



Модели грунтов, реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D

Е.С. Егорова¹, А.В. Иоскевич², В.В. Иоскевич³, К.Н. Агишев⁴, В.Ю. Кожевников⁵

^{1,2,4}ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, Россия, Санкт-Петербурге, Политехническая ул., д. 29.

³ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», 190005, Россия, Санкт-Петербурге, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

⁵ООО «СПб-Гипрошахт», 197101, Россия, Санкт-Петербурге, Чапаева ул., д. 15 А.

Информация о статье	История	Ключевые слова
УДК 69.04	Подана в редакцию 7 марта 2016	СП 22.1330.2011; модель Пастернака; модель линейно деформируемого полупространства; модель упругопластической среды; SCAD; Пастернак; Запрос; КРОСС; Plaxis

АННОТАЦИЯ

В статье производится определение и сравнение значений осадок сооружения, полученных по результатам применения нормативной методики СП 22.13330.2011 с осадками, полученными по результатам применения различных моделей грунтов, реализованных в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D. В статье приводятся теоретические основы каждой из рассматриваемых моделей. В качестве рассматриваемых моделей используются реализованные в SCAD Office модель Пастернака и модель с переменными по площади коэффициентами постели (КРОСС), а также реализованные в Plaxis 3D модель линейно деформируемого полупространства и модель упругопластической среды. Для оценки влияния величины нагружения на осадку рассмотрены 4 варианта нагружения перекрытий здания равномерно распределенной нагрузкой. В каждом варианте нагружения присутствует и нагрузка от собственного веса конструкций. Произведена оценка полученных результатов.

Содержание

1.	Введение	32
2.	Обзор литературы	32
3.	История развития моделей грунтов	33
4.	Постановка задачи	38
5.	Аналитическое решение по СП 22.13330.2011	38
6.	Численное решение	41
7.	Сравнение полученных результатов	50
8.	Выводы	53

¹ Контактный автор:

² +7 (911) 088 3372, egorovaes@hotmail.com (Егорова Евгения Сергеевна, магистрант)

³ +7 (911) 819 1927, anton-ioskevich@mail.ru (Иоскевич Антон Владимирович, магистрант)

⁴ +7 (905) 282 9498, lvasily95@gmail.com (Иоскевич Василий Владимирович, студент)

⁵ +7 (911) 020 4184, kamil_agishev@mail.ru (Агишев Камил Наилевич, магистрант)

+7 (921) 426 2564, vladimir_kozhevnikov92@mail.ru (Кожевников Владимир Юрьевич, инженер-проектировщик)

1. Введение

В настоящее время все большее распространение получает применение численных расчетов основания сооружений с использованием программно-вычислительных комплексов, таких как SCAD Office, Лира, Robot Structural Analysis, Plaxis, Ansys, Abaqus и других. В данных программных комплексах реализовано большое количество различных методик расчета грунтового основания.

Целью данной статьи является сравнение значений осадок сооружения для одного частного расчетного случая, полученных по результатам применения нормативной методики [1], с осадками, полученными по результатам применения различных моделей грунтов реализованных в программных комплексах SCAD Office и Plaxis.

SCAD Office — это интегрированный комплекс прочностного анализа и проектирования конструкций. В состав комплекса входят универсальная программа конечно-элементного анализа SCAD, а также ряд функционально независимых проектно-расчетных и вспомогательных программ. Программа SCAD предназначена для расчета сооружения в целом. Другие проектно-расчетные программы комплекса ориентированы на выполнение детальных проверочных расчетов несущих строительных конструкций (отдельных балок, колонн, плит) в соответствии с действующими нормами. Основы работы с ним изложены в [30].

Plaxis – это программная система конечно-элементного анализа, используемая для решения задач инженерной геотехники и проектирования, представляет собой пакет вычислительных программ для конечно-элементного расчета напряженно-деформированного состояния сооружений, фундаментов и оснований.

В пакет Plaxis в настоящее время входит ряд прикладных вычислительных программ:

Plaxis 2D предназначена для статических расчетов напряженно-деформированного состояния, устойчивости и фильтрации в условиях плоской задачи;

Plaxis 3D предназначена для трехмерных расчетов деформаций и устойчивости пространственных строительных объектов совместно с грунтовым основанием;

Dynamics – дополнительный модуль к программам Plaxis 2D и Plaxis 3D для динамических расчетов с циклическими (вибрационными), импульсными (ударными) и сейсмическими нагрузками;

PlaxFlow – дополнительный модуль к программам Plaxis 2D и Plaxis 3D для расчетов сложных режимов установившейся и неустойчивой фильтрации в насыщенных и ненасыщенных водой грунтовых массивах;

Thermal – дополнительный модуль к программе Plaxis 2D для совместных деформационных расчетов и расчетов стационарного и нестационарного теплового потока.

Основы работы с ним изложены в [31, 32].

В данной статье в сравнение берутся реализованные в SCAD Office модели грунтов:

- Модель Пастернака;
- Модель переменных по площади коэффициентов постели (КРОСС).

Реализованные в Plaxis:

- Модель линейно деформируемого полупространства;
- Модель упругопластической среды.

2. Обзор литературы

В связи с отсутствием в настоящее время общепризнанной единой методики моделирования пространственных конструкций зданий совместно с грунтовыми основаниями актуальным остается вопрос, связанный с выбором модели грунтового основания. До последнего времени расчеты взаимодействия здания и основания выполнялись исключительно в упругой постановке, причем с использованием упрощенных методик, использующих коэффициенты постели. Это спровоцировало множество исследований, связанных со сравнением данных упрощенных методик [33-37], реализованных в программных комплексах.

С появлением и распространением таких программных комплексов, как Abaqus, Ansys и Plaxis 3D проектировщикам была предоставлена возможность моделировать пространственные конструкции зданий с использованием более сложных моделей грунтов [20, 21, 27, 38, 39]. Так же появилось множество исследований, сравнивающих результаты расчетов по упрощенным моделям и более сложным моделям грунтов [9, 10, 14-17].

В данной статье рассматривается использование наиболее распространенных на практике моделей грунтов для одного из расчетных случаев, подобного сочетания моделей не было в представленных выше исследованиях, также авторами произведена оценка влияния нагружения на значения осадок.

3. История развития моделей грунтов Модель Винклера

С вступлением в более активную фазу технического прогресса и, как следствие, возросшего числа гибких конструкций на упругом основании – сначала железнодорожных рельсов и шпал, а затем и железобетонных фундаментов зданий – возникла необходимость более внимательно подойти к оценке реактивных свойств грунтов. Возникло естественное предположение, что между осадкой и реактивным давлением грунта существует прямая зависимость.

Следовательно, появилось положение

$$p = K \cdot Y, \quad (1.1)$$

где Y – осадка; K – коэффициент пропорциональности («коэффициент постели»), зависящий только от физических свойств грунта; p – реактивное давление.

На основе этого положения появилась гипотеза Винклера, которая впервые была применена для расчета железнодорожных путей в 1868 году.

Коэффициент K определяется экспериментально и имеет размерность силы отнесенной к объему. Для реальных грунтовых условий значения коэффициента постели K определяются весьма условно, поэтому в справочных таблицах для одних и тех же грунтов обычно приводят диапазон возможного изменения коэффициента постели [2].

С физической точки зрения модель Винклера может быть представлена множеством несвязных между собой одинаковых упругих пружин, опирающихся на абсолютно жесткое основание (рис. 1).

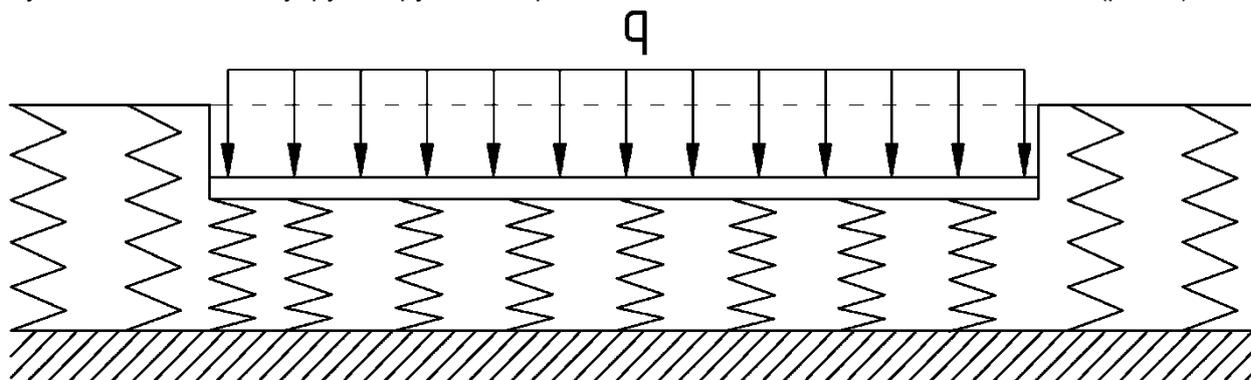


Рисунок 1. Физическое представление модели Винклера

Недостатки модели Винклера:

1) Деформация основания происходит только в области, приложенной к нему нагрузки. Это достаточно хорошо отражает реальные свойства рыхлых и несвязных оснований, но совершенно не подходит для плотных и, тем более, скальных оснований из-за не учета деформаций основания, которые происходят за пределами области приложения нагрузки. Согласно наблюдениям грунт оседает а, следовательно, напряжен и за пределами фундамента;

2) На практике равномерно нагруженные балки и плиты проседают не равномерно (как в модели Винклера), а, как правило, выпуклостью вниз;

3) Значение коэффициента постели K зависит от размеров штампа, которым производится испытание для определения этой величины. Коэффициент постели K получается тем больше, чем меньше площадь штампа. Табличные значения не имеют определенных значений, а представлены диапазонами значений.

Модель линейно деформируемого полупространства

Недостатки модели Винклера сподвигнули ученых к разработке модели линейно деформируемого полупространства, которая и поныне используется в нормативных документах, в том числе и СП 22.13330.2011 [1].

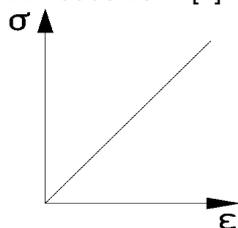


Рисунок 2.

В основу модели линейно деформируемого полупространства положен закон Гука – линейная зависимость между напряжениями и деформациями и, что весьма существенно, представления об идеальной упругости материала – полное восстановление деформаций при снятии нагрузки, т. е. в условиях одноосного простого сжатия или растяжения (рис. 2)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

где ε – осевая деформация; E – модуль упругости.

Для грунтов, наоборот, характерно наличие преимущественно остаточных деформаций. Поэтому модель линейно деформируемого полупространства может применяться только на этапе однократного нагружения грунтовой среды без последующей разгрузки, что для большинства практических строительных случаев статических нагрузок и происходит в действительности.

При использовании модели линейно деформируемого полупространства любая задача сводится к решению системы уравнений, в состав которой, как известно из курса теории упругости, входят статические уравнения, геометрические соотношения и физические уравнения.

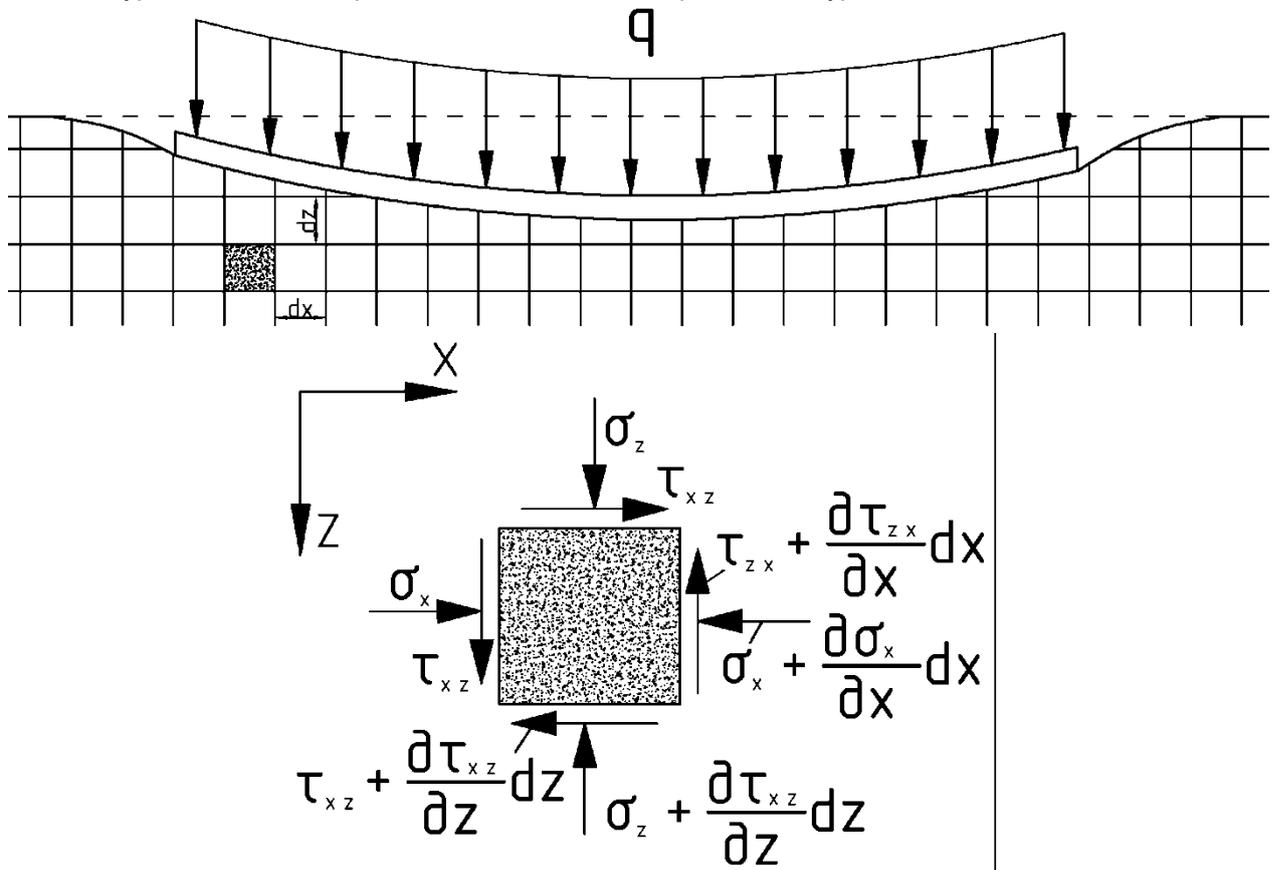


Рисунок 3. Представление напряжений в бесконечно малом элементе среды

В случае плоской задачи уравнения равновесия (статические уравнения) бесконечно малого элемента среды (рис. 3) имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{zx}$ – нормальные и касательные напряжения по граням dx, dz элемента среды; X и Z – проекции объемных сил на оси X и Z соответственно.

