

На правах рукописи



Морозов Евгений Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА
С ЭКРАНОМ ИЗ РАЗРЕЖЕННОГО РЯДА СВАЙ**

05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Знаменский Владимир Валерианович

Официальные оппоненты: **Полищук Анатолий Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Кубанский государственный аграрный
университет имени И.Т.Трубилина», заведующий
кафедрой «Основания и фундаменты»

Купчикова Наталья Викторовна,
кандидат технических наук, доцент,
государственное автономное образовательное
учреждение Астраханской области высшего
образования «Астраханский государственный
архитектурно-строительный университет»,
заведующий кафедрой «Экспертизы, эксплуатации
и управления недвижимостью»

Ведущая организация: АО «Научно-исследовательский центр
«Строительство». Научно-исследовательский,
проектно-изыскательский и конструкторско-
технологический институт оснований и подземных
сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеева.

Защита состоится «9» июня 2021 г., в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.05 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 (Минаевский переулок, д. 2, ГУК-7, аудитория 7618).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.mii.ru.

Автореферат разослан « » апреля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Шавыкина Марина Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из основных задач, стоящих перед проектировщиками и строителями, является снижение негативного влияния, оказываемого строительством, в частности устройством котлованов и их ограждений, на рядом расположенные здания. При проектировании оценка этого влияния, которое заключается, в основном, в развитии дополнительных осадок зданий окружающей застройки, осуществляется, как правило, при помощи численного моделирования в пространственной или плоской постановке, но при этом, устройство ограждения котлована не выделяется в отдельную стадию расчета. В то же время, как показывает практика, устройство наиболее массового в современном строительстве ограждения в виде монолитной железобетонной «стены в грунте» траншейного типа может привести к осадке зданий окружающей застройки, составляющей до 80% от их осадки, вызванной всем строительством, что необходимо учитывать при проектировании, принимая в каждом конкретном случае наиболее эффективные меры по ее снижению до нормативного уровня. Одной из таких мер является устройство защитных геотехнических экранов различного типа, располагаемых между ограждением котлована и защищаемым зданием.

За последние годы тесное взаимодействие научных работников, технологов и строителей позволили разработать и внедрить в производство ряд прогрессивных методов устройства геотехнических экранов, тем не менее поиск новых конструктивных решений экранов, одним из которых является разреженный ряд свай, детальное исследование их взаимодействия с грунтовым массивом, оценка эффективности применения и разработка методов расчета остаются актуальными задачами современного строительства, успешное решение которых позволит снизить стоимость и сократить сроки строительных работ, уменьшить затраты на проведение защитных мероприятий, ремонт и восстановление окружающей застройки.

Степень разработанности темы исследования. Экспериментальным и аналитическим исследованиям влияния откопки котлованов и устройства ограждающих конструкций на дополнительные осадки зданий и сооружений окружающей застройки посвящено много отечественных и зарубежных работ.

При аналитических исследованиях напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтовых массивов при устройстве в них выемок использовались классические решения теории упругости.

Отдельно рассматривались вопросы влияния на осадки, включая технологические, рядом расположенных зданий изменения НДС грунтового массива, вызванные устройством ограждения котлована по технологии траншейной «стены в грунте» (В.В. Знаменский, В.А. Ильичёв, О.А. Исаев, И.В. Колыбин, П.А. Коновалов, Д.С. Конюхов, Р.А. Мангушев, И.Т. Мирсаяпов, О.А. Мозгачева, Е.Б. Морозов, Н.С. Никифорова, В.Н. Парамонов, В.П. Петрухин, А.Б. Пономарёв, Д.Е. Разводовский, Д.А. Сапин, А.И. Свиридов, В.М. Улицкий, Д.Ю. Чунюк, А.Г. Шашкин и др.). Результаты их исследований существенно расширили

наши знания о механизме влияния вскрытия траншеи на деформации основания в зоне расположения существующих фундаментов и позволили дать им количественную оценку.

Вопросу исследования возможности и эффективности применения геотехнических экранов и барьеров для защиты от развития сверхнормативных осадок зданий, расположенных в зоне влияния строительства, посвящены работы А.Л. Готмана, Ю.А. Готмана, Ф.Ф. Зехниева, В.А. Ильичева, Н.С. Никифоровой, А.И. Полищука, Д.Е. Развадовского, О.А. Шулятьева, В.Н. Vin-Chen, F.T. David, C. Chun-Hung, N.H. Richard и др. В этих работах были рассмотрены и проанализированы различные аспекты технологии устройства и проектирования экранов, показана целесообразность их устройства, однако детальные исследования взаимодействия геотехнических экранов с грунтовым массивом и факторов, влияющих на эффективность их применения практически не проводились.

Большое число работ было посвящено исследованию работы свайных конструкций, используемых в качестве защитных устройств для повышения устойчивости откосов, склонов и бортов котлованов (Р.Ш. Адигамов, А.А. Бартоломей, А.И. Билеуш, А.Н. Богомолов, А.С. Буслова, А.Г. Гагаркин, А.Л. Готман, Л.К. Гинзбург, Ф.Н. Деревенец, В.В. Знаменский, В.А. Ильичев, О.В. Карасев, Э.Я. Кильвандер, Л.С. Лapidус, С.И. Маций, Е.Б. Морозов, Г.Д. Недря, Н.С. Никифорова, З.С. Орагвелидзе, А.И. Полищук, О.Г. Семенов, А.Б. Пономарев, З.Г. Тер-Мартirosян, А.П. Хамов, К.Ш. Шадунц, О.А. Шулятьев, E.-C. Ang, J. E. Loehr, D. E. Smith и др.). Изучены вопросы взаимодействия оползневых массивов с удерживающими свайными конструкциями, разработаны методы определения предельных давлений на сваи и шага их погружения. Однако работа свай в удерживающей оползневой склон конструкции существенно отличается от работы свай геотехнического экрана, как по условиям нагружения, так и отсутствием, как правило, заделки в коренные грунты. Отсутствует и методика их расчета, что сдерживает их широкое внедрение в практику строительства при решении важнейшей задачи защиты окружающей застройки от негативного влияния строительных работ в стесненных городских условиях.

Цель диссертационной работы - разработка методики определения оптимальных параметров конструкции защитного геотехнического экрана из разреженного ряда свай в зависимости от необходимой степени снижения дополнительной осадки рядом расположенного здания.

Задачи исследования:

1. Обобщение и анализ экспериментальных и расчетных данных о влиянии процесса устройства ограждений котлованов, выполняемых по технологии траншейной «стены в грунте», на окружающую застройку, в том числе и защищенную геотехническим экраном.
2. Исследование численным методом НДС грунтового массива вмещающего траншею под «стену в грунте», защитный экран и фундамент существующего здания с целью установления зависимости осадок окружающей застройки, вызванных устройством «стены в грунте», от параметров геотехнического

- экрана (диаметр свай, шаг и глубина их погружения), его расположения относительно защищаемого здания и технологии устройства.
3. Анализ результатов выполненных численных исследований, определение коэффициента эффективности применения защитного экрана.
 4. Факторный анализ степени влияния местоположения и параметров геотехнического экрана из разреженного ряда свай на величину коэффициента эффективности его применения для снижения осадок окружающей застройки в связных и несвязных грунтах.
 5. Получение аналитических решений, описывающих физический процесс взаимодействия элементов системы «траншея – грунтовый массив – геотехнический экран – фундамент здания» с использованием классических решений механики грунтов.
 6. Разработка методики определения оптимальных параметров конструкции экрана в зависимости от необходимой степени снижения дополнительной осадки защищаемого здания.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние элементов системы «траншея–грунтовый массив–геотехнический экран–фундамент здания».

Объект исследования – геотехнический экран из разреженного ряда свай, располагаемый между котлованом под новое строительство и ближайшими зданиями с целью снижения их осадок, вызванных откопкой траншеи под монолитную железобетонную «стену в грунте».

Научная новизна заключается в достижении следующих результатов:

- установлены закономерности изменения эффективности применения защитного экрана из разреженного ряда свай на осадки зданий окружающей застройки, вызванные устройством траншеи под «стену в грунте», в зависимости от его конструктивных параметров (диаметр свай, их шаг и глубина погружения), расстояния от траншеи и защищаемого здания, типа грунтовых условий и технологии устройства свай экрана;
- получены аналитические решения, описывающие физический процесс взаимодействия элементов системы «траншея – грунтовый массив – геотехнический экран – фундамент здания» с использованием классических решений механики грунтов;
- получены функциональные зависимости коэффициента эффективности применения геотехнического экрана от варьируемых факторов, позволяющие выполнить подбор основных размеров защитной свайной конструкции в связных и несвязных грунтах с учетом технологии изготовления свай;
- определено, что наибольшей степенью влияния на эффективность применения защитной свайной конструкции для снижения осадок зданий окружающей застройки обладают глубина разрабатываемой траншеи, ее расстояние относительно фундамента здания, диаметр и длина свай экрана, меньшее влияние оказывают модуль деформации грунтового массива и относительное осевое расстояние между сваями;

