



ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ЗДАНИЯ СО СВАЙНЫМ ФУНДАМЕНТОМ И ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ

Т. В. Золина, Ю. С. Ахмамбетова

Золина Татьяна Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Российская Федерация, тел.: + 7 (905) 364-58-58; e-mail: zolinatv@yandex.ru;

Ахмамбетова Юлия Сергеевна, магистрант, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Российская Федерация, тел.: + 7 (967) 828-34-98; e-mail: juliamal-2000@mail.ru

В условиях отсутствия общепризнанной методологии для моделирования пространственных конструкций зданий вопрос выбора модели грунтового основания остается актуальным. В данной статье рассмотрен поэтапный процесс создания расчетной модели здания со свайным фундаментом в программном комплексе Revit. Продемонстрирована разработка модели «грунтового основание» в программном комплексе ЛИРА 10, добавление скважин, разреза по грунту. Сваям заданы характеристики для расчета. Для каждой части сваи назначены свойства грунтов, которые она пронизывает. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния совместной работы здания и грунтового основания.

Ключевые слова: *грунтовое основание, напряженно-деформированное состояние, свайный фундамент, программный комплекс, свая, расчетная модель здания.*

NUMERICAL ANALYSIS OF THE JOINT WORK OF A BUILDING WITH A PILE FOUNDATION AND A SOIL BASE

T. V. Zolina, Yu. S. Akhmambetova

Zolina Tatyana Vladimirovna, Doctor of Technical Sciences, Professor of Industrial and Civil Engineering Department, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russian Federation, phone: + 7 (905) 364-58-58; e-mail: zolinatv@yandex.ru;

Akhmambetova Yuliya Sergeyevna, postgraduate student, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russian Federation, phone: + 7 (967) 828-34-98; e-mail: juliamal-2000@mail.ru

In the absence of a generally accepted methodology for modeling spatial structures of buildings in combination with ground foundations, the issue of choosing a ground foundation model remains relevant. This article discusses the step-by-step process of creating a computational model of a building with a pile foundation in the Revit software package (PC). The creation of the "ground base" model in the LIRA 10 software package (PC), the addition of wells, and the creation of a ground section are demonstrated. The piles are given characteristics for calculation, as well as the properties of the soils that it permeates are assigned to each part of the pile. An analysis of the stress-strain state of the joint operation of the building and the ground foundation has been performed.

Keywords: *ground foundation, stress-strain state, pile foundation, software package, pile, design model of the building.*

В рамках данного исследования рассматривается модель свайно-плитного фундамента многофункционального высотного комплекса при совместной работе здания с грунтовым основанием, проводится анализ осадки модели взаимодействия, исследуется комплекс процессов, происходящих в грунте под действием нагрузки от фундамента, а также реакция самого фундамента на эти процессы в программном комплексе (ПК) ЛИРА 10.

Многофункциональный высотный комплекс имеет в плане осевые размеры 24,25 × 29,5 м. Конструктивная схема здания каркасно-стеновая из монолитного железобетона, состоящая из пилонов и стен с объединяющими их в единую пространственную систему горизонтальными жесткими дисками в виде монолитных плит перекрытий. Фундамент свайно-плитный высотой $H = 1200$ мм из бетона класса В25. Сваи приняты буронабивные диаметром 400 мм, длиной 10 м

из бетона класса В25, заданы как упругие связи. Шаг свай принят $3d = 1200$ мм. Грунты – согласно инженерно-геологическому разрезу: ИГЭ 1 – супесь глинистая; ИГЭ 2 – супесь пластичная; ИГЭ 3 – суглинок пластичный; ИГЭ 4 – суглинок моренный; ИГЭ 5 – песок средней плотности сложения; ИГЭ 6 – глины полутвердые.

Исследования показывают, что использование сложных моделей грунтов позволяет более точно учитывать взаимодействие строительных объектов с основанием, что особенно важно для зданий, расположенных на нестабильных или сложных грунтах. В результате применения таких моделей проектировщики могут не только уменьшить риски, связанные с возможными деформациями и разрушениями, но и оптимизировать проектные решения, что в конечном итоге приводит к снижению затрат на строительство и повышению долговечности объектов. Кроме того, современные программные

комплексы позволяют проводить сценарные анализы, что дает возможность оценить влияние различных факторов. Это открывает новые горизонты для разработки более безопасных и эффективных архитектурных решений.

Одной из ключевых задач является обеспечение совместимости между грунтовым основанием и возводимым зданием. Проблемы могут возникать при неравномерной осадке фундамента, изменении свойств грунта под воздействием внешних факторов, а также при недостаточной проработке взаимодействия основания и конструкции здания. Это может привести к деформации и разрушению строительных объектов, что представляет угрозу для безопасности людей и имущества.

