

*На правах рукописи*

**САПИН Дмитрий Александрович**

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСАДКИ  
ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ СОСЕДНЕЙ ЗАСТРОЙКИ  
ПРИ УСТРОЙСТВЕ ТРАНШЕЙНОЙ «СТЕНЫ В ГРУНТЕ»**

**Специальность: 05.23.02 - Основания и фундаменты, подземные сооружения**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Мангушев Рашид Абдуллович**

**Официальные оппоненты:** **Знаменский Владимир Валерианович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный  
университет», кафедра механики грунтов и  
геотехники, профессор;

**Татаринов Сергей Викторович,**  
кандидат технических наук  
ООО «Бюро экспертизы и совершенствования  
проектных решений» (г. Санкт-Петербург),  
генеральный директор

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО «Казанский государственный  
архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «21» июня 2016 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.01 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний (ауд. 219).

Тел./факс: 8 (812) 316-58-72. Email: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте [spbgasu.ru](http://spbgasu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук

**Конюшков Владимир  
Викторович**

## I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Современные требования к строительству в крупных городах предполагают наличие развитого подземного пространства при возведении новых зданий. При организации новых подземных объёмов в сложных инженерно-геологических условиях центральной части Санкт-Петербурга необходимо применение технологий, обеспечивающих безопасность зданий соседней застройки.

Известно, что дополнительные вертикальные перемещения фундаментов существующих зданий при устройстве вблизи них новых подземных объёмов зависят от горизонтальных деформаций ограждений котлованов, которые в свою очередь пропорциональны изгибной жёсткости ограждения. Ограждение котлованов, выполняемое по технологии «стена в грунте» обладает значительно большей жёсткостью на изгиб по сравнению со шпунтовым ограждением или ограждением из буросекующихся свай, что позволяет разрабатывать глубокие котлованы в сложных инженерно-геологических условиях в непосредственной близости от зданий существующей застройки.

Другим преимуществом технологии «стена в грунте» является отсутствие при её устройстве процессов, связанных с вибрацией, что является весьма важным фактором при 20...30-ти метровой толще слабых пылевато-глинистых грунтов, обладающих тиксотропными свойствами, что характерно для геологического строения центральной части Санкт-Петербурга. При вибрационных воздействиях (при забивке свай или вибропогружении шпунта) такие грунты, обладающие и без того низкими прочностными свойствами, практически превращаются в вязкую жидкость с минимальными значениями прочностных характеристик ( $\varphi \approx 0^\circ$  и  $c \approx 0$  кПа).

В сложившейся практике проектирования и строительства бытует мнение, что вертикальные перемещения зданий, происходящие в процессе устройства ограждений котлованов способом траншейной «стены в грунте» (так называемые технологические осадки), несущественны, и этими перемещениями можно пренебречь. В диссертационной работе, в результате проведенных исследований, в том числе и по результатам натурных наблюдений, показано, что для траншейной «стены в грунте» технологические осадки могут составлять до 80% общей осадки зданий соседней застройки, вызванной новым строительством.

**Степень разработанности темы исследования.** Объекты с развитым подземным пространством, расположенные в стеснённых условиях плотной городской застройки, вошли в практику строительства в России относительно недавно – 15...20 лет назад. Этим и обусловлено некоторое отставание аналитических методик расчёта подобных сооружений. Основным способом комплексной оценки влияния новых зданий с подземным объёмом на существующую застройку на данный момент является численное моделирование (ЧМ), в основном методом конечных элементов (МКЭ).

Технология траншейной «стены в грунте» известна довольно давно. Впервые её применили ещё в 30-х годах прошлого века при строительстве московского метрополитена. Серьезное развитие она получила в Европе с

начала 60-х годов XX века, в России эта технология стала применяться более широко с 70-х годов XX века, в основном при строительстве метрополитенов, противофильтрационных завес в гидротехническом строительстве и на других специализированных объектах. Задач, связанных с масштабным строительством подземных объёмов в условиях плотной городской застройки, в то время не возникало, что обуславливает состояние изученности рассматриваемой технологии.

Большинство работ, посвящённых стене в грунте, рассматривают три задачи: общую устойчивость ограждения и определение внутренних усилий в них; устойчивость стенок траншеи, связанную с технологическими аспектами подбора бентонитового раствора и погружения бетонной смеси; численное моделирование работы ограждения.

Аналитическим методам расчётов подпорных стенок, взаимодействию ограждающих конструкций с грунтовым массивом посвящены работы Ш. Кулона, Понселе Ж.В., Энгессера Ф., Якоби Э.К., Соколовского В.В., Новотворцева В.И., Шихиева Ф.М., Жемочкина Б.Н., Кречмера В.В., Горбунова-Посадова М.И., Снитко А.Н., Симвулиди И.А., Пузыревского Н.П., Снитко Н.К., Крылова А.Н. и др.

