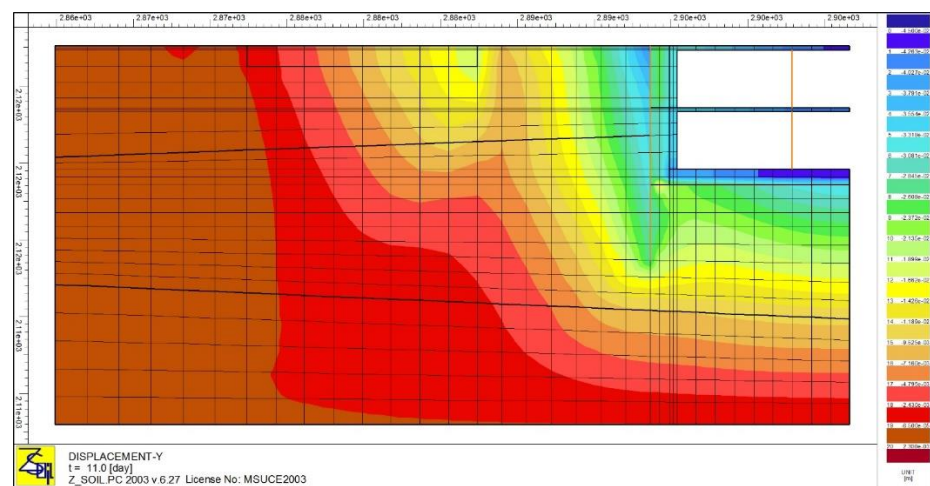


Рис. 25. Распределение вертикальных перемещений на период завершения моделирования.

3. Особенности выполнения расчетной части курсового проекта с использованием программного КОМПЛЕКСА Z_Soil v.7 – v.13

При создании иллюстраций рассмотрено использование Z_Soil версии 13, при использовании более ранних версий возможны некоторые отклонения в интерфейсе программы при сохранении общей концепции.

При моделировании распорные и ограждающие конструкции, а также колонны здания будут задаваться при помощи стержневых элементов. Остальные конструкции будут задаваться элементами типа *Continuum*.

При запуске программы выбирается тип задачи (*Analysis type*) плоская (*Plane Strain*) (рис. 26).

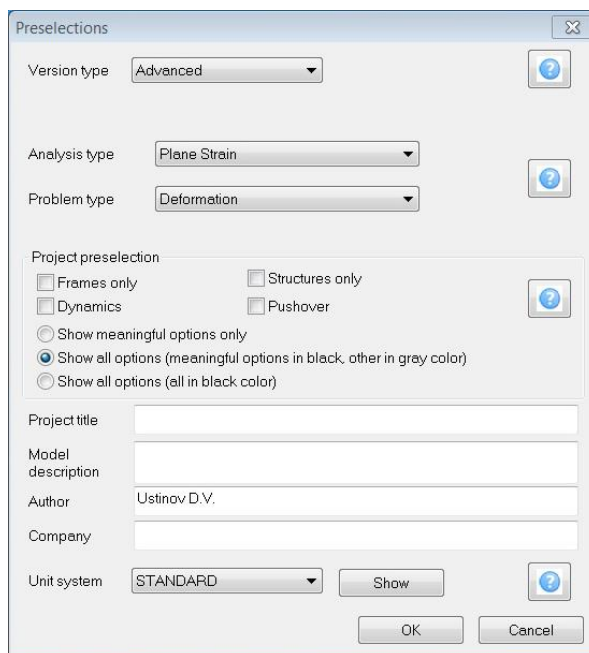


Рис. 26. Вид окна выбора режима работы программы.

В новом окне программы выбираем *Assembly* → *Preprocessing* для открытия окна предпроцессора (рис. 27).

Импортируем при помощи команды *Macro Model* → *Objects* → *Import from DXF* (рис. 29) заранее подготовленный файл из AutoCAD'a (рис. 28). Важным отличием от версии 6 является отсутствие необходимости использовать команду *Boundary* для подготовки исходного файла.

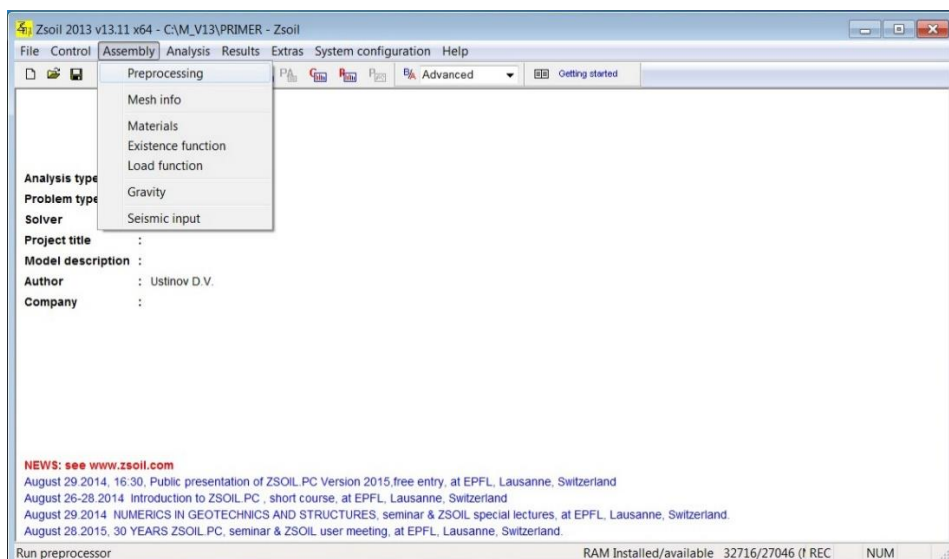


Рис. 27. Вид основного рабочего окна программы.

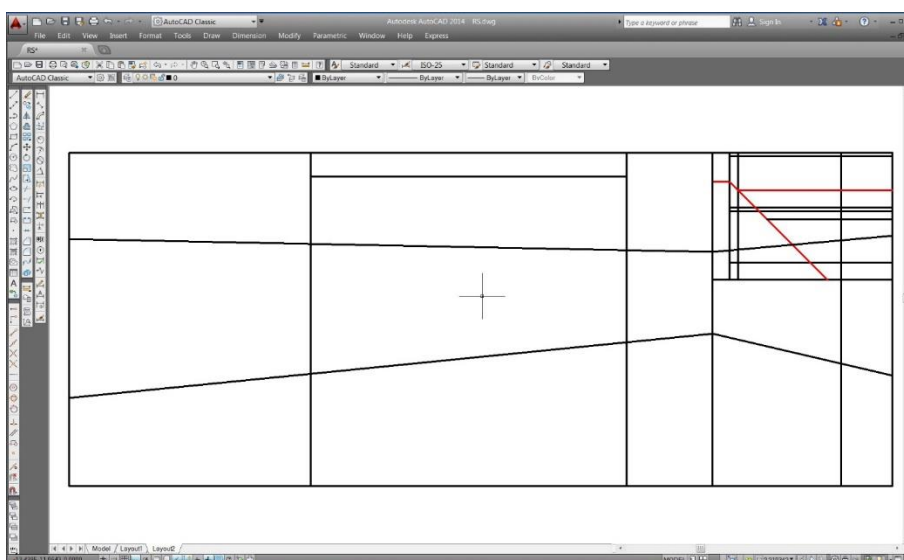


Рис. 28. Расчетная схема, подготовленная для переноса в программу Z_Soil.

Геометрическая схема выполняется «в линиях», при этом разбивку линий в местах пересечения возможно выполнить с помощью специальной функции в Z_Soil (см. ниже). При этом необходимо указать масштабный коэффициент, в результате применения которого необходимо получить размерность расчетной схемы «метр».