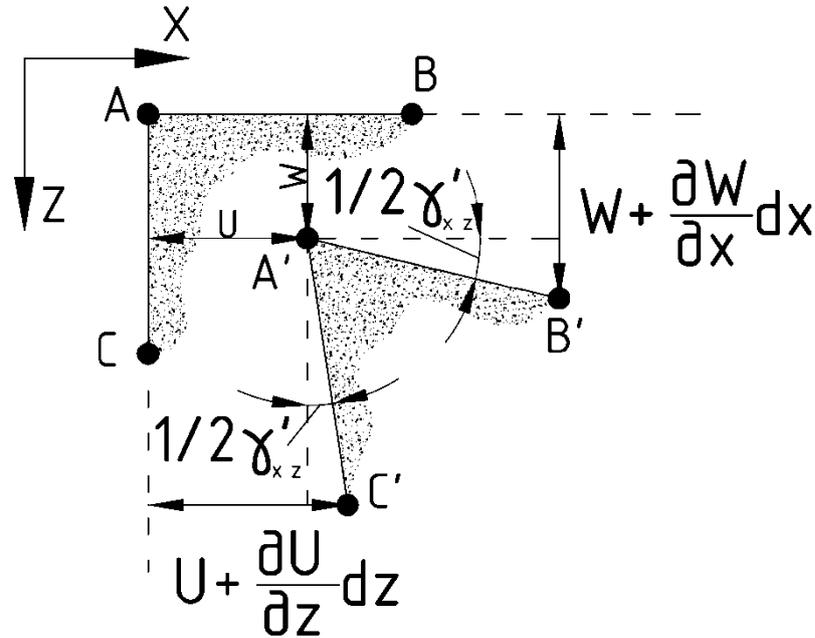


Рисунок 4. Представление деформаций бесконечно малого элемента среды

Поскольку в большинстве случаев деформации могут считаться малыми, как правило, членами

$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2$, $\left(\frac{\partial U}{\partial x} \cdot \frac{\partial U}{\partial z}\right)$ и т. д. пренебрегают, а геометрические соотношения для плоской задачи

принимают в виде

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z}; \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}. \quad (1.3)$$

Физические уравнения характеризуют зависимости между напряжениями и деформациями и принимаются в виде соотношения обобщенного закона Гука:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} \cdot [(1 - \nu^2) \cdot \sigma_x - \nu \cdot (1 + \nu) \cdot \sigma_z]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \cdot [(1 - \nu^2) \cdot \sigma_z - \nu \cdot (1 + \nu) \cdot \sigma_x]; \\ \gamma_{xz} &= \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot \tau_{xz}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Таким образом, в общем случае для плоской задачи из восьми уравнений определяются неизвестные три компоненты напряжений (σ_x , σ_z , τ_{xz}), три компоненты деформаций (ε_x , ε_z , γ_{xz}) и две компоненты перемещений (U , W). Для условий пространственной задачи таких уравнений и неизвестных будет 15.

Модель упругопластической среды

Эта модель представляет собой синтез модели линейно деформируемого полупространства и модели среды теории предельного равновесия [27], что предполагает наличие в грунтовой среде как области среды линейно деформируемого полупространства, так и области среды теории предельного равновесия. (рис. 5)

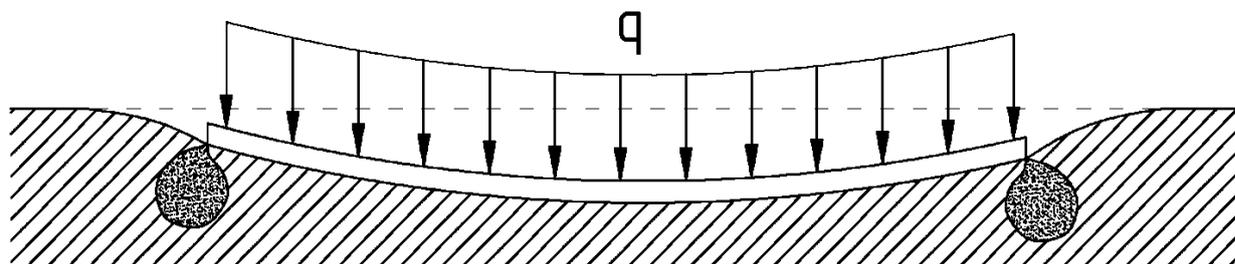


Рисунок 5. Представление модели упругопластической среды

Система уравнений, описывающая напряженное состояние такой среды имеет следующий вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

$$\nabla^2 \cdot (\sigma_x + \sigma_z) = -\frac{1}{1-\nu} \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial z} \right) \quad (1.6)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_2 + 2 \cdot \sigma_c) \cdot \sin(\varphi), \quad (1.7)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа, который определяется согласно формуле

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (1.8)$$

Уравнения равновесия (1.5) должны выполняться по всей грунтовой среде, уравнения совместности (1.6) – только в упругой области, а уравнения (1.7) только в области предельного равновесия.

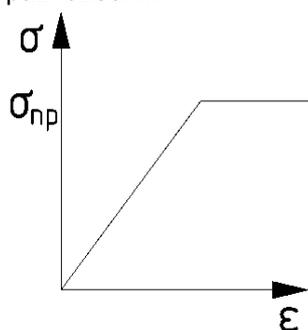


Рисунок 6. соответственно.

Данная модель грунтовой среды может быть наглядно проиллюстрирована на примере одноосного сжатия (рис. 6). В этом случае после начального этапа линейных деформаций образец грунта переходит при $\sigma_{пр}$ в предельное состояние.

В качестве основного условия предельного равновесия наиболее широко применяют условие, сформулированное Ш. Кулоном, по которому на площадках возможного начального скольжения касательные напряжения (τ) связаны с нормальными напряжениями (σ) зависимостью

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + c, \quad (1.9)$$

где φ и c – угол внутреннего трения и сцепление грунта соответственно.

Зависимость Кулона (1.9) является частным случаем появившейся позднее теории прочности Мора, который принял, что сопротивление сдвигу по какой-либо площадке является функцией нормального напряжения, т. е.

$$\tau = f(\sigma). \quad (1.10)$$

Из-за этого условия данную модель зачастую также называют моделью Кулона-Мора.

Данная модель рекомендуется для приближенной оценки напряженно-деформированного состояния [11]. Она учитывает основные свойства грунта, такие как упругое поведение при малых нагрузках, малая жесткость материала при разрушении, условие разрушения и упругая разгрузка после течения [12].

Усовершенствованные модели, основанные на модели Винклера

В силу сложности и трудоемкости ручных расчетов грунтового основания по моделям линейно деформируемого полупространства и упругопластической среды инженеры не торопились отказываться от применения в расчетах модели Винклера. И поэтому же ученые, оценивая данную потребность, всячески её совершенствовали.

Модель с двумя коэффициентами постели. Модель Пастернака

В данной модели вводится не один, а два коэффициента постели C_1, C_2 . Коэффициент постели C_1 – коэффициент сжатия связывает интенсивность вертикального отпора грунта σ с его осадкой w формулой

$$\sigma = C_1 \cdot w. \quad (1.11)$$

А коэффициент постели C_2 – коэффициент сдвига дает возможность выразить интенсивность вертикальной силы сдвига t (или изгибающего момента) в виде произведения C_2 на производную осадки в соответствующем направлении

$$t = C_2 \cdot \frac{\partial w}{\partial x}. \quad (1.12)$$

Ввод коэффициента C_2 исключает недостаток теории Винклера связанный со сложностями определения значений коэффициентов постели, при этом коэффициент C_1 не является коэффициентом постели K в модели Винклера.

Дифференциальное уравнение осадочной поверхности выглядит следующим образом [3]:

$$C_1 \cdot w - C_2 \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) - p = 0 \quad (1.13)$$

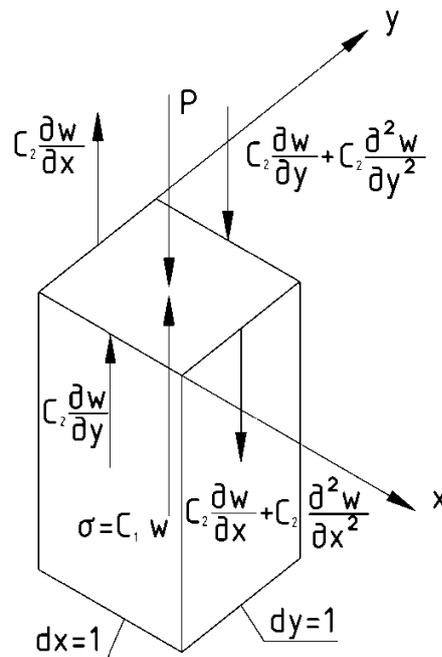


Рисунок 7. Представление модели с двумя коэффициентами постели

Определение значений коэффициентов C_1, C_2 по модели Пастернака реализовано в программе-сателлите ЗАПРОС и программе-сателлите Пастернак, входящих в ПК SCAD Office.

Согласно [5] определение коэффициентов C_1 и C_2 по модели Пастернака происходит следующим образом:

$$C_1 = \left(\int_0^H \frac{dz}{E(z)} \right)^{-1}; \quad C_2 = \left(\int_0^H \frac{dz}{E(z)} \right)^{-2} \cdot \int_0^H \frac{1}{E(z)} \cdot \int_0^z G(z) \cdot \int_z^H \frac{dz}{E(z)}, \quad (1.14)$$

где $E(z), G(z)$ – соответственно приведенные модули деформации и сдвига на глубине z .

Приведенные модуль деформации и модуль сдвига определяются по формулам:

$$E = E_0 \frac{1 - \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}; G = \frac{E_0}{2 \cdot (1 + \nu)},$$

где E_0 – модуль деформации; ν – коэффициент Пуассона; H – полная толщина многослойного основания $H = \sum_{i=1}^n h_i$.

Модель с переменными по площади коэффициентами постели

Данная модель разработана специалистами НИИОСП им. Герсеванова [6] и именно в виде переменных коэффициентов постели реализована в программе-сателлите КРОСС [7].

Данный метод расчета осадок основан на послойном суммировании с учетом структурной прочности грунта в соответствии с формулой:

$$w = \int_{z_f}^{z_d} \beta \frac{\Delta \sigma}{E} dz, \quad (1.15)$$

где z – вертикальная координата, возрастающая вниз; z_f – координата подошвы; $z_d = z_f + H$ – нижняя граница интегрирования (послойного суммирования); H – глубина сжимаемой толщи; β – коэффициент, учитывающий степень боковой стесненности вертикального сжатия грунта; $\Delta \sigma$ – приращение вертикального нормального напряжения от действия нагрузки на основание; E – модуль деформации.

Авторы методики на основе анализа возможных способов задания входящих в формулу (1.15) величин принимают такие способы, которые обеспечивают оптимальное, по мнению авторов, сочетание простоты и точности расчета.

4. Постановка задачи

4.1. Конструктивное решение

Рассмотрим представленные модели грунтов на примере расчета трехэтажного каркасного здания с перекрестным расположением ригелей и размерами в плане 18x18 м, шаг колонн 6 м. Высота этажей – 3 м. Конструкции каркаса и плиты выполнены из бетона В25. Размеры фундаментной плиты 20x20 м, толщина – 300 мм. Толщина плит перекрытий – 200 мм. Колонны сечением 400x400 мм, ригели сечением 400(б)x600(г) мм.

Для выявления влияния величины нагружения на осадку к расчету принимаем 4 варианта нагружения перекрытий здания равномерно распределенной нагрузкой 0,2, 0,4, 0,8 и 1,6 Т/м². В каждом варианте нагружения присутствует и нагрузка от собственного веса конструкций.

4.2. Грунтовые условия

Характеристики грунтов, вводимые в расчет, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики грунтов

№ слоя	Наименование слоя	Толщина слоя h_i , м	Удельный вес γ_i , Т/м ³	c , кПа	ϕ , град.	E , МПа	Коэффициент Пуассона, ν
1	песок средней крупности	1,3	1,94	0	30	17	0,3
2	суглинок полутвердый	1,3	2,039	17	7	12	0,35
3	суглинок тугопластичный	3,4	2,192	19	17	20	0,35
4	суглинок мягкопластичный	2,7	2,08	20	5	16	0,35
5	суглинок полутвердый	6,3	2,09	79	17	36	0,35

5. Аналитическое решение по СП 22.13330.2011

Определим нижнюю границу сжимаемой толщи основания в соответствии с пунктом 5.6.41 [1]. Нижнюю границу сжимаемой толщи принимают на глубине $z = H_c$, где выполняется условие $\sigma_{zp} = 0,5 \cdot \sigma_{zg}$.

При этом глубина сжимаемой толщи должна быть не меньше H_{min} , равной

$$H_{min} = 4 + 0,1 \cdot b = 4 + 0,1 \cdot 20 = 6 \text{ м,}$$

где $b = 20$ м – ширина фундаментной плиты.

Для определения нижней границы сжимаемой толщи делим грунт основания на слои толщиной h_i , принимаемой не более

$$0,4 \cdot b = 0,4 \cdot 20 = 8 \text{ м.}$$

Среднее давление под подошвой фундамента, p , определяется согласно формуле

$$p = \frac{Q_{св} + Q_{полез}}{A},$$

где $Q_{св}$ – нагрузка от собственного веса конструкций; $Q_{полез}$ – суммарная полезная нагрузка; A – площадь фундаментной плиты.

Определим нагрузку от собственного веса конструкций $Q_{св}$

$$Q_{св} = Q_{фунд.пл.} + Q_{пер.} + Q_{кол.} + Q_{бал.} = 0,3 \cdot 2,5 \cdot 20 \cdot 20 + 3 \cdot (0,2 \cdot 2,5 \cdot 18 \cdot 18) + 48 \cdot (0,4 \cdot 0,4 \cdot 3 \cdot 2,5) + 72 \cdot (0,4 \cdot 0,6 \cdot 6 \cdot 2,5) = 1102,8 \text{ Т}$$

Определим суммарную полезную нагрузку $Q_{полез}$ для каждого из четырех расчетных случаев

$$1) Q_{полез.1} = 4 \cdot (0,2 \cdot 18 \cdot 18) = 259,2 \text{ Т;}$$

$$2) Q_{полез.2} = 4 \cdot (0,4 \cdot 18 \cdot 18) = 518,4 \text{ Т;}$$

$$3) Q_{полез.3} = 4 \cdot (0,8 \cdot 18 \cdot 18) = 1036,8 \text{ Т;}$$

$$4) Q_{полез.4} = 4 \cdot (1,6 \cdot 18 \cdot 18) = 2073,6 \text{ Т.}$$

Определим среднее давление под подошвой фундамента p для каждого из расчетных случаев

$$1) p_1 = \frac{1102,8 + 259,2}{20 \cdot 20} = 3,402 \text{ Т/м}^2;$$

$$2) p_2 = \frac{1102,8 + 518,4}{20 \cdot 20} = 4,053 \text{ Т/м}^2;$$

$$3) p_3 = \frac{1102,8 + 1036,8}{20 \cdot 20} = 5,349 \text{ Т/м}^2;$$

$$4) p_4 = \frac{1102,8 + 2073,6}{20 \cdot 20} = 7,941 \text{ Т/м}^2.$$

Определение напряжений от собственного веса грунта $\sigma_{zg} = \sum_{i=1}^n h_i \cdot \gamma_i$ сведем в таблицу 2.