Численные методы анализа влияния конструкций ограждений котлованов на здания соседней застройки рассматривались Фадеевым А.Б., Федоровским В.Г., Ильичёвым В.А., Мангушевым Р.А., Никифоровой Н.С., Мирсаяповым И.Т., Парамоновым В.Н., Петрухиным В.П., Колыбиным И.В., Сахаровым И.И., Пономарёвым А.Б., Улицким В.М., Шашкиным А.Г., Шашкиным К.Г., Татариновым С.В. Стоит выделить работы Парамонова В.Н., Шашкина К.Г. и др. по разработке новых моделей грунта, учитывающих специфические свойства слабых пылевато-глинистых напластований Санкт-Петербурга.

Устойчивость стенок траншеи, заполненной глинистым раствором, изучалась такими специалистами как Малоян Э.А., Беленькая В.В., Перлей Е.М., Стайн А.В., Morgenstern N.R., Bishop A.W., Kowalewski Z, Piaskowski A., Huder J. и др.

Ряд значимых работ по изучению технологии «стена в грунте» был выполнен во ВНИИГ им. Веденеева под руководством Верстова В.В. В этих работах изучались технологические аспекты устройства стены в грунте, в том числе из сборных элементов, а также возможность применения вибрации для устройства стены в грунте.

Отдельно отметим работы, посвящённые изучению технологических осадок зданий. Так, Никифоровой Н.С. проанализировано влияние устройства отсечных экранов на существующую застройку по результатам мониторинга ряда объектов в Москве. Технологическим осадкам также посвящена работа Конюхова Д.С. и Свиридова А.И., в которой авторы, обработав данные мониторинга, предлагают эмпирическую методику для расчёта технологических осадок зданий для условий Москвы.

Анализ опытных данных и литературных источников показывает, что при проектировании и устройстве конструкций по технологии траншейной стены в

грунте, существует ряд проблем, требующих проведения дополнительных исследований.

Не определена доля осадки, вызванная устройством траншейной стены в грунте, в общей осадке фундаментов соседней застройки вследствие нового строительства. В работе Никифоровой Н.С. (2011) исследуются осадки существующих зданий в Москве при устройстве вблизи них отсечных экранов различной конструкции. На основании обработки данных геотехнического мониторинга показано, что осадки при производстве работ по устройству отсечных экранов (в большинстве случаев, выполняемых с помощью струйной технологии или секущихся свай) составляют 30...90% от общей осадки здания. Однако, эти результаты получены для различных технологий в инженерно-геологических условиях Москвы.

Влияние различных факторов на величину дополнительной осадки при устройстве траншейной стены в грунте не изучено. В работе Конюхова Д.С. и Свиридова А.И. (2011) на основании статистической обработки данных мониторинга предлагаются две эмпирические зависимости для определения технологической осадки для осреднённых условий Москвы в зависимости от типа ограждения котлована. Рассмотрены траншейная стена в грунте и стальные трубы. Влияние других факторов кроме типа ограждения не изучалось.

Знаменский В.В., Чунюк Д.Ю., Морозов Е.Б. (2012, 2015) исследовали технологические осадки существующей застройки, рассматривая задачу о траншейной стене в грунте в плоской постановке. Этот подход носит несколько упрощённый характер, при этом такая постановка задачи даёт большой «инженерный запас».

Как правило, при геотехнических расчётах принимается (ввиду отсутствия методов расчёта), что технологическая осадка соседней застройки при производстве работ в щадящем режиме будет равна нулю.

Технологические осадки, вызванные устройством траншейной стены в грунте в условиях слабых пылевато-глинистых грунтов и высокого уровня грунтовых вод, в частности, для условий Санкт-Петербурга, явились предметом настоящего исследования.

**Цель исследования** – оценка влияния процесса устройства ограждений котлованов, выполняемых по технологии траншейной стены в грунте, на осадки фундаментов существующих зданий в условиях слабых пылевато-глинистых грунтов, и разработка методики расчёта таких осадок для зданий соседней городской застройки.

**Задачи исследования:**

1) обобщение и анализ экспериментальных данных для оценки влияния процесса устройства ограждений котлованов, выполняемых по технологии траншейной стены в грунте, на осадки фундаментов существующих зданий в условиях слабых пылевато-глинистых грунтов Санкт-Петербурга;

2) разработка методики численного моделирования осадок зданий, вызванных устройством траншейной стены в грунте;

3) оценка влияния различных технологических параметров на технологические осадки зданий, вызванные процессом устройства траншейной стены в грунте;

4) разработка аналитической методики расчета осадок зданий при устройстве траншейной стены в грунте;

5) подтверждение достоверности результатов численного моделирования и аналитического расчёта по предлагаемым методикам путём сравнения с данными геотехнического мониторинга;

6) разработка рекомендаций по снижению технологических осадок зданий при устройстве траншейной стены в грунте.

**Объект исследования** – траншейная стена в грунте.

**Предмет исследования** – напряженно-деформированное состояние системы «стена в грунте – грунтовый массив – фундаменты здания».

**Научная новизна** исследования заключается в достижении следующих результатов:

1. Разработана методика численного моделирования осадки зданий, вызванной устройством траншейной стены в грунте, заключающаяся в поэтапном моделировании в пространственной постановке технологических операций по её устройству – откопки траншеи под защитой бентонитового раствора, с последующим заполнением траншеи литой бетонной смесью и её дальнейшим затвердеванием.