Следующим шагом в создании расчетной модели будет деление перенесенной геометрической схемы на цельные отрезки между точками пересечения линий геометрической схемы (рис. 30). Для этого необходимо выделить все элементы в модели и выполнить разбивку линий на отрезки в месте их пересечения с помощью команды **Macro Model** → **Objects** → **Intersection by object(s)**.

При этом необходимо не допускать лишних геометрических точек, образование которых возможно при неаккуратной подготовке геометрической схемы. В случае наличия лишних геометрических точек, образовавшихся в результате создания составных отрезков или при неточном пересечении нескольких отрезков в одной точке, желательно откорректировать схему в AutoCAD'e. Это позволит избежать проблем в дальнейшем.

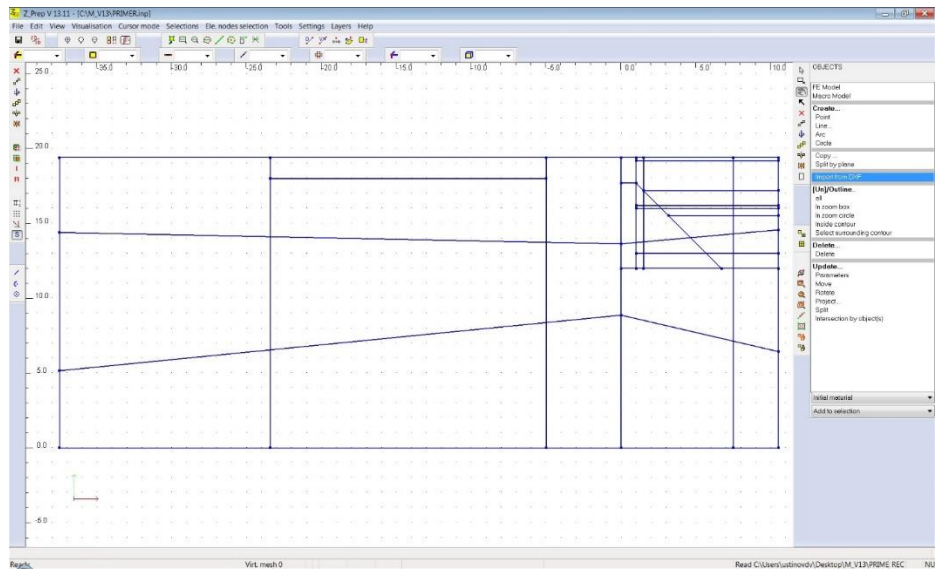


Рис. 29. Импорт начальной геометрической модели из Автокада.

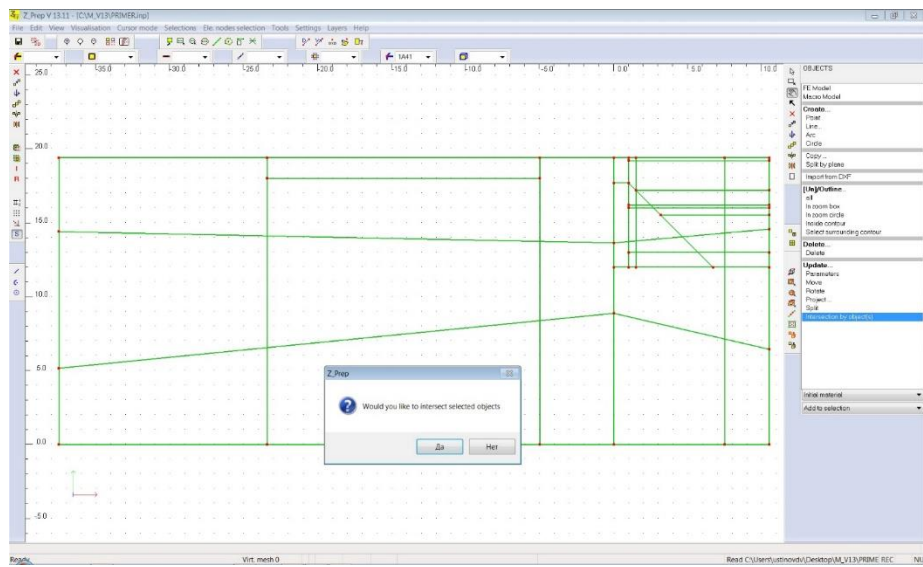


Рис. 30. Разбивка геометрической модели в местах взаимного пересечения.

После этого приступаем к созданию специальных областей – «субдоменов». Для этого с помощью команды *Macro Model* → *Subdomain* → *2D continuum inside contour* выделяем области внутри образованных отсеков (рис. 31).

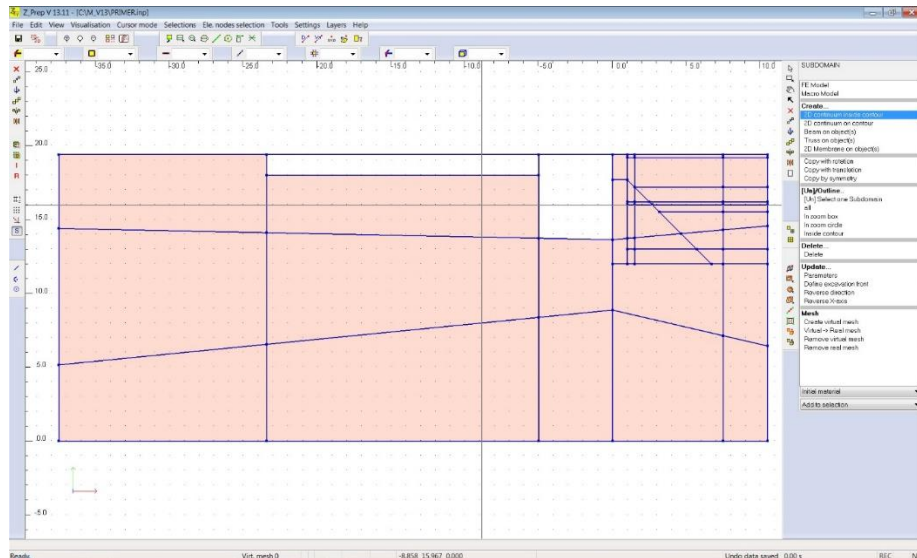


Рис. 31. Создание укрупненных элементов расчетной модели.

При помощи команды **Macro Model** → **Subdomain** → **Parameters** присваиваем порядковые номера инженерно-геологических слоев (рис. 32), последующие номера материалов элементам конструкции и обратной засыпки, а также порядковые номера зонам сетки функций существования для последующего присвоения им очередности работ (рис. 33). Выделение укрупненных элементов производится в меню **Macro Model** → **Subdomain** → **[Un]** → **Outline** различными способами, например секущей рамкой (In zoom box) или произвольным контуром (Inside contour). Одновременно с этим можно назначить время присвоенным функциям существования, добавив недостающие для будущих конструкций, или для них повторив эту операцию в дальнейшем (EXISTENCE FUNCTION). В программе Z_Soil начиная с 12-й версии изменился интерфейс окна задания временных периодов функции существования (рис. 33). В отличие от описанной ранее методики задания, теперь необходимо задавать период активности элементов, и в случае существования элемента бессрочно ставится **INF!**

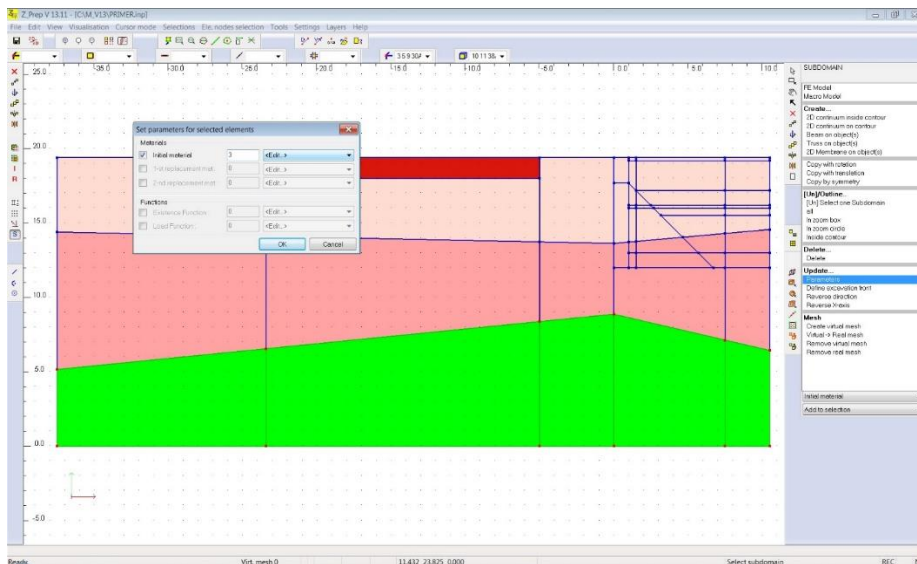


Рис. 32. Назначение инженерно-геологических элементов.

