

На правах рукописи



Денисова Ольга Олеговна

**ВЛИЯНИЕ УСТРОЙСТВА ГЛУБИННОЙ
ДИАФРАГМЫ, ВЫПОЛНЯЕМОЙ МЕТОДОМ
СТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ,
НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ
СОСТОЯНИЕ ОГРАЖДЕНИЯ КОТЛОВАНА
И ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ**

Специальность: 2.1.2. Основания и фундаменты,
подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: Чл.- корр. РААСН,
доктор технических наук, профессор
Мангушев Рашид Абдуллович

Официальные оппоненты: **Никифорова Надежда Сергеевна**
доктор технических наук, старший научный
сотрудник ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный университет»
(НИУ МГСУ), кафедра механики грунтов
и геотехники; профессор;

Шарафутдинов Рафаэль Фаритович
кандидат технических наук,
НИИОСП им. Н.М. Герсванова АО «НИЦ
«Строительство», г. Москва, директор.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».**

Защита состоится «15» февраля 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.04 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4. зал заседаний диссертационного совета (аудитория 220). Тел. 8 (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте: <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/denisova-olga-olegovna>

Автореферат розослан «25» декабря 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



А. Н. Гайдо

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С целью обеспечения допустимых величин дополнительных деформаций окружающей застройки при новом строительстве или реконструкции зданий с устройством подземного пространства система ограждения котлована должна обладать достаточной жесткостью. Большая толща слабых пылевато-глинистых отложений, распространённых в центральных районах Санкт-Петербурга на глубинах от 3-5 м до 15–20 м способствует развитию значительных перемещений ограждения на глубинах, близких к отметке дна котлована или ниже неё. Уменьшить их величину за счёт использования более мощной конструкции ограждения и устройства традиционных систем раскрепления, не всегда представляется возможным. Эффективным решением в таком случае является применение глубинной распорной диафрагмы, выполняемой по технологии струйной цементации (Jet Grouting) в границах контура ограждения ниже уровня дна котлована.

В составе геотехнического расчёта она рассматривается как однородный массив, моделируемый упругим линейно-деформируемым материалом – грунтоцементом с проектными, либо фактическими характеристиками. При таком подходе не учитываются технологические особенности производства работ по устройству диафрагмы, связанные с созданием в закреплённом и окружающем массиве грунта значительного избыточного порового давления.

Как показывает опыт, дополнительные технологические осадки зданий окружающей застройки, вызванные влиянием нового строительства/реконструкции, могут быть сопоставимы, а порой и превышать значения, установленные расчётом и определяемые изменением работы конструкции ограждения при устройстве котлована. Таким образом, исследование влияния технологических особенностей выполнения глубинной горизонтальной Jet-диафрагмы на изменение напряженно-деформированного состояния окружающего грунтового массива является актуальной задачей. Разработка методики учёта влияния данного технологического воздействия на изменение характера работы ограждения котлована типа «стена в грунте» позволит определять дополнительные деформации основания фундаментов существующих зданий на этапе проектирования.

Степень разработанности темы исследования. В России и за рубежом выполнен большой объём работы по направлению исследования зависимости между деформациями ограждения котлована и дополнительной осадкой массива грунта и зданий, расположенных в границах зоны влияния нового строительства. Данным вопросом занимались Готман Ю.А., Ильичёв В.А., Коренева Е.Б., Мангушев Р.А., Мозгачева О.А., Никифорова Н.С., Петрухин В.П., Сапин Д.А., Семенюк-Ситников В.В., Собенин А.А., Сотников С.Н., Степаненко С.В., Трофимов Е.Ю., Шулятьев О.А. Среди зарубежных

работ по данной теме можно отметить следующих авторов: Bowles J.E., Clough G.W., Mana, A.I., Moormann Ch. и Moormann H.R., O'Rourke T.D., Реск, R.B., Smith E.M., Sweeney B.P. Экспериментальные и численные исследования, отражающие совместную работу ограждения котлована и массива грунта в основании зданий окружающей застройки на различных объектах г. Москвы и Санкт-Петербурга опубликованы в работах Алексева С.И., Гутовского В.Э., Знаменского В.В., Ильичёва В.А., Колыбина И.В., Ледяева А.П., Мангушева Р.А., Мозгачевой О.А., Морозова Е.Б., Никифоровой Н.С., Осокина А.И., Петрухина В.П., Разводовского Д.Е., Сотникова С.Н., Улицкого В.М., Фурсова А.А., Чунюка Д.Ю., Шарафутдинова Р.Ф., Шашкина А.Г., Шулятьева О.А. и др.

Исследованием проблем изменения свойств грунтов при их закреплении и развитием технологии струйной цементации занимались: Абелев Ю.М., Безрук В.М., Богов С.Г., Борисова Е.Г., Бройд И.И., Воронкевич С.Д., Ганичев И.А., Гончарова Л.В., Жинкин Г.Н., Запелалов И.А., Калганов В.Ф., Кузьмин Е.В., Куликов Ю.Н., Меркин Е.С., Коновалов П.А., Корольков В.Н., Маковецкий О.А., Малинин А.Г., Малышев Л.И., Парамонов В.Н., Петросян Л.Р., Попов А.В., Смородинов М.И., Соколович В.Е., Федоров Б.С., Хасин М.Ф., Bottero, Bringiotti, Burke, Garassino, Jahiro, Joshida, Koeling, Melegari, и др. Общие указания по устройству и использованию грунтоцементного массива, в т. ч. в качестве глубинной горизонтальной распорной диафрагмы, представлены в рекомендациях следующих нормативных документов: СП 291.1325800.2017, СП 45.13330.2017.

Способы уменьшения дополнительных деформаций ограждения котлована за счёт увеличения его изгибной жёсткости путём закрепления массива грунта в примыкании изучались Готманом Ю.А., Ильичёвым В.А., Мангушевым Р.А., Ланько С.В., Назаровым В.П., Фадеевым А.Б.

Проблеме технологического влияния отдельных видов работ «нулевого» цикла на дополнительные деформации зданий окружающей застройки уделено внимание в публикациях Дьяконова И.П., Знаменского В.В., Зуева С.С., Маковецкого О.А., Мангушева Р.А., Минакова Д.К., Мирсяпова И.Т., Мозгачёвой О.А., Сапина Д.А., Улицкого В.М. и др.

На основании проведённого анализа литературных источников был сделан вывод о том, что при выполнении геотехнических расчётов не учитывается технологическое воздействие глубинной распорной Jet-диафрагмы на ограждение котлована и, как следствие, на вызванные им дополнительные деформации зданий окружающей застройки.

Цель исследования: разработать методы оценки степени и характера влияния процесса устройства глубинной горизонтальной диафрагмы, выполняемой с использованием струйной технологии Jet Grouting (в дальнейшем, Jet-диафрагма), на изменение напряжённо-деформированного состояния

конструкции ограждения котлована типа «стена в грунте» и грунтового основания соседних зданий.