2. С помощью вариантных численных расчётов изучено влияние различных факторов на дополнительную осадку существующих зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте.

3. Разработано аналитическое решение задачи о напряженно-деформированном состоянии грунтового массива при разработке траншейной «стены в грунте», выполненное в рамках теории упругости.

4. Применимость разработанных методик расчёта и численного моделирования подтверждена сравнительным анализом результатов расчетов, выполненных по предлагаемым методикам, с данными геотехнического мониторинга, проведённого на реализованных в Санкт-Петербурге объектах с применением ограждения котлована, выполненного по технологии траншейной стены в грунте.

5. Даны рекомендации по возможности снижения технологической осадки соседней застройки при устройстве траншейной стены в грунте путём корректировки параметров захватки, плотности глинистого раствора и выбора оптимальных технологий усиления фундаментов.

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается в разработке принципов проектирования ограждений, выполненных по технологии траншейной стены в грунте, при устройстве глубоких котлованов в условиях слабых грунтов и плотной городской застройки. Это позволяет достовернее прогнозировать осадки, существующих зданий при устройстве вблизи них котлована с ограждением, выполняемым по технологии траншейной стены в грунте, что обеспечивает безопасную эксплуатацию зданий окружающей застройки.

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы внедрены компанией ЗАО «Геострой» в практику проектирования конструкций ограждения котлованов. Кроме того, результаты работы получили отражение в учебном пособии для студентов строительных вузов «Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах» (2013), Справочнике геотехника (2014), а также при проведении учебных занятий на кафедре геотехники СПбГАСУ для студентов строительных специальностей.

**Методология и методы исследования.** В диссертационной работе использованы следующие методы исследования:

- 1) анализ литературных источников по устройству ограждений котлованов с применением технологии «стена в грунте»;
- 2) использование численных методов моделирования и анализа напряжённо-деформированного состояния системы «траншея – грунтовый массив – здание»;
- 3) математическая оценка степени влияния различных параметров устройства стены в грунте на осадки ближайших фундаментов;
- 4) статистический анализ данных натурных наблюдений, полученных в результате геотехнического мониторинга за перемещениями зданий соседней застройки при строительстве нескольких объектов с развитым подземным пространством в условиях слабых пылевато-глинистых грунтов и плотной городской застройки;
- 5) сопоставительный анализ результатов геотехнического мониторинга с результатами расчётов осадки зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) методика численного моделирования ограждений котлованов, выполняемых по технологии траншейной «стены в грунте», которая позволяет оценить технологические осадки соседних зданий;
- 2) результаты оценки влияния параметров траншейной стены в грунте на осадку существующих зданий;
- 3) методика аналитического расчёта осадки фундаментов здания при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте;
- 4) результаты численного моделирования и аналитических расчетов, выполненных по предлагаемым методикам и их сопоставление с данными геотехнического мониторинга, проведённого на реализованных в Санкт-Петербурге объектах с применением траншейной стены в грунте;
- 5) анализ эффективности усиления фундаментов существующих зданий при строительстве ограждений котлованов методом «стена в грунте» в условиях плотной городской застройки.

**Область исследования.** Согласно сформулированной цели научной работы, её научной новизне и установленной практической значимости диссертация соответствует паспорту специальности 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения, пункту 10 «Разработка научных основ и основных принципов обеспечения безопасности нового строительства и

реконструкции объектов в условиях сложившейся застройки, в том числе для исторических памятников, памятников архитектуры и др.»).

**Достоверность результатов** научных исследований и выводов диссертационной работы подтверждается применением основных положений и моделей механики грунтов, теории упругости, механики твёрдого и деформируемого тела, математической статистики; обеспечивается достаточным объёмом данных геотехнического мониторинга реальных объектов, реализованных в условиях слабых пылевато-глинистых грунтов и плотной городской застройки, применением современных средств обработки экспериментальных данных и оборудования, а также внедрением отдельных положений работы в процесс проектирования строительной организации ЗАО «Геострой».

**Апробация работы.** Основные положения работы были доложены и обсуждены на 6-й научно-технической конференции пользователей программного комплекса Plaxis (2012 г, Санкт-Петербург) и четырёх научно-технических конференциях, проведённых в СПбГАСУ (2011-2013 гг.), а также получили отражение в одном учебном пособии, одном справочнике геотехника, 2 патентах на изобретение, 6-ми научных работах, 4 из которых опубликованы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка литературы и четырёх приложений. Общий объем диссертации составляет 177 страниц машинописного текста, 76 рисунков, 19 таблиц.

## **II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

**1. Разработана методика численного моделирования осадки зданий, вызванной устройством траншейной стены в грунте, заключающаяся в постадийном моделировании в пространственной постановке технологических операций по её устройству – откопки траншеи под защитой бентонитового раствора, с последующим заполнением траншеи литой бетонной смесью и её дальнейшим затвердеванием**

Основным способом моделирования ограждающих конструкций котлована в современных геотехнических пространственных расчётах методом конечных элементов является моделирование котлована изгибаемыми плосконапряжёнными конечными элементами (элементами плоской оболочки), у которых в узле имеются шесть степеней свободы (3 линейные и 3 вращательные). Такие элементы (в Plaxis – это элементы «plate») способны воспринимать продольные и поперечные силы, а также изгибающие моменты в двух ортогональных направлениях и крутящие моменты. Эти плоские элементы с точки зрения геометрии конечно-элементной модели имеют фактически нулевую толщину, их эффективная толщина учитывается только через жесткостные параметры при построении общей матрицы жёсткости модели.