- показано, что эффективность применения экрана существенно выше в песчаных грунтах по сравнению с глинистыми, также установлено, что применение защитного экрана наиболее эффективно при его устройстве до глубины, составляющей не более 1,2 глубины траншеи и его расположении ближе к ней;
- определены пределы эффективности применения экрана из разреженного ряда свай для защиты от развития сверхнормативных осадков окружающей застройки;
- на основе выполненных аналитических исследований разработана методика оптимизации конструктивного решения экрана из разреженного ряда свай, позволяющая устанавливать его основные параметры в зависимости от необходимой степени снижения дополнительных осадков защищаемого здания.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в разработке принципов расчета и проектирования защитных экранов из разреженных рядов свай, применяемых для снижения до требуемого уровня осадков зданий и сооружений окружающей застройки, вызванных устройством монолитной железобетонной «стены в грунте» траншейного типа, служащей ограждением котлована под строительство нового объекта в условиях стесненной городской застройки;
- в разработке метода оптимизации параметров геотехнического экрана, позволяющий сократить расходы и время на его устройство;
- в возможности использования результатов проведенных исследований при проектировании ограждений котлованов типа монолитная железобетонная «стена в грунте» траншейного типа и мероприятий по защите зданий и сооружений окружающей застройки от развития сверхнормативных осадков, вызванных новым строительством;
- в возможности на стадии проектирования оптимизировать параметры геотехнического экрана из разреженного ряда свай в зависимости от необходимой величины снижения осадки защищаемого здания;
- в возможности выполнить расчеты по разработанным методикам с использованием специальных диаграмм, что существенно сокращает время проектирования и позволяет рассмотреть большое число возможных вариантов экрана;
- в возможности использования полученных аналитических решений для проверки основных результатов численных расчетов, а также для выполнения предварительных расчетов геотехнического экранов и дополнительных осадков фундаментов по упрощенным схемам;
- в возможности использования результатов проведенных исследований и разработанных методик расчета для актуализации нормативных документов в области геотехники.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационного исследования являлись труды отечественных и зарубежных ученых, технологов, проектировщиков и строителей в области геотехники. В диссертационной работе применялись следующие методы:

- анализ литературных источников по тематике диссертационной работы;

- численное моделирование работы геотехнического экрана из разреженного ряда свай, расположенного между траншеей под «стену в грунте» и фундаментом защищаемого здания, анализ напряжённо-деформированного состояния системы «траншея – грунтовый массив – геотехнический экран - здание»;
- факторный анализ влияния местоположения и конструктивных параметров свайного ряда на эффективность его применения для защиты от развития осадок зданий окружающей застройки при устройстве траншейной «стены в грунте».
- сравнение результатов численного моделирования с результатами аналитических решений, полученных с использованием классических решений механики грунтов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика и результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния системы «траншея–грунтовый массив– геотехнический экран–фундамент существующего здания».
2. Результаты численных расчетов влияния расположения и параметров защитного экрана из разреженного ряда свай на степень снижения осадок зданий и сооружений окружающей застройки, вызванных устройством траншейной «стену в грунте», служащей ограждением котлована под новое здание.
3. Методика выполнения и результаты факторного анализа степени влияния местоположения и конструктивных параметров геотехнического экрана на эффективность его использования для снижения осадок зданий и сооружений в зоне влияния откопки траншеи под «стену в грунте».
4. Методика расчета геотехнического экрана, позволяющая определять его параметры (диаметр свай, их шаг и глубину погружения) в зависимости от необходимой величины снижения осадки защищаемого здания до требуемого уровня.
5. Методика оптимизации конструктивных параметров защитного экрана из разреженного ряда свай с учетом заданной степени эффективности его устройства.
6. Алгоритм расчета снижения осадок зданий окружающей застройки, вызванных вскрытием траншеи под «стену в грунте», с помощью геотехнического экрана из разреженного ряда свай.
7. Аналитические решения, описывающие физический процесс взаимодействия элементов системы «траншея – грунтовый массив – геотехнический экран – фундамент здания» с использованием классических решений механики грунтов.

Степень достоверности исследований проведенных в диссертационной работе исследований и сделанных выводов подтверждается применением основных положений моделей поведения материалов, применяемых в механике грунтов, теории упругости, теории пластичности, математической статистики, использованием современных комплексов и методик обработки экспериментальных данных, непротиворечием полученных результатов имеющимся данными о применении защитных конструкций, подтверждением

результатов численного моделирования аналитическими расчётами с использованием классических решений теории упругости.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы были рассмотрены и обсуждены на:

- XIII Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и докторантов. МГСУ, 14-21 апреля 2010 г;
- XIV Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и докторантов. МГСУ, 27-29 апреля 2011 г;
- Научно-технической конференции «Численные методы расчетов в практической геотехнике», СПбГАСУ, Санкт-Петербург, 2012 г;
- Научно-технической конференции ВИТУ «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций». г. Санкт Петербург, 29 марта 2016 г;
- Международной конференции 2018 NEU International Postgraduate Summer School – Intelligent Civil, Северо-Восточный Университет г. Шеньян (Китай), 2018 г;
- Международной геотехнической конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и расчеты», СПбГАСУ, Санкт-Петербург, 2019 г.;
- Международном научном конгрессе XXII International Scientific Conference on Advanced In Civil Engineering Construction the formation of living environment 2019, Узбекистан, г. Ташкент, 2019 г.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 4-х приложений, содержит 198 страниц, 80 рисунков и 48 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, отражена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследований, отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены различные варианты устройства котлованов и их ограждений. Показано, что одним из наиболее часто применяемых технических решений при возведении ограждений глубоких котлованов в стесненных городских условиях является монолитная траншейная «стена в грунте», устройство которой сопровождается развитием существенных дополнительных осадок зданий окружающей застройки. Отмечена роль отечественных и зарубежных ученых и специалистов в разработке теоретических основ и методов оценки влияния откопки котлованов и вскрытия траншей под «стены в грунте» на осадки окружающей застройки. Рассмотрены мероприятия, применение которых позволяет уменьшить эти осадки, одним из которых является разреженный ряд свай, расположенный

между ограждением котлована и защищаемым зданием. Подчеркивается, что в отличие от свайных рядов, используемых в качестве противоположных конструкций, взаимодействие которых с грунтовым массивом хорошо изучено и освещено в отечественной и зарубежной технической литературе, работа рядов свай, образующих геотехнический экран, до настоящего времени специально не изучалась, методика расчета отсутствует. Эти вопросы остаются открытыми, что сдерживает широкое применение на практике этой перспективной, на наш взгляд, защитной конструкции.

В выводах по главе сформулированы цель и задачи экспериментальных и аналитических исследований диссертации, направленных на решение этих вопросов.

Вторая глава посвящена исследованию закономерностей влияния устройства геотехнического экрана из разреженного ряда свай на снижение осадок зданий окружающей застройки, вызванных устройством монолитной железобетонной «стены в грунте».

Исследование выполнялось численным методом - методом конечных элементов. Моделирование производилось в программном комплексе «MIDAS GTS», в пространственной постановке с использованием упругопластической модифицированной модели Мора-Кулона.

Эффективность применения защитного экрана из разреженного ряда свай и ее зависимость от различных факторов устанавливалась путем сравнения результатов расчетов осадок зданий окружающей застройки, без устройства защитной свайной конструкции и с ее применением.

При расчете осадок здания без применения геотехнического экрана рассматривались фундаменты глубиной заложения 1,5 м, с шириной подошвы 1,5 м, с передаваемым давлением на грунт $p=200$ кПа. Параметры траншеи варьировались в следующих пределах: глубина траншеи H_{tr} изменялась от 20 до 30 м, длина захватки L_{tr} - от 1 до 6 м. Удаленность траншеи от фундамента здания L_0 принималась в диапазоне от 2 до 6 м.

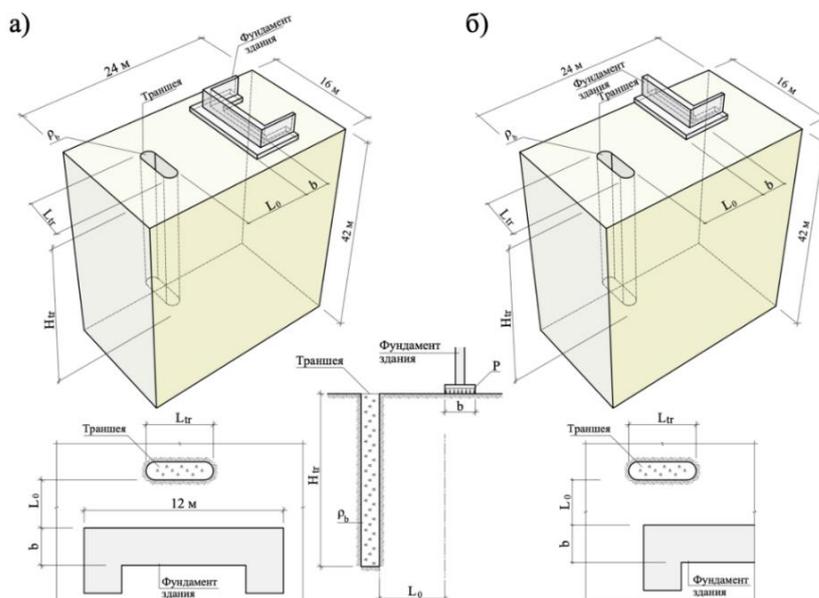


Рисунок 1 - Схемы к расчету осадки фундамента, вызванной разработкой траншеи:
а) расчетная схема 1;
б) расчетная схема 2.

Конечно-элементные модели расчетных схем имели размеры 16x24x42 м, включали грунтовый массив, ленточный фундамент и траншею ограниченной длины (см. Рисунок 1). Схема 1 моделировала расчетный случай, при котором захватка была расположена по центру фундамента, на схеме 2 захватка располагалась у его края.