Задачи исследования:

1. На основании анализа существующих способов устройства ограждений котлованов в плотной городской застройке выполнить обоснование применения горизонтальной грунтоцементной Jet-диафрагмы в качестве распорной конструкции ограждения котлована.

2. Провести лотковые и полевые исследования влияния процесса устройства глубинной горизонтальной Jet-диафрагмы на изменение напряженно-деформированного состояния грунтового основания и конструкцию ограждения котлована типа «стена в грунте».

3. Разработать метод аналитического расчета и численного моделирования процесса устройства глубинной горизонтальной диафрагмы, выполняемой по технологии Jet Grouting, и его влияния на конструкцию ограждения котлована «стена в грунте», изменение напряженно-деформированного состояния грунтового основания и дополнительные осадки соседних зданий.

4. Разработать рекомендации по минимизации воздействия работ при устройстве Jet-диафрагмы на напряженно-деформированное состояние грунтового основания и ограждение котлована «стена в грунте».

Объект исследования: устройство глубинной горизонтальной Jet-диафрагмы.

Предмет исследования: изменение напряженно-деформированного состояния грунтового основания и конструкции ограждения котлована типа «стена в грунте» при устройстве Jet-диафрагмы.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Установлено влияние процесса устройства глубинной горизонтальной Jet-диафрагмы на образование начальных «предварительных» напряжений и перемещений в конструкции ограждения котлована типа «стена в грунте» и грунтовом основании фундаментов зданий окружающей застройки.

2. Разработана методика аналитического расчёта и численного моделирования учёта влияния устройства глубинной Jet-диафрагмы на конструкцию ограждения и грунтовое основание соседних зданий.

3. На основании результатов натурного эксперимента и численного моделирования определена зона влияния технологии струйной цементации на конструкцию ограждения котлована «стена в грунте».

4. Разработана методика оценки дополнительных деформаций оснований существующих зданий, расположенных в границах зоны влияния, при различных конструктивных параметрах Jet-диафрагмы.

Теоретическая значимость работы. На основании результатов экспериментальных исследований и численного моделирования установлено, что под воздействием давления, возникающего при устройстве глубинной

Jet-диафрагмы, до начала основных этапов работ «нулевого» цикла происходит изменение напряженно деформированного состояния конструкции ограждения, грунтового основания за ней и развитие дополнительных деформаций в основании фундаментов зданий окружающей застройки. Данное воздействие оказывает влияние на характер работы ограждения в ходе последующей разработки котлована.

Разработана методика численного моделирования технологического процесса устройства Jet-диафрагмы и определены аналитическая и эмпирическая зависимости между конструктивными параметрами ограждения, диафрагмы и дополнительными деформациями грунтового основания фундаментов окружающих зданий.

Практическая значимость диссертационной работы. Учёт влияния устройства горизонтальной диафрагмы на «стену в грунте» на основании разработанных методик и зависимостей позволяет:

- определять величины дополнительных деформаций основания фундаментов зданий окружающей застройки в процессе устройства Jet-диафрагмы;
- учитывать зоны образования максимальных усилий в ограждении котлована при устройстве Jet-диафрагмы в процессе назначения конструктивных параметров «стены в грунте»;
- назначать и корректировать шаг и диаметр точек закрепления грунта при устройстве Jet-диафрагмы.

Методология и методы исследований:

1. Анализ и систематизация литературных источников по вопросам устройства ограждения котлованов, в том числе с применением грунтоцементной диафрагмы в качестве распорной конструкции, методикам их расчёта и технологическому воздействию работ «нулевого» цикла на дополнительные деформации зданий окружающей застройки.

2. Проведение лотковых и натурных полевых исследований влияния технологического процесса устройства Jet-диафрагмы на изменение напряженно-деформируемого состояния ограждения котлована типа «стена в грунте» и грунтового основания фундаментов соседних зданий.

3. Выполнение численного моделирования технологического процесса устройства Jet-диафрагмы в условиях слабых грунтов Санкт-Петербурга.

4. Разработка методики аналитического решения задачи по определению дополнительных деформаций массива грунта, вызванных устройством диафрагмы Jet Grouting в границах ограждения котлована.

5. Сопоставление результатов аналитического решения, численного моделирования и экспериментальных исследований.

6. Численное исследование факторов, определяющих степень воздействия Jet-диафрагмы на дополнительные деформации окружающей застройки, вывод многофакторных эмпирических зависимостей.

7. Установление статистических зависимостей между параметрами Jet-диафрагмы (количеством/шагом точек закрепления) и величиной дополнительной деформации поверхности за пределами ограждения котлована.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие возникновение и дальнейшую трансформацию начальных «предварительных» напряжений и перемещений в ограждении котлована, выполняемого методом «стены в грунте», и грунтовом основании при устройстве глубоинной Jet-диафрагмы.

2. Методика численного моделирования устройства глубоинной Jet-диафрагмы, позволяющая уточнить положение зон и значения максимальных усилий и перемещений в конструкции «стены в грунте», а также определить величины дополнительных деформаций основания фундаментов зданий окружающей застройки, возникающих в результате воздействия Jet-диафрагмы.

3. Методика аналитического расчета дополнительных деформаций зданий окружающей застройки, вызванных устройством Jet-диафрагмы в границах контура ограждения котлована.

4. Сопоставление результатов определения дополнительных деформаций фундаментов зданий окружающей застройки в результате воздействия Jet-диафрагмы на основании аналитического решения, численного моделирования по предлагаемой методике и экспериментальных исследований.

5. Эмпирическая зависимость, определяющая влияния основных параметров задачи (высоты и глубины расположения Jet-диафрагмы, толщины «стены в грунте», расстояния от ограждения до фундаментов существующих зданий) на дополнительные деформации фундаментов зданий соседней застройки.

Область исследования соответствует требованиям паспорта специальности 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения, по пункту 3 «Разработка новых методов расчёта и моделирования высокоэффективных конструкций, способов и технологий устройства подземных сооружений промышленного и гражданского назначения», пункту 8 «Разработка новых методов прогноза, расчёта, испытаний, принципов конструирования и создания высокоэффективных технологий устройства подпорных и противофильтрационных конструкций, анкеров и распорных систем, дренажных систем, водопонижения и гидроизоляции для фундаментостроения и подземного строительства» и пункту 10 «Разработка научных основ и ведущих принципов обеспечения безопасности нового строительства и реконструкции объектов в условиях сложившейся застройки, в том числе для исторических памятников, памятников архитектурного наследия и др.».