Так, например, в работе [1] акцентируется внимание на моделировании поведения оснований и их взаимодействии с конструкциями, предлагаются различные подходы к учету деформаций и напряжений в сжимаемом основании. В работе [2] рекомендуется использовать методы оптимизации проектных решений, которые основываются на численных методах и программном обеспечении, что позволяет значительно улучшить точность расчетов. В работе [3] приводится качественная оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций здания при изменении разработанных коэффициентов взаимодействия. Показано, что, чем жестче сооружение и податливее основание, тем сильнее проявляются основные эффекты их взаимодействия, такие как перераспределение усилий или выравнивание осадок фундамента.

В нашей стране для расчета зданий различного класса ответственности с фундаментами и грунтовыми основаниями широко применяется ПК ЛИРА 10. Данный комплекс – это мощная

программная система для автоматизированного расчета строительных конструкций, которая широко используется в проектировании. Она позволяет выполнять статические и динамические расчеты, анализ НДС конструкций, а также решать задачи оптимизации при проектировании.

Обобщая вышесказанное, основной целью данной работы является комплексное исследование взаимодействия грунтового основания и здания при проектировании, анализ полученных результатов в табличных формах и в виде графических изображений.

Основные задачи исследования:

1) получение расчетной схемы здания со свайно-плитным фундаментом при совместной работе с грунтовым основанием, с получением выходных материалов в программном комплексе ЛИРА 10;

2) проведение анализа полученных результатов, формирование их аналитики в табличных формах и в виде графических изображений.

При исследовании совместной работы грунтового основания и здания были выполнены следующие этапы:

1) проведен сбор нагрузок, действующих на проектируемое здание (табл.);

2) разработана расчетная модель здания с учетом действующих нагрузок. Для расчета выполнен перенос модели здания со свайным фундаментом и всеми действующими нагрузками из ПК Revit в ПК ЛИРА 10 (рис. 1, 2);

3) создана модель грунта, согласно инженерно-геологическому разрезу;

4) заданы скважины в грунте;

5) выведен разрез по грунту со сваями (рис. 3);

6) Проведен полноценный расчет системы «здание со свайным фундаментом и грунтовым основанием» в ПК ЛИРА 10.

Таблица

Показатели нагрузок, действующих на проектируемое здание

Вид загрузки	Коэффициент к расчетным нагрузкам	Доля длительности	Комбинация нагрузок			
			1	2	3	4
Постоянная нагрузка (собственный вес)	1.1	1	1	1	1	1
Кратковременная полезная нагрузка	1.3	0.35	1	1	1	1
Ветровая нагрузка	1.4	0	1	0	0	0
Кратковременная снеговая нагрузка	1.4	0.35	0,9	0,9	0,9	0,9
Постоянная нагрузка от давления грунта	1.15	1	1	1	1	1