Таблица 2. Определение напряжений от собственного веса грунта

№ слоя	Толщина слоя h_i , м	Удельный вес γ_i , Т/м ³	$h_i \cdot \gamma_i$	σ_{zg} , Т/м ²	$0,5 \cdot \sigma_{zg}$, Т/м ²
1	1,3	1,94	2,522	2,522	1,261
2	1,3	2,039	2,651	5,173	2,586
3	3,4	2,192	7,453	12,626	6,312
4	2,7	2,08	5,616	18,242	9,120
5	6,3	2,09	13,167	31,409	15,71

Определение средних напряжений в слоях от внешней нагрузки определяется по формуле:

$$\sigma_{zp} = \alpha \cdot p,$$

где α – коэффициент, принимаемый по таблице 5.8 [1] в зависимости от относительной глубины ξ ,

равной $\xi = \frac{2 \cdot z}{b}$; z – глубина от подошвы фундамента, соответствующая середине каждого из слоев.

Таблица 3. Определение средних напряжений в слоях от внешней нагрузки

№ слоя	z, м	ξ	α	$\sigma_{zpi}, \text{Т/м}^2$ ($p_1 = 3,402 \text{ Т/м}^2$)	$\sigma_{zpi}, \text{Т/м}^2$ ($p_2 = 4,053 \text{ Т/м}^2$)	$\sigma_{zpi}, \text{Т/м}^2$ ($p_3 = 5,349 \text{ Т/м}^2$)	$\sigma_{zpi}, \text{Т/м}^2$ ($p_4 = 7,941 \text{ Т/м}^2$)
1	0,65	0,065	0,994	3,382	4,029	5,317	7,893
2	1,95	0,195	0,981	3,337	3,976	5,247	7,790
3	4,3	0,43	0,948	3,225	3,842	5,071	7,528
4	7,35	0,735	0,826	2,810	3,348	4,418	6,559
5	11,85	1,185	0,613	2,085	2,485	3,279	4,868

Ниже приведен пример определения значения нижней границы сжимаемой толщи H_c для случая 4 ($q = 1,6 \text{ Т/м}^2$).

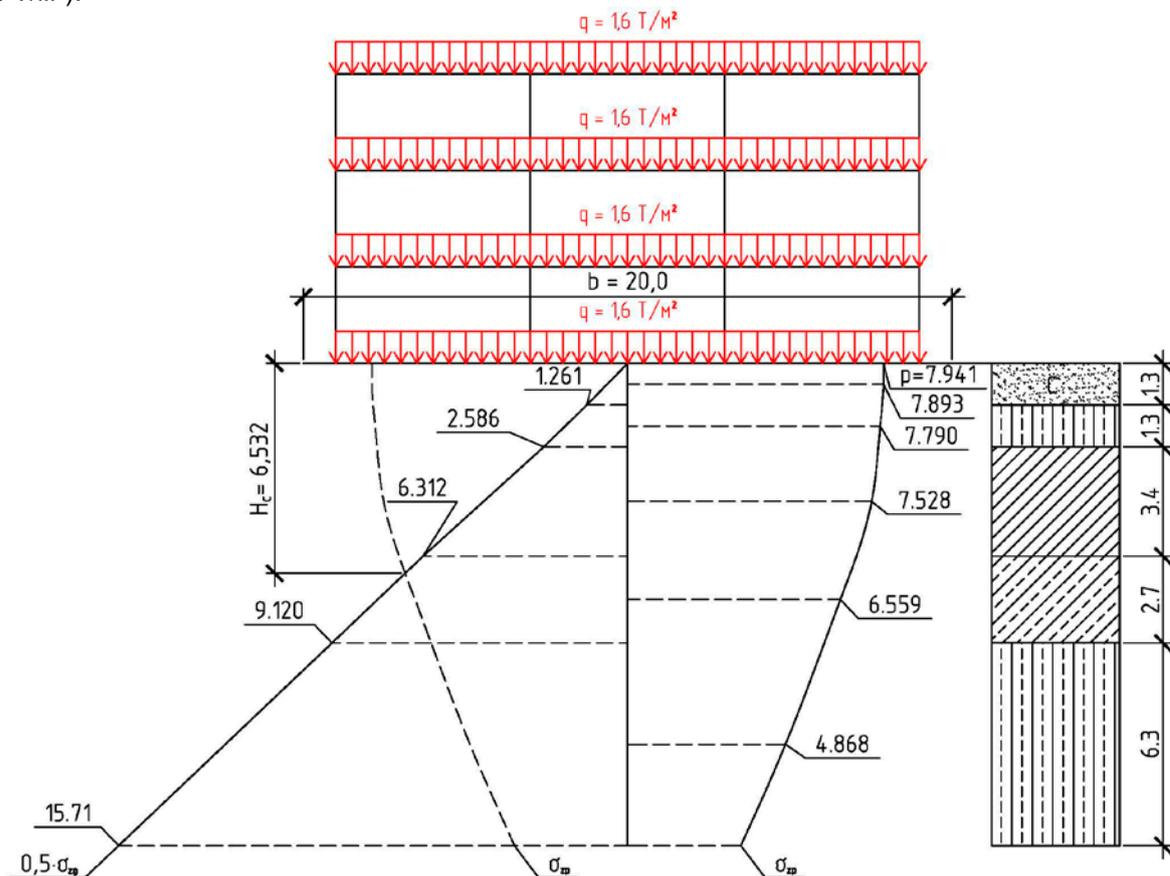


Рисунок 8. Схема распределения вертикальных напряжений в линейно-деформируемом полупространстве для случая 4 ($q = 1,6 \text{ Т/м}^2$)

Для случая 4 ($q = 1,6 \text{ Т/м}^2$) принимаем $H_c = 6,532 \text{ м}$. Для остальных случаев H_c была принята равной $H_{min} = 6 \text{ м}$.

Определим осадку основания s , мм методом послойного суммирования по формуле:

$$s_i = \beta \cdot \sum_{i=1}^{H_c} \frac{\sigma_{zpi} \cdot h_i}{E_i},$$

где β – коэффициент, учитывающий степень боковой стесненности вертикального сжатия грунта [6], в СП 22.13330.2011 принимаемый равным 0,8.

1) Определим осадку для случая 1 ($q = 0,2 \text{ Т/м}^2$)

$$s_1 = 0,8 \cdot \left(\frac{3,382 \cdot 1,3}{1732,926} + \frac{3,337 \cdot 1,3}{1223,242} + \frac{3,225 \cdot 3,4}{2038,736} \right) = 0,00917 \text{ м} = 9,17 \text{ мм};$$

2) Определим осадку для случая 2 ($q = 0,4 \text{ Т/м}^2$)

$$s_2 = 0,8 \cdot \left(\frac{4,029 \cdot 1,3}{1732,926} + \frac{3,976 \cdot 1,3}{1223,242} + \frac{3,842 \cdot 3,4}{2038,736} \right) = 0,01092 \text{ м} = 10,92 \text{ мм};$$

3) Определим осадку для случая 3 ($q = 0,8 \text{ Т/м}^2$)

$$s_3 = 0,8 \cdot \left(\frac{5,317 \cdot 1,3}{1732,926} + \frac{5,247 \cdot 1,3}{1223,242} + \frac{5,071 \cdot 3,4}{2038,736} \right) = 0,01442 \text{ м} = 14,42 \text{ мм};$$

4) Определим осадку для случая 4 ($q = 1,6 \text{ Т/м}^2$)

$$s_4 = 0,8 \cdot \left(\frac{7,893 \cdot 1,3}{1732,926} + \frac{7,790 \cdot 1,3}{1223,242} + \frac{7,528 \cdot 3,4}{2038,736} + \frac{6,559 \cdot 0,532}{1630,989} \right) = 0,02312 \text{ м} = 23,12 \text{ мм}.$$

6. Численное решение

6.1. Реализация в SCAD 21.1

Общий вид модели SCAD представлен на рисунке 9.

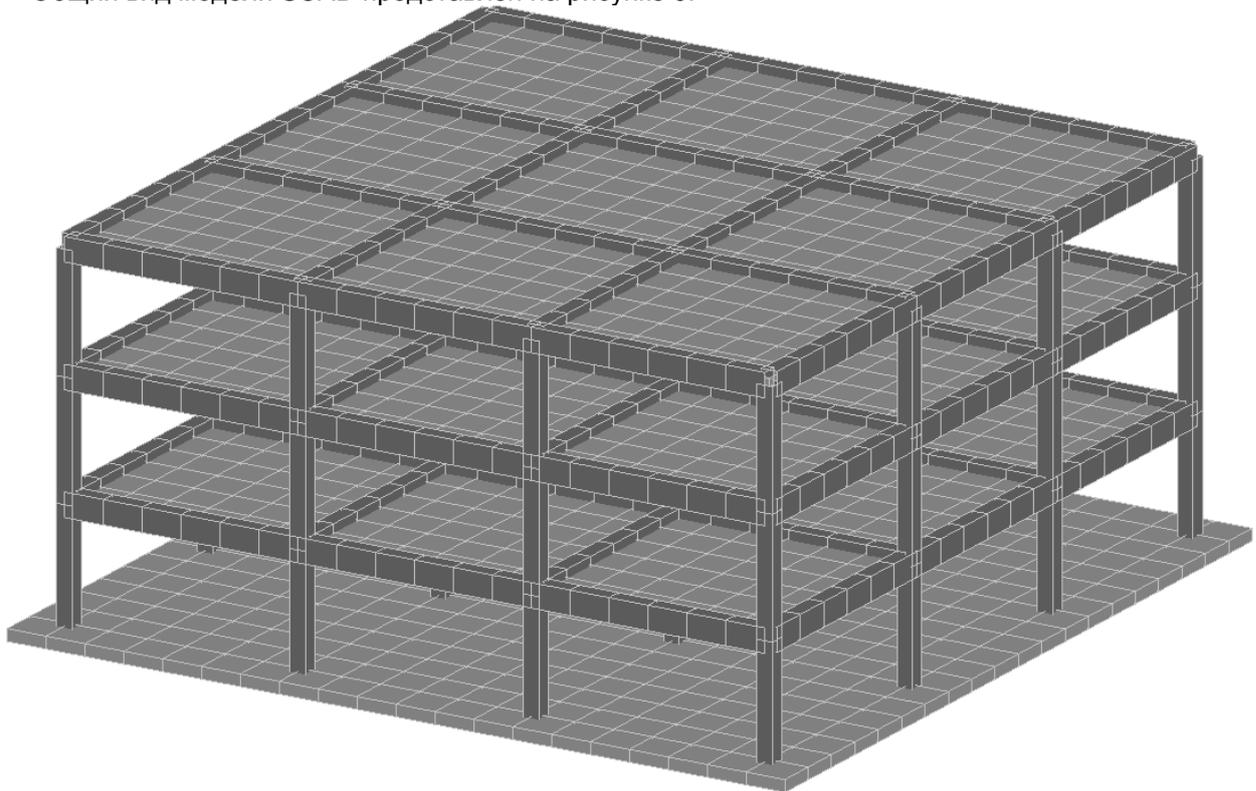


Рисунок 9. Общий вид модели

Созданы 4-ые комбинации загрузок, каждая из которых соответствует определенному расчетному случаю.

6.1.1. Модель с двумя коэффициентами постели.

Модель Пастернака

Полученные при помощи модуля Пастернак значения коэффициентов C_1 и C_2 представлены на рисунке 10. Коэффициенты постели по модели Пастернака можно также рассчитать и при помощи модуля ЗАПРОС, и внутри программы SCAD по нажатию на кнопку «Расчет коэффициентов упругого основания» в окне «Назначение коэффициентов упругого основания пластин».

Ограничиваем грунтовую толщу нижней границей сжимаемой толщи, определенной в процессе аналитического решения.

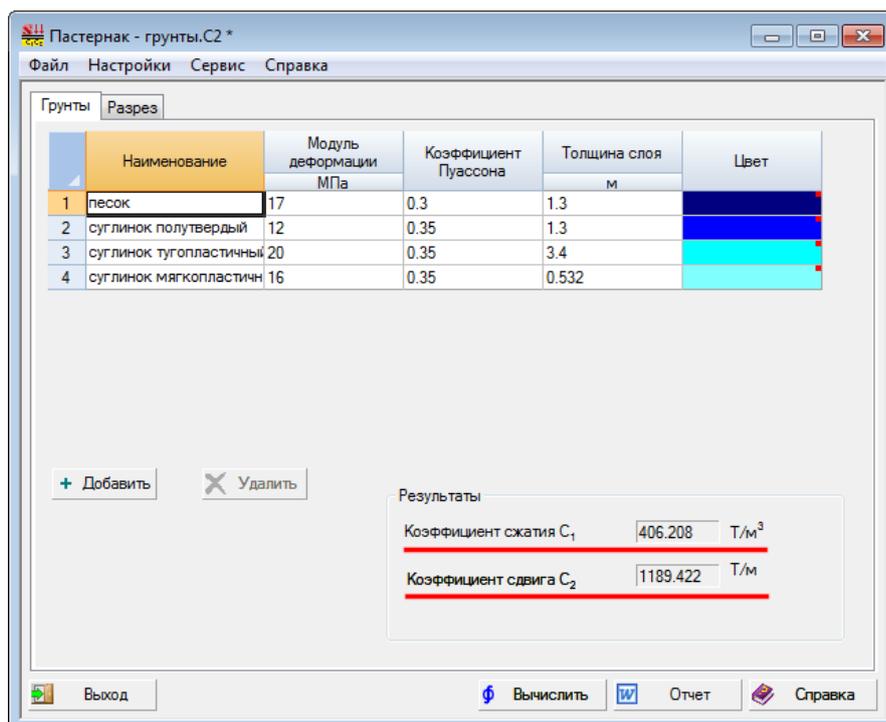


Рисунок 10. Коэффициенты постели по модели Пастернака

Ниже приведена графическая интерпретация результатов расчетов для случая 4 ($q = 1,6 \text{ Т/м}^2$), результаты для остальных расчетных случаев приведены в текстовой форме в таблице 4.

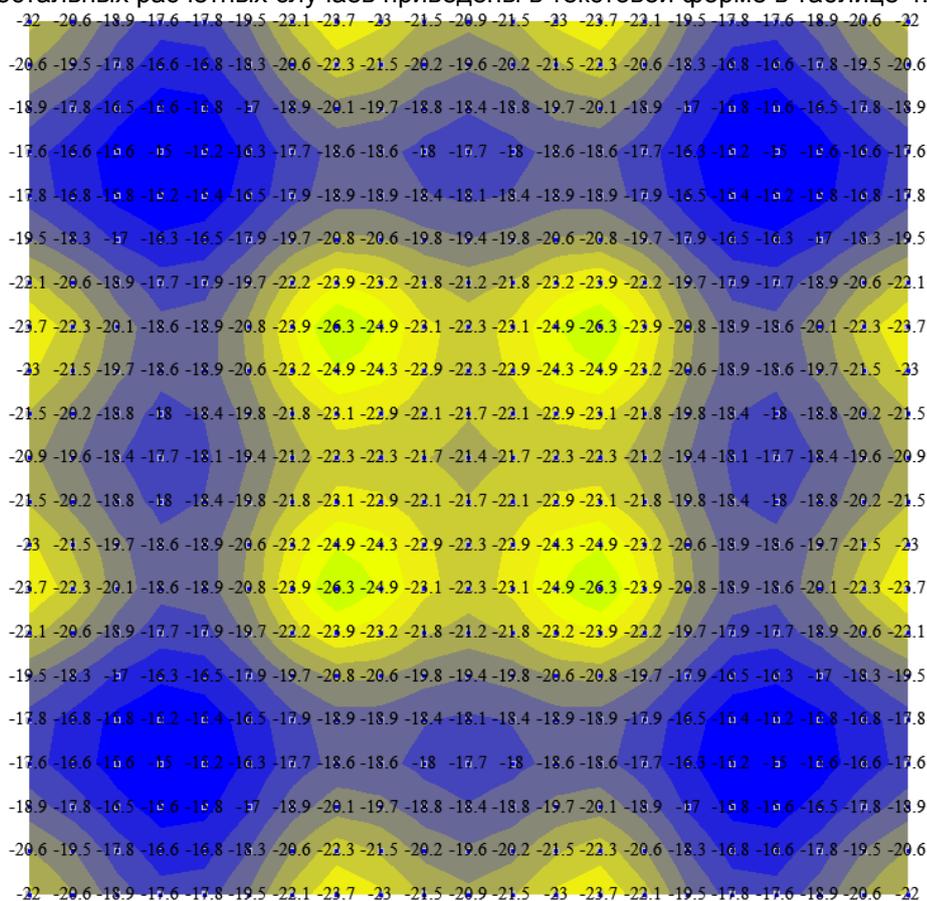


Рисунок 11. Результаты расчета с применением модели Пастернака. Случай 4 ($q = 1,6 \text{ Т/м}^2$)
Максимальная осадка – 26,3 мм.
Минимальная осадка – 15,0 мм.