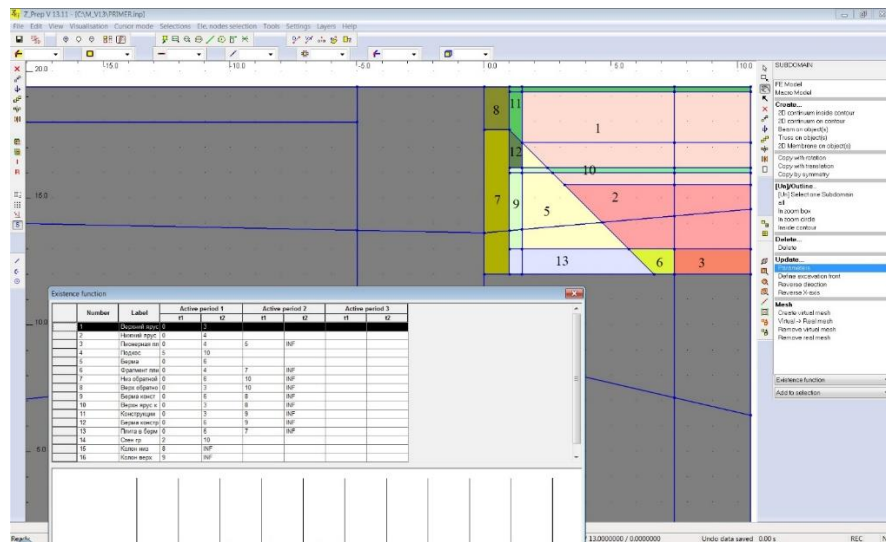


Рис. 33. Присвоение порядковых номеров по очередности работ: 1 – зона выемки грунта (1-й подземный этаж); 2 – зона выемки грунта (2-й подземный этаж); 3 – зона пионерной фундаментной плиты; 5 – зона грунта пригрузочной бермы; 6 – зона фрагмента фундаментной плиты; 7 – зона обратной засыпки (нижний ярус); 8 – зона обратной засыпки (верхний ярус); 9 – зона конструкций 2-го подземного этажа в зоне грунтовой бермы; 10 – зона конструкций 2-го подземного этажа; 11 – зона конструкций 1-го подземного этажа; 12 – зона конструкций 1-го подземного этажа в зоне грунтовой бермы; 13 – зона фундаментной плиты.

Далее необходимо провести разбиение предварительной «виртуальной» сетки с помощью команды *Macro Model* → *Subdomain* → *Create virtual mesh*. Если в процессе выделения области для назначения виртуальной сетки выбирается область с 4 точками, то назначение контуров происходит автоматически, и необходимо только назначить количество элементов, на которое предполагается выполнить разбиение (рис. 34). При этом необходимо помнить, что граничащие между собой элементы должны иметь общие узлы и общую грань. В некоторых случаях может понадобиться провести дополнительные действия по созданию переходных элементов типа 1 → 3. Кроме этого, существует возможность создания неструктурированной сетки (хаотичной). Данная опция значительно упрощает процесс построения сетки, но влечет сложности в обработке результатов и порой приводит к получению неадекватных результатов и возникновению проблем в процессе расчета за счет возможности создания элементов вырожденной геометрии в автоматическом режиме.

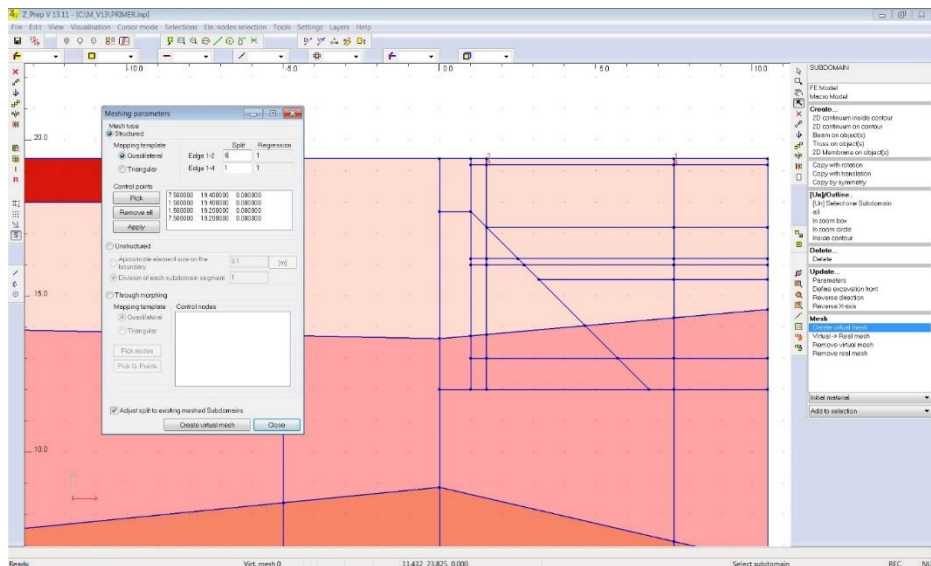


Рис. 34. Разбиение виртуальной сетки конечных элементов.

Необходимо отметить полезную особенность инструмента создания виртуальных сеток, позволяющую автоматически создавать разбиение виртуальной сетки в соответствии с уже выполненной сеткой на граничных участках при активном меню в нижней части рабочего окна «*Adjust split to existing meshed Subdomains*» (рис. 35, выделено красным).

Если выделенная область содержит в контуре более 4 точек, необходимо воспользоваться командой Pick и последовательно выделить «контрольные точки», являющиеся вершинами виртуального «четырёхугольника» и находящиеся в вершинах противоположных граней будущей виртуальной сетки (рис. 36).

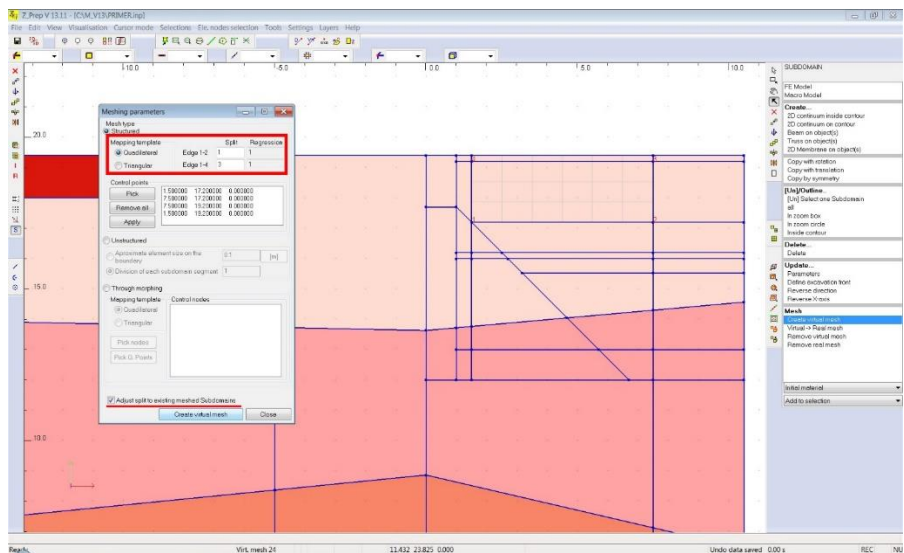


Рис. 35. Разбиение виртуальной сетки конечных элементов с подгонкой (adjust) сетки к ранее выполненной.