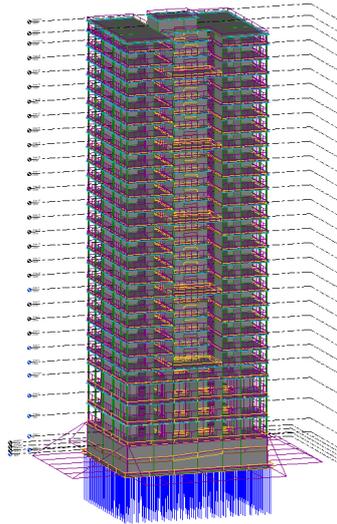


Рис. 1. Модель здания в ПК Revit

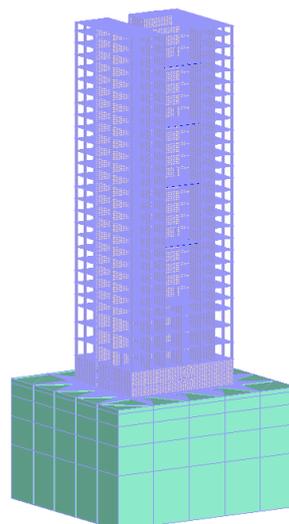


Рис. 2. Модель здания в ПК ЛИРА 10

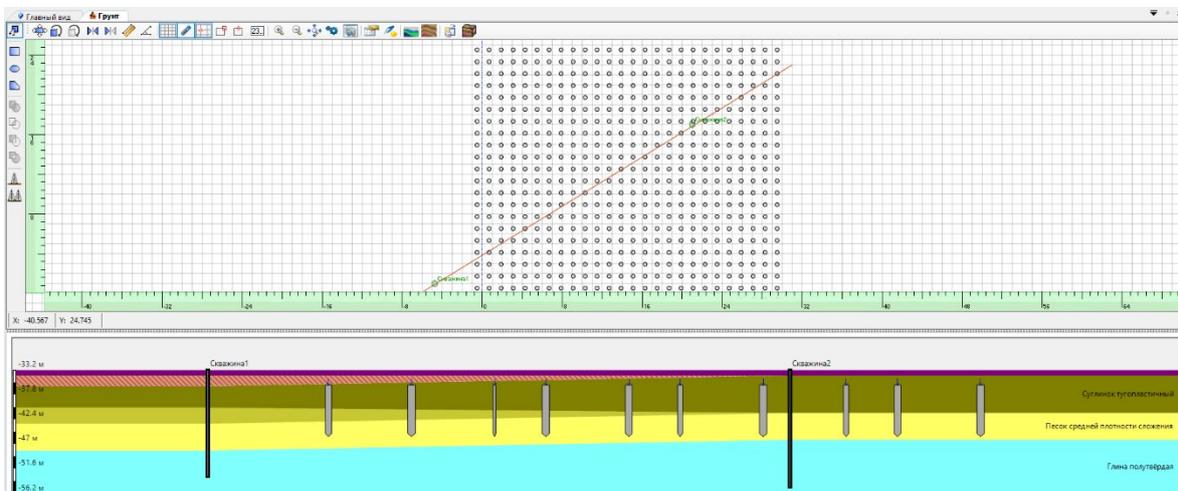


Рис. 3. Разрез по грунту со сваями

На основании выполненного расчета были получены следующие результаты:

1) значения реактивного отпора грунта – R_z (тс) (рис. 4);

По окончании расчета были проанализированы величины распределения нагрузок [4–12]. Далее проведены три итерации расчета, после которых получен процент изменения распределения нагрузок, равный 0.011 %, что означает корректность возведенной расчетной модели. После уточнены результаты реактивного отпора грунта – R_z (тс) и приняты данные R_z как исходные (рис. 4);

2) коэффициент постели (рис. 5).

Данный коэффициент необходим для дальнейшего нахождения осадки фундамента:

$$C = P/s,$$

где C – коэффициент постели; P – давление, приложенное к поверхности грунта; s – осадка.

Так как свая воспринимает нагрузку боковой поверхностью [13], она рассматривается как совокупность конечных элементов, каждый из которых соприкасается с определенным слоем грунта;

3) осадка здания.

Полученная осадка здания приближена к фактическим значениям и составляет 22 мм, что меньше 15 см, требуемых по СП 20.13330.2016, (рис. 6);

4) несущая способность свай (рис. 7).

Данный параметр позволяет подобрать тип свай, выдерживающий нагрузку. Несущая способность в данном исследовании составила 121 тс;

5) коэффициент использования свай по несущей способности по грунту (рис. 8).

Он отражает нагрузки на сваи и их включение в работу, является параметром по подбору количества свай;

6) количество свай и их расположение.

Благодаря возможностям ПК, фундамент запроектирован максимально эффективно и экономично [14–20];

7) формы горизонтальных перемещений здания со свайным фундаментом при совместной работе с грунтовым основанием вдоль осей X , $-X$, Y , $-Y$ (рис. 9–12).