Степень достоверности результатов исследований и выводов по диссертационной работе обоснована применением основных положений механики

грунтов; механики твердого и деформируемого тела; теории линейно деформируемой среды; теории упругости; методов математической статистики; подтверждена хорошей сходимостью аналитических и численных решений с результатами натуральных наблюдений на площадке строительства; обеспечена достаточным объёмом экспериментальных исследований на реальных объектах, реализованных в условиях слабых пылевато-глинистых грунтов и плотной городской застройки, с учётом применения современных средств обработки данных. Сформулированные соискателем выводы и практические рекомендации могут быть использованы при проектировании системы ограждения для котлованов, устраиваемых в условиях плотной застройки.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция по геотехнике «Современные теоретические и практические вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и методы расчёта» (GFAC 2021) (г. Санкт-Петербург, 27–29 октября 2021 г.); LXXVI Научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета «Архитектура – строительство – транспорт» (г. Санкт-Петербург, 18–21 октября 2022 года); Национальная (все-российская) научно-техническая конференция «Перспективы современного строительства» (Санкт-Петербург, 10–13 апреля 2023г.); Межвузовская научно-практическая конференция «Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства» (Санкт-Петербург, 21 апреля 2023г.); Межвузовская научно-практическая конференция «Специальные сооружения и объекты: актуальные проблемы изысканий, строительства и эксплуатации» (Санкт-Петербург, 25 апреля 2023г.); Ежемесячная видеоконференция Российского общества по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению (Москва, 8 июня 2023г.).

Личный вклад автора заключается в формулировании целей и задач исследования; поиске их решения путём проведения достаточного объёма экспериментальных исследований на объектах, реализованных в условиях слабых пылевато-глинистых грунтов и плотной городской застройки; последующей обработке результатов измерений; разработке методик численного и аналитического определения дополнительных деформаций зданий окружающей застройки, вызванных устройством Jet-диафрагмы в границах ограждения котлована; определении рекомендаций по назначению параметров Jet-диафрагмы (количества/шага точек закрепления), обеспечивающих допустимые величины дополнительных деформаций поверхности за пределами ограждения котлована; подготовке публикации с изложением основных результатов исследования.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 научных работах, в том числе 7 статей – в изданиях, утверждённых перечнем

ВАК РФ и 1 статья – в издании, индексируемом международными базами данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 104 наименования, и 1 приложения. Работа изложена на 171 странице машинописного текста, содержит 83 рисунка и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена актуальность диссертационной работы, её научная новизна, цель и задачи исследования.

В первой главе обосновано применение глубинной горизонтальной диафрагмы как одного из конструктивных способов уменьшения дополнительных деформаций окружающих зданий в условиях слабых грунтов и плотной исторической застройки Санкт-Петербурга. При этом установлено отсутствие методик расчётов, которые бы учитывали технологические особенности выполнения Jet-диафрагмы, связанные с образованием избыточного порового давления в границах области струйного закрепления грунтового массива.

Обзор научных работ по теме закрепления грунтов показал, что технологические особенности струйной цементации учитываются, в основном, для назначения конструктивных параметров массива скважин (их диаметра и шага). В отдельных исследованиях определено влияние устройства ограждения и массива из грунтоцементных свай на дополнительный подъём окружающих зданий. Вместе с этим не выявлен характер воздействия работ по созданию глубинной Jet-диафрагмы на ограждающую конструкцию и расположенные за её границей здания. Такой подход может привести к недостаточному назначению проектного решения и некорректному прогнозу дополнительных деформаций фундаментов зданий окружающей застройки. На основе проведённого литературного обзора по теме исследования были сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты качественного лабораторного лоткового и полевого экспериментов, определяющие воздействие Jet-диафрагмы на изменение напряжённо-деформированного состояния ограждения котлована и дополнительные деформации фундаментов зданий окружающей застройки.

Лабораторный лотковый эксперимент. Целью выполнения эксперимента являлось определение качественного характера изменения НДС системы «ограждение котлована – грунт – окружающая застройка» при устройстве Jet-диафрагмы.

Ограждение котлована, роль которого исполнял лист поликарбоната, помещалось в экспериментальный лоток, заполненный грунтом. Устройство диафрагмы внутри ограждения моделировалось увеличением объёма

в горизонтальном направлении плоского полого резинового элемента, помещённого в грунтовый массив на глубине 220мм, за счёт его заполнения сжатым воздухом. Вертикальность, либо отклонение ограждения в ходе «устройства диафрагмы» проверялось проскальзыванием стальных спиц по внутренним ячейкам листа. С целью определения характера деформирования грунтового основания и фундаментов зданий окружающей застройки за ограждением, на расстоянии 15 мм от него, устанавливалась модель здания.

По мере роста давления в полом резиновом элементе происходило увеличение его размеров в горизонтальном направлении. Этот процесс способствовал уплотнению окружающего грунта, росту порового давления и, как следствие, вызывал изгиб конструкции ограждения в сторону от резинового элемента. Факт изгиба подтверждался не полным проскальзыванием спиц по ячейкам поликарбоната. Изгиб ограждения, в свою очередь, приводил к образованию дополнительного подъёма грунта за ограждением (максимально 3 мм на расстоянии ~120–180 мм от ограждения) и крену модели здания в сторону котлована (рисунок 1, а, б).



Рисунок 1 а, б – Результаты лабораторного эксперимента –
подъём поверхности грунта за ограждением

Полевой эксперимент был проведён на объекте реконструкции в условиях плотной застройки и слабых грунтов центральной части Санкт-Петербурга. Проектом предусматривалось устройство подземного пространства в двух внутренних дворах трехэтажного исторического здания.

Разработка котлованов глубиной 4,2 м и 6,2 м производилась под защитой «стены в грунте» толщиной 800 мм и глубиной 26 м от поверхности при устройстве одно- и двухуровневой распорной системы соответственно. Для обеспечения дополнительной жёсткости ограждения с глубины 13 м ниже дна котлованов проектом предусматривалось устройство глубинной горизонтальной Jet-диафрагмы мощностью 1,5 м (рисунок 2).

Для определения изменения НДС «стены в грунте» по периметру ограждения котлована были выбраны характерные контролируемые панели – 4 в 1-м дворе и 6 во 2-м. В теле каждой из них оборудовалась инклиноме-

трическая скважина и устанавливались струнные тензометрические датчики измерения усилий в арматуре, по 2 датчика на 5 уровнях. Высотное положение датчиков определялось местами образования пиковых значений на расчётной эпюре моментов при обязательном расположении одного из уровней на отметке середины массива Jet-диафрагмы (рисунок 3). Влияние работ на здание определялось по результатам геодезических измерений его дополнительных деформаций (рисунок 4).