Описанный выше «классический» метод численного моделирования ограждений котлованов с помощью пластинчатых элементов, даёт хорошую

сходимость с данными натуральных наблюдений для шпунтовых ограждений, однако не позволяет достоверно оценить осадки существующих зданий соседней застройки при устройстве ограждения котлована по технологии траншейной стены в грунте. Это объясняется тем, что учесть осадки существующих зданий, вызванные процессом устройства вблизи них траншейной стены в грунте, при подобном подходе к конечно-элементному моделированию практически невозможно.

Предложено производить моделирование ограждения, выполняемого по технологии «стена в грунте», с помощью объёмных элементов, что позволило учесть технологические осадки соседних зданий путём поэтапного моделирования технологических операций по устройству захватки стены в грунте (этап откопки захватки траншеи под защитой глинистого раствора и этап заполнения захватки литым бетоном).

При моделировании стены в грунте объёмными элементами выходными параметрами расчёта являются напряжения. При этом от вычисленных напряжений можно перейти к моментам, действующим в любом сечении конструкции по классическим зависимостям сопротивления материалов для изгибаемых и внецентренно сжатых элементов.

Для случаев, когда в стене в грунте отсутствуют продольные усилия, и конструкция работает только на изгиб, будет справедлива расчётная схема, представленная на рисунке 1, а изгибающие моменты в сечении с известными напряжениями будут определяться по формуле ( 1 ).

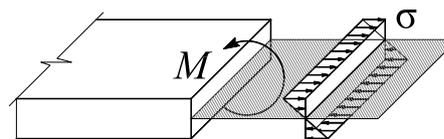


Рисунок 1 – Напряжения в изгибаемом элементе

$$M = \sigma \times W \quad (1)$$

Где:

- $\sigma$  – нормальное напряжение в сечении, кН / м<sup>2</sup>;
- $W$  – момент сопротивления сечения, м<sup>3</sup>.

Для погонного метра стены, толщиной  $b$ , выражение ( 1 ) приобретает вид:

$$M = \sigma \times b^2 / 6 \quad (2)$$

Для случаев, когда стена в грунте работает не только на изгиб, но и на сжатие (если стена является несущим элементом для надземных конструкций), следует разделить напряжения, вызываемые изгибом от напряжений, вызываемых продольным усилием по схеме, приведённой на рисунке 2 и выражению ( 3 ).

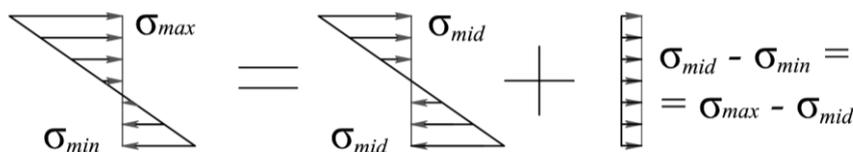


Рисунок 2 – Схема к определению напряжений для вычисления изгибающего момента в сечении внецентренно сжатого элемента

$$\sigma_{mid} = 0,5(|\sigma_{max}| + |\sigma_{min}|) \quad (3)$$

Сравнение двух различных способов моделирования ограждения котлована, выполняемого по технологии траншейной стены в грунте на примере тестовой задачи по расчёту ограждения глубокого котлована, разрабатываемого по технологии «top-down» с тремя уровнями откопки, представлено в таблице 2.

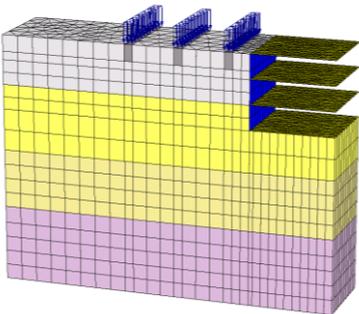
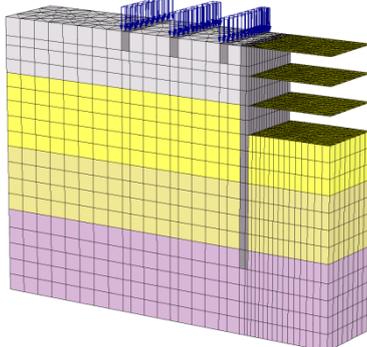
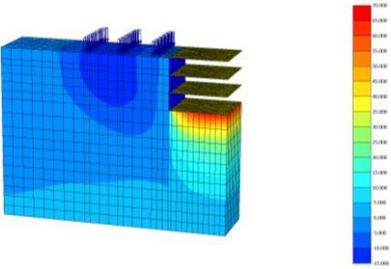
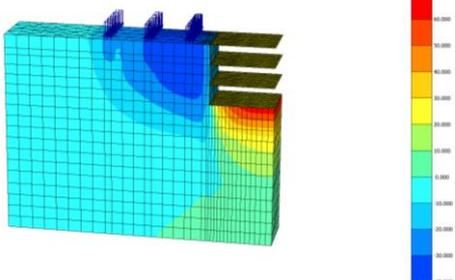
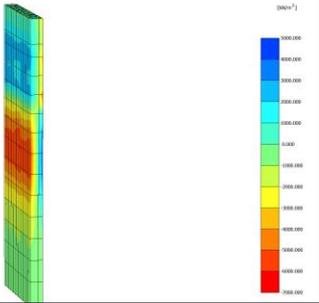
**2. С помощью вариантных численных расчётов изучено влияние различных факторов на дополнительную осадку существующих зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте.**