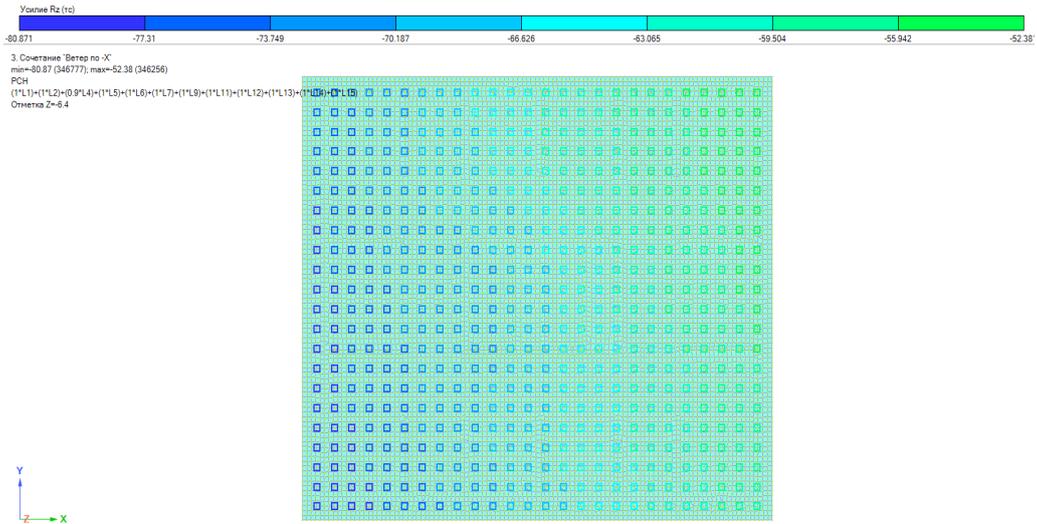


Рис. 4. Результаты Rz – реактивного отпора грунта по третьей итерации

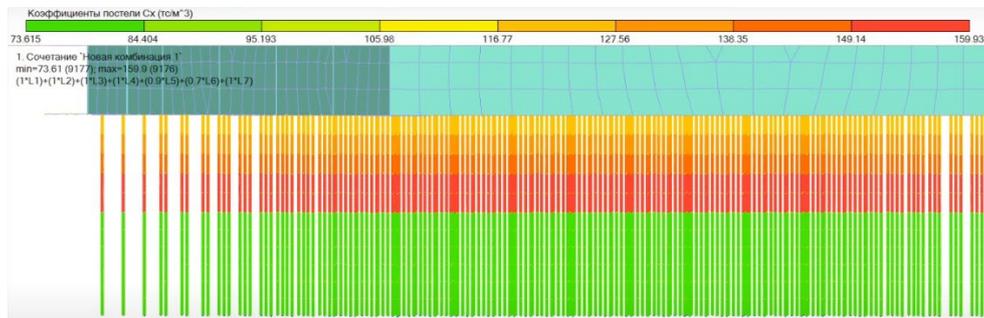


Рис. 5. Коэффициент постели Sx

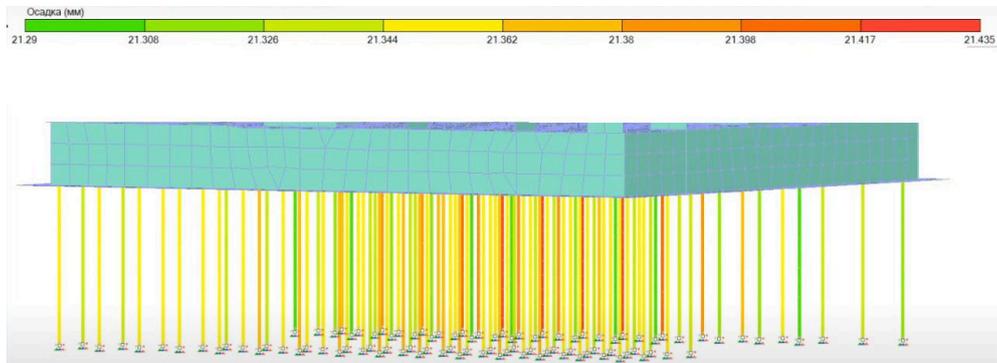