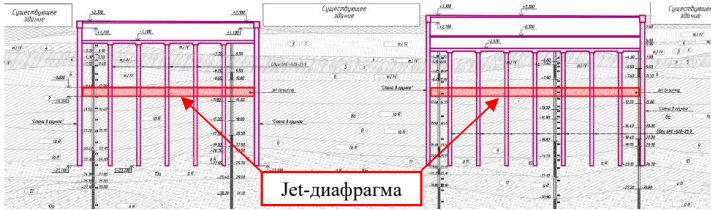


Рисунок 2 – Инженерно-геологический разрез II-II. Конструктивные решения устройства подземного пространства в границах дворов № 1 и № 2

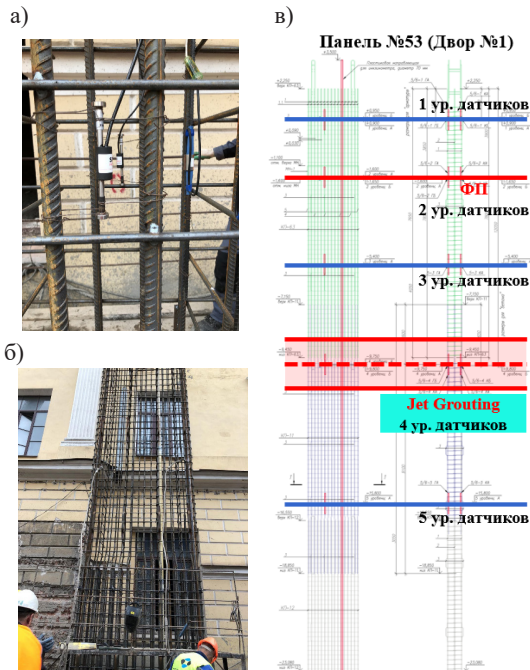


Рисунок 3 – а) монтаж тензометрических датчиков; б) монтаж инклинометрической скважины; в) схема расположения датчиков по высоте панели



Рисунок 4 –Схема расположения контрольно-измерительного оборудования в границах объекта реконструкции

Сопоставление результатов мониторинга и календарного плана производства работ на площадке показало, что начало изменения напряжённо-деформированного состояния «стены в грунте» связано с технологическим воздействием на ограждение работ по устройству Jet-диафрагмы. Устройство Jet-скважин в границах 5–6 м от контролируемых панелей сопровождалось значительным увеличением порового давления вокруг точки закрепления грунта, образованием усилий в арматуре конструкции ограждения на глубине расположения середины закрепляемого массива грунта (до 329,2 кНм) и появлением начальных перемещений ограждения в направлении «от котлована» (до 26,0 мм) (рисунок 5).

По результатам мониторинга датчики порового давления, установленные в массиве грунта за ограждением котлована на глубине устройства Jet-диафрагмы, показали увеличение порового давления при выполнении скважин на расстоянии до 5 м от ограждения котлована. Наибольший прирост порового давления (до 15,2 кПа) определён при устройстве 1-го и 2-го ряда Jet-скважин (рисунок 6).

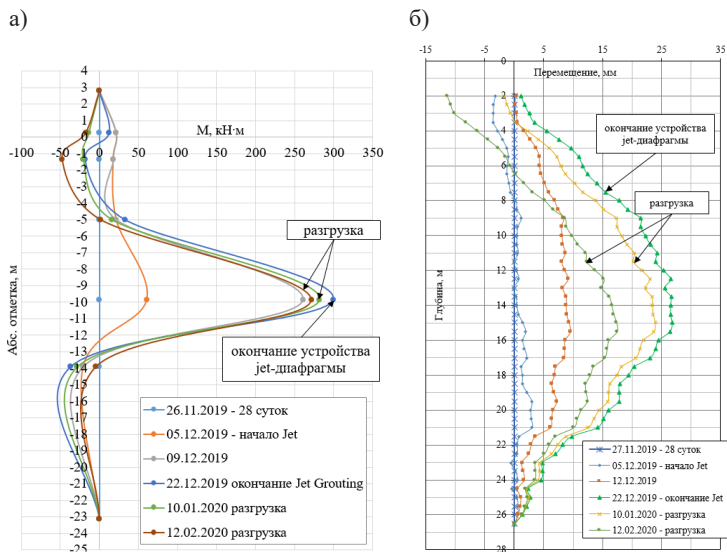


Рисунок 5 – Характерные эпюры развития изгибающих моментов (а) и горизонтальных отклонений «стены в грунте» (б) при выполнении Jet-диафрагмы

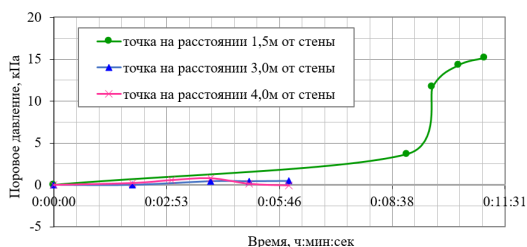
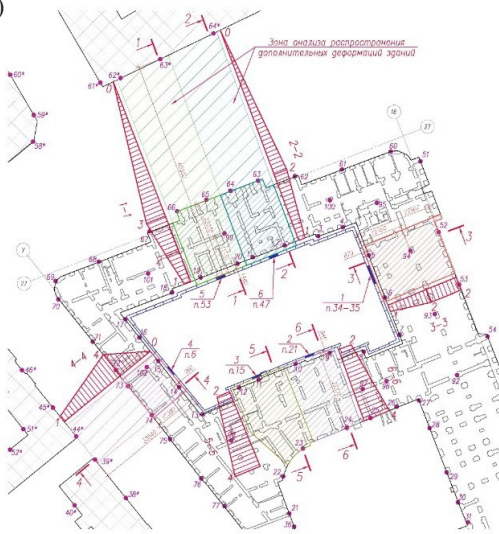


Рисунок 6 – График изменения порового давления во времени за «стеной в грунте» при устройстве Jet-диафрагмы

Перемещаясь, ограждение оказывает влияние на массив окружающего грунта и фундаменты здания, расположенного за периметром котлована. По результатам геодезического мониторинга в период выполнения глубинной диафрагмы были определены дополнительные деформации подъёма фундаментов здания до 4 мм (рисунок 7, а). При этом наибольший подъём в 3–4 мм испытывают фундаменты, расположенные в интервале расстояний 12–20 м от контура «стены в грунте». Фундаменты здания, устроенные непосредственно вдоль периметра ограждения, в 0,6–1,0 м от него, показали единичные колебания отметок, их дополнительные деформации на этапе закрепления грунта изменялись пределах от «-1» до «+1» мм. Графики развития дополнительных деформаций

здания на этапе устройства Jet-диафрагмы по маркам в границах панели «стены в грунте» № 53 представлены на рисунке 7, в.