Графики на Рисунке 2, построенные по результатам расчета по двум указанным схемам, показывают, что осадки здания, вызванные разработкой траншеи, расположенной у края фундамента (схема 2), больше осадок здания в случае ее расположения по центру фундамента (схема 1). В обоих расчетных случаях с увеличением длины траншеи осадки и интенсивность их увеличения возрастают, растет и разница в осадках, достигая максимального значения при $L_{tr} = 6$ м. При длине траншеи менее 3 м эта разница практически отсутствует.

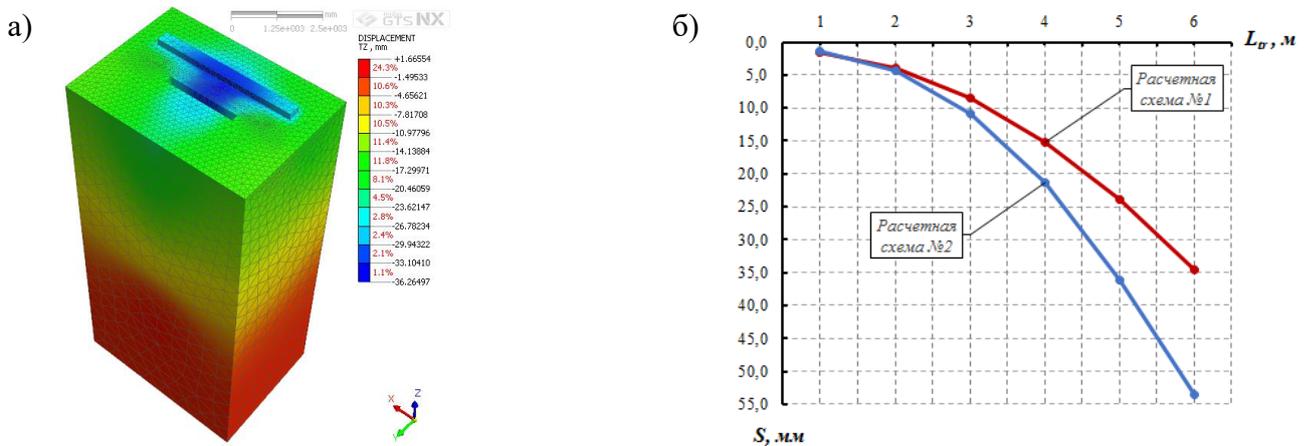


Рисунок 2 – Результаты расчета осадок фундаментов, вызванных разработкой траншеи: а) – изополю деформаций по оси Z расчетной схемы 1; б) - графики зависимости $S=f(L_{tr})$ при $L_0=3$ м, $H_{tr}=25$ м.

Перед выполнением дальнейших расчетов габариты расчетной модели были уменьшены в 5 раз и составили 3x24x42 м (Рисунок 3), что позволило существенно сократить объем вычислений с большим количеством изменяющихся параметров. В предложенной расчетной схеме 3 фундамент существующего здания и разрабатываемая траншея не имели конечной длины и обрезались на границах расчетной области.

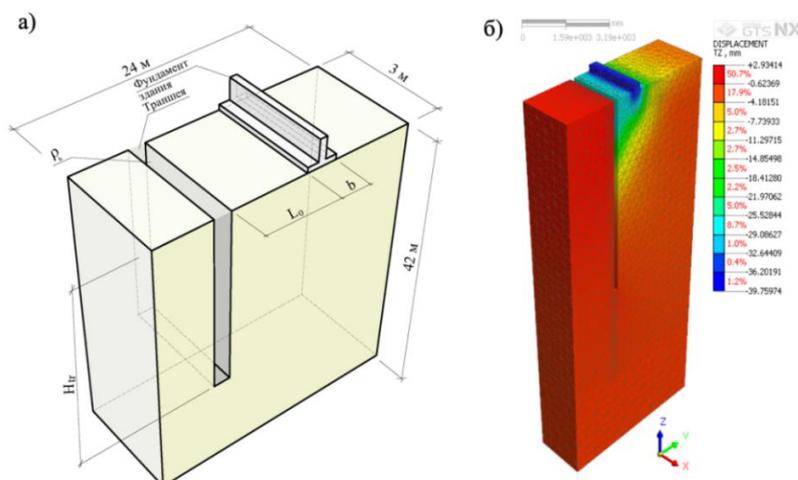


Рисунок 3 – К расчету осадок фундаментов, вызванных разработкой траншеи по схеме 3:
а) общий вид расчетной схемы 3;
б) деформации по оси Z.

Сопоставление результатов расчетов, выполненных с использованием расчетных схем 2 и 3 при изменяемой глубине траншеи H_{tr} , и ее удаленности от здания на расстояние L_0 показало их незначительное расхождение (Рисунок 4) в пределах от 2 до 15%, причем эта разница остается практически постоянной с увеличением глубины траншеи H_{tr} .

Из графиков на Рисунке 4 также видно, что осадка растет по мере приближения траншеи к зданию и увеличению ее глубины.

Результаты проведенных расчетов показали возможность в дальнейших численных исследованиях использовать расчетную схему 3, сохраняя достаточную для выполнения анализа полученных результатов точность.

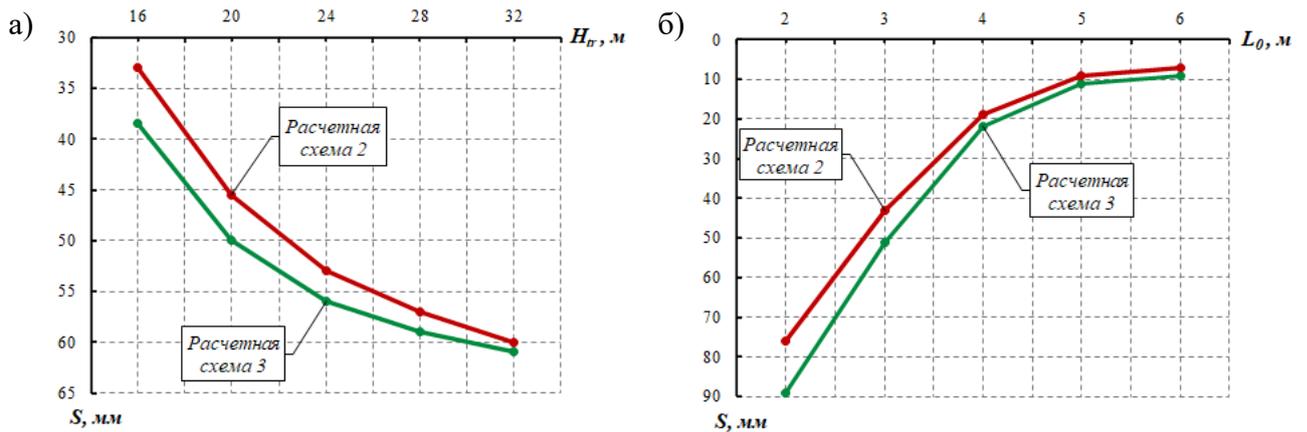


Рисунок 4 – Графики зависимости:

а) $S=f(H_{tr})$ при $L_0=3$ м, $E=18$ МПа; б) $S=f(L_0)$ при $H_{tr}=25$ м, $E=18$ МПа

При расчете осадок здания, защищенных геотехническим экраном размеры расчетной области, параметры траншеи и ее расположение относительно фундамента, принятые в соответствии с моделью расчетной схемы 3 (Рисунок 5).

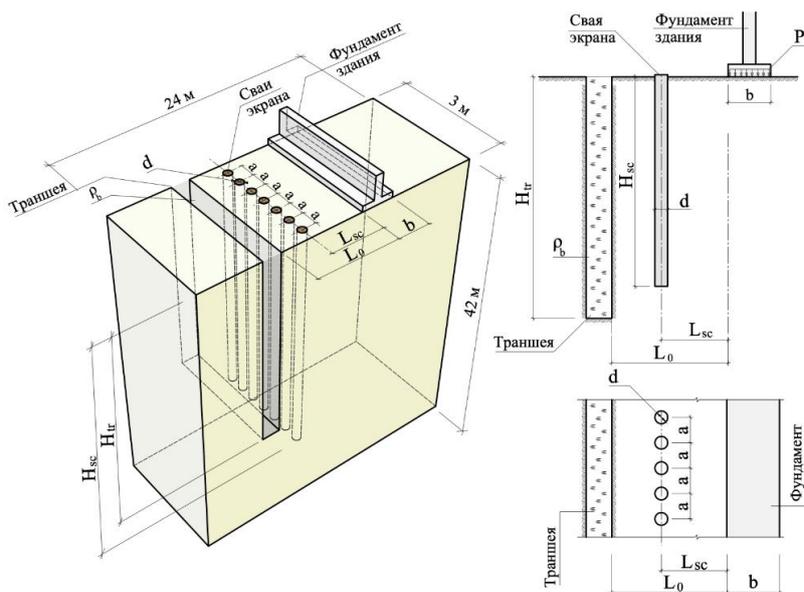


Рисунок 5 - Расчетная схема к задаче о влиянии применения экрана из разреженного ряда свай, на осадки рядом расположенного здания, вызванные разработкой траншеи под «стену в грунте».

Защитный экран моделировался с изменяющимися параметрами его конструкции, к которым относились длина свай H_{sc} , диаметр свай d , осевое (шаг свай) a и относительное расстояние между ними a/d , а также расположения

экрана относительно фундамента здания, выраженное через отношение L_{sc}/L_0 , где L_0 – расстояние между фундаментом здания и траншеей. Изменялась также глубина траншеи H_{tr} и относительное расстояние от траншеи до фундамента существующего здания H_{tr}/L_0 . Указанные параметры свайной конструкции изменялись в следующих пределах: d – 200...600 мм; a/d – 2...4; H_{sc} – 16...36 м; L_{sc}/L_0 – 0,25...0,75 (при расстоянии траншеи от здания от 2 до 6 м); H_{tr}/L_0 – 5...10 (при глубине траншеи от 20 до 30 м).