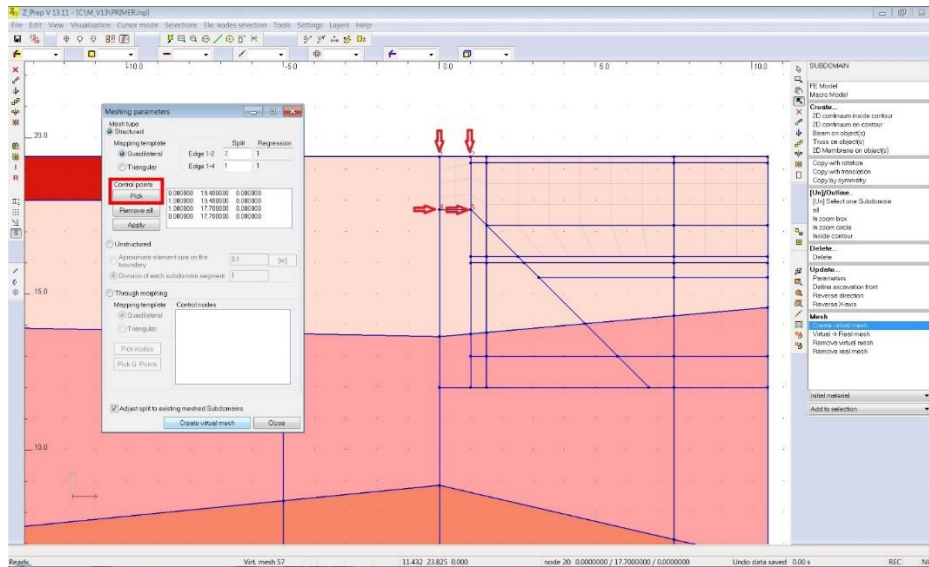


Рис. 36. Выбор контрольных точек.

По окончании создания виртуальной сетки и назначения параметров всем областям переводим виртуальную сетку в сетку конечных элементов с помощью команды *Macro Model* → *Subdomain* → *Virtual* → *Real mesh*, предварительно выделив все элементы нажатием клавиш **Ctrl** – **A**.

Создание переходных элементов рассмотрим на заранее подготовленном участке сетки, у которого примыкающие элементы разбиты в соотношении 1:3 (рис. 37). В качестве варианта разбиения сетки в нашем примере выбираем вариант деления 1:3 по выделенной грани. Первым делом необходимо выделить грань элементов, подлежащих изменению. Далее воспользуемся командой *Mesh refinement* и, выбрав опцию *Selected edges*, завершаем операцию преобразования.

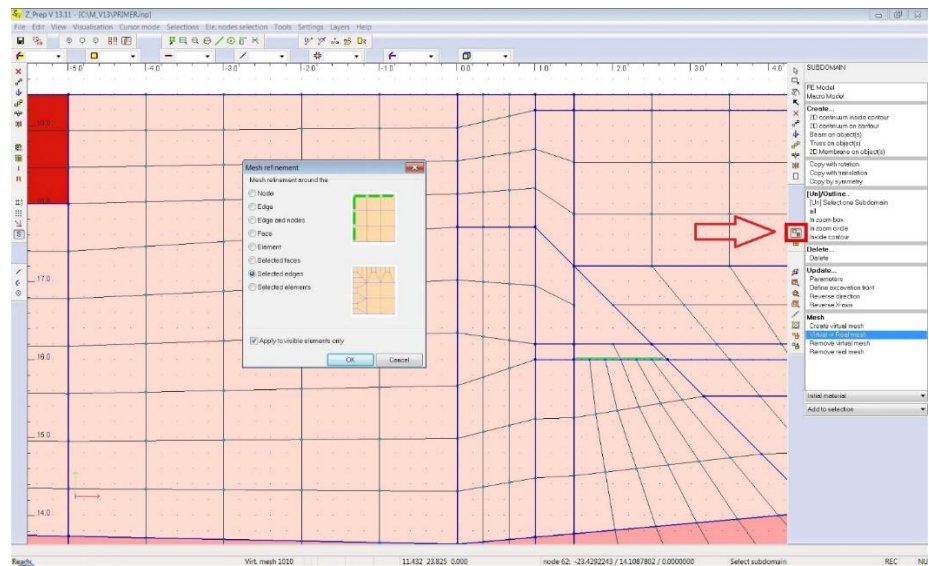


Рис. 37. Создание переходных элементов.

Для создания сетки в оставшемся контуре можно воспользоваться опцией создания неструктурированной сетки. При этом необходимо соблюдение условия соизмеримости в разбиении сетки на граничащих участках. Для создания сетки необходимо воспользоваться опцией *Unstructured* (рис. 38).

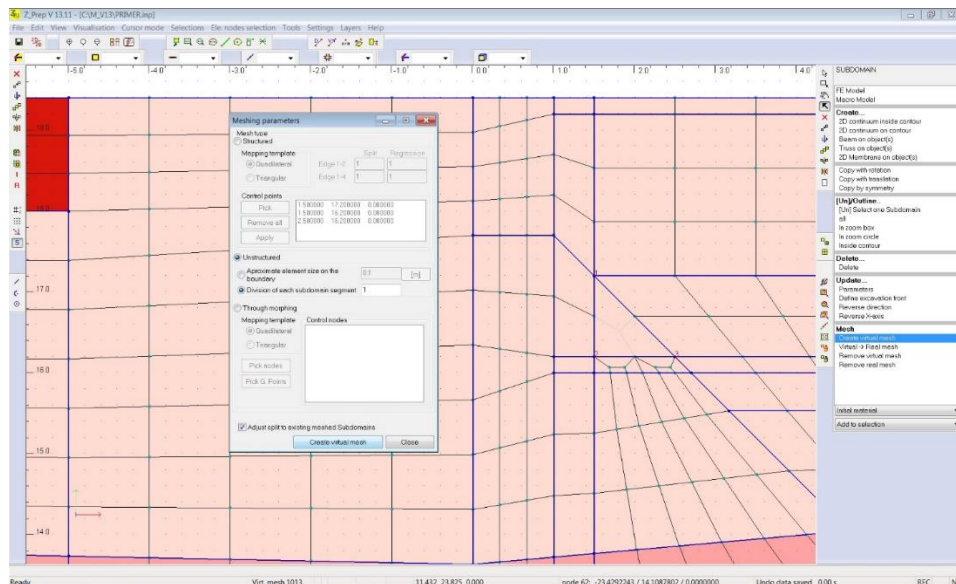


Рис. 38. Пример создания неструктурированных сеток.

После подготовки основной сетки необходимо создать стержневые элементы для ограждающих, распорных и конструктивных (колонны) элементов (рис. 39). Стержневые элементы (beam) создаются с помощью меню **FE Model** → **Beam** → **Create** → **2 nodes** → **points** с последующим выделением крайних точек. Присвоить характеристики вновь созданному элементу можно при помощи команды **FE Model** → **Beam** → **Update** → **Parameters**, выделив его стрелочкой.

Для создания ограждающей конструкции необходимо сначала отключить из отображения элементы сетки, находящиеся внутри котлована. Выбор элементов возможен разными способами, например **FE Model** → **Continuum 2D** → **[Un]** → **Outline** → **In zoom box**. Скрытие элементов производится из левого вертикального меню иконкой **Hide selected elements** (рис. 40).