а)



б)

№ осадочной марки	расстояние от «стены в грунте», мм	прирост деформации за период устройства Jet Grouting, мм
панель №34/35		
5	0,87	1
6	0,72	1
52	22,57	2
94	12,76	2
панель №47		
1	1,36	1
2	1,23	1
63	21,78	2
64	21,92	2
64* (окр.застр.)	66,73	0
панель №53		
19	1,57	1
20	1,44	1
65	22,03	3
66	22,19	2
99	11,30	2
62* (окр.застр.)	64,66	0
63* (окр.застр.)	65,50	0
панель №6		
14	0,96	0
15	0,76	-1
72	12,16	4
73	12,32	3
74	12,38	4
39* (окр.застр.)	33,54	0
44* (окр.застр.)	33,47	1
панель №15		
11	0,90	2
12	0,89	0
23	24,43	4
панель №21		
9	0,94	2
10	0,70	2
24	22,27	4
25	20,32	4
26	17,59	4

в)

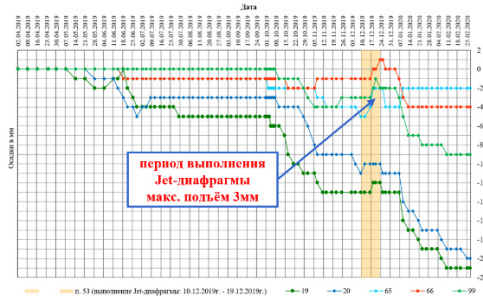


Рисунок 7 – а, б – Распределение дополнительных деформаций основания в границах контролируемых панелей «стены в грунте» на этапе устройства Jet-диафрагмы; в – графики развития дополнительных деформаций здания в границах панели № 53

В третьей главе представлена методика численного расчёта, позволяющая учесть технологические особенности устройства Jet-диафрагмы. Выполнен численный анализ влияния факторов, определяющих степень воздействия Jet-диафрагмы на дополнительные деформации зданий окружающей застройки. Предложена эмпирическая зависимость, позволяющая прогнозировать значения максимальных вертикальных перемещений подошвы фундаментов и оценивать влияние толщины «стены в грунте», глубины устройства и высоты диафрагмы на величину подъёма фундаментов зданий.

При моделировании учитывались следующие технологические параметры производства работ: рабочее давление нагнетания на выходе 350–400 атм.; расход цемента на одну скважину при В/Ц = 0,8 составляет 750 кг.; проектный диаметр грунтоцементной колонны 800 мм.

Напряженно деформированное состояние грунтового массива при использовании технологии струйного закрепления грунта задавалось путем создания дополнительной боковой объемной деформации ε_v при условии, что дополнительная вертикальная деформация отсутствует ($\varepsilon_v = 0$), а горизонтальные деформации $\varepsilon_x = \varepsilon_z = \varepsilon_v/2$. Суть предлагаемой методики численного моделирования заключалась в замене участка, образованного отдельными скважинами, на Jet-массив соответствующего размера на основании соотношения горизонтальных перемещений и избыточных поровых давлений, возникающих в грунте.

В результате анализа взаимосвязи между конечным объемом инъекционной скважины, задаваемой объемной деформацией и получаемыми перемещениями была принята расчетная схема устройства одиночной Jet-скважины с начальной площадью основания 0,385 м² и значением объемной деформации 1,5 %. Представление рядов из отдельных инъекционных скважин в виде Jet-лент позволяло моделировать последовательное устройство скважин в ряду путем увеличения задаваемой объемной деформации его границах на каждом следующем этапе расчета (рисунок 8).

По итогам моделирования в инженерно-геологических условиях, характерных для центральных районов Санкт-Петербурга, возможность замены отдельных рядов Jet-лент на массив обеспечивается при среднем значении боковой объемной деформации 0,13 %.

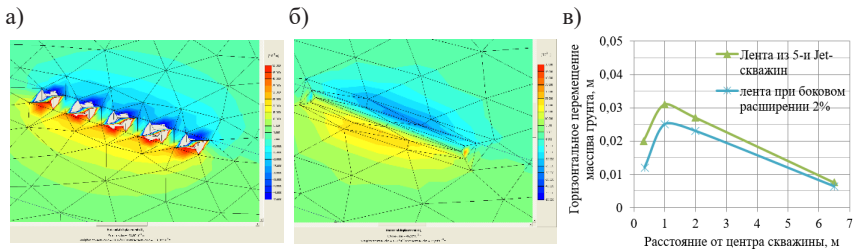


Рисунок 8 – Моделирование ряда инъекционных скважин: а) в виде отдельных восьмигранных призм; б) в виде Jet-ленты; в) график зависимости горизонтальных перемещений грунта от расстояния до центра инъекционной скважины

Предлагаемая методика численного моделирования процесса устройства Jet-диафрагмы была апробирована при расчёте объекта, в границах которого выполнялся полевой эксперимент. С этой целью проведены сравнительные расчёты: расчёт № 1 – включение в работу Jet-диафрагмы обеспечивалось за счёт задания закрепляемому массиву грунта характеристик, определённых по результатам лабораторных испытаний; расчёт

№ 2 – по предлагаемой методике численного моделирования с учётом создания избыточного порового давления в грунте и его последующего воздействия на ограждение путём задания грунту боковой объёмной деформации. При этом активная зона влияния устройства Jet-диафрагмы на ограждение составила 8 рядов лент (~ 5м).

Сравнительные результаты величин контролируемых параметров (усилий, и перемещений) по результатам расчётов № 1 и № 2 и по данным фактических наблюдений представлены в таблице 1, а также на рисунках 9–11.

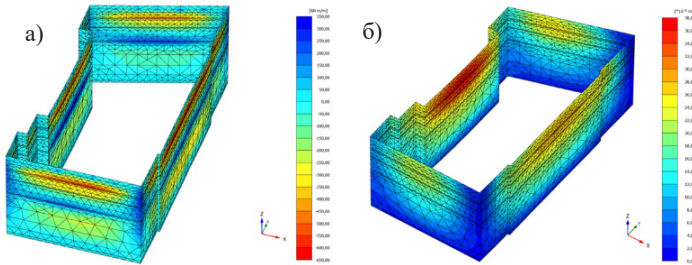


Рисунок 9 – Изополю изгибающих моментов (а) и горизонтальных отклонений «стены в грунте» (б) на этапе разработки котлована до проектной отметки без учёта особенностей технологии устройства Jet-диафрагмы (расчёт № 1)