В качестве исходных инженерно-геологических данных для численного моделирования приняты результаты исследований Л.Г. Заварзина (1975) по геологическому районированию территории Ленинграда, дополненные данными геологического атласа Санкт-Петербурга (2009). Схема деления территории Санкт-Петербурга на районы по Л.Г. Заварзину и геологическое строение районов приведены на рисунках 3 и 4. Характеристики грунтов Санкт-Петербурга приняты в соответствии с материалами треста ГРИИ (В.М. Фурса, 1978) и приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Осреднённые характеристики грунтов Санкт-Петербурга (В.М. Фурса, 1978)

Индекс	<i>V<sub>kt</sub></i>	<i>g<sub>III</sub></i>	<i>lg<sub>III</sub></i>	<i>ml<sub>IV</sub></i>
Характерный тип грунта	твёрдые глины	валунные суглинки тугопластичные	ленточные мягкопластичные суглинки	от песков до суглинков, иногда с включением органики
Естественная влажность, %	14	20	35	40
Объёмная масса, кН/м <sup>3</sup>	22	21	19	18
Коэффициент пористости	0.5	0.53	0.85	1.08
Число пластичности	15	9	11	9
Показатель консистенции	-0.2	0.1	0.3	0.4
Модуль деформации, МПа	30	20	7.5	10
Угол внутреннего трения, град.	25	23	20	18
Удельное сцепление, кПа	45	40	15	20

Таблица 2 – Сравнение двух различных способов моделирования ограждения котлована, выполняемого по технологии траншейной стены в грунте

	Общепринятая методика ЧМ: ограждение – <b>пластинчатые КЭ</b>	Предлагаемая методика: ограждение – <b>объёмные КЭ</b>
Расчётная схема		
Вертикальные перемещения грунтового массива		 <p data-bbox="255 1052 1447 1355">Из сопоставления результатов следует, что при расчёте по предлагаемой методике максимальные дополнительные осадки происходят у ближнего к котловану фундамента, а не у дальних, как при классическом расчёте. Это объясняется тем, что у ближнего фундамента значительную долю общей дополнительной осадки составляет осадка, вызванная процессом устройства стены в грунте, то есть так называемая «технологическая» осадка. Полученный при моделировании ограждения объёмными КЭ характер распределения вертикальных перемещений, хорошо согласуется с данными мониторинга на возведённых объектах с ограждением котлованов, выполненных по технологии «стены в грунте».</p>
Изгибающие моменты в ограждении	 <p data-bbox="383 1780 630 1814"><math>M_{\text{макс}} = 950 \text{ кН}\times\text{м}</math></p>	 <p data-bbox="965 1691 1228 1724"><b>Cartesian Total Stress <math>\sigma_{yy}</math></b></p> <p data-bbox="805 1724 1396 1758">Maximum Value = <math>4,69 \cdot 10^3 \text{ кН/м}^2</math> (Element 3672 at Node 11566)</p> <p data-bbox="805 1758 1396 1792">Minimum Value = <math>-6,10 \cdot 10^3 \text{ кН/м}^2</math> (Element 3843 at Node 11526)</p> <p data-bbox="782 1814 1444 1859"><math>M = [ ( [ 6100 + 4690 ] / 2 ) \times 1^2 ] / 6 = 900 \text{ кН}\times\text{м/м}</math></p> <p data-bbox="255 1881 1447 1982">Значение изгибающего момента, полученное расчётом по разработанной методике хорошо коррелируется со значением, получаемым по классической методике расчёта</p>