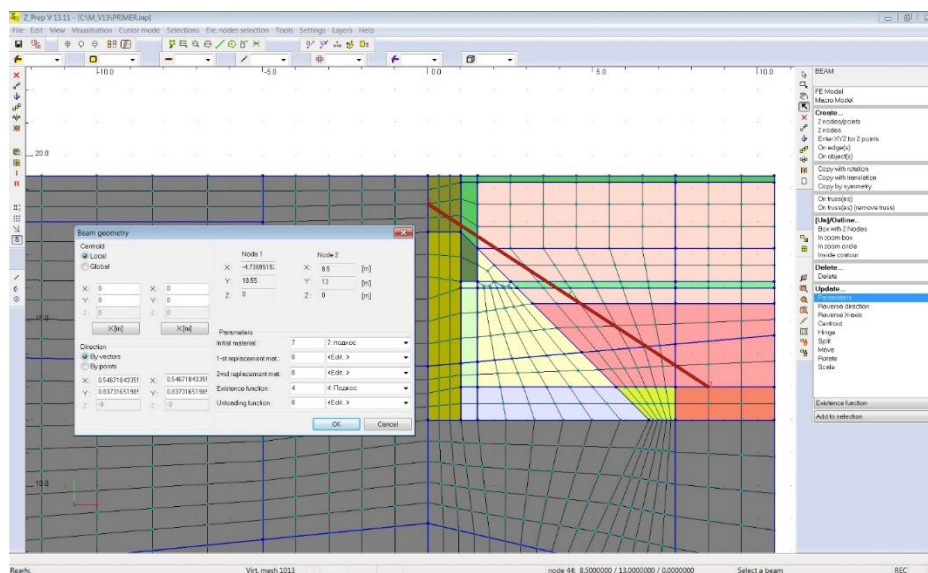


Рис. 39. Создание стержневого элемента и назначение его параметров.

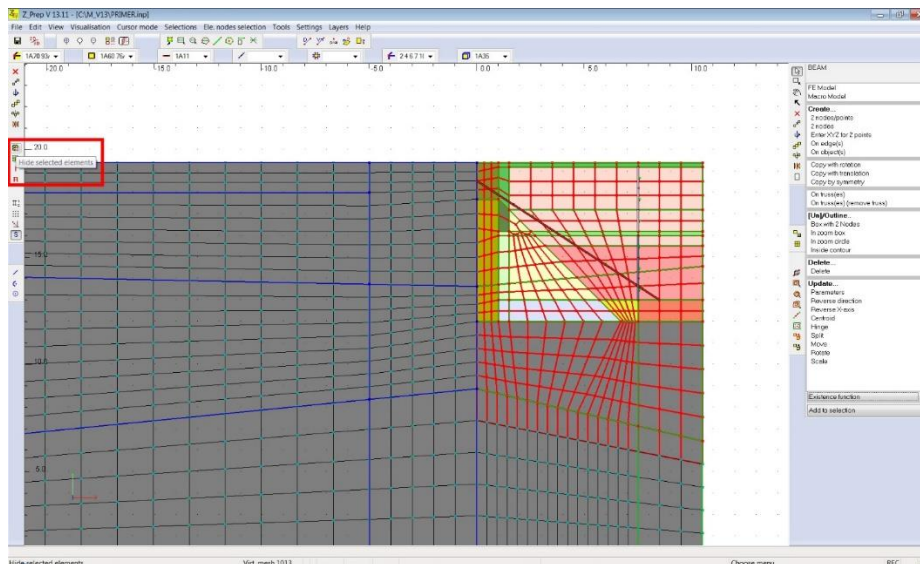


Рис. 40. Выбор и скрытие выделенных элементов.

Далее необходимо выделить ребра (edges) 2D-элементов, на которых будет создана ограждающая конструкция. Для этого можно воспользоваться набором кнопок верхнего горизонтального меню, например *Select edges in zoom box* (Выбрать ребра элемента при помощи рамки) или *Select edges between two nodes* (Выбрать ребра между двух точек) (рис. 41). После выполнения команды выделенные ребра подсвечиваются зеленым.

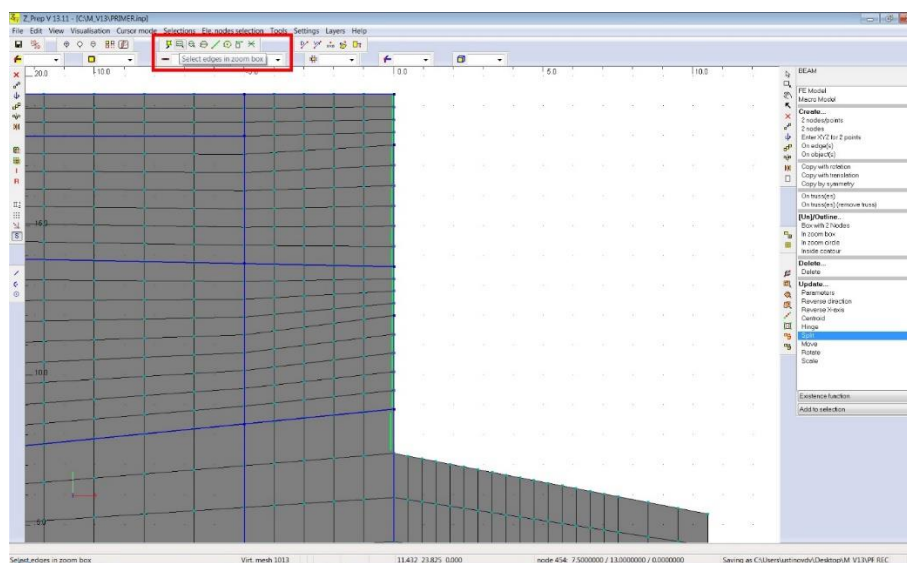


Рис. 41. Выбор ребер, на которых будет создана ограждающая конструкция котлована.

Затем создаем стержневые элементы на выделенных ребрах с помощью команды **FE Model** → **Beam** → **Create** → **On edge(s)**.

Не отменяя выделения, переходим к созданию контакт-элемента на границе стены в грунте и окружающего массива. Проведем это с помощью команды **FE Model** → **Interface** → **Create** → **On continuum elem. edge(s)**. Присваиваем контакт-элементу свой тип материала и функцию существования, аналогичную функции существования ограждающих конструкций (рис. 42).

Характеристики контакт-элемента можно принять в соответствии с табл. 9.1 п. 9.16 СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» (см. приложение 2).

Восстановление скрытых элементов производится иконкой *Restore hidden elements* (пиктограмма с красной буквой R) в левом вертикальном меню.

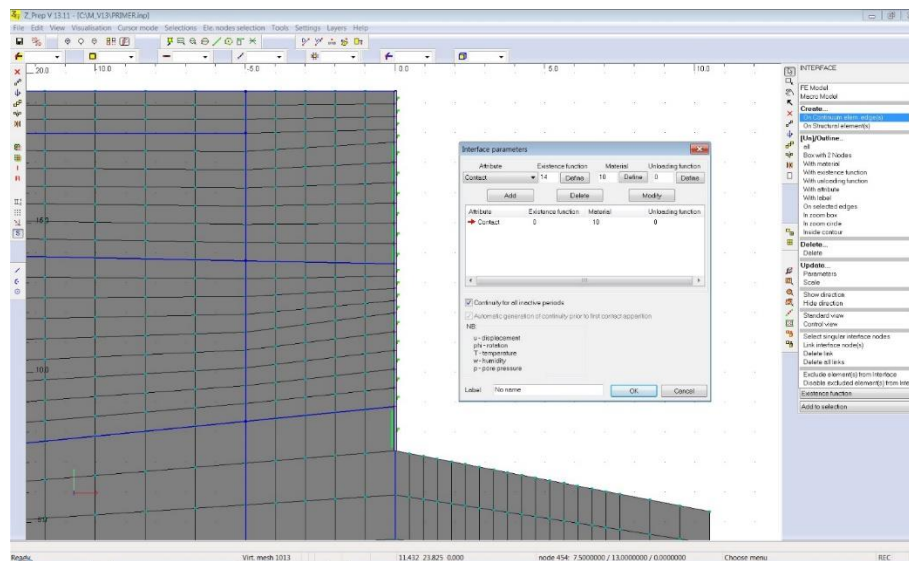


Рис. 42. Создание контакт-элемента и задание его свойств.