Сопоставление результатов выполненных расчетов (Рисунок 6) показало, что применение экрана из разреженного ряда свай привело к снижению осадок защищаемого здания в пределах 30-75%.

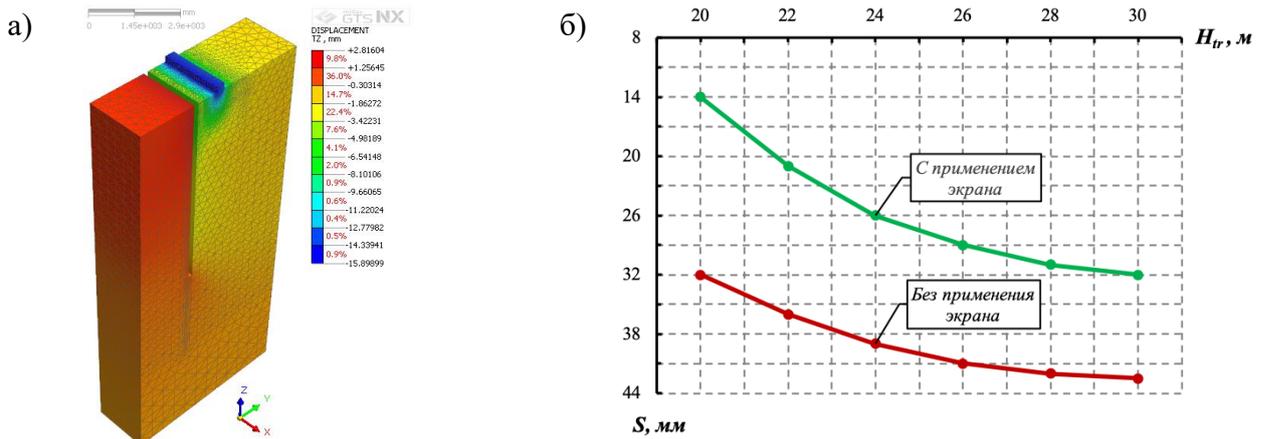


Рисунок 6 – Результаты расчета осадок фундаментов, вызванных разработкой траншеи под защитой геотехнического экрана: а) деформации по оси Z; б) график зависимости $S=f(H_{tr})$ при $L_{sc}=3$ м, $L_{sc}/L_0=0,5$, $H_{sc}/H_{tr}=1,0$, $E=15$ МПа.

Осадки здания под защитой геотехнического экрана возрастают с увеличением относительного расстояния между сваями a/d , уменьшаются с увеличением диаметра свай и глубины защитного экрана, характеризуемой отношением H_{sc}/H_{tr} (Рисунок 7а, б), а также по мере увеличения расстояния от экрана до защищаемого здания (Рисунок 8а).

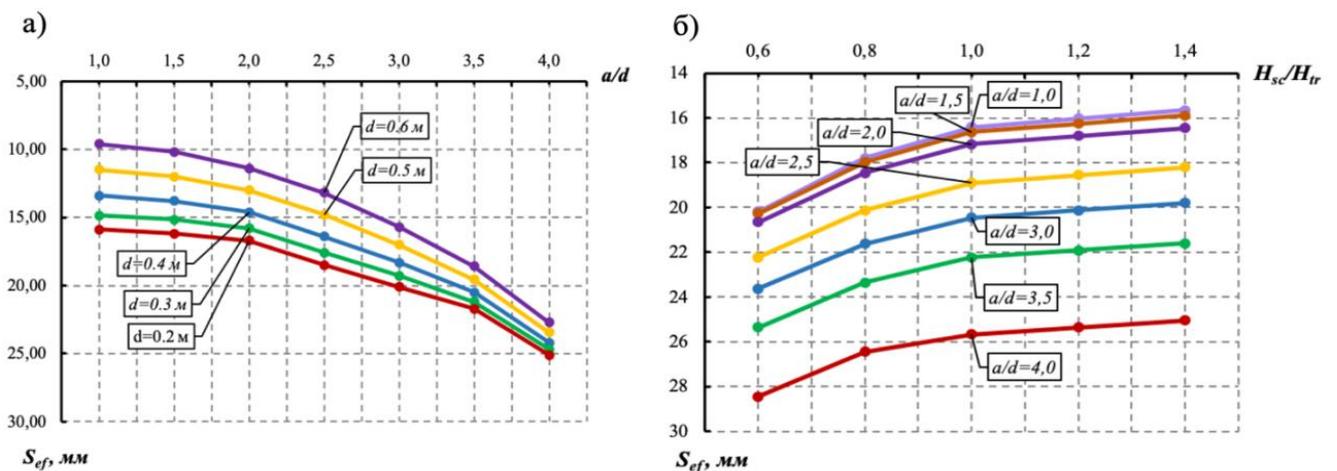


Рисунок 7 – Графики зависимости:
а) $S_{ef}=f(a/d)$ при $H_{sc}/H_{tr}=1,0$; $L_{sc}/L_0=0,5$; $E=15$ МПа;
б) $S_{ef}=f(H_{sc}/H_{tr})$ при $d=0,3$; $L_{sc}/L_0=0,50$; $E=15$ МПа.

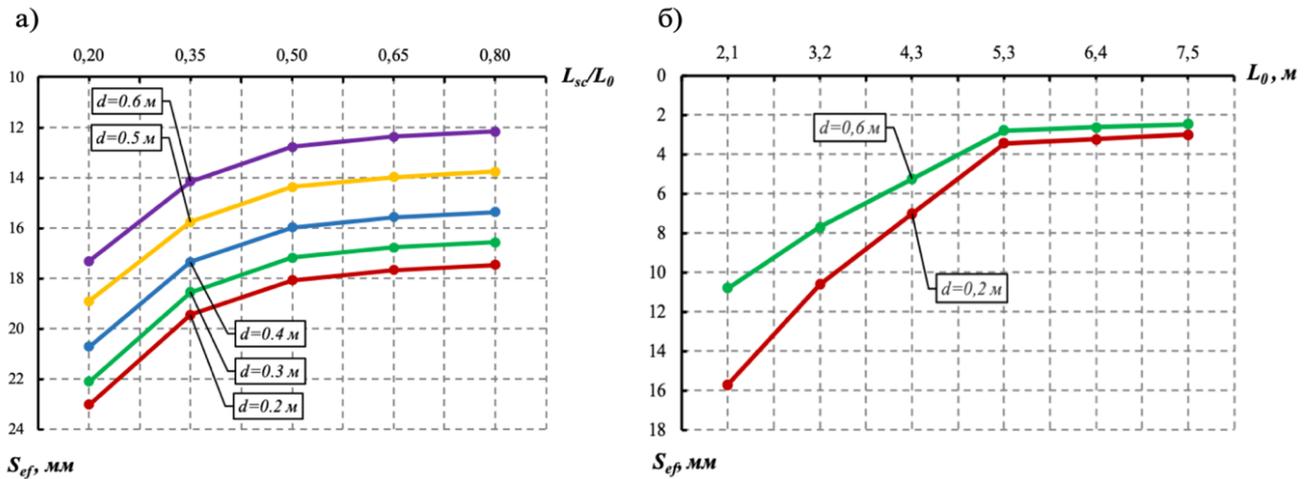


Рисунок 8 – Графики зависимости:

- а) $S_{ef} = f(L_{sc}/L_0)$ при $H_{sc}/H_{tr} = 1,0$; $a/d = 2,0$; $E = 15$ МПа;
 б) $S_{ef} = f(L_0)$ при $a/d = 2$; $L_{sc}/L_0 = 0,75$; $H_{tr} = 20$ м; $H_{sc}/H_{tr} = 1,0$; $E = 15$ МПа

Значимое снижение осадки наблюдается при устройстве экрана до глубины, превышающей на 1-2 м глубину траншеи под «стену в грунте», дальнейшее увеличение глубины экрана по отношению к низу траншеи практически не сказывается на его защитных свойствах.

При отдалении траншеи от фундамента более чем на 5 м, параметры защитной свайной конструкции на величины дополнительных осадок существенного влияния не оказывают (Рисунок 8б).

Наряду с расчетом осадок зданий окружающей застройки, вызванных вскрытием траншеи под «стену в грунте», в диссертационной работе выполнены расчеты, позволяющие оценить дополнительные осадки здания, вызванные устройством свай защитного экрана и зависящие от технологии их выполнения. Рассматривались две, наиболее часто применяемые технологии: формирование свай в предварительно пробуренных скважинах (буровые сваи) и погружение металлических свай ввинчиванием. Расчеты показали, что, как и ожидалось, устройство экрана из буровых свай вызывает большие осадки рядом расположенного фундамента, чем устройство экрана из металлических ввинчиваемых свай. Влияния технологии устройства свай экрана уменьшается при увеличении расстояния между сваями и уменьшении их диаметра.

Выполненные численным методом исследования показали, что устройство геотехнического экрана из разреженного ряда свай позволяет снизить осадки зданий окружающей застройки, вызванные откопкой траншеи под монолитную железобетонную «стену в грунте», а его защитные свойства зависят от многих факторов, степень влияние каждого из которых на эффективность применения экрана определена факторным анализом, результаты которого приведены в главе 3.