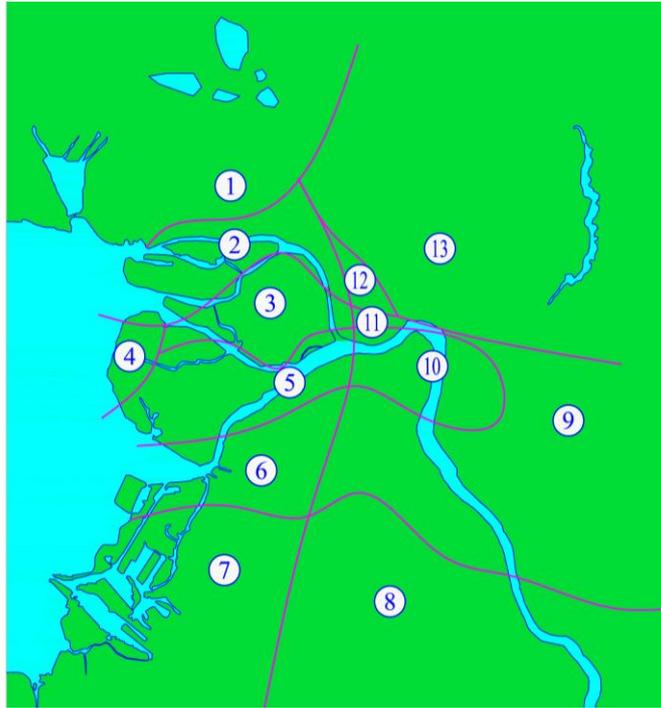


Рисунок 3 – Инженерно-геологическое районирование по Л.Г. Заварзину (1975).

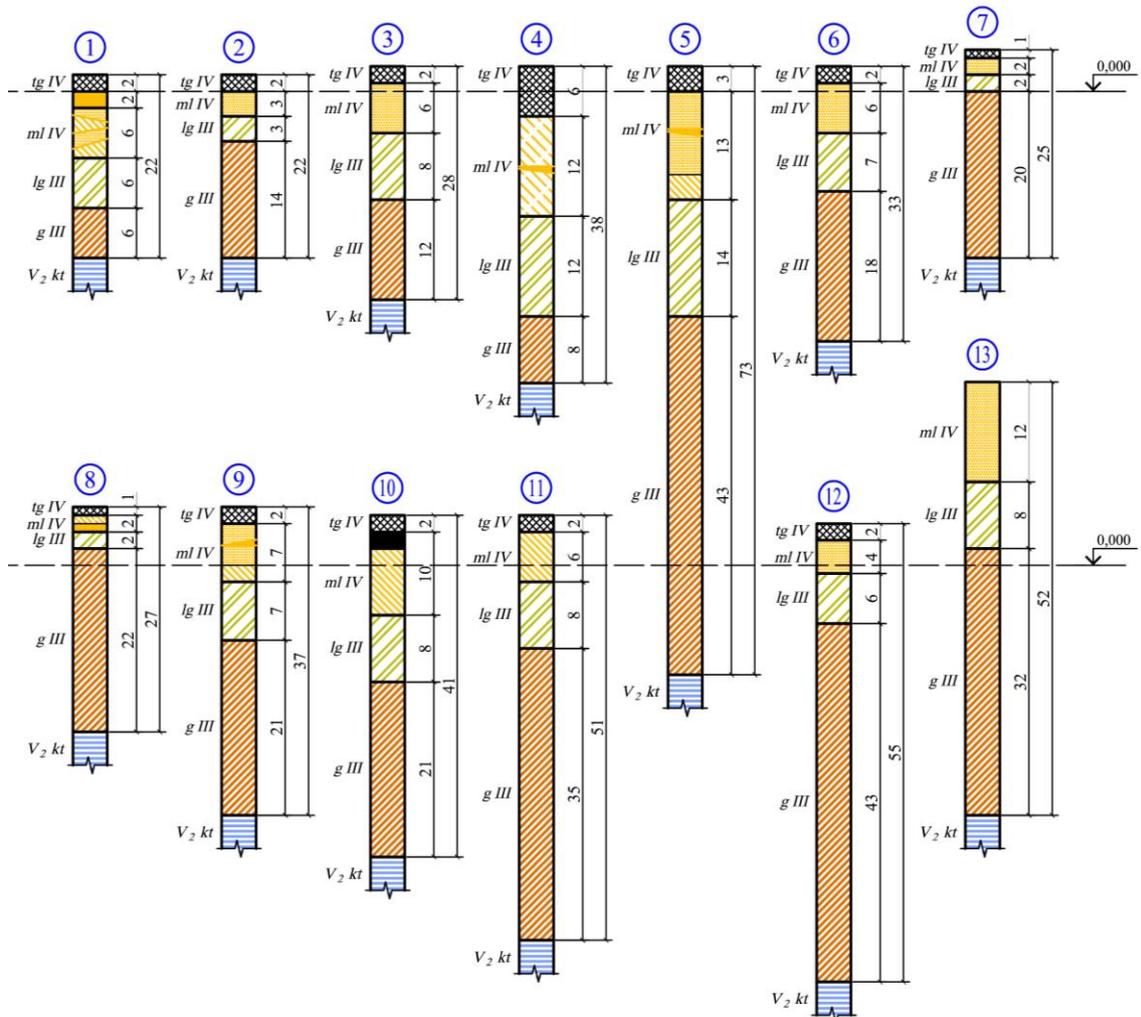


Рисунок 4 – Разрезы по инженерно-геологическим районам по Л.Г. Заварзину, дополненные данными геологического Атласа Санкт-Петербурга (2009).

Параметры зданий соседней застройки были приняты на основании многочисленных обследований, выполненных сотрудниками кафедры геотехники СПбГАСУ в различные годы. Большинство исторических зданий построены бескаркасными с тремя несущими продольными стенами; глубина заложения фундаментов обычно составляет около 2...3 м; ширина фундаментов – 1...2 м; пролёты здания – 5...6 м; нагрузка на обрез фундаментов составляет в среднем 200...250 кПа.