Рис. 6. Осадка здания

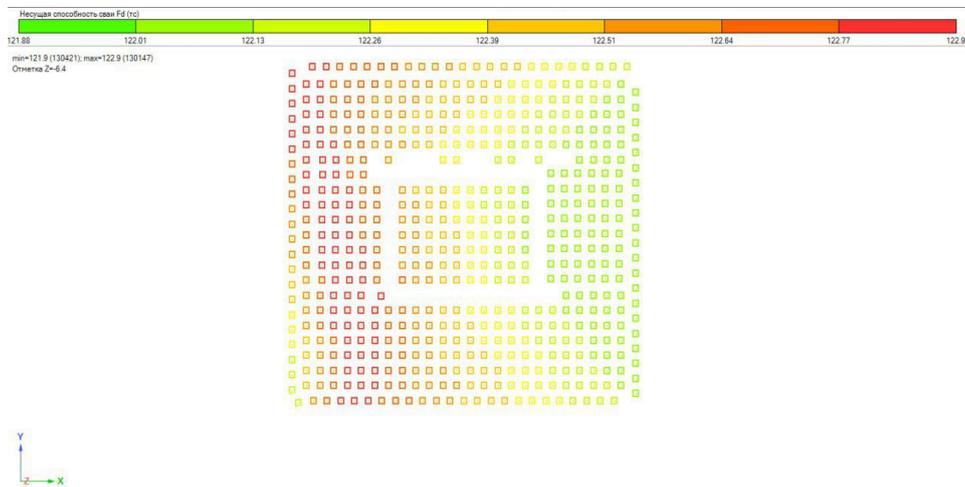


Рис. 7. Несущая способность свай по грунту Fd

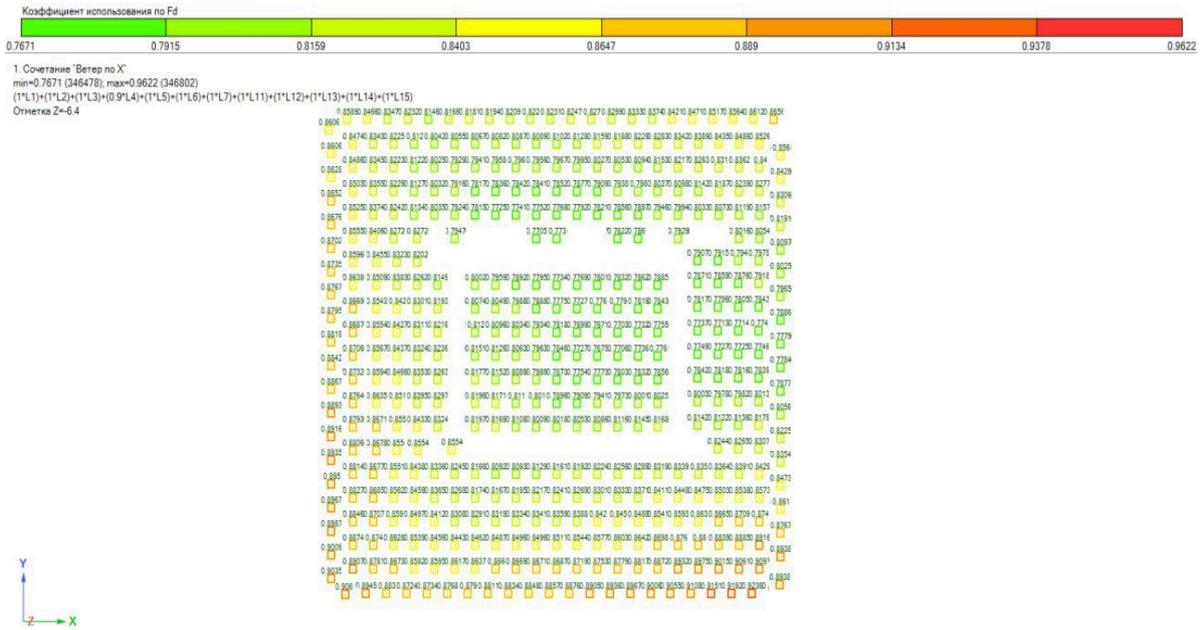


Рис. 8. Коэффициент использования по Fd (несущей способности)