6.1.2. Модель переменных по площади коэффициентов постели. КРОСС

Значения переменных по площади коэффициентов постели определяются в программе-сателлите КРОСС. Ниже приводятся параметры грунтов, вводимые в расчет.

№	Наименование	Удельный вес Т/м ³	Модуль деформации МПа	Модуль упругости МПа	Коэффициент Пуассона	Коэффициент переуплотнения	Давление переуплотнения МПа	Цвет
1	песок	1.937	17	17	0.3	1	0	Dark Blue
2	суглинок полутв...	2.039	12	12	0.35	1	0.049	Blue
3	суглинок тугопл...	2.192	20	20	0.35	1	0.049	Cyan
4	суглинок мягкоп...	2.08	16	16	0.35	1	0.049	Light Blue
5	суглинок полутв...	2.09	36	36	0.35	1	0.049	Yellow

Рисунок 12. Параметры грунтов, вводимые в КРОСС

При отсутствии данных натуральных испытаний в модуле КРОСС рекомендуется использовать значение коэффициента переуплотнения 1,0, а величину давления переуплотнения принимать равной [7]:

- 5 Т/м² – для глинистых грунтов;
- 2,5 Т/м² – для супеси;
- 0 Т/м² – для песков.

Подробнее остановимся и на определении значений модуля упругости грунта, по умолчанию он определяется программой как $D/0,12$, где D – модуль деформации. В руководстве [7] не приводится обоснования принимаемого значения величины, на которое происходит деление модуля деформации. Среди пользователей также довольно расхоже мнение, что модуль деформации и модуль упругости – одно и то же, что не верно.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Согласно [13] можно выделить два состояния грунтового основания:

1) Состояние в период возведения сооружения и непосредственно после возведения, когда происходит активная осадка сооружения вследствие необратимых деформаций основания.

2) Состояние после завершения осадочных явлений и стабилизации основания, т. е. в период нормальной эксплуатации сооружения.

Первое предполагает возможным рассматривать основание как линейно деформируемое полупространство и характеризуется модулем деформации. Второе — как упругое полупространство и характеризуется модулем упругости.

Так же если взглянуть на обобщенную формулу для определения осадок основания (5.16) [1]:

$$s_i = \beta \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zpi} - \sigma_{z\gamma}) \cdot h_i}{E_i} + \beta \cdot \sum_{i=1}^{H_c} \frac{\sigma_{z\gamma} \cdot h_i}{E_{e,i}},$$

где E_i – модуль деформации i -ого слоя грунта по ветви первичного нагружения (модуль деформации); $E_{e,i}$ – модуль деформации i -ого слоя грунта по ветви вторичного нагружения (модуль упругости).

Значение $E_{e,i}$ также как и значение E_i определяется в процессе изыскательских работ согласно формулам, представленным в пункте 5.2.5.3 [25]. В примечании к пункту 5.6.31 [1] даются следующие рекомендации на случай отсутствия опытных данных: «При отсутствии опытных определений модуля деформации $E_{e,i}$ для сооружений II и III уровней ответственности допускается принимать $E_{e,i} = 5 \cdot E_i$ », т.е. формула для определения модуля упругости должна выглядеть так: $D/0,2$. На практике, значение модуля упругости примерно в 3-5 раз больше значения модуля деформации.

В рассматриваемой задаче не рассматривается откопка котлована, поэтому величиной $\sigma_{z\gamma,1}$ можно пренебречь и, как следствие, из формулы «уходит» и модуль упругости $E_{e,i}$. В процессе аналитического решения определяется только активная осадка, то есть непосредственно после возведения сооружения, поэтому в КРОССе для всех грунтов модули упругости приняты равными модулям деформации.

Значение высоты сжимаемой толщи определяется параметром σ_{zp}/σ_{zg} в разделе настроек «Расчет». По умолчанию σ_{zp}/σ_{zg} равно 0,2.

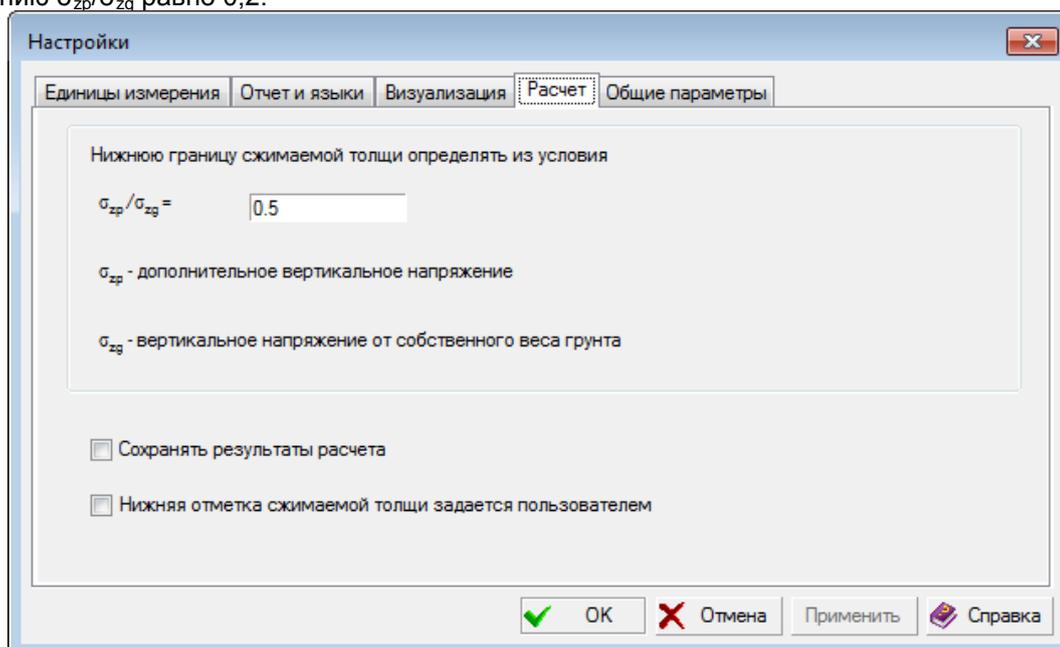


Рисунок 13. Параметры определения границы сжимаемой толщи

Расчеты с использованием модуля КРОСС проводятся в несколько итераций. Согласно графикам, приведенным в [8] и выводу: «стабилизация величин C_1 наступает к 3-й итерации, а погрешность вычисленных максимальных и минимальных значений на 6-м шаге расчета составляет примерно 4%. Так как распределение величин коэффициентов C_1 стабилизировалось, то дальнейшее использование программы «КРОСС» нецелесообразно.», количество итераций принимается равным 6.

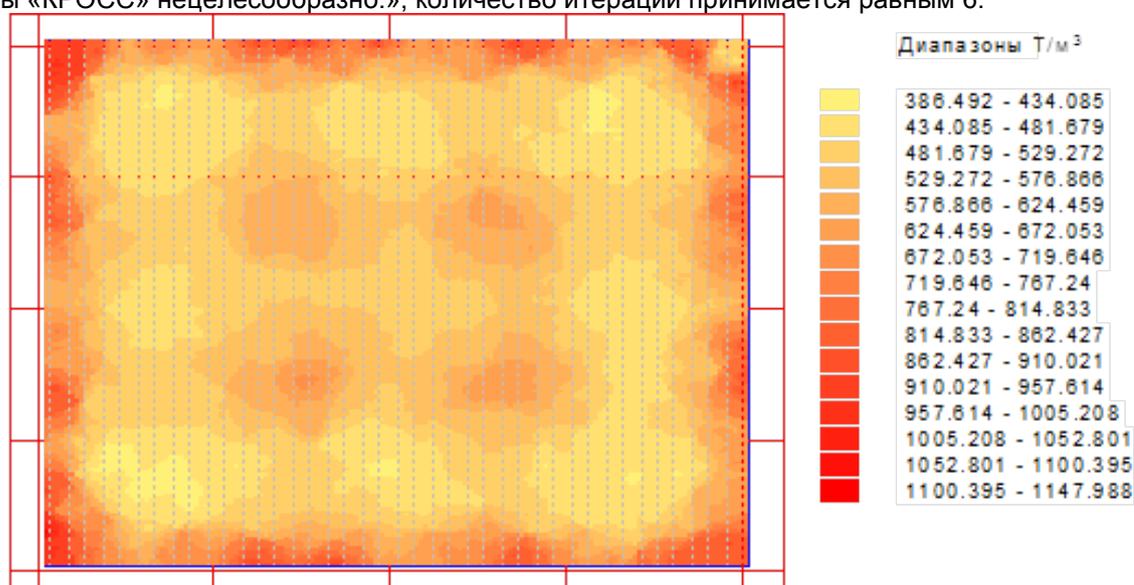


Рисунок 14. Значения коэффициентов постели после 6-ой итерации.

Полученные результаты для случая 4 ($q = 1,6 \text{ Т/м}^2$).

-15.68-14.52-12.98-11.87-12.03-13.55-15.81-17.2-16.3-14.68-14.01-14.74-16.34-17.17-15.69-13.35-11.77-11.56-12.61-14.13-15.23
-14.89-13.97-12.49-11.52-11.67-13.01-15.05-16.51-15.52-14.1-13.51-14.12-15.51-16.44-14.91-12.78-11.36-11.1-11.96-13.32-14.09
-13.51-12.71-11.7-11.04-11.26-12.38-13.95-14.91-14.43-13.45-13.01-13.43-14.39-14.83-13.8-12.14-10.92-10.59-11.1-11.93-12.54
-12.35-11.77-11.13-10.79-11.09-12.04-13.24-13.94-13.75-13.15-12.84-13.12-13.7-13.86-13.1-11.83-10.79-10.37-10.58-11.07-11.49
-12.39-11.89-11.37-11.13-11.5-12.47-13.63-14.32-14.18-13.65-13.37-13.63-14.14-14.25-13.53-12.3-11.25-10.8-10.94-11.37-11.78
-13.81-13.2-12.49-12.12-12.51-13.7-15.22-16.13-15.82-15-14.6-14.97-15.78-16.08-15.15-13.58-12.32-11.87-12.2-12.87-13.46
-16.04-15.23-14.08-13.34-13.71-15.28-17.5-18.9-18.13-16.68-16.04-16.65-18.08-18.84-17.42-15.17-13.57-13.17-13.9-15.06-15.89
-17.45-16.71-15.07-14.06-14.43-16.23-18.96-21.08-19.6-17.7-16.91-17.65-19.53-20.99-18.86-16.13-14.34-13.98-14.99-16.65-17.43
-16.62-15.77-14.61-13.88-14.31-15.94-18.22-19.64-18.88-17.42-16.78-17.38-18.81-19.54-18.11-15.86-14.27-13.88-14.62-15.8-16.68
-15.05-14.37-13.64-13.28-13.77-15.11-16.78-17.75-17.44-16.57-16.14-16.54-17.38-17.66-16.68-15.06-13.78-13.34-13.73-14.48-15.18
-14.33-13.76-13.19-12.97-13.48-14.69-16.12-16.96-16.78-16.13-15.8-16.13-16.77-16.92-16.08-14.69-13.54-13.09-13.33-13.92-14.5
-14.95-14.29-13.58-13.23-13.72-15.04-16.7-17.67-17.36-16.5-16.1-16.52-17.39-17.68-16.7-15.09-13.82-13.39-13.75-14.47-15.12
-16.42-15.6-14.48-13.78-14.21-15.83-18.1-19.52-18.76-17.32-16.71-17.35-18.8-19.55-18.13-15.9-14.33-13.95-14.67-15.78-16.59
-17.15-16.46-14.87-13.91-14.29-16.08-18.82-20.95-19.48-17.6-16.84-17.61-19.51-20.99-18.87-16.16-14.42-14.08-15.06-16.65-17.36
-15.59-14.87-13.81-13.12-13.54-15.13-17.38-18.8-18.04-16.61-15.99-16.61-18.06-18.83-17.43-15.21-13.66-13.29-14-15.11-15.9
-13.12-12.66-12.1-11.82-12.29-13.55-15.12-16.05-15.77-14.96-14.57-14.95-15.77-16.08-15.17-13.64-12.43-12.01-12.34-12.99-13.55
-11.35-11.1-10.79-10.72-11.21-12.27-13.5-14.24-14.13-13.62-13.35-13.62-14.15-14.27-13.58-12.4-11.39-10.95-11.1-11.52-11.91
-10.93-10.68-10.34-10.23-10.7-11.77-13.05-13.82-13.68-13.11-12.83-13.13-13.72-13.9-13.18-11.95-10.93-10.52-10.72-11.2-11.6
-11.79-11.4-10.75-10.36-10.76-12.01-13.69-14.74-14.34-13.41-13.01-13.45-14.41-14.87-13.89-12.27-11.06-10.7-11.16-11.95-12.51
-13.12-12.62-11.49-10.77-11.1-12.57-14.73-16.3-15.42-14.08-13.53-14.13-15.51-16.45-14.98-12.9-11.46-11.13-11.9-13.14-13.8
-14.02-13.26-12.01-11.11-11.41-13.05-15.45-16.97-16.21-14.69-14.05-14.75-16.31-17.15-15.74-13.44-11.81-11.48-12.38-13.72-14.64

Рисунок 15. Результаты расчета с применением модели переменных по площади коэффициентов постели.
Случай 4 ($q = 1,6 \text{ Т/м}^2$)

Максимальная осадка – 21,08 мм;
Минимальная осадка – 10,23 мм.

6.2. Реализация в Plaxis 3D

В Plaxis 3D размеры площадки грунтовой толщ приняты равными 100x100 м.