Глубина стены в грунте при моделировании принималась таким образом, чтобы выполнялось требование норм (в частности СП 50-101-2004): «... 10.8 При проектировании подпорных стен котлованов в водонасыщенных грунтах глубину заложения стены следует назначать с учётом возможности её заделки в водоупорный слой с целью производства экскавации грунта без применения мероприятий по водопонижению...». Согласно п. 5.6.40 СП 22.13330.2011 водоупорным считается слой с  $I_L < 0,25$  и  $k_{\phi} < 10^{-5}$  м/сут. Данным параметрам в Санкт-Петербурге отвечают только коренные протерозойские отложения, представленные вендскими и кембрийскими глинами твёрдой консистенции.

Таким образом, средние глубины «стены в грунте» в центральной части города составляют порядка 30 м, что соответствует строительной практике.

Важным моментом является выбор изменяемых параметров вариантных расчётов. Так как поставленная задача лежит на стыке нескольких строительных дисциплин, то и различных параметров, влияющих на величину технологической осадки может быть выделено чрезвычайно много: с точки зрения строительных материалов – это различные свойства глинистой суспензии и литого бетона, с точки зрения технологии строительного производства – параметры и виды оборудования для разработки траншеи, с точки зрения инженерной геологии, механики грунтов и фундаментостроения – параметры зданий соседней застройки и инженерно-геологические условия. В рамках данной диссертационной работы было изучено влияние следующих факторов: длины захватки траншейной «стены в грунте»; ширины захватки; плотности глинистого раствора; расстояния от фундамента здания до «стены в грунте» в свету.

Численное моделирование производилось для двух различных геологических районов центра Санкт-Петербурга, выделенных по методике Л.Г. Заварзина (3 и 6).

В каждом расчётном случае изменялся один параметр при постоянстве остальных, таким образом, для каждого из двух геологических районов было выполнено по  $3^4 = 81$  расчёту.

Результаты выполненных расчётов представлены на рисунке 5 в виде графиков зависимости технологической осадки от расстояния между фундаментом и траншейной стеной в грунте.

На основе проведённых расчётов для инженерно-геологических условий, центральных районов Санкт-Петербурга, предложено следующее эмпирическое выражение для инженерной оценки дополнительных осадок фундаментов зданий, вызванных устройством траншейной стены в грунте:

$$s = \alpha A e^{-BL} \quad (4)$$

где:

- $s$  – осадка фундамента соседнего с котлованом здания в мм;
- $A$  и  $B$  – коэффициенты, зависящие от геометрических параметров захватки «стены в грунте», плотности глинистого раствора и грунтовых условий;
- $e$  – постоянная Эйлера;
- $L$  – расстояние от «стены в грунте» до здания, м;
- $\alpha$  – поправочный коэффициент.

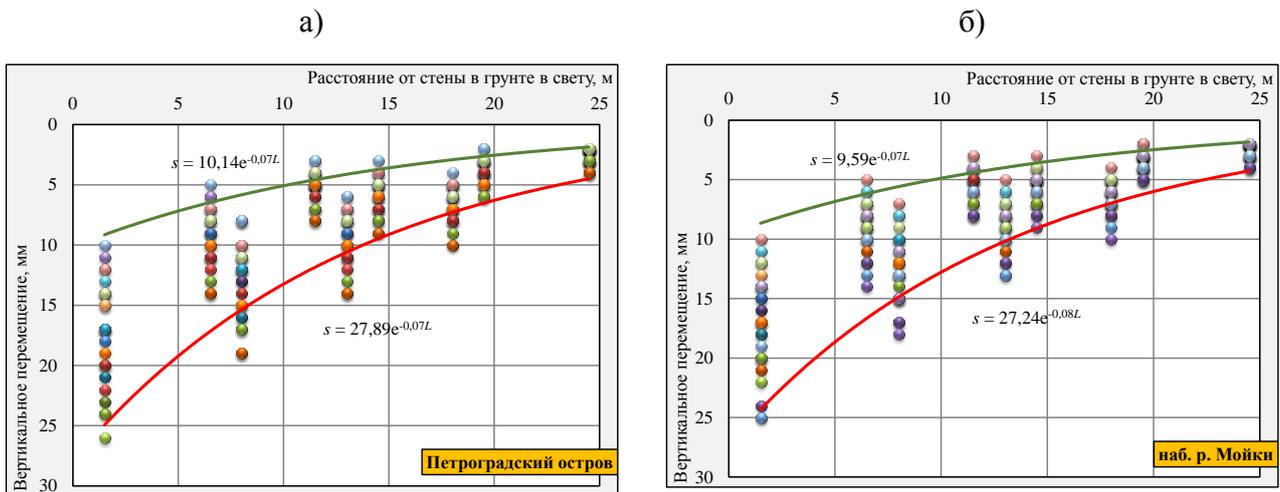


Рисунок 5 – Осадки существующих зданий в зависимости от расстояния до «стены в грунте» для третьего (а) и шестого (б) геологических районов по Л. Г. Заварзину.