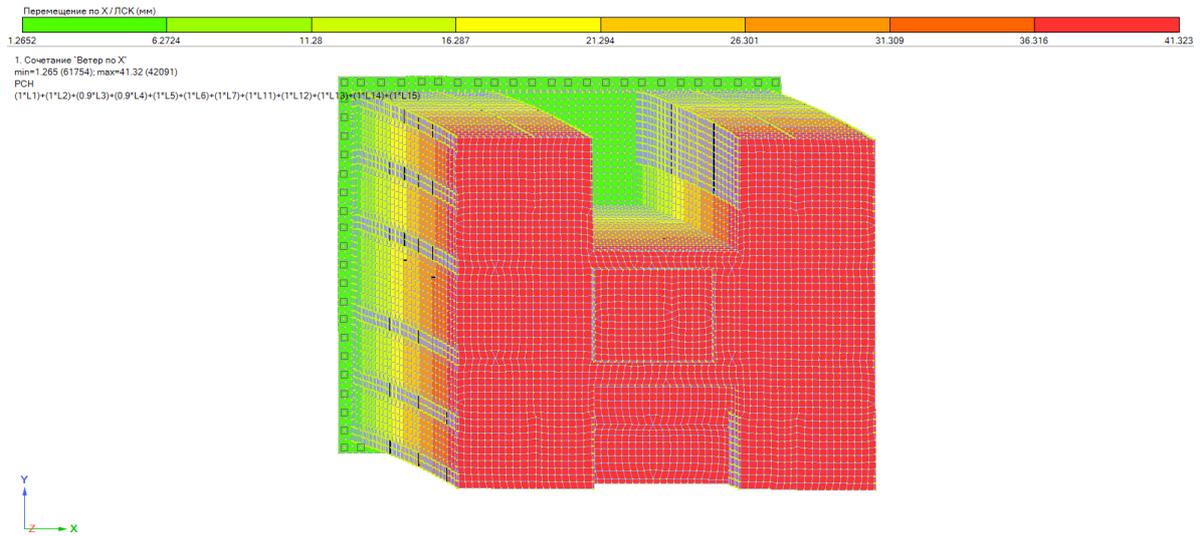


Рис. 9. Горизонтальные перемещения здания с основанием вдоль оси X

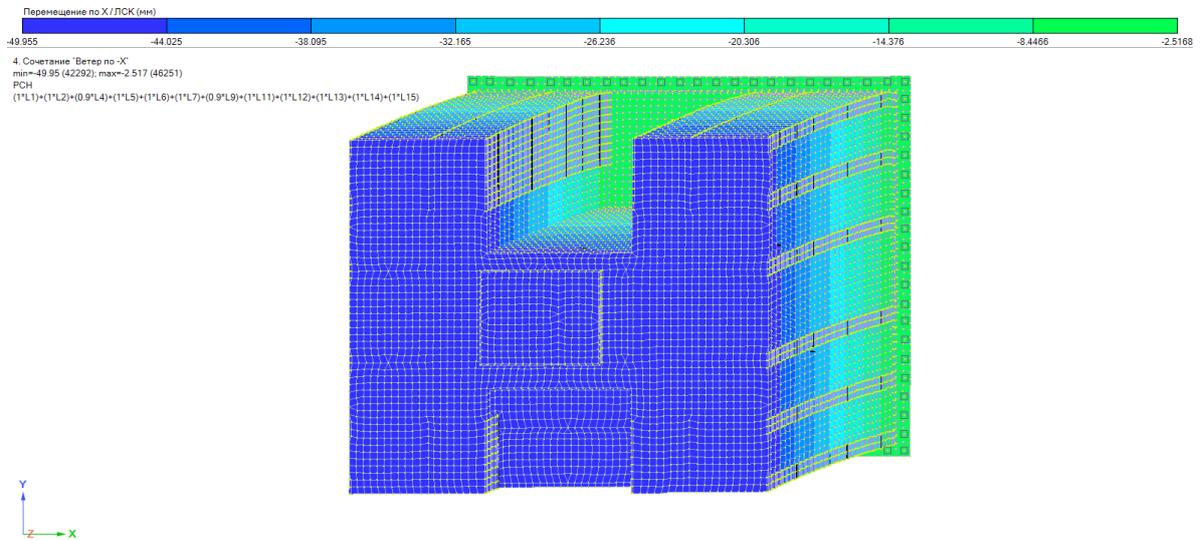


Рис. 10. Горизонтальные перемещения здания с основанием вдоль оси -X

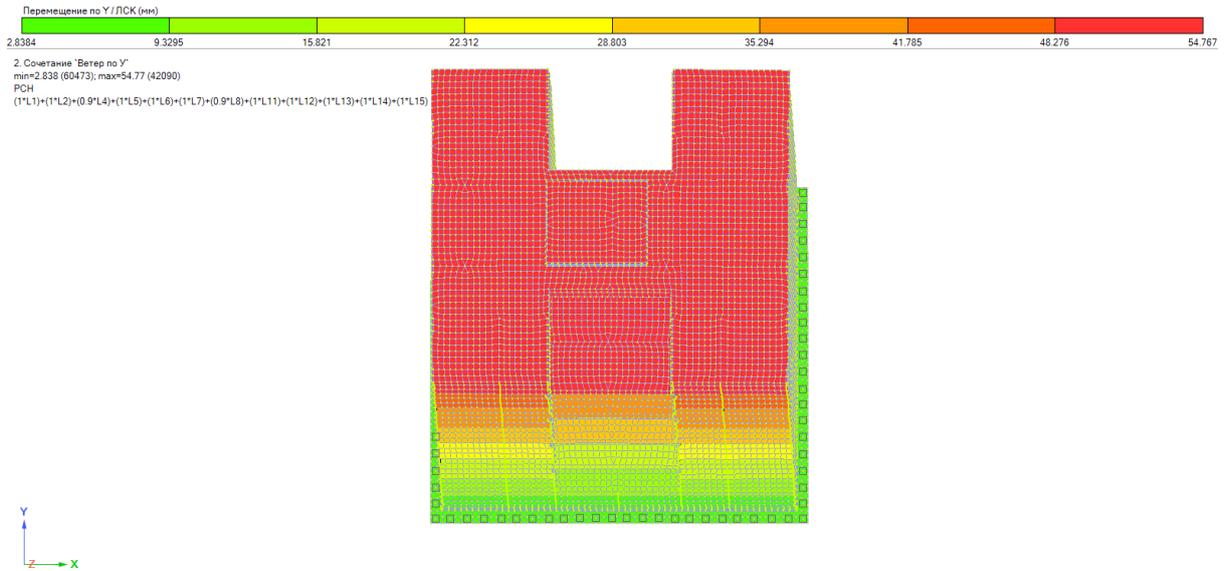


Рис. 11. Горизонтальные перемещения здания с основанием вдоль оси Y

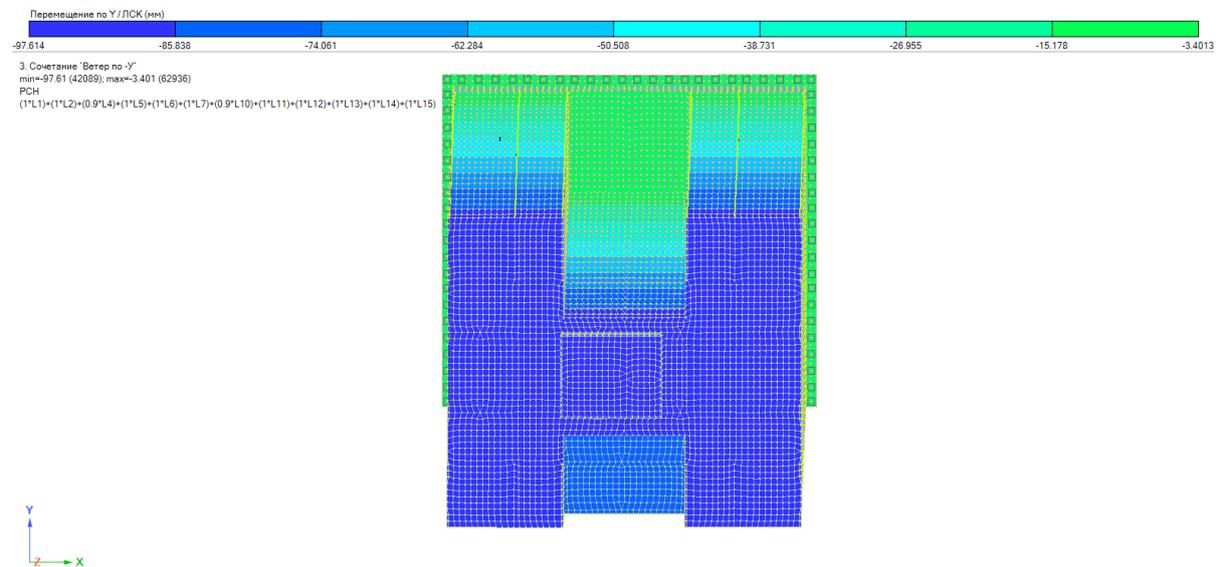


Рис. 12. Горизонтальные перемещения здания с основанием вдоль оси $-Y$

Анализируя полученные данные, видим, что формы перемещений здания поступательные. Высота $h = 85,8$ м. Максимальные перемещения по оси $-Y$ составляют $97,61 \text{ мм} < 171,6 \text{ мм}$, условие $h / 500 = 85,800 / 500 = 171,61 \text{ мм}$ табл. Д.4, прил. Д СП 20.13330.2016 выполняется.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных расчетов здания со свайным фундаментом и грунтовым основанием (рис. 1–3) с помощью программного комплекса определены несущая способность свай по грунту, которая составила 121 тс (рис. 7), осадка, результат которой 22 мм , удовлетворяющий нормам СП 20.13330.2016 (рис. 6) и коэффициент их использования в данном фундаменте

(рис. 8). Подтверждено, что данный расчет упрощает работу инженера и дает возможность проверить данные по сваям без результатов статических испытаний. Сделаны выводы о преимуществах свайно-плитного фундамента, подтвержденные экспериментальными данными. Определено, что специализированный программный комплекс позволяет разрабатывать модели, которые наиболее точно воссоздают геологические условия, и проводить расчеты взаимодействия здания и грунтового основания. Данное исследование доказало влияние грунтового основания на напряженно-деформированное состояние многоэтажных зданий при подборе фундамента.

Список литературы

1. Горбунов-Посадов М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва, 1984.
2. Корнев Б. Г. Введение в теорию бесселевых функций / Б. Г. Корнев. – Москва : Наука, 1971.