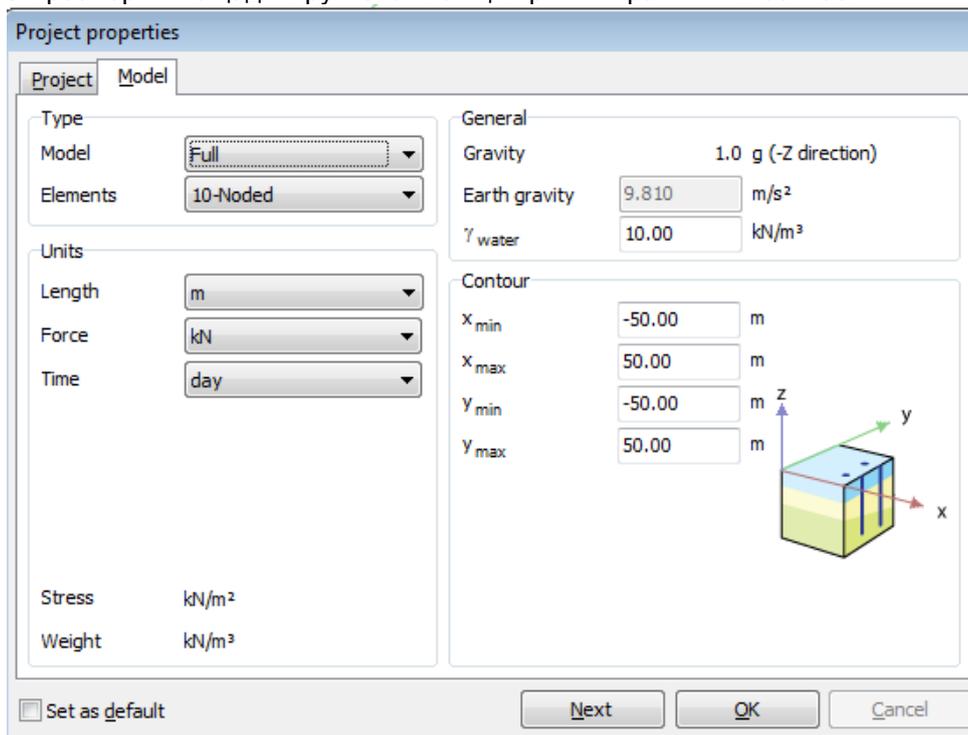


Рисунок 16. Параметры задания модели Plaxis 3D

Грунтовая толща ограничена высотой сжимаемой толщи, полученной в процессе аналитического решения.

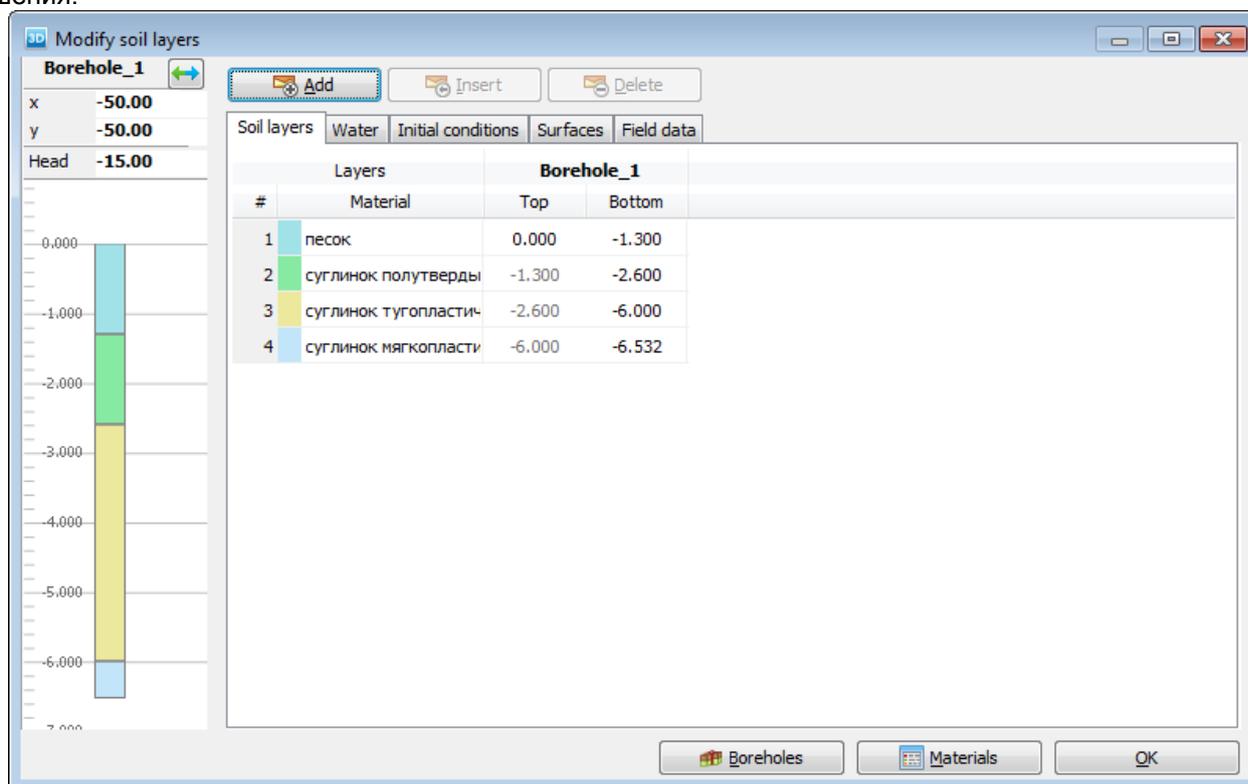


Рисунок 17. Напластование грунтов

Колонны и балки моделируются элементами Beam, связи – элементами Anchor, плиты – элементами Plate. В фундаментной плите присвоен Negative Interface (интерфейс со стороны контакта с грунтом). Общий вид модели представлен на рисунке 18.

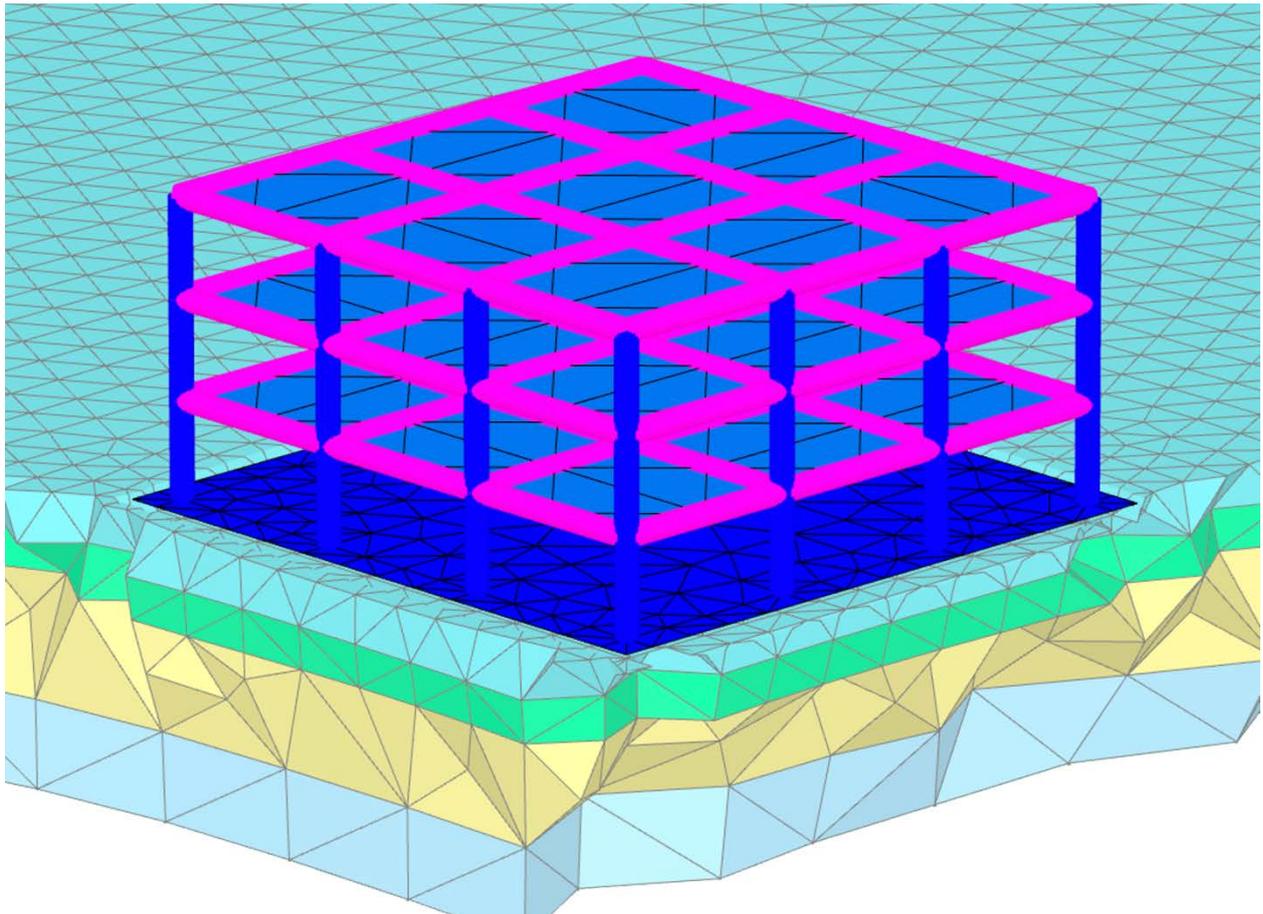
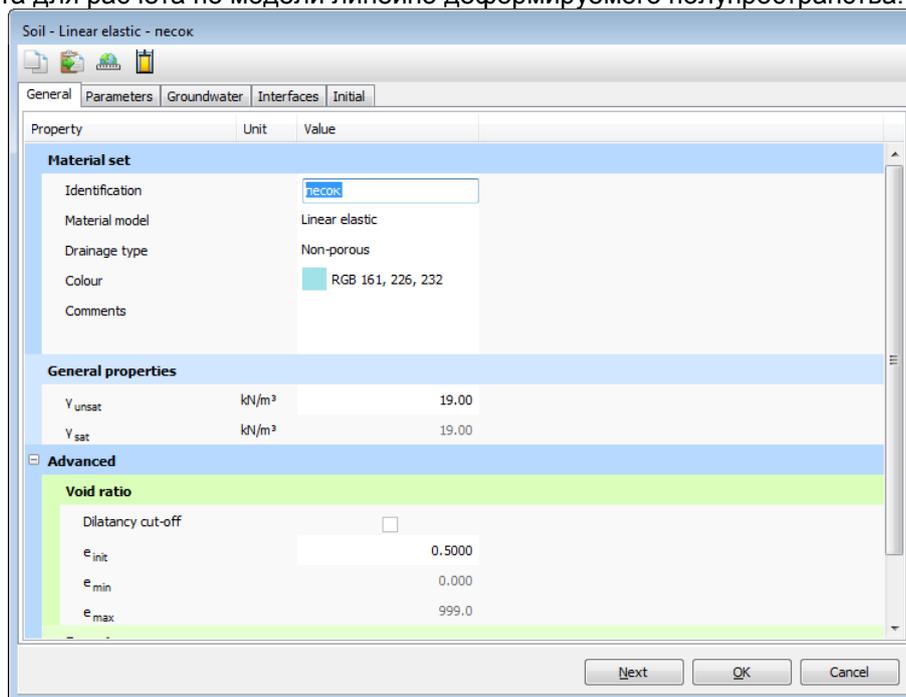


Рисунок 18. Общий вид модели Plaxis 3D

Создано 4-е фазы расчета, каждая из которых соответствует определенному расчетному случаю.

6.2.1. Модель линейно деформируемого полупространства

Выбор модели определяется параметрами задания грунтов. Ниже представлен пример задания параметров грунта для расчета по модели линейно деформируемого полупространства.



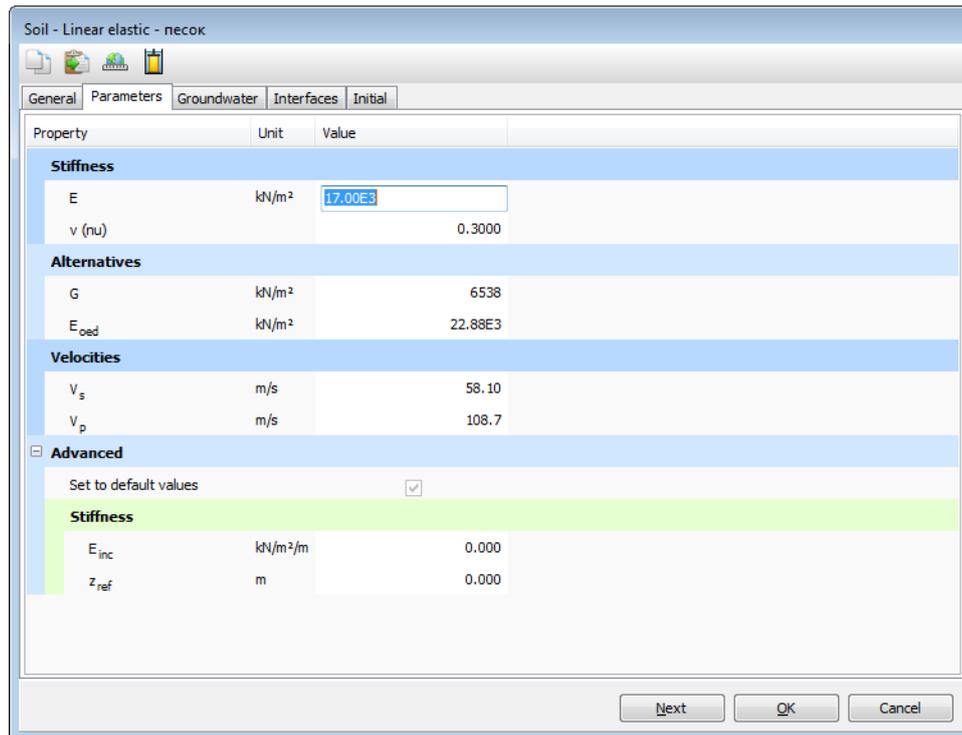


Рисунок 19. Пример задания параметров грунта для расчета по модели линейно деформируемого полупространства в Plaxis 3D

Полученные результаты для случая 4 ($q = 1,6 \text{ Т/м}^2$).

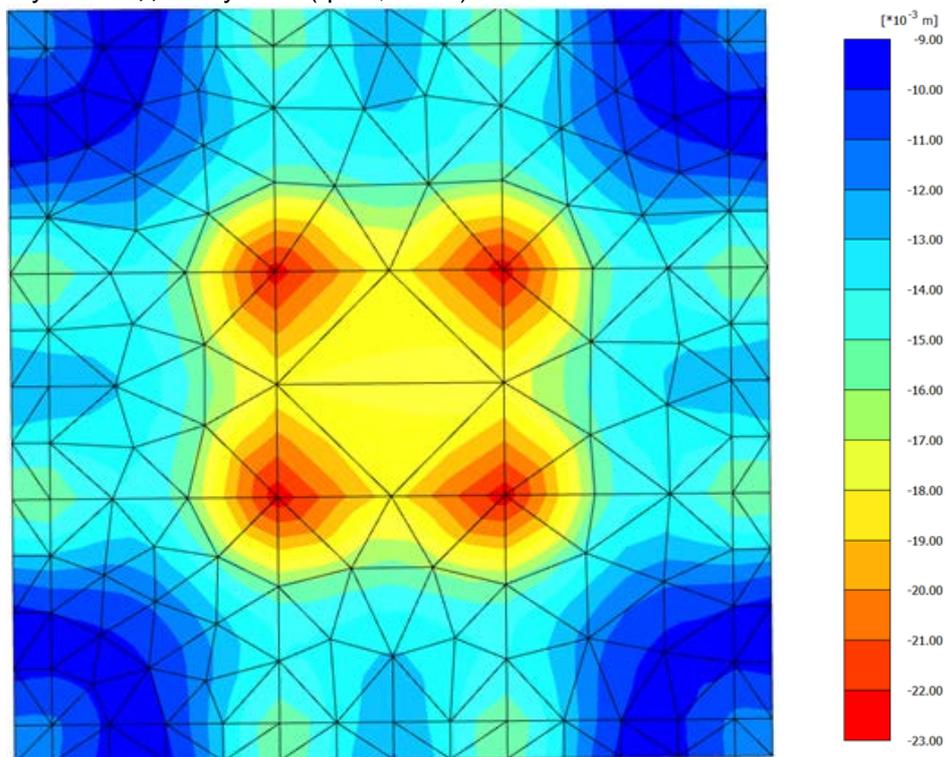


Рисунок 20. Результаты расчета по модели линейно деформируемого полупространства. Случай 4 ($q = 1,6 \text{ Т/м}^2$)

Максимальная осадка – 22,68 мм;

Минимальная осадка – 9,19 мм.