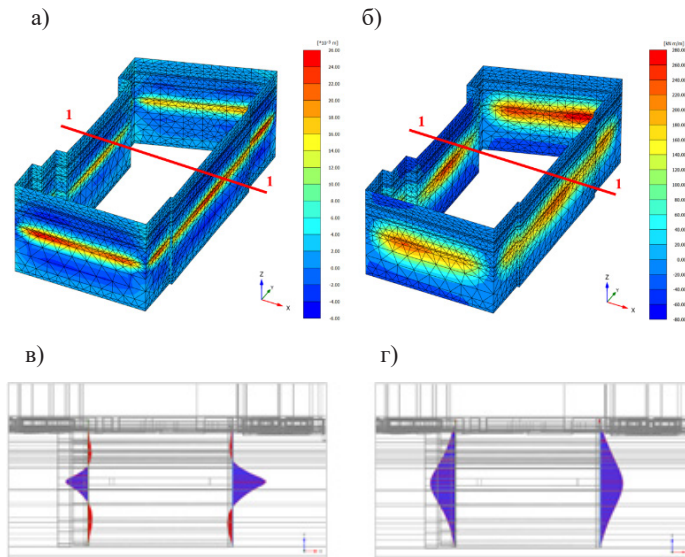


Рисунок 10 – Изополю и эпюры изгибающих моментов (а, в) и горизонтальных отклонений «стены в грунте» (б, г) на этапе выполнения Jet-диафрагмы, вызванные особенностями её устройства (расчёт № 2)

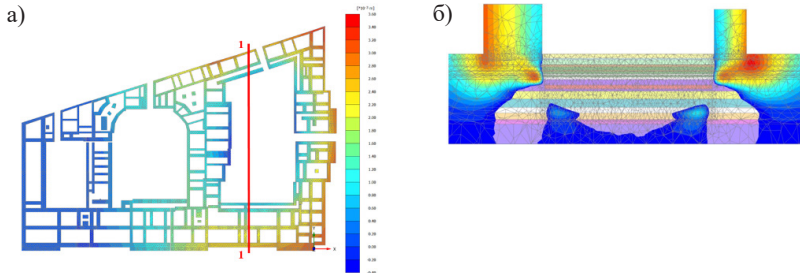


Рисунок 11 – Изополя распределения дополнительных вертикальных перемещений реконструируемого здания а) в плане здания; б) по разрезу 1-1

Таблица 1

Сравнение расчётных и фактических значений контролируемых параметров при устройстве Jet-диафрагмы

Измеряемый параметр	Положение расчётного сечения	Расчётные величины при фактической прочности Jet-диафрагмы 2,4МПа		Расчётные величины при учёте технологии Jet-диафрагмы	Средние величины по данным наблюдений
		при устройстве диафрагмы	на этапе проектной откопки		
Изгибающий момент, кНм	дно котлов. диафрагма	0,0 данный этап расчёта не выделяется	550,0	42,8	-14,5
			102,0	275,2	286,4
Горизонтальное отклонение, мм	дно котлов. диафрагма		32,0	5,5	8,15
			10,7	23,0	24,1
Дополнительные деформации здания, мм			-14,1	+3,4	от +3,0 до +4,0

Дальнейшее направление численного эксперимента заключалось в исследовании факторов, определяющих степень воздействия Jet-диафрагмы на дополнительные деформации зданий окружающей застройки. Выполнены серии расчетов при глубине Jet-диафрагмы от поверхности 12; 13; 14 и 15 м; при высоте диафрагмы 1; 1,5 и 2 м и при толщине стены в грунте 0,6; 0,8 и 1 м. Ленточные фундаменты располагались параллельно длинной стороне контура «стены в грунте» при расстоянии между их осями 1,5; 3; 6; 9; 12; 15; 18; 24; 48 и 72 м. По результатам расчётов построены графики взаимозависимостей между выделенными параметрами, определены их угловые коэффициенты.

При исследовании влияния расстояния от «стены в грунте» до фундаментов здания L получено, что наибольшие деформации подъёма происходят

в интервале расстояний от 9 до 18 м (рисунок 12). В границах области наиболее заметного влияния устройства диафрагмы величину вертикального перемещения фундаментов U_y можно рассмотреть, как функцию трех параметров: глубины диафрагмы (H), толщины «стены в грунте» (b) и высоты диафрагмы (d). Анализ результатов численного эксперимента показал, что зависимости U_y от каждого из указанных параметров при фиксированных значениях остальных близки к линейным (рисунок 13).

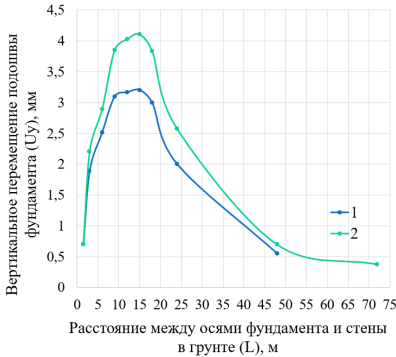


Рисунок 12 – Зависимость вертикальных перемещений подошвы фундаментов, вызванных устройством Jet-диафрагмы, от расстояния между осями фундамента и стены в грунте при толщине стены 0,8 м, толщине диафрагмы 1,5 м и ее глубине от поверхности грунта: 1 – 12 м; 2 – 15 м

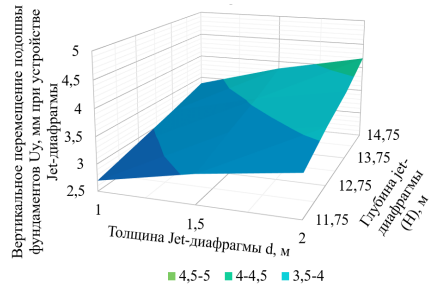


Рисунок 13 – Зависимость вертикальных перемещений фундаментов здания на расстоянии 15 м от ограждения при толщине «стены в грунте» 1 м от высоты диафрагмы и глубины её расположения

Используя разложение функции в ряд Тейлора и принимая начальное значение U_{y0} равным 3,5 мм (при условии глубины устройства диафрагмы $H = H_0 = 13$ м, толщины стены $b = b_0 = 0,8$ м и высоты диафрагмы $d = d_0 = 1,5$ м), зависимость $U_y(H, b, d)$ можно представить в виде выражения:

$$U_y = 3,5 + 0,275\Delta H - 0,928\Delta b + 0,767\Delta d - 0,11\Delta H\Delta b + 0,073\Delta H\Delta d - 0,285\Delta b\Delta d, \text{ мм}, \quad (1)$$

где $\Delta H = (H - 13)$, м; $\Delta b = (b - 0,8)$, м; $\Delta d = (d - 1,5)$, м.

Выражение (1) позволяет вычислить максимальные значения вертикальных перемещений подошвы фундаментов при различных толщинах «стены в грунте», высоте и глубине устройства Jet-диафрагмы. Расчеты по формуле (1) при различных значениях факторов влияния показали сходимость с результатами численного моделирования.

В четвертой главе представлена разработанная методика аналитического решения задачи по определению дополнительных деформаций поверхности грунта и зданий окружающей застройки, вызванных устройством диафрагмы Jet Grouting, сопоставлены результаты аналитических и численных

расчетов с данными натурных наблюдений, а также приведены рекомендации по назначению параметров Jet-диафрагмы (количества/шага точек закрепления), обеспечивающие допустимые величины дополнительных деформаций поверхности за пределами ограждения котлована.