Для получения аналитических решений, описывающих физический процесс взаимодействия элементов системы «траншея – грунтовый массив – геотехнический экран – фундамент здания», а также подтверждения результатов выполненных численным методом исследований и их оценки с точки зрения непротиворечия основным закономерностям классической теории упругости и механики грунтов в диссертационной работе решены следующие задачи:

- задачи по определению напряжений в грунте в зоне контакта с геотехническим экраном как со стороны траншеи, так и со стороны защищаемого фундамента;
- задачи по определению осадки защищаемого фундамента, вызванной горизонтальным смещением геотехнического экрана.

Аналитическое решение задачи по определению напряжений в грунте в зоне контакта с геотехническим экраном со стороны траншеи получено в упругой постановке на основе решения Мелана об определении напряжений в грунте от действия вертикальных и горизонтальных сил, приложенных внутри массива.

При решении задачи по аналогии с решением Д.А. Сапина, рассматривавшего задачу определения НДС массива грунта при устройстве траншейной «стены в грунте», отсутствие грунта со стороны выемки компенсировалось действием нормальных горизонтальных σ_x и касательных вертикальных напряжений τ на вертикальную плоскость $A-B$ в полупространстве, совмещенную с гранью траншеи, как это показано на Рисунке 9. За нормальные горизонтальные напряжения σ_x принята сумма давлений покоя грунта σ_0 и бентонитового раствора внутри траншеи σ_b , за касательные τ – компенсирующее трение грунта по стенке траншеи.

$$\sigma_x = \sigma_0 + \sigma_b; \sigma_0 = \sigma_g \frac{\nu}{1-\nu}; \sigma_g = \gamma z; \sigma_b = \gamma_b z; \tau = \sigma_0 \tan \varphi \quad (1)$$

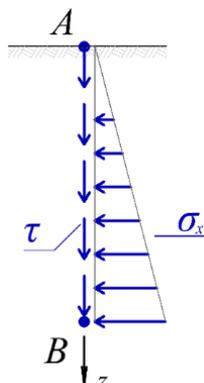


Рисунок 9 - Схема напряжений, действующих на плоскость А-В, совмещенную с гранью траншеи

Формула для определения суммарного горизонтального давления Q_1 на контакте с поверхностью экрана, вызванного указанными напряжениями, получена путем интегрирования решений Е. Мелана по глубине траншеи, а построенные по ней эпюры распределения напряжений Q_1 на экран при его различном удалении от траншеи, показаны на Рисунке 10 а. Эпюры показывают, что напряжения в грунте на контакте с экраном уменьшается по мере его удаления от траншеи. Максимальное значение напряжения Q_{1max} интенсивно снижается до расстояния от траншеи порядка 1 м, а далее изменяется незначительно (Рисунок 10б). Этот результат хорошо согласуется с результатами численных расчетов.

Горизонтальное давление Q_2 на экран от нагрузки на фундамент, определено интегрированием решения Е. Мелана по ширине фундамента b . Построенные по результатам этого решения эпюры давления Q_2 на экран при различном его удалении от фундамента приведены на Рисунке 11, а эпюры результирующего давления Q_z на экран, включающие как давление со стороны траншеи Q_1 , так и со стороны фундамента Q_2 , - на Рисунке 12.

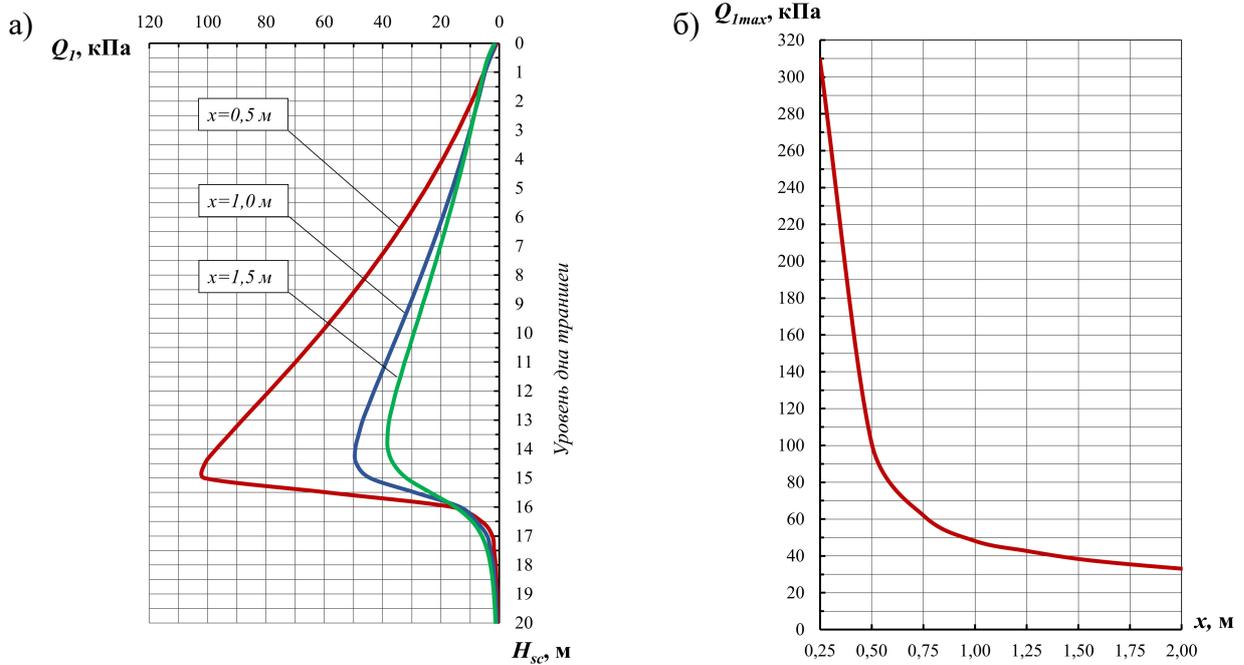


Рисунок 10 – а) - Эпюры распределения результирующих напряжений Q_1 на контакте с экраном при его удалении от траншеи глубиной 15 м на расстояние 0,5; 1,0 и 1,5 м; б) – График зависимости $Q_{1max} = f(x)$

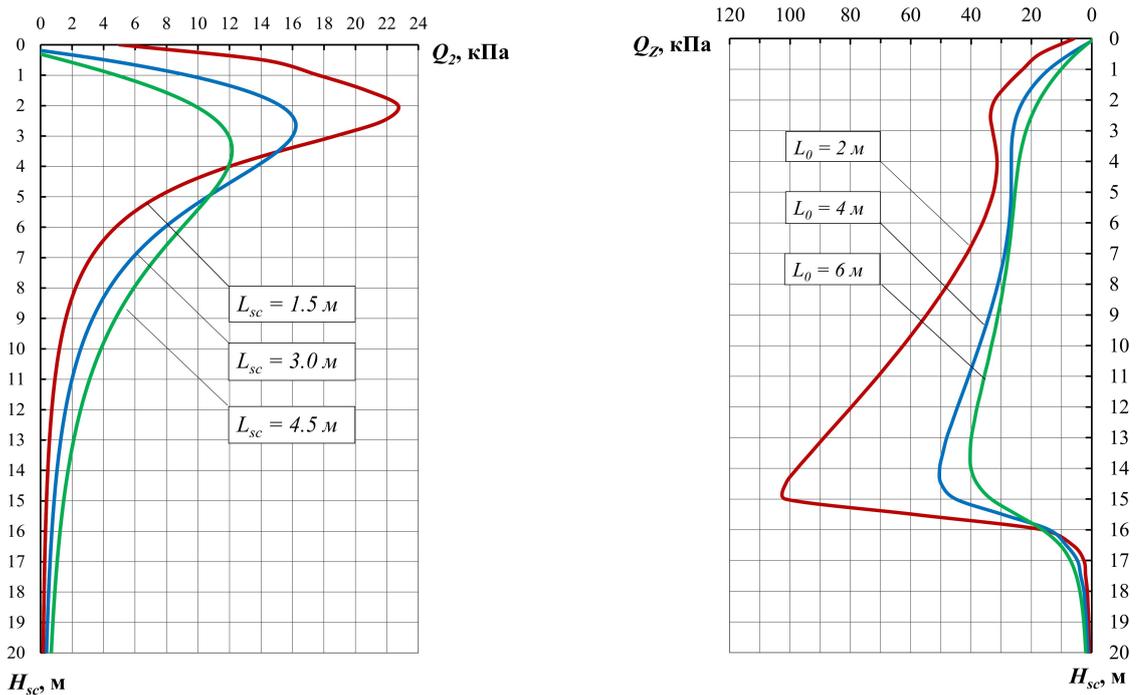


Рисунок 11 - График изменения давления Q_2 по глубине экрана при его удалении от фундамента шириной 1,5 м и глубиной заложения 1,5 м на расстояние $L_{sc} = 1,5; 3,0$ и $4,5$ м

Рисунок 12 - График изменения результирующего давления Q_z , вызванного разработкой траншеи, по глубине экрана, при расстоянии между фундаментом и траншеей $L_0 = 2; 4$ и 6 м

Задача об определении осадки защищаемого здания при смещении геотехнического экрана, вызванного разработкой траншеи под «стену в грунте» и нагрузкой, передаваемой на грунт фундаментом, решалась в следующей последовательности.