6.2.2. Модель упругопластической среды

Ниже представлен пример задания параметров грунта для расчета по модели упругопластической среды.

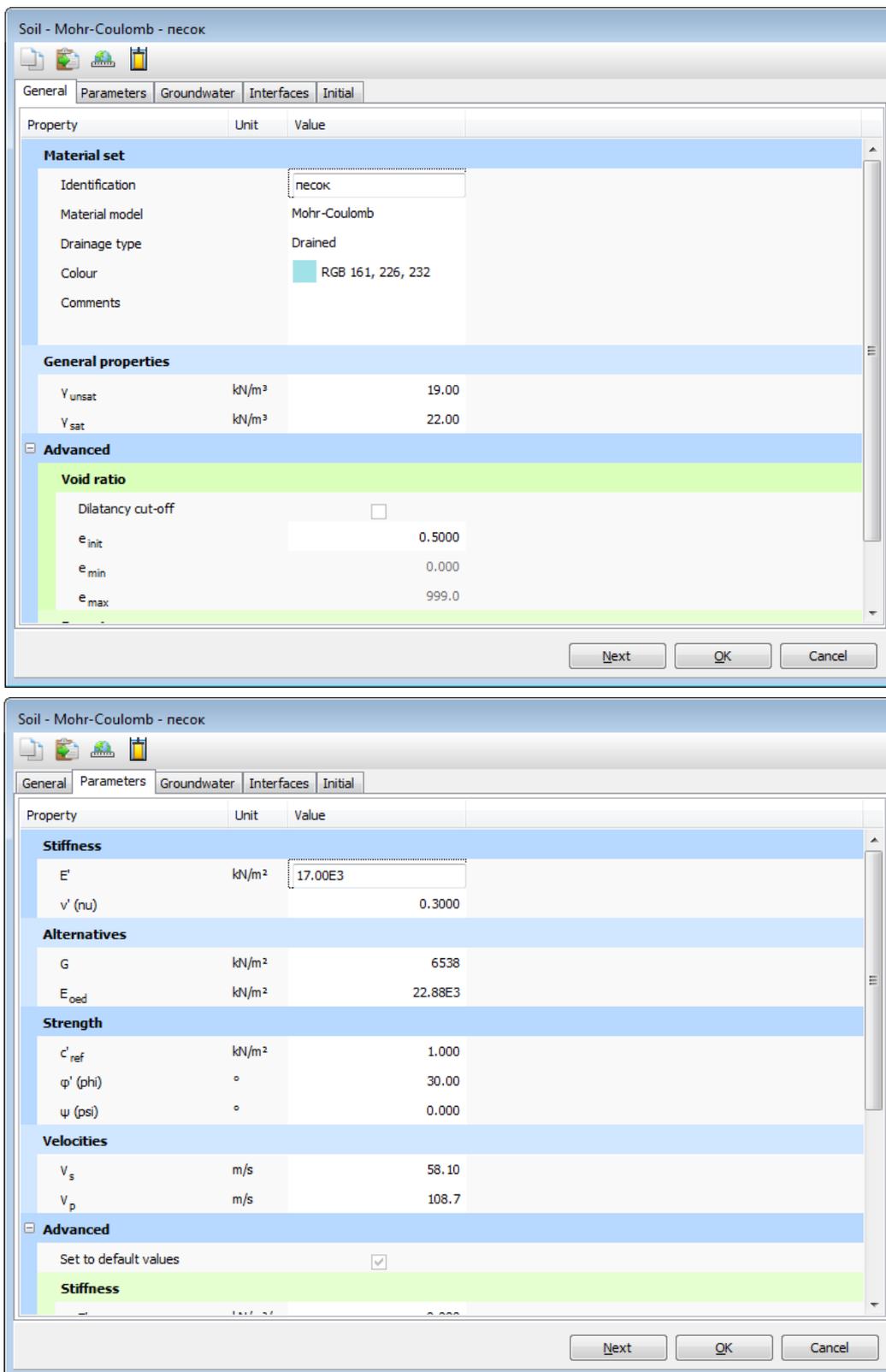


Рисунок 21. Пример задания параметров грунта для расчета по модели упругопластической среды в Plaxis 3D

Полученные результаты для случая 4 ($q = 1,6 \text{ Т/м}^2$).

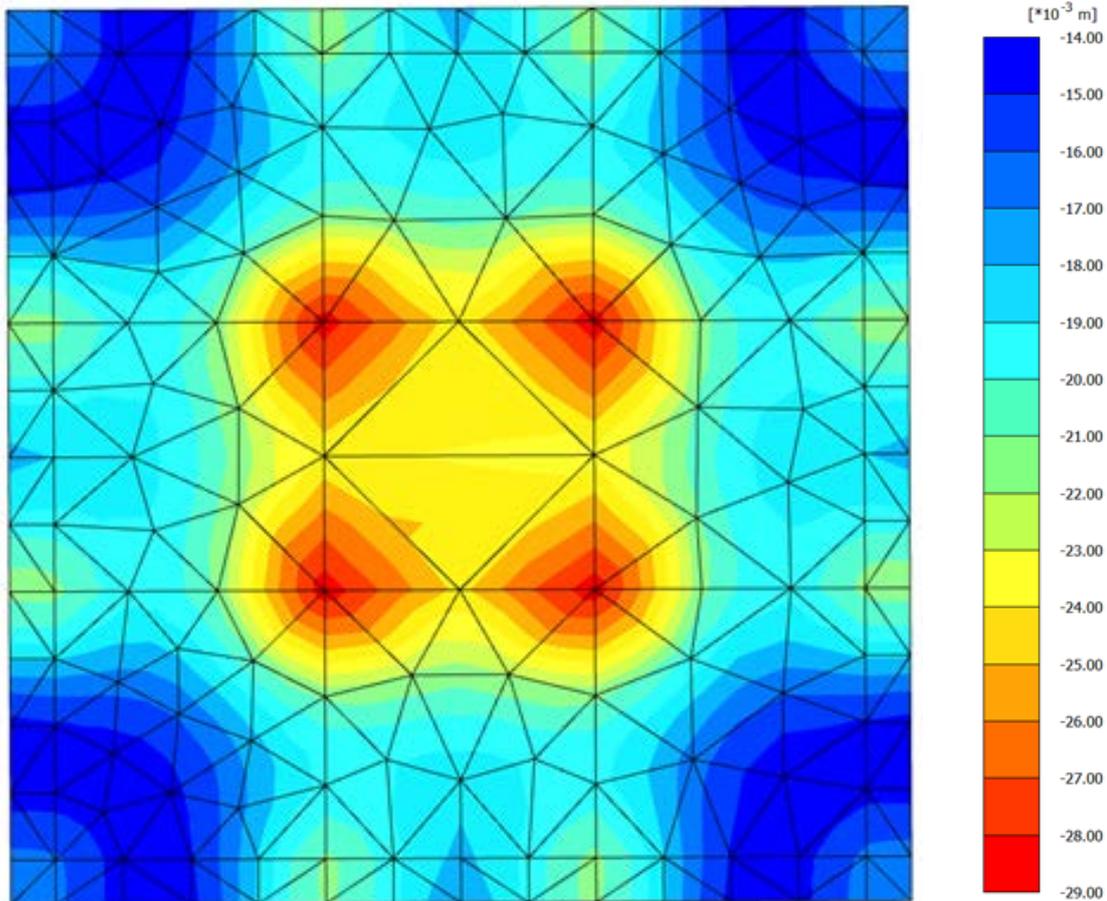


Рисунок 22. Результаты расчета по модели упругопластической среды. Случай 4 ($q = 1,6 \text{ Т/м}^2$)
Максимальная осадка – 28,67 мм;
Минимальная осадка – 14,08 мм.

7. Сравнение полученных результатов

В данном примере фундаментная плита довольно гибкая (толщина 300 мм) и значения осадок по площади плиты имеют довольно большой диапазон. В данном случае средняя осадка по площади плиты не является такой показательной величиной, как в случае жестких сооружений, поэтому результаты численных решений представлены диапазонами значений. Значения полученных результатов сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Значения осадок по результатам расчетов

Модель грунта		Нагрузка на перекрытие, Т/м^2							
		0,2		0,4		0,8		1,6	
Аналитическое решение		Осадка, мм							
СП 22.13330.2011		средняя							
Численные решения	Средняя	9,17		10,92		14,42		23,12	
		min	max	min	max	min	max	min	max
SCAD Office	Модель Пастернака	6,6	10,7	7,8	12,7	10,2	17,4	15,0	26,3
	Модель с переменными по площади коэффициентами постели (КРОСС)	4,54	8,54	5,36	10,33	7,26	13,92	10,23	21,08

Plaxis 3D	Модель линейно деформируемого полупространства	4,37	9,28	5,07	11,19	6,45	15,02	9,19	22,68
	Модель упругопластической среды	6,266	11,72	7,34	14,13	9,52	18,95	14,08	28,67

Для более наглядной оценки сходимости результатов расчета по различным моделям грунтов с расчетами по нормативной методике [1] построены графики на рис. 23 - 26.

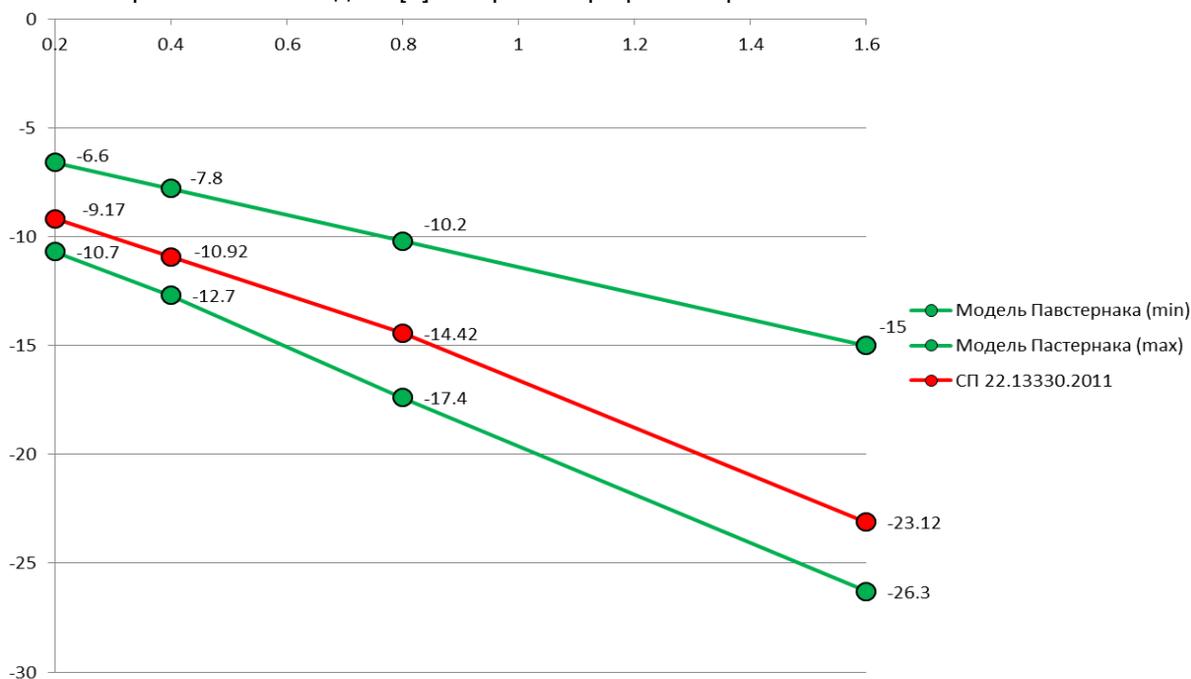


Рисунок 23. Значения осадок по модели Пастернака

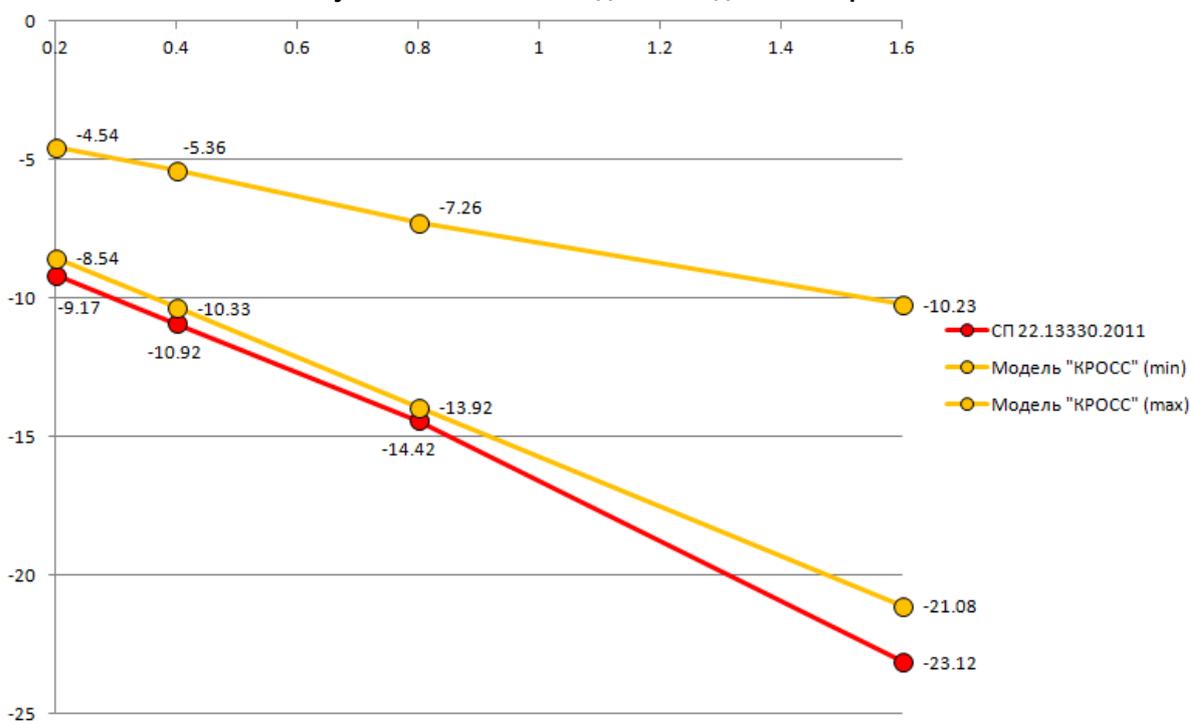


Рисунок 24. Значения осадок по модели с переменными по площади коэффициентами постели (КРОСС)