В более поздних версиях программы, начиная с Z_Soil v.13, можно воспользоваться альтернативным методом создания контакт-элемента «по границе структурного элемента». При этом необходимо выделить требуемый структурный элемент (в нашем примере это ограждающие конструкции котлована, созданные из *BEAM*-элементов). При помощи команды *INTERFACE* → *On Structural element(s)* есть возможность создать контактную поверхность по одной или обеим граням элемента с заданием различных характеристик по каждой из них. При этом необходимо задать номер материала ИНТЕРФЕЙСА и присвоить требуемую функцию существования (рис. 43).

После создания контакт-элементов может потребоваться восстановление связи в узле на нижней границе балочных элементов. Для этого будет необходимо выделить требуемый узел (*node*) и при помощи команды *INTERFACE* → *Link interface node(s)* восстановить связь.

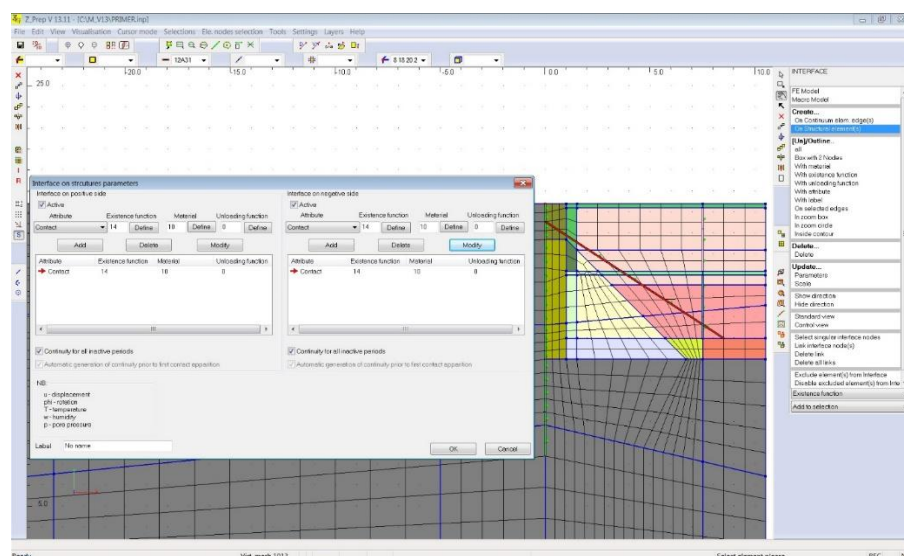


Рис. 43. Создание контакт-элементов на структурном элементе.

Также необходимо создать стандартное закрепление сетки (рис. 44). Для этого необходимо воспользоваться командой *FE Model* → *SOLID BC* → *Create* → *On box*.

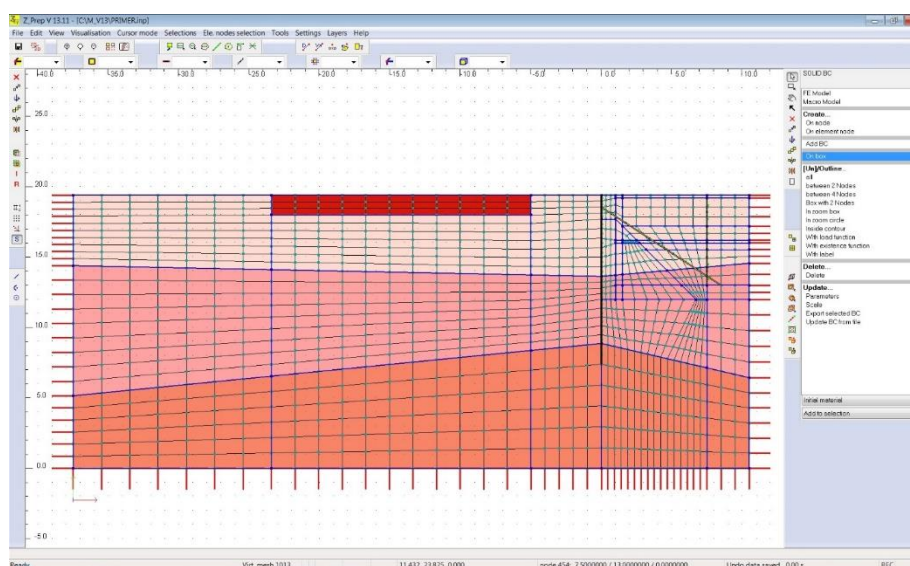


Рис. 44. Создание стандартных граничных условий.

Далее прикладываем эквивалентные нагрузки от верхних частей строений:

- нагрузку к фундаменту существующего здания. Нагрузку от существующего здания будем задавать как распределенную из условия 15 кН/м^2 с каждого этажа здания;
- нагрузку с временной функцией к строящемуся зданию (рис. 45). Нагрузка прикладывается из расчета на 1 пог. м. Для строящегося здания нагрузка от верхнего строения передается на стены и колонны, а ее величина приводится с учетом размеров сечений.

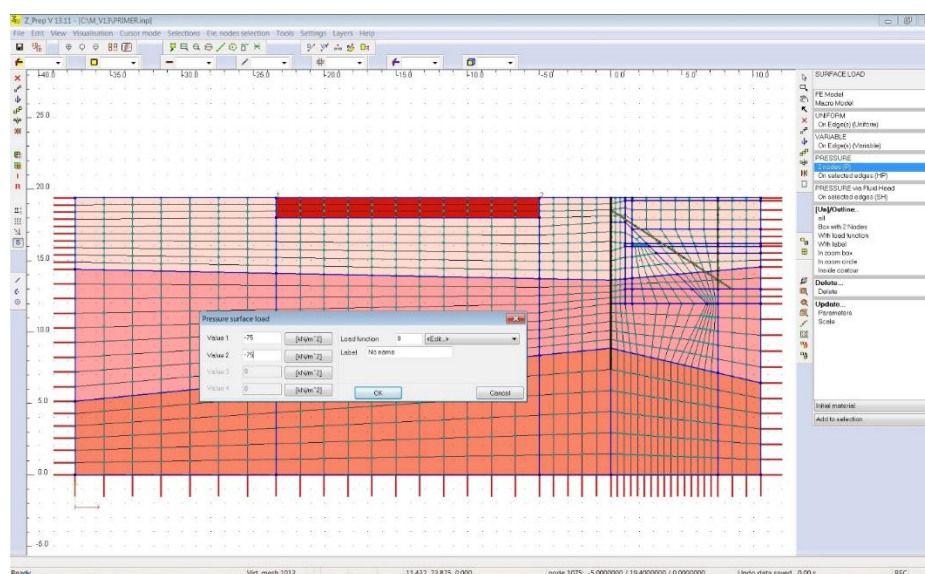


Рис. 45. Приложение нагрузки от существующего здания.

Следующим шагом в создании расчетной схемы будет задание прочностных и деформационных характеристик для всех задействованных материалов. Характеристики грунтового массива принимаются из задания. Характеристики материалов конструктивных элементов принимаются по справочным величинам. Кроме этого, необходимо задать временную функцию приложения

нагрузки. Задаем время приложения нагрузки на следующем временном шаге после завершения обратной засыпки. Задание свойств материалов, функций нагружения и существования, а также анализ результатов производится по аналогии с ранее приведенным примером.

Проведя расчет, можно переходить к анализу полученных результатов.

Необходимо выписать величины максимальных горизонтальных перемещений ограждающей конструкции, величины дополнительных осадок и высчитать крены прилегающего строения на период отрывки котлована и завершения моделирования.