Разработанная методика позволяет определить влияние устройства грунтоцементной диафрагмы на фундаменты зданий окружающей застройки в рамках теории упругости, на основании решения Мелана, связывающего смещения точек упругого полупространства от действия горизонтальной силы на заданной глубине.

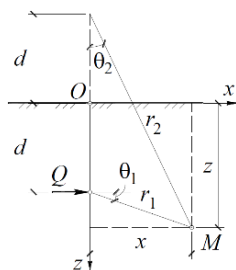


Рисунок 14 – Расчётная схема к задаче Мелана для горизонтальной нагрузки

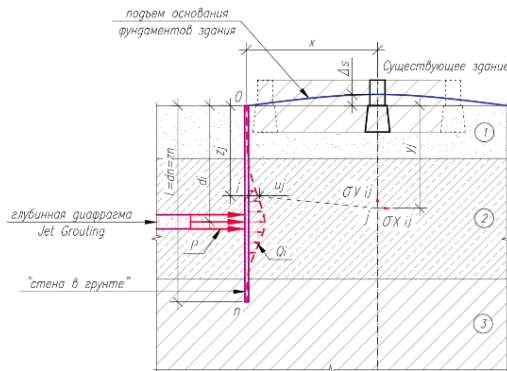


Рисунок 15 – Расчётная схема по определению дополнительных деформаций поверхности грунта от давления на «стену в грунте», вызываемого устройством Jet-диафрагмы

Решение задачи по предлагаемой аналитической методике условно можно разделить на 3 основных этапа.

На первом этапе выполняется оценка деформаций ограждающей конструкции от нагрузок при устройстве грунтоцементной диафрагмы.

При помощи решения Мелана устанавливается зависимость между горизонтальной силой Q_i , действующей на глубине d_i , и перемещением точки упругого полупространства, расположенной на той же вертикальной оси на глубине z_i (при $x = 0$):

$$u_i(z, d, E, \nu_1) = \frac{-Q_i}{4\pi E} \left(\begin{aligned} &2(1 + \nu_1) \left[1 + \frac{d^2 + \nu_1 z^2}{(d + z)^2} + \ln(|z^2 - d^2|) \right] + \\ &+(1 - \nu_1) \left(\frac{2z(1 + \nu_1)}{d + z} + \ln(|z - d|)(1 + \nu_1) + \ln(z + d)(3 - \nu_1) \right) \end{aligned} \right). \quad (2)$$

Далее в матричной форме определяется зависимость перемещения точки на глубине z от множества сил, приложенных на разных глубинах и находится обратная матрица коэффициентов полученного уравнения:

$$u_i = \sum_{i=0}^n Q_i A_{ij}, \quad (3) \quad u = AQ, \quad (4) \quad Q = A^{-1}u, \quad (5) \quad P = A^{-1}u \frac{1}{dz}. \quad (6)$$

Выполняется построение матрицы жесткости ограждающей конструкции на основании метода конечных разностей. Путем суммирования матриц жесткостей определяется матрица жесткости системы «грунт/ограждающая конструкция» и вычисляются горизонтальные смещения ограждающей конструкции:

$$R_{\text{сист.}} = R_{\text{гр.}} + R_{\text{огр.}}, \quad (7) \quad R_{\text{гр.}} = A^{-1} \frac{1}{dz}, \quad (8) \quad u = R_{\text{сист.}}^{-1}P. \quad (9)$$

В составе 2-го этапа решения задачи находится контактная эпюра давлений массива грунта на ограждающую конструкцию.

$$Q = A^{-1}u = A^{-1} R_{\text{сист.}}^{-1}P. \quad (10)$$

3-й этап решения заключается в оценке влияния работ по устройству диафрагмы на существующий фундамент. Для этого определяются:

– напряжения в точках среды при помощи решения Мелана:

$$\sigma_x = \frac{Qx}{\pi} \left\{ \begin{array}{l} \frac{m+1}{2m} \left[\frac{x^2}{r_1^4} + \frac{x^2 - 4dz - 2d^2}{r_2^4} + \frac{8dz(z+d)^2}{r_2^6} \right] + \\ + \frac{m-1}{4m} \left[\frac{1}{r_1^2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{4z(d+z)}{r_2^4} \right] \end{array} \right\}; \quad (11)$$

$$\sigma_z = \frac{Qx}{\pi} \left\{ \begin{array}{l} \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(z-d)^2}{r_1^4} - \frac{d^2 - z^2 + 6dz}{r_2^4} + \frac{8dzx^2}{r_2^6} \right] - \\ - \frac{m-1}{4m} \left[\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} - \frac{4z(d+z)}{r_2^4} \right] \end{array} \right\}. \quad (12)$$

– вертикальные относительные деформации на расстоянии x от «стены в грунте» по закону Гука;

– дополнительные деформации поверхности грунта от давления на «стену в грунте», вызванного устройством Jet-диафрагмы, как сумма произведений относительных деформаций на высоту участка разбиения.

Сходимость результатов расчётов по предлагаемой методике численного моделирования, аналитического расчёта и данным натурного геотехнического мониторинга по одной из панелей, контролируемых в составе полевого эксперимента на объекте исследования, подтверждена графиками, представленными на рисунке 16.

На основании комбинации предложенных методик численного моделирования и аналитического решения задачи определены направления по уменьшению воздействия от устройства диафрагмы на дополнительные деформации фундаментов окружающих зданий путём корректировки количества/шага точек закрепления (либо их диаметра – при необходимости). Данное решение подтверждает

оптимальный параметр проектного решения – при шаге инъекционных скважин 0,7 м максимальные деформации подъёма реконструируемого здания не превысят допустимых значений, установленных требованиями нормативной документации (таблица 2).