Методом начальных параметров определялась величина горизонтального смещения экрана $u(z)$ от приложенных к нему нагрузок, найденных по полученным выше решениям задач о напряжениях в грунте на контакте с геотехническим экраном. Затем определялось реактивное давление грунта R_z , вызванное смещением экрана как балки шириной $b = 1$ м на упругом основании, характеризуемом коэффициентом пропорциональности k (коэффициент постели).

$$R_z = kbu_z \quad (2)$$

На Рисунке 13 приведены эпюры горизонтальных смещений экрана и распределения реактивного отпора грунта по его высоте в зависимости от расположения экрана относительно фундамента и траншеи.

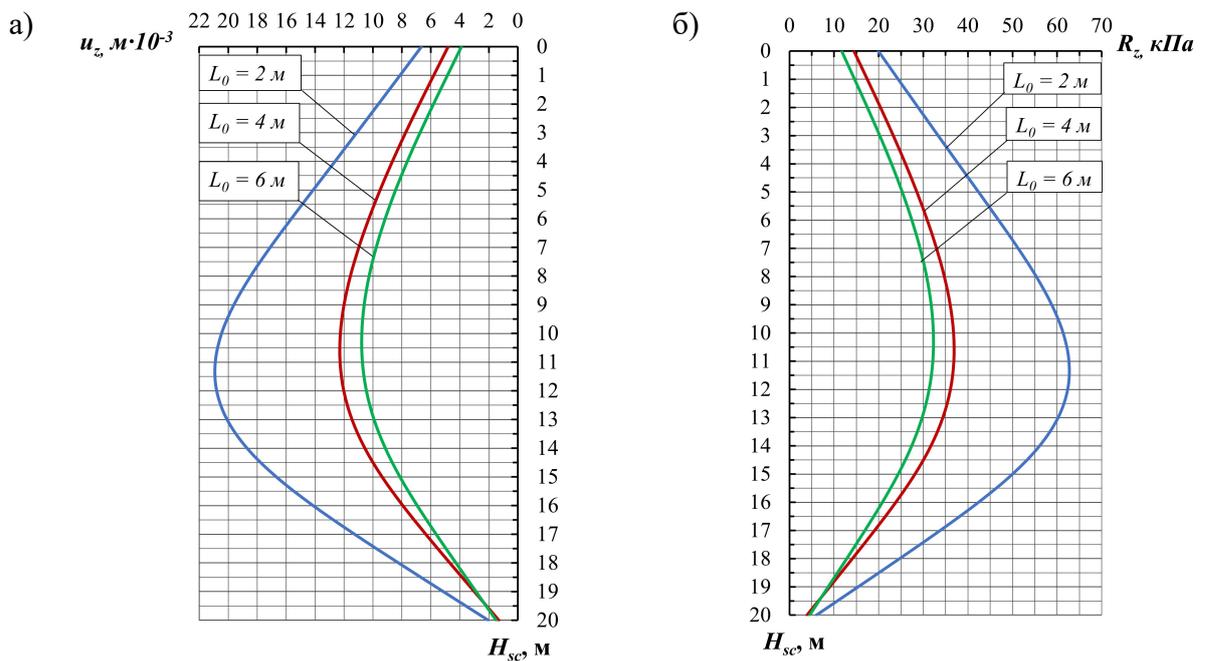


Рисунок 13 – Графики а) - горизонтальных смещений u_z ; б) - реактивного отпора грунта R_z по глубине экрана при расстоянии $L_0 = 2; 4$ и 6 м

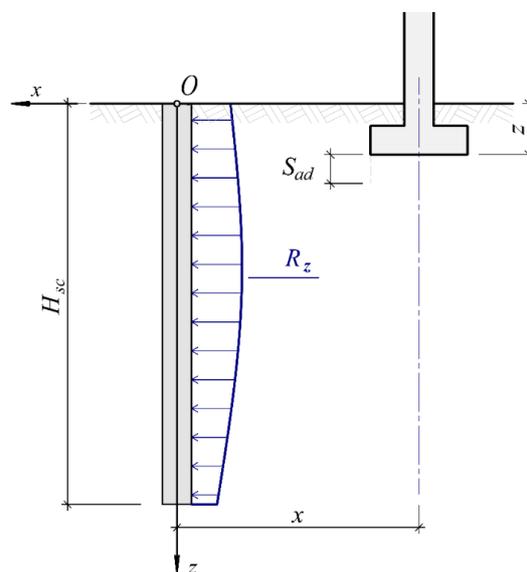


Рисунок 14 - Расчетная схема к определению дополнительной осадки фундамента.

Осадка фундамента от действия реактивных усилий, вызванных смещением экрана (см. Рисунок 14), определялась путем интегрирования решения Е. Мелана.

$$\begin{aligned}
 S_{ad}(x, z) &= \int_0^{H_{sc}} \frac{Q}{\pi E} \left[\begin{aligned} &\frac{1 + \nu_1}{2} \left\{ \frac{(z - h)^2}{2[x^2 + (z - h)^2]} + \frac{\ln[(z - h)^2 + x^2][(z + h)^2 + x^2]}{2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{z^2 + 6hz + 3h^2}{2[x^2 + (z + h)^2]} - \frac{2hz(h + z)^2}{[x^2 + (z + h)^2]^2} \right\} \\ &+ \frac{1 - \nu_1}{4} \left\{ \frac{\ln[(z - h)^2 + x^2]}{2} + \frac{3\ln[(z + h)^2 + x^2]}{2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2z(h + z)}{[x^2 + (z + h)^2]} \right\} \\ &- \frac{\nu_1(1 + \nu_1)}{2} \left\{ \frac{h^2 - z^2 - 2hz}{2[x^2 + (z + h)^2]} + \frac{2hz(h + z)^2}{[x^2 + (z + h)^2]^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(z - h)^2}{2[x^2 + (z - h)^2]} \right\} \\ &+ \frac{\nu_1(1 - \nu_1)}{4} \left\{ \frac{\ln[(z - h)^2 + x^2]}{2} - \frac{\ln[(z + h)^2 + x^2]}{2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2z(h + z)}{[x^2 + (z + h)^2]} \right\} \end{aligned} \right] dh = \\
 &= \frac{Q}{\pi E} \left[\begin{aligned} &\frac{1 + \nu_1}{2} \left\{ \frac{(z - h)^2}{2[x^2 + (z - h)^2]} + \frac{\ln[(z - h)^2 + x^2][(z + h)^2 + x^2]}{2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{z^2 + 6hz + 3h^2}{2[x^2 + (z + h)^2]} - \frac{2hz(h + z)^2}{[x^2 + (z + h)^2]^2} \right\} \\ &+ \frac{1 - \nu_1}{4} \left\{ \frac{\ln[(z - h)^2 + x^2]}{2} + \frac{3\ln[(z + h)^2 + x^2]}{2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2z(h + z)}{[x^2 + (z + h)^2]} \right\} \\ &- \frac{\nu_1(1 + \nu_1)}{2} \left\{ \frac{h^2 - z^2 - 2hz}{2[x^2 + (z + h)^2]} + \frac{2hz(h + z)^2}{[x^2 + (z + h)^2]^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(z - h)^2}{2[x^2 + (z - h)^2]} \right\} \\ &+ \frac{\nu_1(1 - \nu_1)}{4} \left\{ \frac{\ln[(z - h)^2 + x^2]}{2} - \frac{\ln[(z + h)^2 + x^2]}{2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2z(h + z)}{[x^2 + (z + h)^2]} \right\} \end{aligned} \right]_0^{H_{sc}} \quad (3)
 \end{aligned}$$

Определенные по описанной методике осадки фундамента, вызванные устройством траншеи под защитой геотехнического экрана, приведены в Таблице 1. Сопоставление представленных в Таблице 1 результатов численных расчетов с данными, полученными на основе предложенных аналитических решений, показало их удовлетворительную сходимость.

Таблица 1. - Дополнительные осадки фундамента, вызванные устройством траншей под защитой геотехнического экрана

№	Расстояние между фундаментом и траншеей L_0 , м	Расстояние между фундаментом и экраном L_{sc} , м	Дополнительная осадка фундамента S_{ad} , см	
			Аналитическое решение	Численное решение
1	2,0	1,5	1,1	1,4
2	4,0	3,0	0,6	0,8
3	6,0	4,5	0,4	0,6

В третьей главе изложены результаты выполненного на основе теории планирования эксперимента анализа степени влияния различных факторов (факторного анализа) на коэффициент эффективности применения геотехнического экрана K_{ef} , за который принято отношение $(S_{tr} - S_{sc}) / S_{tr}$, где S_{tr} – осадка здания, вызванная разработкой траншеи при отсутствии геотехнического экрана; S_{sc} – осадка здания, вызванная разработкой траншеи, отделенной от здания геотехническим экраном.

К рассматриваемым факторам относились: X_1 - диаметр свай d ; X_2 - относительное расстояние между сваями a/d ; X_3 - глубина экрана H_{sc} ; X_4 - глубина траншеи H_{tr} ; X_5 - относительное расстояние от траншеи до фундамента H_{tr}/L_0 ; X_6 - модуль деформации E грунтового массива.

Уравнения регрессии, выражающие зависимость коэффициента K_{ef} от рассмотренных факторов и их комбинаций, получены для сыпучих и связных грунтов и экранов из буровых и ввинчиваемых свай.

Установленная относительная сила влияния факторов на коэффициент K_{ef} , выраженная в графической форме, показана на Рисунке 15.

Согласно выполненному анализу, из конструктивных факторов наибольшей силой влияния обладают диаметр и длина свай, из исходных данных – глубина траншеи и ее расстояние до здания.