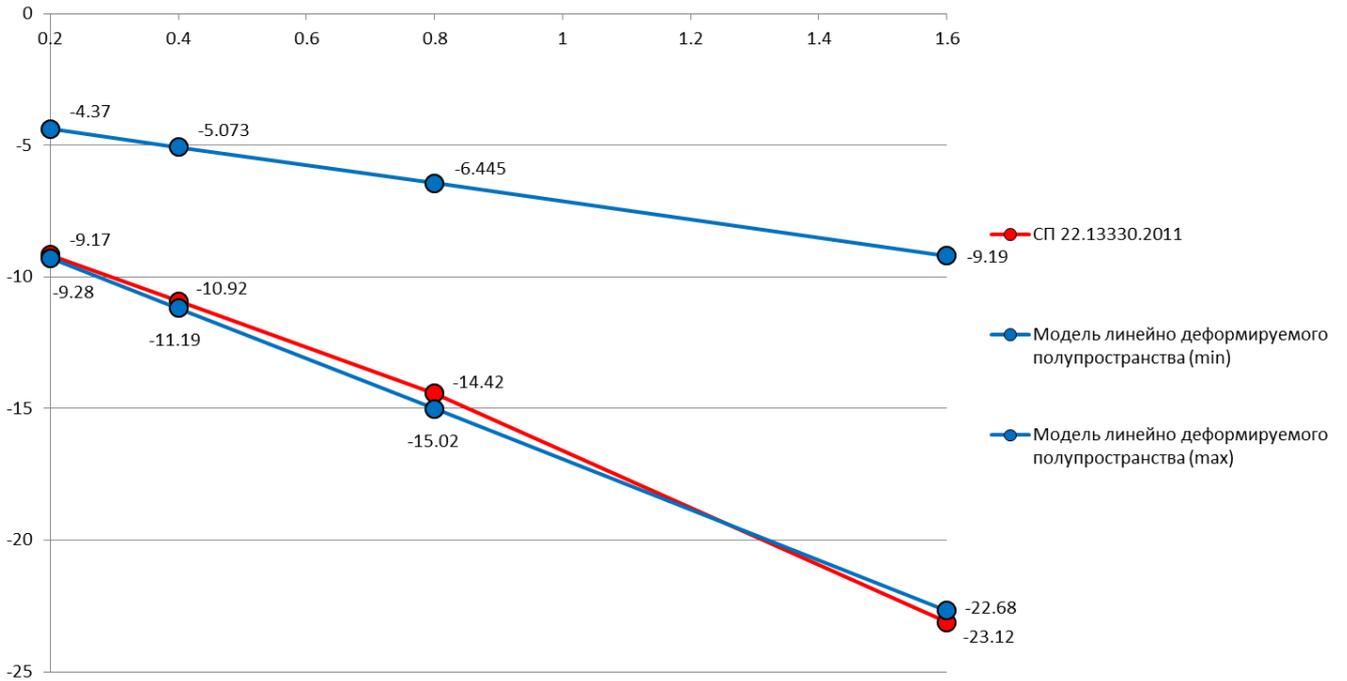


Рисунок 25. Значения осадок по модели линейно деформируемого полупространства

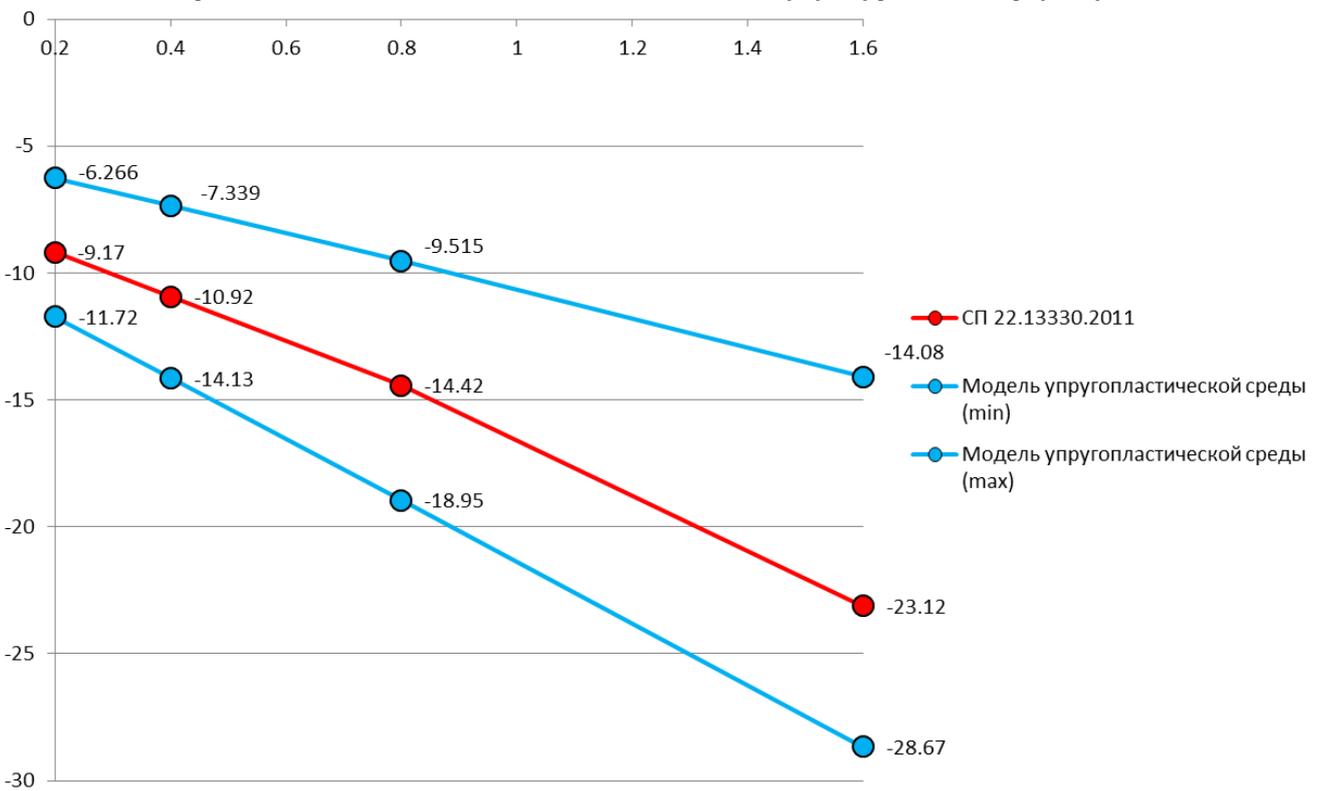


Рисунок 26. Значения осадок по модели упругопластической среды

8. Выводы

По результатам проведенного исследования могут быть сделаны следующие выводы:

1) Результаты расчетов с использованием модели Пастернака охватывают средние значения осадок, рассчитанные по СП 22.13330.2011 [1] (рис. 23). Данная модель может быть использована только при горизонтальном напластовании грунтов, что в инженерной практике довольно редкое явление. Для её использования также необходимо предварительно определить значение высоты сжимаемой толщи грунтов, что предполагает довольно большое количество предварительных расчетов.

2) Результаты расчетов с использованием модели с переменными по площади коэффициентами постели (КРОСС) меньше средних значений осадок, рассчитанных по СП 22.13330.2011 [1] (рис. 24). Полученные результаты согласуются с другими подобными исследованиями [9, 10]. Программа-сателлит КРОСС располагает возможностью моделировать практически любые конфигурации напластования грунтов, настройки программы так же позволяют ей определять значение высоты сжимаемой толщи, помогая избежать большого количества предварительных расчетов.

3) Результаты расчетов с использованием модели линейно деформируемого полупространства, реализованной в Plaxis 3D, в 3 из 4-х случаев нагружения охватывают средние значения осадок, рассчитанные по СП 22.13330.2011 [1] (рис. 25). Средние значения осадок по этой модели окажутся ниже нормативных, что согласуется с другими подобными исследованиями [10]. Для использования данной модели необходимо предварительно определить значение высоты сжимаемой толщи грунтов.

4) Результаты расчетов с использованием модели упругопластической среды, реализованной в Plaxis 3D, охватывают средние значения осадок, рассчитанные по СП 22.13330.2011 [1] (рис. 26). Средние значения осадок по этой модели окажутся незначительно выше нормативных, что идет «в запас». Полученные результаты также согласуются с другими подобными исследованиями [9, 10, 13]. Данная модель наиболее полно из представленных отображает реальную работу грунтового основания, что подтверждают статьи [15-17].

Plaxis 3D обладает обширным количеством параметров для моделирования грунтовых условий [28, 29]. Помимо представленных моделей грунта в Plaxis 3D имеется упругопластическая модель с изотропным упрочнением Hardening Soil Model [11, 18, 19], которая способна ещё более точно отображать реальное поведение грунта [20-23]. Применение данной модели требует дополнительных данных о грунтовой толще [21], которых нет в распоряжении авторов.

Авторы не отдают предпочтения какой-либо из представленных моделей. Выбор модели грунта зависит от грунтовых условий, условий нагружения и ещё ряда факторов. Выбор той или иной модели грунта необходимо рассматривать отдельно под каждый расчетный случай.

Литература

- [1]. СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*
- [2]. Варданян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А. Сопроотивление материалов с основами теории упругости и пластичности. Учебник под ред. Г.С. Варданяна. М.:Изд-во АСВ, 1995. 568 с.
- [3]. Пастернак П.Л. Основы нового метода расчёта фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. М.: Стройиздат, 1954. 55 с.
- [4]. Пискунов В.Г., Федоренко Ю.М. Динамический метод контроля состояния слоистых плит на упругом основании // Архитектура и строительство Беларуси. № 5-6. 1994. С. 19-22.
- [5]. Кравченко В.С., Криксунов Э.З., Перельмутер М.А., Скорук Л.Н. ЗАПРОС. Расчет оснований и фундаментов. Руководство пользователя. К.: Электронное издание, 2006. 33 с.
- [6]. Федоровский В.Г., Безволев С.Г. Прогноз осадок фундаментов мелкого заложения и выбор модели основания для расчета плит // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2000. № 4. С. 10-18.
- [7]. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Микитаренко М.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А., Федоровский В.Г., Юрченко В.В. SCAD Office. Реализация СНиП в проектирующих программах. М.: СКАД СОФТ, 2014. 480 с.
- [8]. Маляренко А., Ожогин Р. Реализация методики расчета жесткостных характеристик грунтового основания в модуле «КРОСС» программного комплекса SCAD Office // Геотехника. 2011. №3. С. 68-75.
- [9]. Сафина А.Г. Сопоставление прогнозируемых осадок плитных фундаментов с фактическим осадками // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2010. №10. С. 52-57.
- [10]. Мангушев Р.А., Сахаров И.И. [и др.] Сравнительный анализ численного моделирования системы «здание-фундамент-основание» в программных комплексах SCAD и PLAXIS // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 3. С. 96-101.
- [11]. Brinkgreve R.B.J. et al. PLAXIS, 2D Version 8. – Balkema, 1997. – 200 p.
- [12]. Болдырев Г.Г. Устойчивость и деформируемость оснований анкерных фундаментов. М.: Стройиздат, 1987. 80 с.
- [13]. Белокопытова И.А., Бурыгин С.Г. и др. SCAD для чайников. К.: Электронное издание, 2001. с. 356.
- [14]. Игошева Л.А., Клевко В.И. Сравнение результатов определения вертикальной осадки ленточного фундамента аналитическим методом и методом конечных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2014. № 3 (15). С. 30-38.
- [15]. Полищук А.И., Самарин Д.Г., Филипович А.А. Оценка несущей способности свай в глинистых грунтах с помощью Plaxis 3D Foundation // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 3. С. 351-359.
- [16]. Заменский В.В., Рузаев А.М., Польшков И.Н. Сравнение результатов натурных экспериментов с расчетами, выполненными при помощи конечноэлементной программы Plaxis 3D Foundation для забивных свай в глинистых грунтах // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 18-23.
- [17]. Клевко В.И., Татьянинков Д.А., Драчева Е.О. Сравнение модельных штамповых испытаний и расчета по методу конечных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 8. С. 170-179.
- [18]. Schanz T. Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien // Mitt. Inst. fur Geotechnik 45. Universita. Stuttgart. – Stuttgart, 1998. – 152 P.
- [19]. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The Hardening Soil Model: Formulation and verification // Beyond 2000 in Computational Geotechnics. – Balkema, Rotterdam, 1999. – P. 281–290.
- [20]. Голубев А.И., Селецкий А.В. Выбор модели грунта и её параметров в расчётах геотехнических объектов // Труды международной конференции по геотехнике "Геотехнические проблемы мегаполисов (GEOMOS 2010). 2010. том 4. С. 1727-1732.
- [21]. Соколова О.В. Подбор параметров грунтовых моделей в программном комплексе Plaxis 2D // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 4 (48) С. 10-16.
- [22]. Строкова Л. А. Определение параметров для численного моделирования грунтов // Известия Томского Политехнического университета. 2008. Т. 313. №1. С. 69-74.

- [23]. Тер-Мартirosян А.З., Мирный А.Ю., Сидоров В.В., Соболев Е.С. Определение параметров модели Hardening Soil по результатам лабораторных испытаний // Геотехника. Теория и практика. Общероссийская конференция молодых ученых, научных сотрудников и специалистов: межвузовский тематический сборник трудов. СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2013. С. 141-146.
- [24]. Колосова Г.С., Егорова Е.С., Иоскевич В.В. Расчёт фундаментных плит методом конечных элементов // Молодой ученый. 2016. №1. С. 169-174.
- [25]. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
- [26]. John W. Bull, Soil-structure interaction: numerical analysis and modeling, 1994. – 324 p.
- [27]. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. М.: Высшая школа, 1985. 352 с.
- [28]. Голубев А.И., Селецкий А.В. Программный комплекс PLAXIS – эффективный инструмент для геотехнических расчетов транспортных сооружений // Дороги. Инновации в строительстве. 2011. № 9. С. 58-60.
- [29]. Голубев А.И., Селецкий А.В. Комплексные расчеты гидротехнических сооружений в PLAXIS // Гидротехника XXI Век. 2011. №3(6). С. 16-18.
- [30]. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Микитаренко М.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++. М.: Изд-во САД СОФТ, 2015. 808 с.
- [31]. Руководство пользователя Plaxis 2D 2015: Пер. с англ. СПб.: НИП-Информатика, 2015. 424 с. (ISBN-13: 978-90-76016-18-4)
- [32]. Руководство пользователя Plaxis 3D AE 2015: Пер. с англ. СПб.: НИП-Информатика, 2015. 430 с. (ISBN-13: 978-90-76016-19-1)
- [33]. Коляскина С.А., Егоров П.И. Исследование влияния вариантов расчета грунтового основания и методов расчета коэффициентов постели на напряженно-деформированное состояние здания // Ученые заметки ТОГУ. 2014. т. 5. №2. С. 21-34.
- [34]. Федоров Д.А., Мокляк К.Г. Численное исследование задачи совместного расчета конструкций с основаниями по реализациям в вычислительных комплексах SCAD и «ЛИРА» // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. №12. С. 97-104.
- [35]. Кожанов Ю.А., Ефименко А.Г. [и др.] Анализ напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции с учетом основания // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2013. №8 (185). С. 42-47.
- [36]. Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Кубашов Т.Р. Влияние модели основания на напряженно-деформированное состояние фундаментной плиты // СТРОИТЕЛЬСТВО - 2015: СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА материалы международной научно-практической конференции. Ростовский государственный строительный университет, Союз строителей Южного Федерального округа, Ассоциация строителей Дона. Ростов-на-Дону, 2015. С. 481-483.
- [37]. Степанов А.С., Мельников В.А. Сравнение расчетов по СНиП 2.02.01-87 и по результатам применения специализированных программ // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №7 (22). С. 9-23.
- [38]. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. [и др.] Конечно-элементное моделирование задач геомеханики и геофизики // Вестник МГСУ. 2012. №2. С. 52-65.
- [39]. Потосеня А.Г., Карасев М.А. Разработка численной модели прогноза деформаций грунтового массива при строительстве полуглубленного сооружения в программном комплексе Abaqus // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2014. №2. С. 2-6.
- [40]. Benz T., Schwab R., Vermeer P.A. On the practical use of advanced constitutive laws in finite element foundation analysis. Fondsup 2003 International Symposium. 2003. Pp. 8-16.
- [41]. Wheeler S.J., Cudny M., Neher H.P., Wiltafsky C. Some developments in constitutive modeling of soft clays. International Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice. 2003. Pp. 101-121.
- [42]. Wiltafsky C., Scharinger F., Schweiger H.F. Results from a geotechnical benchmark exercise of an embankment on soft clay. International Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice. 2003. Pp. 67-73.
- [43]. Brinkgreve R. B. J. Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application. Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration / Ed. J.A.Yamamuro, V.N.Kaliakin. American Society of Civil Engineers, 2005. Vol. 128. Pp. 69-98.