- величина максимальных горизонтальных перемещений ограждающей конструкции – 1,51 см.
- величина максимальных дополнительных осадок существующего строения на период отрывки котлована – 0,85 см.
- относительная разность осадок на период отрывки котлована $\Delta s/L$ – 0,0046.
- величина максимальных дополнительных осадок существующего строения на период завершения моделирования – 2,15 см.
- относительная разность осадок на период завершения моделирования $\Delta s/L$ – 0,0092.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что принятая распорная конструкция и конструкция ограждения котлована эффективны. Возведение сооружения по принятой технологической схеме возможно, и полученные величины прогнозных дополнительных осадок прилегающего строения на период завершения отрывки котлована и завершения строительства не превышает максимально допустимых значений, предусмотренных в Приложении Л СП 22.13330.2011 (приложение 1).

При оформлении отчета приводятся следующие графические материалы:

- расчетная схема (рис. 46);
- схема распределения перемещений на период отрывки котлована (деформированная схема) (рис. 47);
- схема распределения перемещений на период завершения моделирования (деформированная схема) (рис. 48);
- распределение горизонтальных перемещений на период отрывки котлована (рис. 49);
- распределение вертикальных перемещений на период отрывки котлована (рис. 50);
- распределение вертикальных перемещений на период завершения моделирования (рис. 51).

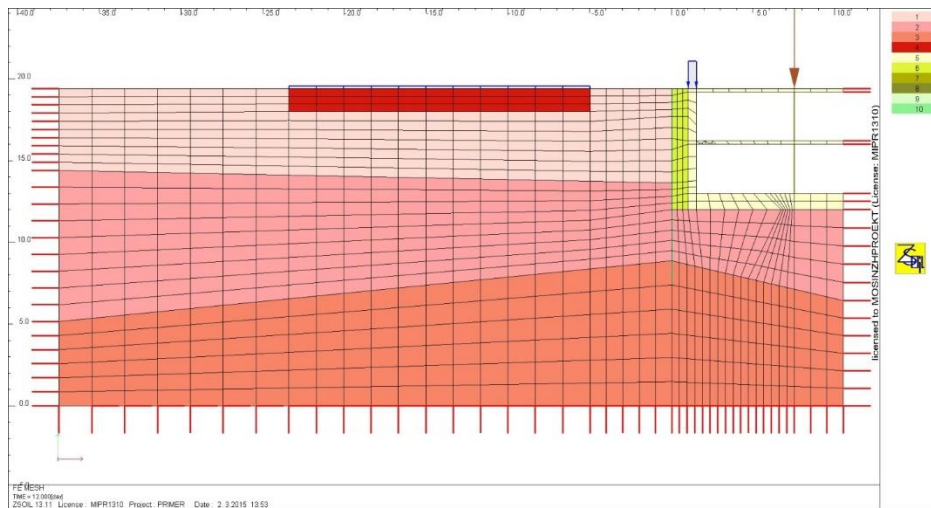


Рис. 46. Расчетная схема.

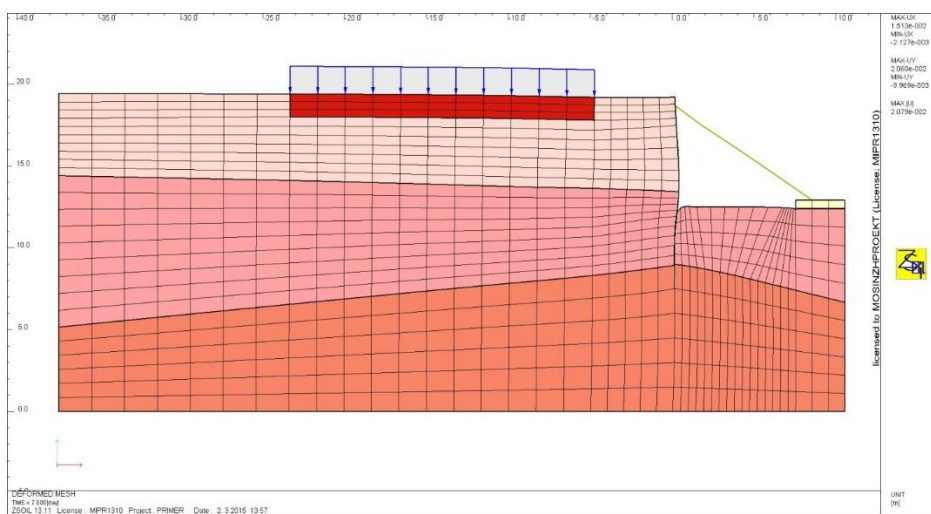


Рис. 47. Схема распределения перемещений на период отрывки котлована.

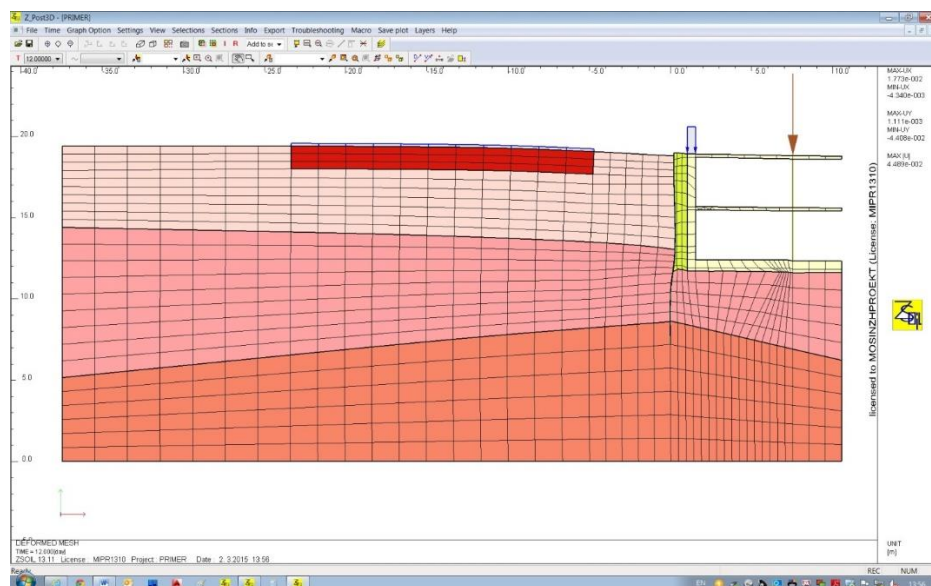


Рис. 48. Схема распределения перемещений на период завершения моделирования.

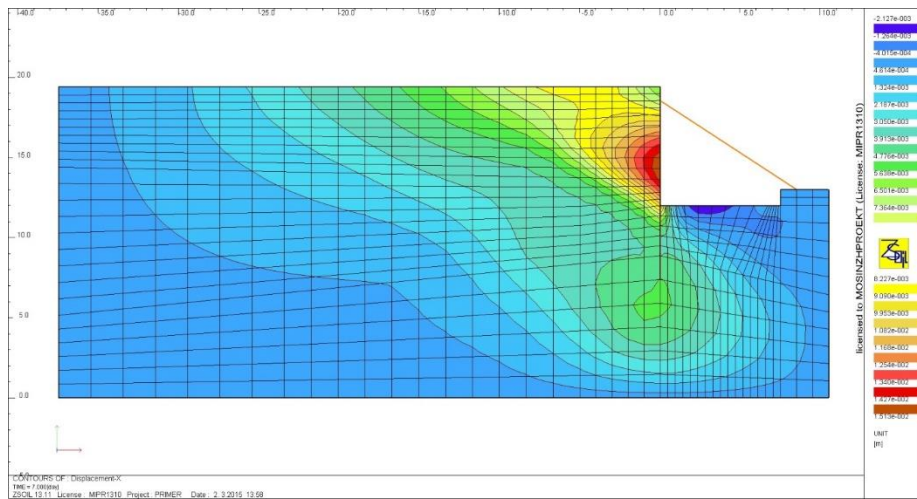


Рис. 49. Распределение горизонтальных перемещений на период отрывки котлована.