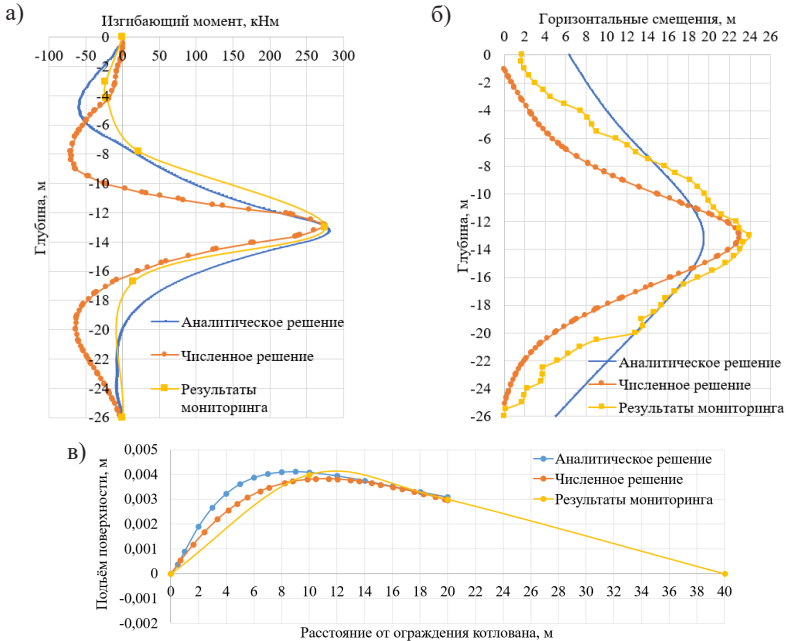


Рисунок 16 – Сопоставление графиков а) изгибающих моментов в ограждении котлована; б) горизонтальных смещений грунта по глубине; в) подъёмов массива грунта на глубине 2,0 м от поверхности

Таблица 2

Зависимость между усилиями в ограждении и вертикальными перемещениями грунта от количества/шага выполненных Jet-скважин

№ п/п	Количество, шт. / шаг, м скважин диаметром 0,8 м на участке длиной 20 м	Боковая объёмная деформация массива, %	Изгибающий момент в ограждении котлована, кНм	Вертикальное перемещение поверхности грунта, мм
1	2	3	4	5
1	15 шт. /1,30 м	0,07	215	3,60
2	20 шт. /1,00 м	0,09	237	3,97
3	30 шт. /0,70 м (проектн.)	0,13	270	4,45
4	37 шт. /0,54 м	0,15	290	4,85

1	2	3	4	5
5	53 шт. /0,38 м	0,20	305	5,11
6	67 шт. /0,30 м	0,25	319	5,33

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При большой тоще слабых грунтов, характерных для исторического центра Санкт-Петербурга, наибольшие перемещения ограждения развиваются ниже отметки дна котлована. Эффективным решением в таком случае является устройство глубинной горизонтальной распорной диафрагмы, выполняемой в границах ограждения ниже уровня дна котлована до начала его разработки. При этом, не выявлен характер воздействия работ по созданию глубинной Jet-диафрагмы на ограждающую конструкцию и расположенные за её границей окружающие здания.

2. При проведении лоткового и крупномасштабного полевого экспериментов определено влияние процесса устройства глубинной горизонтальной Jet-диафрагмы на изменение напряжённо-деформированного состояния конструкции ограждения «стена в грунте» и грунтового основания фундаментов соседних зданий. Установлено, что под воздействием избыточного порового давления, возникающего в грунтовом массиве при его закреплении, конструкция «стены в грунте» получает начальные «предварительные» напряжения и деформацию «от котлована». Максимальные значения начальных перемещений и усилий наблюдаются в уровне расположения Jet-диафрагмы.

3. Изменение НДС ограждения котлована на этапе выполнения глубинной диафрагмы вызывает дополнительные деформации подъёма фундаментов окружающих зданий. Максимальный дополнительный подъём основания фундаментов наблюдается на расстоянии 10 – 20 м от ограждения.

4. Разработана методика численного моделирования глубинной Jet-диафрагмы, позволяющая оценить влияние её устройства на НДС ограждающей конструкции котлована и массива окружающего грунта. Предложена методика аналитического решения задачи по определению дополнительных деформаций основания фундаментов зданий окружающей застройки, вызванных устройством диафрагмы Jet Grouting. Результаты аналитических и численных расчетов по предложенным методикам показывают сходимость с данными натурных наблюдений.

5. На основании комбинации предложенных методик численного моделирования и аналитического решения задачи определены направления решения по уменьшению воздействия от устройства диафрагмы на дополнительные деформации фундаментов окружающих зданий путём корректировки количества/шага точек закрепления.

6. Направление будущих исследований может быть сосредоточено на учёте в составе полученных решений технологических параметров производства работ при устройстве Jet-диафрагмы (давления нагнетания, скорости подачи раствора

и пр.), а также проведении расчётов во времени, обосновывающих дальнейшую осадку здания в процессе постепенного рассеивания порового давления.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

1. Бронин В.Н. Совмещенный метод разработки котлована по технологии Top-Down и открытым способом при строительстве в стесненной городской застройке / В.Н. Бронин, С.В. Татаринов, А.И. Осокин, **О.О. Денисова** // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 3(38). – С. 93–100.
2. Бронин В.Н. Деформация окружающей застройки при строительстве в центральной части г. Санкт-Петербурга жилого и нежилого зданий с развитой подземной частью / В.Н. Бронин, С.В. Татаринов, Г.В. Левинтов, М.А. Зайцев, **О.О. Денисова** // Международный журнал «Геотехника». – 2014. – № 5–6. – С. 14–18.
3. Осокин А.И. Технологическое обеспечение подземного строительства в условиях городской застройки / А.И. Осокин, Т.Н. Шахтарина, **О.О. Денисова** // Жилищное строительство. – 2014. – № 3. – С. 16–21.
4. Татаринов С.В. Система геотехнического мониторинга как средство обеспечения безопасности строительства / С.В. Татаринов, А.И. Осокин, **О.О. Денисова**, Е.В. Макарова // Жилищное строительство. – 2014. – № 9. – С. 10–18.
5. Мангушев Р.А. Влияние технологического воздействия изготовления горизонтальной диафрагмы методом Jet-grouting на ограждение котлована типа «стена в грунте» / Р.А. Мангушев, **О.О. Денисова** // Жилищное строительство. – 2022. – № 9. – С. 25–31.
6. Денисова О.О. Влияние работ по выполнению свай вдавливания и устройству глубинной распорной диафрагмы на дополнительные деформации зданий окружающей застройки. / **О.О. Денисова** // Вестник гражданских инженеров. – 2023. – № 5(100). – С. 52–63.
7. Мангушев Р.А. Факторы влияния глубинной диафрагмы jet-grouting на окружающую застройку. / Р.А. Мангушев, Е.С. Вознесенская, **О.О. Денисова** // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 11 – С. 77–85.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science

8. Voznesenskaya E. Investigation of the technological effects of jet grouting diaphragm on the pit enclosure / E. Voznesenskaya, **O. Denisova**, S. Tatarinov // E3SWebofConferences 371, 02010 (2023), AFE-2022. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337102010>.

Статьи в других печатных изданиях

9. Осокин А.И. Система геотехнического мониторинга как средство обеспечения безопасности существующих зданий окружающей застройки. / А.И. Осокин, С.В. Татаринов, **О.О. Денисова** // Вопросы проектирования и устройства надземных и подземных конструкций зданий и сооружений: межвузовский тематический сборник трудов; СПбГАСУ. – СПб.: [б. и.], 2018. – С. 195–205.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 08.12.2023. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 183.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.