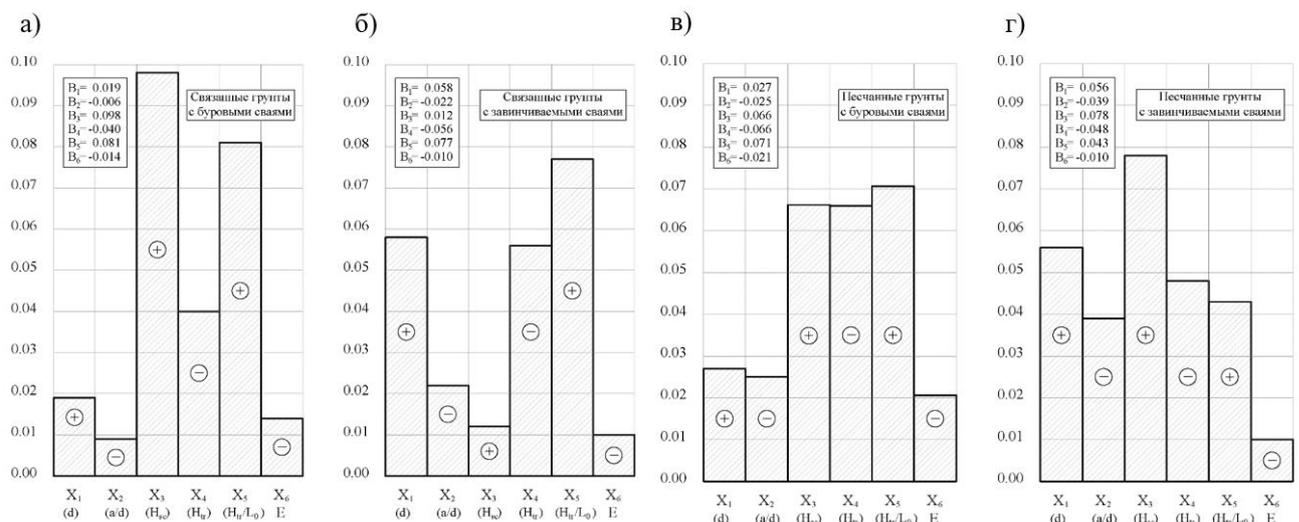


Рисунок 15 - Степень влияния различных факторов и их сочетаний на коэффициент K_{ef}
а,в - для буровых свай; б,г - для ввинчиваемых свай.

На основании проведенного анализа разработаны и построены номограммы по определению конструктивных параметров геотехнических экранов из разреженного ряда свай при устройстве «стены в грунте» траншейного типа, в зависимости от исходных условий и технологии изготовления свай. На Рисунке 16 представлены номограммы для экранов из буровых и ввинчиваемых свай, применяемых в песчаных грунтах.

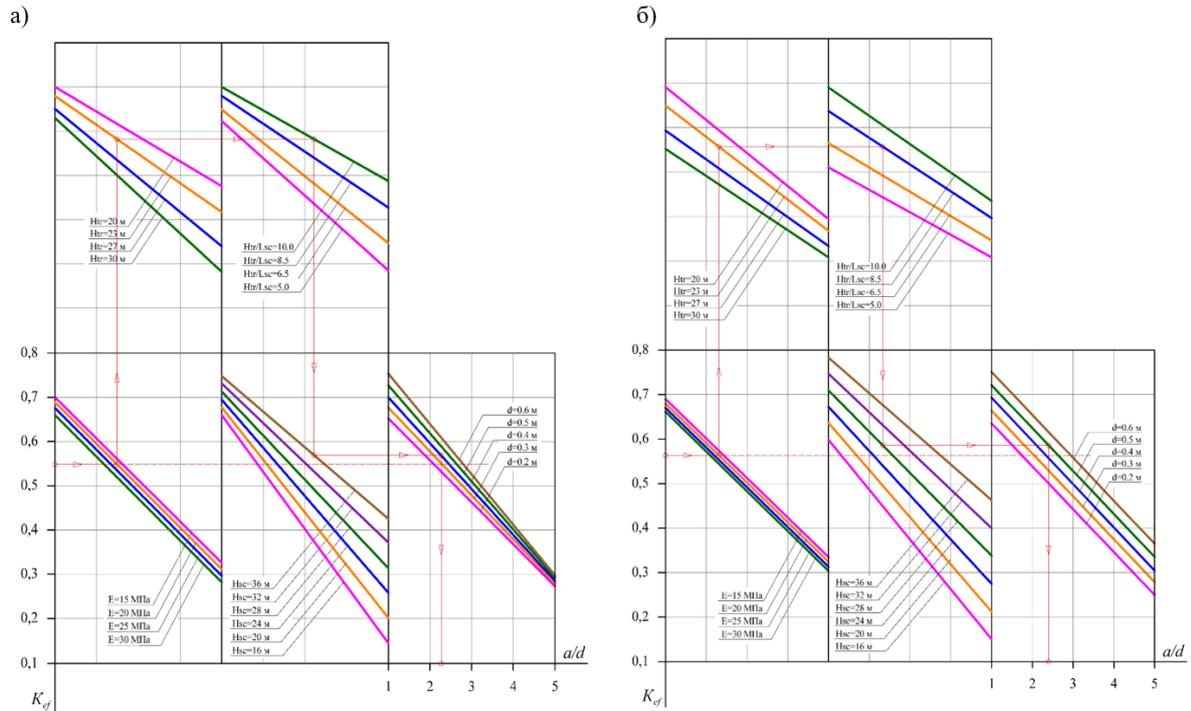


Рисунок 16 - Номограммы для определения параметров геотехнического экрана:
 а) для буровых свай; б) для ввинчиваемых свай.

Четвертая глава посвящена вопросу оптимизации конструктивных параметров геотехнического экрана из разреженного ряда свай. За критерий оптимизации принят расход материала свай на 1 погонный метр длины экрана, что можно представить в виде функции:

$$\bar{V} = \frac{V_p}{a} \rightarrow \inf \quad (4)$$

$$V_p(a, \frac{a}{d}, H_{sc}, H_{tr}, \frac{H_{tr}}{L_0}, E, K_{ef}) \rightarrow \inf$$

Функциональные зависимости изменения коэффициента эффективности от конструктивных параметров экрана и исходных данных (параметры траншеи и грунтовые условия), полученные в ходе математического моделирования преобразованы к единообразному виду:

$$K_{ef} = AX_1X_3 + BX_1 + CX_2 + DX_3 + F \quad (5)$$

где коэффициенты A , B , C , D и F выражаются через факторы, зависящие от параметров траншеи, ее местоположения, грунтовых условий, а также технологии изготовления свай геотехнического экрана.

Полученные зависимости позволяют определить предельные значения коэффициентов эффективности K_{ef}^{min} до K_{ef}^{max} в зависимости от исходных данных и конструктивных параметров экрана.

Выразив факторы X_1, X_2, X_3 через диаметр свай d , длину свай H_{sc} и приведенный объем материала свай \bar{V} , зависимость $\bar{V} = f(X_1, X_2, X_3)$ можно представить в виде параболического гиперboloида, имеющего точки экстремума, расположенные на границах области определения факторов X_1 и X_3 (Рисунок 17). Указанная функция будет достигать минимальных значений в одной из четырех точек на границах области определения факторов X_1 и X_3 , т.е. величина минимального объема материала свай экрана в зависимости от исходных условий и заданного уровня эффективности его применения будет достигаться при одном из четырех сочетаний минимальных и максимальных значений диаметра свай и их длины.

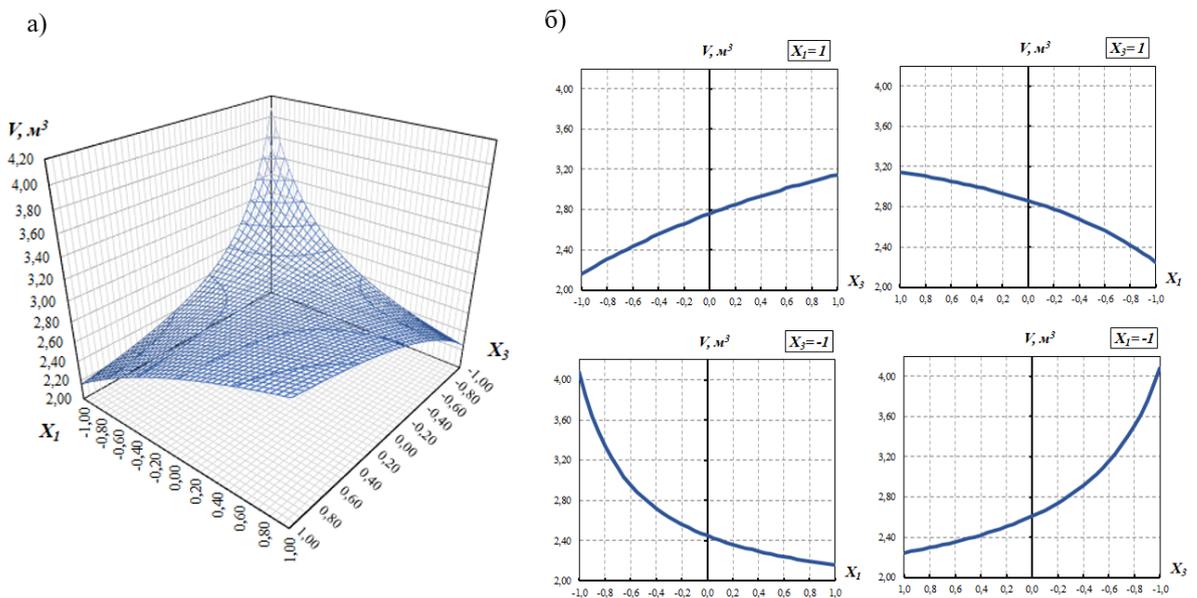


Рисунок 17 – Графическая интерпретация функции $\bar{V} = f(X_1, X_2, X_3)$.