3. Loganathan N. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays / N. Loganathan, H. G. Poulos // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 1998. – Vol. 124, № 9. – P. 846–856.
4. Плахутина А. А. Применение информационного моделирования зданий при расчете фундаментов каркасного здания на естественном основании / А. А. Плахутина // *Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении : материалы научно-технической конференции*. – Новочеркасск, 2022. – С. 216–224.
5. Мещеряков Ю. И. Formation of a Multiscale Structure during Impact Loading of a Solid / Ю. И. Мещеряков, Н. И. Жигачева, Г. В. Коновалов, А. К. Диваков, V. A. Morozov // *Technical Physics Letters*. – 2021. – Т. 47, № 5. – С. 357–359.
6. Босаков С. В. Об одной модели упругого основания и ее использовании для расчета прямоугольной плиты на упругом основании / С. В. Босаков, С. И. Зиневич, О. В. Козунова // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2018. – № 4 (279). – С. 2–5.
7. Ширунов Г. Н. Численно-аналитический расчет упругого грунтового основания / Г. Н. Ширунов // *Архитектура, строительство, землеустройство и кадастры на дальнем востоке в XXI веке : материалы Международной научно-практической конференции*. – 2017. – С. 126–130.
8. Соломин В. И. Расчет конструкций на упругом основании / В. И. Соломин // *Государственная премия СССР*. – 1987.
9. Цытович Н. А., Устройство для определения прочностных и деформационных характеристик грунта / Н. А. Цытович, З. Г. Тер-Мартirosян, Ю. С. Григорьев, В. А. Тищенко. – Авторское свидетельство SU 998648 a1, 23.02.1983. – Заявка № 3289019 от 07.05.1981.
10. Купчикова Н. В. Результаты численного анализа системы «здание-свайный фундамент-грунтовое основание» с помощью «MIDAS GTS NX» / Н. В. Купчикова, А. Н. Сычков // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. – 2021. – №1 (35). – С. 19–24.
11. Байков В. Н., Сигалов Э. И. Железобетонные конструкции. Общий курс / В. Н. Байков, Э. И. Сигалов. – Москва : Стройиздат, 2008.
12. *Geodesic Math and How to Use It First Edition* by Hugh Kenner. – 1990.
13. Введение в программный комплекс ЛИРА 10.4 : учебное пособие – Режим доступа: <https://lira-soft.com/download/metodpos/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
14. Жакулин А. С. Расчетные сопротивления грунтов свайных фундаментов / А. С. Жакулин, А. А. Жакулина // *Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры имени Н. Исанова*. – 2016. – № 1 (51). – С. 209–213.
15. Солонов Г. Г. Особенности погружения свай в грунт / Г. Г. Солонов, А. В. Печеникин, М. О. Артеменко // *Сборник: ADVANCED SCIENCE : сборник статей XI Международной научно-практической конференции*. – 2020. – С. 252–253.
16. Солонов Г. Г., Печеникин А. В., Артеменко М. О. Преимущества и недостатки буронабивных свай / Г. Г. Солонов, А. В. Печеникин, М. О. Артеменко *Сборник: Европейские научные исследования : сборник статей V Международной научно-практической конференции*. – 2020. – С. 200–201.
17. Мангушев Р. А., Дьяконов И. П., Полунин В. М., Башмаков И. Б., Паскачева Д. А. Математическое моделирование работы плитных элементов при совместной работе с грунтовым основанием в условиях плоской деформации / Р. А. Мангушев, И. П. Дьяконов, В. М. Полунин, И. Б. Башмаков, Д. А. Паскачева // *Жилищное строительство*. – 2024. – № 11. – С. 37–46.
18. Москалькова Ю. Г. Влияние конструктивных особенностей фундамента на выбор размеров фундамента / Ю. Г. Москалькова // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Международной научно-технической конференции / под ред. М. Е. Лустенкова и др.* – Могилев, 2021. – С. 253–254.
19. Кононенко В. В. Фундаменты, их роль в конструкции здания и основные ошибки при укладке фундаментов / В. В. Кононенко, В. И. Пахолько, С. П. Горзова // *Тенденции развития науки и образования*. – 2024. – № 109-15. – С. 44–49.
20. Сережев Д. В. Исследование расчетных моделей системы «фундамент – основание» для свайных фундаментов / Д. В. Сережев // *Сборник научных трудов 2-й Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров*. – 2020. – С. 189–191.

© Т. В. Золина, Ю. С. Ахмамбетова

Ссылка для цитирования:

Золина Т. В., Ахмамбетова Ю. С. Численный анализ совместной работы здания со свайным фундаментом и грунтового основания // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет*. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. №1 (51). С. 54–60.