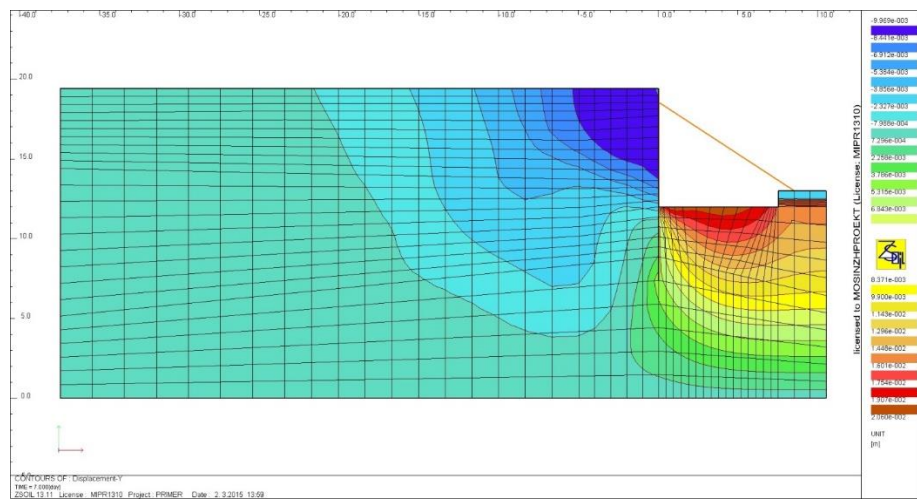


Рис. 50. Распределение вертикальных перемещений на период отрывки котлована.

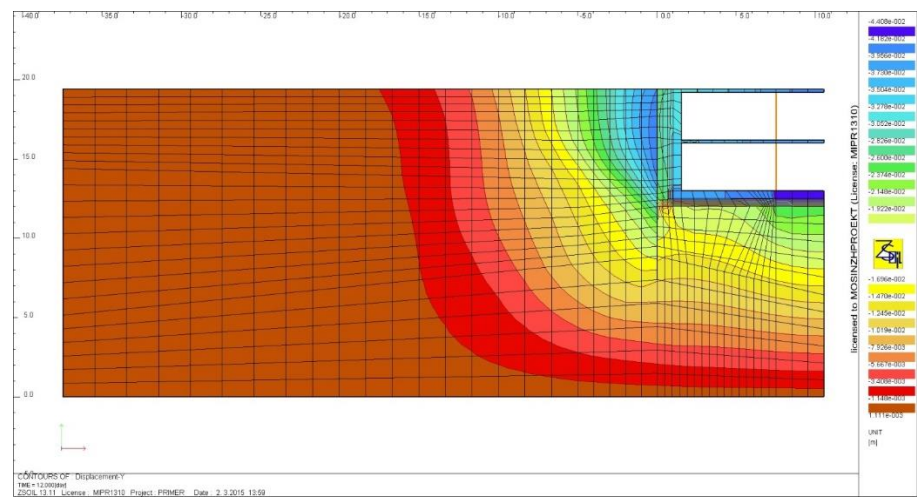


Рис. 51. Распределение вертикальных перемещений на период завершения моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Власов, С.Н.* Подземные сооружения / В.П. Абрамчук, С.Н. Власов, В.М. Мостков. М. : ТИИМР, 2006. – 464 с.
2. *Теличенко, В.И.* Современные технологии комплексного освоения подземного пространства мегаполисов: монография / В.И. Теличенко [и др.] М. : АСВ, 2010. – 322 с.
3. *Зерцалов М.Г.* Использование подземного пространства / М.Г. *Зерцалов, ДС. Конюхов, В.Е. Меркин.* М. : АСВ, 2015. – 416 с.
4. Data Preparation & Tutorials Z_Soil.PC manual [Подготовка данных и Описание Z_Soil.PC. Инструкция].
5. СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений».
6. Рекомендации по проектированию и устройству оснований и фундаментов при возведении зданий вблизи существующих в условиях плотной застройки в г. Москве. М. : Москомархитектура, 1999.
7. <http://www.zace.com/>

Справочная информация для выполнения курсовой работы

Предельные дополнительные деформации основания фундаментов сооружений окружающей застройки, расположенных в зоне влияния нового строительства или реконструкции*

Сооружения	Категория технического состояния зданий	Предельные дополнительные деформации основания фундаментов	
		Относительная разность осадок $(\Delta s/L)_u$	Максимальная осадка $s_{ad,u}^{max}$, см
1 Гражданские и производственные одноэтажные и многоэтажные здания с полным железобетонным каркасом	I	0,0020	5,0
	II	0,0010	3,0
	III	0,0007	2,0
2 Многоэтажные бескаркасные здания с несущими стенами из крупных панелей	I	0,0016	4,0
	II	0,0008	3,0
	III	0,0005	2,0
3 Многоэтажные бескаркасные здания с несущими стенами из крупных блоков или кирпичной кладки без армирования	I	0,0020	4,0
	II	0,0010	3,0
	III	0,0007	1,0
4 Многоэтажные бескаркасные здания с несущими стенами из кирпича или бетонных блоков с арматурными или железобетонными поясами	I	0,0024	5,0
	II	0,0015	3,0
	III	0,0010	2,0
5 Многоэтажные и одноэтажные здания исторической застройки или памятники истории, архитектуры и культуры с несущими стенами из кирпичной кладки без армирования	I	-	-
	II	0,0006	1,0
	III	0,0004	0,5
6 Высокие жесткие сооружения и трубы	I	0,004	5,0
	II	0,002	3,0
	III	0,001	2,0

Примечания

1 $s_{ad,u}^{max}$ - значение предельной дополнительной максимальной осадки основания отдельно стоящих фундаментов на естественном основании или свайных ростверков, в том числе при усилении оснований и фундаментов сооружения окружающей застройки.

2 Для сооружений с категорией технического состояния IV - предаварийное или аварийное дополнительные деформации основания фундаментов не допускаются.

* СП 22.13330.2011 Приложение Л

Справочная информация для выполнения курсовой работы

Силы трения и сцепления на контакте стена - грунтовый массив**

Для проверки возможности сдвига на контакте конструкций с грунтом должны быть определены силы предельного сопротивления сдвигу, которые зависят от характеристик трения и сцепления на контакте.

Силы трения и сцепления на контакте «конструкция - грунтовый массив» должны определяться в зависимости от значений прочностных характеристик грунта, гидрогеологических условий площадки, материала конструкции, технологии ее устройства.

Для нескальных грунтов допускается принимать следующие расчетные значения прочностных характеристик на контакте «конструкция - грунтовый массив»:

удельное сцепление $c_k = 0$;

угол трения грунта по материалу конструкции $\delta = \gamma_k \varphi$, где φ - угол внутреннего трения грунта, γ_k - коэффициент условий работы, принимаемый по таблице 1

Таблица 1

Коэффициент условий работы

Материал конструкции	Технология устройства и особые условия	γ_k
Бетон, железобетон	Монолитные гравитационные и гибкие подпорные стены, бетонизируемые насухо. Монолитные фундаменты	0,67
	Монолитные гибкие подпорные стены, бетонизируемые под глинистым раствором в грунтах естественной влажности. Сборные гравитационные стены и фундаменты	0,50
	Монолитные гибкие стены, бетонизируемые под глинистым раствором в водонасыщенных грунтах. Сборные гибкие стены, устраиваемые под глинистым раствором в любых грунтах	0,33
Металл, дерево	В мелких и пылеватых водонасыщенных песках	0
	В прочих грунтах	0,33
Любой	При наличии вибрационных нагрузок на основание	0

** П 9.16 СП 22.13330.2011