а) поверхность функции $\bar{V} = f(X_1, X_2, X_3)$;

б) графики функции $\bar{V} = f(X_1, X_2, X_3)$ на границах области ее определения.

Условия, при которых функция $\bar{V} = f(X_1, X_2, X_3)$ будет принимать минимальные значения в одной из четырех угловых точек, определяются путем сравнения величин объемов \bar{V} в этих точках (Рисунок 18). Решением представленных неравенств находятся граничные значения коэффициентов эффективности $k_{opt}^{I-II}; k_{opt}^{I-IV}; k_{opt}^{II-III}; k_{opt}^{II-IV}; k_{opt}^{III-IV}$, при переходе через которые функция будет достигать минимума в одной из четырех точек.

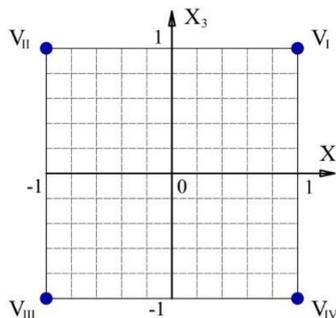


Рисунок 18 – Схема расположения точек экстремумов функции $\bar{V} = f(X_1, X_2, X_3)$.

На основе проведенных аналитических исследований разработан алгоритм для определения оптимальных конструктивных параметров геотехнического экрана из разреженного ряда свай, устраиваемого для снижения дополнительных осадок зданий, вызванных разработкой «стены в грунте» траншейного типа, при заданном уровне эффективности его применения.

Значения используемых в расчетах коэффициентов приведены в трех Приложениях к диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Одним из основных конструктивных решений ограждений котлованов в сложных инженерно-геологических условиях и высоком уровне стояния подземных вод является монолитная железобетонная «стена в грунте» траншейного типа, применение которой в стесненных условиях городского строительства осложняется существенным влиянием ее устройства на окружающую застройку. По имеющимся данным, дополнительные осадки зданий окружающей застройки, вызванные устройством траншеи под «стену в грунте», могут достигать 80% от общих дополнительных осадок, вызванных возведением нового объекта.
2. Возможным вариантом защитных мероприятий по снижению влияния устройства «стены в грунте» на осадки окружающей застройки является геотехнический экран из разреженного ряда свай, эффективность применения которого для этой цели показана выполненными в настоящей диссертации численными исследованиями, по данным которых осадки защищаемого здания за счет устройства указанного экрана могут быть снижены на 30...75%.
3. Проведенными исследованиями установлено, что эффективность применения экрана из разреженного ряда свай, характеризуемая коэффициентом эффективности K_{ef} , увеличивается с увеличением диаметра и длины свай и уменьшается с увеличением расстояния между ними, глубины траншеи и ее расстояния от здания, а также с увеличением модуля деформации грунтового массива.
4. Факторным анализом, основанном на теории планирования эксперимента, определено, что наибольшей степенью влияния на эффективность применения геотехнического экрана из разреженного ряда свай для защиты зданий и сооружений окружающей застройки от развития дополнительных осадок, вызванных устройством траншеи под «стену в грунте», обладают глубина разрабатываемой траншеи, ее расстояние относительно фундамента здания, диаметр и длина свай экрана, меньшее влияние оказывают модуль деформации грунтового массива и относительное осевое расстояние между сваями. При расчете геотехнического экрана все перечисленные факторы следует рассматривать, как значимые.
5. Показано, что применение защитного экрана из разреженного ряда свай наиболее эффективно при его устройстве до глубины, составляющей не более 1,2 глубины траншеи и его расположении ближе к ней. Эффективность применения экрана существенно выше в песчаных грунтах по сравнению с глинистыми.

6. Расчеты показали, что устройство свай экрана из буровых свай, выполненных с выемкой грунта, существенно снижает коэффициент эффективности его применения для защиты от развития дополнительных осадок зданий, расположенных в зоне влияния строительства. Более эффективен экран из металлических ввинчиваемых свай.
7. Установленные функциональные зависимости (уравнения регрессии) коэффициента эффективности применения геотехнического экрана от варьируемых факторов, представленные в виде номограмм, для различных грунтовых условий и двух технологией изготовления свай, позволяют существенно упростить подбор основных размеров защитной свайной конструкции.
8. Разработанная методика оптимизации конструктивных параметров геотехнического экрана из разреженного ряда свай, позволяющая подобрать такое их сочетание, при котором дополнительные осадки здания, вызванные разработкой «стены в грунте» траншейного типа, будут снижены до заданных величин при одновременном достижении наилучших технико-экономических показателей экрана по расходу материала.
9. Полученные с использованием классических решений механики грунтов аналитические решения, описывающие физический процесс взаимодействия элементов системы «траншея – грунтовый массив – геотехнический экран – фундамент здания, могут быть использованы для проверки результатов численных расчетов, а также для выполнения предварительных расчетов геотехнических экранов и дополнительных осадок фундаментов защищаемых ими зданий по упрощенным схемам.
10. Разработанный на основе проведенных аналитических исследований алгоритм расчета позволяет, варьируя конструктивными параметрами защитного экрана, определить такое их сочетание, при котором дополнительные осадки здания, вызванные разработкой траншеи под «стену в грунте», будут снижены до заданных значений при минимальном расходе материалов на 1 п.м. его устройства.

Значения используемых в расчетах коэффициентов приведены в трех Приложениях к диссертации.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

- Исследование взаимодействия с грунтовым массивом многорядных свайных конструкций, служащих экраном, защищающим здания и сооружения, расположенные в зоне влияния строительства, от развития сверхнормативных осадок, вызванных производством строительных работ. Разработка методики их расчета численными и аналитическими методами.
- Разработка методики оптимизации параметров конструкций из разреженных рядов свай, служащих ограждением вертикальных откосов котлованов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях:

1. Знаменский, В.В. Влияние устройства траншейной «стены в грунте» на деформации рядом расположенного здания / В.В. Знаменский, Е.Б. Морозов // Вестник МГСУ. - Спецвыпуск 1/2009. - С. 505-508.
2. Знаменский, В.В. Устройство ограждающих систем котлованов в стесненных городских условиях / В.В. Знаменский, Е.Б. Морозов, Д.Ю. Чунюк // Жилищное строительство. - 2012. - №9. - С. 60-62.
3. Морозов, Е.Б. Учет технологических деформаций при усилении грунтов основания аварийных и реконструируемых зданий/ Е.Б. Морозов, Д.Ю. Чунюк // Естественные и технические науки. - 2015. - №3(81). - С. 210-212.
4. Знаменский, В.В. Оценка влияния устройства защитного геотехнического экрана на деформации здания, расположенного в зоне влияния нового строительства, по результатам численного моделирования / В.В. Знаменский, Е.Б. Морозов, Д.Ю. Чунюк // Научное обозрение. - 2018. - №18. - С. 43-48.
5. Морозов, Е.Б. Оценка эффективности применения геотехнического экрана из разреженного ряда свай при устройстве «стены в грунте» траншейного типа / Е.Б. Морозов // Перспективы науки. - 2018. - №2(101). - С. 55-61.
6. Морозов, Е.Б. К вопросу о снижении дополнительных осадок здания, расположенного в непосредственной близости от разрабатываемого котлована / Е.Б. Морозов // Перспективы науки. - 2018. - №4(103). - С. 42-45.

б) в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus:

7. Vladimir Znamenskiy, Evgenii Morozov Effectiveness of geotechnical curtain of loose pile rows design for cast-in-place trench walls Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New materials, Structures, Technologies and Calculations (GFAC 2019)», Saint Petersburg, Russia, 6-8 February 2019. – pp. 457-461.
8. V.V. Znamenskiy, E.B. Morozov The results of numerical simulation of the work of the geotechnical screen of a sparse row of piles E3S Web of Conferences Volume 97, 29 May 2019, Номер статьи 0402022nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM2019; Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers Tashkent; Uzbekistan; 18 April 2019 - 21 April 2019.

в) в других изданиях:

9. Знаменский, В.В. Результаты численного исследования влияния защитного экрана из разреженного ряда свай на осадки зданий окружающей застройки, вызванные устройством монолитной «стены в грунте» траншейного типа / В.В. Знаменский, Е.Б. Морозов // Перспективы науки. - 2019. - №3(114). - С. 202-207.
10. Знаменский, В.В. Численные исследования влияния устройства геотехнического экрана на осадки рядом расположенных зданий / В.В. Знаменский, Е.Б. Морозов // Перспективы науки. - 2019. - №3(114). - С. 28-31.
11. Знаменский, В.В. Определение напряжений в грунте на контакте с геотехническим экраном со стороны разрабатываемой траншеи под «стену в грунте» / В.В. Знаменский, Е.Б. Морозов // Перспективы науки. - 2020. - №7(130). - С. 76-81.

Морозов Евгений Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА
С ЭКРАНОМ ИЗ РАЗРЕЖЕННОГО РЯДА СВАЙ**

05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «2» апреля 2021 г.
Тираж 80 экз. Усл. печ. л. 1,5

Формат 60x90/16
Заказ №

АО «Копи Центр»
125047, г. Москва, ул. 2-я Тверская-Ямская, д. 16