- [44]. Calvello M., Finno R.J. Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis. Computers and Geotechnics. Vol. 31. Issue 5. Pp. 420-424.
- [45]. Barla M., Barla G. Torino subsoil characterization by combining site investigations and numerical modelling. Geomechanics and Tunelling. 2012. Vol. 3. Pp. 214-232.
- [46]. Rokonzaman M., Sakai T. Calibration of the parameters for a hardening-softening constitutive model using genetic algorithms. Computers and Geotechnics. 2010. Vol. 37. Issue 4. Pp. 573-579.

Soil model implemented in the software packages SCAD Office and Plaxis 3D

E.S. Egorova¹, A.V. Ioskevich², V.V. Ioskevich³, K.N. Agishev⁴, V.Yu. Kozhevnikov⁵

^{1,2,4}*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya st. 29, St.Petersburg, 195251, Russia.*

³*St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-nd Krasnoarmeiskaya st. 4, St.Petersburg, 190005, Russia.*

⁵*SPb-Giproshacht, Chapayeva st. 15A, St. Petersburg, 197101, Russia.*

ARTICLE INFO

Scientific article

Article history

Received 7 March 2016

Keywords

SP 22.1330.2011;
Pasternak model;
linear elastic model;
model elastic-plastic environment;
SCAD;
CROSS;
Mohr-Coulomb;
Plaxis;

ABSTRACT

The paper dwells on the definition of structures settlement and provides their comparison. The research was carried out in accordance with the normative technique realized in SP 22.1330.2011. There also were used some software complexes such as SCAD Office and Plaxis 3D to compute value of structures settlement. The report consists of the theoretical foundations of each soil models used in the research. Exactly there were used Pasternak model, the model with variables square coefficients (CROSS) which were implemented in SCAD Office and the linear elastic model, the model elastic-plastic environment (Mohr-Coulomb) implemented in Plaxis 3D. To evaluate the effect of load rate on settlement were considered four versions of loading building spans by ultimate dead load. There was also included the dead load of structures in each version. The efficiency of the results was assessed.

1

Corresponding author:

2

+7 (911) 088 3372, egorovaes@hotmail.com (Evgeniya Sergeevna Egorova, Master Student)

3

+7 (911) 819 1927, anton-ioskevich@mail.ru (Anton Vladimirovich Ioskevich, Master Student)

4

+7 (905) 282 9498, lvasily95@gmail.com (Vasiliy Vladimirovich Ioskevich, Student)

5

+7 (911) 020 4184, kamil_agishev@mail.ru (Kamil Nailevich Agishev, Master Student)

5

+7 (921) 426 2564, vladimir_kozhevnikov92@mail.ru (Vladimir Yurievich Kozhevnikov, Design Engineer)

References

- [1]. SP 22.13330.2011 Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01-83* [Foundations of buildings and structures. SNiP 2.02.01-83* updated edition] (rus)
- [2]. Vardanyan G.S., Andreev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. Soprotivlenie materialov s osnovami teorii uprugosti i plastchnosti. [Mechanics of materials with the basics of the theory of elasticity and plasticity]. Moscow: ASV, 1995. 568 p. (rus)
- [3]. Pasternak P.L. Osnovy novogo metoda rascheta fundamentov na uprugom osnovanii pri pomoshchi dvukh koeffitsiyentov posteli. [The basis of a new calculation method of foundations on elastic foundation by means of two coefficients of soil reaction]. Moscow: Stroyizdat, 1954. 55 p. (rus)
- [4]. Piskunov V.G., Fedorenko Yu.M. Dynamic method to control the state of layered plates on elastic foundation. Architecture and construction of Belarus. 1994. № 5-6. Pp. 19-22. (rus)
- [5]. Kravchenko V.S., Kriksunov E.Z., Perelmuter M.A., Skoruk L.N. ZAPROS. Raschet osnovaniy i fundamentov. Rukovodstvo polzovatelya. [ZAPROS. Calculation of bases and foundations. User manual]. Kiev: Electronic edition, 2006. 33 p. (rus)
- [6]. Fedorovskiy V.G., Bezvolev S.G. Forecast sediment of shallow foundations and the Foundation for the calculation of plates. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2000. № 4. Pp. 10-18. (rus)
- [7]. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Mikitarenko M.A., Perelmuter A.V., Perelmuter M.A., Fedorovskiy V.G., Yurchenko V.V. SCAD Office. Realizatsiya SNiP v proektiruyuschih programmah. [SCAD Office. Implementation of SNiP in designing programs] Moscow: SKAD SOFT, 2014. 480 p. (rus)
- [8]. Malyarenko A., Ozhogin R. Implementation of the methodology for calculating the stiffness characteristics of the subgrade in the module "CROSS" of a program complex SCAD Office. Geotechnic. 2011. №3. Pp. 68-75. (rus)
- [9]. Safina A.G. The projected comparison of raft Foundation with actual precipitation. Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2010. №10. Pp. 52-57. (rus)
- [10]. Mangushev R.A., Sakharov I.I. [et al] Comparative analysis of computational modeling of the system «building-foundation-base» in the software packages SCAD and PLAXIS. Bulletin of Civil Engineers. 2010. № 3. Pp. 96-101. (rus)
- [11]. Brinkgreve R.B.J. et al. PLAXIS, 2D Version 8. – Balkema, 1997. – 200 r.
- [12]. Boldyirev G.G. Ustoychivost i deformiruemost osnovaniy ankernykh fundamentov. [The stability and deformability of bases of anchor foundations]. Moscow: Stroyizdat, 1987. 80 p. (rus)
- [13]. Belokopyitova I.A., Buryigin S.G. [et al] SCAD dlya chaynikov. [SCAD for dummies] Kiev: Electronic edition, 2001. 356 p. (rus)
- [14]. Igosheva L.A., Kleveko V.I. The comparison of the results of retrieving the vertical rainfall of strip Foundation analytical method and finite element method. PNRPU Bulletin, Applied ecology. Urban development. 2014. № 3 (15). Pp. 30-38. (rus)
- [15]. Polischuk A.I., Samarin D.G., Filipovich A.A. Estimation of bearing capacity of piles in clayey soils by using the Plaxis 3D Foundation. Vestnik of TSUAB. 2013. № 3. Pp. 351-359. (rus)
- [16]. Zamenskiy V.V., Ruzaev A.M., Polyinkov I.N. Compare results of field experiments with calculations performed using the finite element program Plaxis 3D Foundation for driven piles in clay soils. Vestnik MGSU. 2008. № 2. Pp. 18-23. (rus)
- [17]. Kleveko V.I., Tatyankov D.A., Dracheva E.O. Comparison of model stamp testing and calculation method of end elements. PNRPU Construction and Architecture Bulletin. 2014. № 8. Pp. 170-179. (rus)
- [18]. Schanz T. Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien // Mitt. Inst. fur Geotechnik 45. Universita..t Stuttgart. – Stuttgart, 1998. – 152 P.
- [19]. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The Hardening Soil Model: Formulation and verification // Beyond 2000 in Computational Geotechnics. – Balkema, Rotterdam, 1999. – R. 281–290.
- [20]. Golubev A.I., Seletskiy A.V. Vybore modeli grunta i yeye parametrov v raschetakh geotekhnicheskikh obyektov // Trudy mezhdunarodnoy konferentsii po geotekhnike "Geotekhnicheskiye problemy megapolisov (GEOMOS 2010). 2010. tom 4. C. 1727-1732.
- [21]. Sokolova O.V. The selection of soil models parameters in Plaxis 2D. Magazine of Civil Engineering. 2014. № 4 (48) Pp. 10-16. (rus)

- [22].Strokova L. A. Determination of parameters for computational modeling of soils. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. 2008. Vol. 313. № 1. Pp. 69–74. (rus)
- [23].Ter-Martirosyan A.Z., Mirnyy A.Yu., Sidorov V.V., Sobolev Ye.S. Opredeleniye parametrov modeli Hardening Soil po rezul'tatam laboratornykh ispytaniy [Determination of parameters of Hardening Soil model by the results of laboratory soil testing]. Geotekhnika. Teoriya i praktika. Obshcherossiyskaya konferentsiya molodykh uchenykh, nauchnykh sotrudnikov i spetsialistov: mezhhuzovskiy tematicheskoy sbornik trudov [Geotechnics. Theory and practice. All-Russian Conference of Young Scientists, researchers and professionals: interuniversity thematic collection of works]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGASU, 2013. Pp. 141–146. (rus)
- [24].Kolossova G.S., Egorova E.S., Ioskevich V.V. The calculation of Foundation slabs by finite element method. Young scientist. 2016. №1. Pp. 169-174. (rus)
- [25].GOST 12248-2010. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya harakteristik prochnosti i deformiruемости. [Soils. Methods for laboratory determination of strength and deformability] (rus)
- [26].John W. Bull, Soil-structure interaction: numerical analysis and modeling, 1994. – 324 r.
- [27].Ivanov P.L. Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. [The soils and foundations of hydraulic structures]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 352 p. (rus)
- [28].Golubev A.I., Seletskiy A.V. Software package PLAXIS is an effective tool for geotechnical calculations of transport facilities. ROAD. Innovations in construction. 2011. № 9. Pp. 58-60. (rus)
- [29].Golubev A.I., Seletskiy A.V. Comprehensive calculations of hydraulic structures in PLAXIS. Hydraulic engineer. XXI century. 2011. №3(6). Pp. 16-18. (rus)
- [30].Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Mikitarenko M.A., Perelmuter A.V., Perelmuter M.A. SCAD Office. Vychislitelnyy kompleks SCAD. [Computing system SCAD] Moscow: SKAD SOFT, 2015. 808 p. (rus)
- [31].Plaxis 2D 2015. Reference manual, Delft University of Technology & PLAXIS b.v., The Netherland, 424 p. (ISBN-13: 978-90-76016-18-4)
- [32].Plaxis 3D 2015. Reference manual, Delft University of Technology & PLAXIS b.v., The Netherland, 430 p. (ISBN-13: 978-90-76016-19-1)
- [33].Kolyaskina S.A., Egorov P.I. Study of the effect of variants of calculation of the subgrade and calculation methods of the coefficients on the stress-strain state of the building. Scientists notes PNU. 2014. T. 5. №2. Pp. 21-34. (rus)
- [34].Fedorov D.A., Moklyak K.G. Numerical investigation of the problem of joint analysis of structures with base implementations in computer complexes SCAD and LIRA. News of higher educational institutions. Construction. 2011. №12. Pp. 97-104. (rus)
- [35].Kozhanov Yu.A., Efimenko A.G. [et al] Analysis of the stress-strain state of reinforced concrete structures with account base. Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture. 2013. №8 (185). Pp. 42-47. (rus)
- [36].Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Kubashov T.R. The influence of Foundation model on the stress-deformirovanie the condition of the Foundation slab. STROITELSTVO - 2015: SOVREMENNYE PROBLEMYI STROITELSTVA materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Rostovskiy gosudarstvennyy stroitelnyy universitet, Soyuz stroiteley Yuzhnogo Federalnogo okruga, Assotsiatsiya stroiteley Dona. Rostov-na-Donu, 2015. Pp. 481-483. (rus)
- [37].Stepanov A.S., Melnikov V.A. Comparison of calculations using SNiP 2.02.01-87 and using special software. Construction of Unique Buildings and Structures. 2014. №7 (22). Pp. 9-23. (rus)
- [38].Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskiy D.B. [et al] Finite element modeling of problems of geomechanics and geophysics. Vestnik MGSU. 2012. №2. Pp. 52-65. (rus)
- [39].Protosenya A.G., Karasev M.A. Development of Numerical Model for Deformation Prediction of Soil Mass During Construction of a Moderately Deep Structure in the Abaqus Software Package. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2014. T. 51. № 2. Pp. 53-59. (rus)
- [40].Benz T., Schwab R., Vermeer P.A. On the practical use of advanced constitutive laws in finite element foundation analysis. Fondsup 2003 International Symposium. 2003. Pp. 8-16.
- [41].Wheeler S.J., Cudny M., Neher H.P., Wiltafsky C. Some developments in constitutive modeling of soft clays. International Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice. 2003. Pp. 101-121.

- [42]. Wiltafsky C., Scharinger F., Schweiger H.F. Results from a geotechnical benchmark exercise of an embankment on soft clay. International Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice. 2003. Pp. 67-73.
- [43]. Brinkgreve R. B. J. Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application. Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration / Ed. J.A.Yamamuro, V.N.Kaliakin. American Society of Civil Engineers, 2005. Vol. 128. Pp. 69-98.
- [44]. Calvello M., Finno R.J. Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis. Computers and Geotechnics. Vol. 31. Issue 5. Pp. 420-424.
- [45]. Barla M., Barla G. Torino subsoil characterization by combining site investigations and numerical modelling. Geomechanics and Tunelling. 2012. Vol. 3. Pp. 214-232.
- [46]. Rokonuzzaman M., Sakai T. Calibration of the parameters for a hardening-softening constitutive model using genetic algorithms. Computers and Geotechnics. 2010. Vol. 37. Issue 4. Pp. 573-579.

Егорова Е.С., Иоскевич А.В., Иоскевич В.В., Агишев К.Н., Кожевников В.Ю. Модели грунтов, реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D// Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №3 (42). С. 31-60.

Egorova E.S., Ioskevich A.V., Ioskevich V.V., Agishev K.N., Kozhevnikov V.Yu. Soil model implemented in the software packages SCAD Office and Plaxis 3D. Construction of Unique Buildings and Structures, 2016, 3 (42), Pp. 31-60. (rus)