Коэффициенты  $A$  и  $B$  для геологических условий центральной части Санкт-Петербурга при различных геометрических параметрах захватки «стены в грунте», плотности глинистого раствора приведены в таблице 3. Значения коэффициентов  $A$  и  $B$  рассчитаны по методу экспоненциальной аппроксимации значений, полученных при фиксированных параметрах  $b$ ,  $l$ , и  $\gamma_{\text{гл}}$ . Так как коэффициенты  $A$  и  $B$  определены путём статистической обработки массива значений, для определения максимальной осадки при заданных параметрах предлагается вводить коэффициент надёжности  $\alpha = 1,3$ .

Для оценки влияния остальных факторов (кроме расстояния между «стеной в грунте» и фундаментом) полученные результаты представлены в относительных величинах  $b_i / b_0$  и  $s_i / s_0$ , где:  $b_0$  – значение рассматриваемого фактора, соответствующее максимальным осадкам фундаментов, при неизменных значениях двух других факторов,  $b_i$  – два оставшиеся значения рассматриваемого фактора,  $s_0$  – значения осадок при значениях  $b_0$ ,  $s_i$  – значения осадок при значениях  $b_i$ . Аналогично пересчитаны результаты для остальных двух факторов. По полученным значениям построен график влияния отдельных факторов на величину дополнительной осадки (рисунок 6). Угол наклона пунктирных линий на графике позволяет качественно оценить степень влияния фактора на осадку здания – чем больше изменение фактора влияет на изменение результата, тем больший угол наклона к горизонтали имеет линия тренда рассматриваемого фактора.

Таблица 3 – Коэффициенты  $A$  и  $B$  для инженерно-геологических условий центральной части Санкт-Петербурга

№	Параметры захватки		$\gamma_{\text{гл. р-ра}}$ , кН/м <sup>3</sup>	$A$ , мм	$B$ , м <sup>-1</sup>
	$b_{\text{захв}}$ , м	$l_{\text{захв}}$ , м			
1	1,2	3,3	12,5	19	-0,07
2			11,7	23	-0,07
3			11	28	-0,08
4		2,6	12,5	17	-0,08
5			11,7	17	-0,07
6			11	22	-0,08
7		2	12,5	12	-0,07
8			11,7	16	-0,08
9			11	18	-0,07
10	1	3,3	12,5	17	-0,07
11			11,7	23	-0,08
12			11	27	-0,07
13		2,6	12,5	15	-0,08
14			11,7	19	-0,08
15			11	22	-0,08
16		2	12,5	11	-0,07
17			11,7	14	-0,07
18			11	18	-0,08
19	0,8	3,3	12,5	19	-0,08
20			11,7	22	-0,08
21			11	27	-0,08
22		2,6	12,5	15	-0,08
23			11,7	19	-0,09
24			11	22	-0,08
25		2	12,5	10	-0,07
26			11,7	14	-0,07
27			11	16	-0,08

факторы влияют на величину осадки зданий при устройстве траншейной стены в грунте, а также подтвердил полученные ранее выводы о степени влияния рассмотренных факторов.

Из графика на рисунке 6 следует, что наименьшее влияние на дополнительную осадку зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте имеет ширина захватки секции «стены в грунте» (линия тренда данного фактора ближе всего к горизонтали). Наибольшее влияние на осадку соседних зданий из трёх рассматриваемых факторов имеет плотность глинистого раствора, влияние длины захватки несколько слабее фактора плотности глинистого раствора.

В программном комплексе STATISTICA 10 проведён дисперсионный анализ, который показал, что все рассмотренные

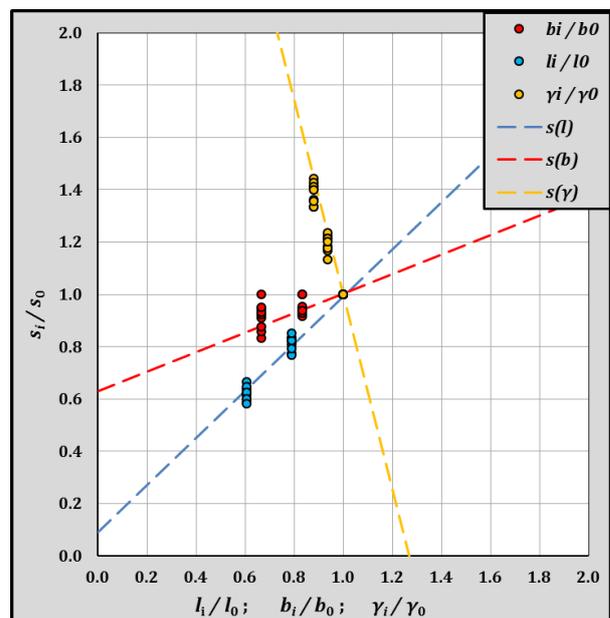


Рисунок 6 – Графическая интерпретация степени влияния отдельных факторов на величину дополнительной осадки зданий при устройстве вблизи них траншейной «стены в грунте».

### 3. Разработано аналитическое решение задачи о напряжённо-деформированном состоянии грунтового массива при разработке траншейной «стены в грунте», выполненное в рамках теории упругости.

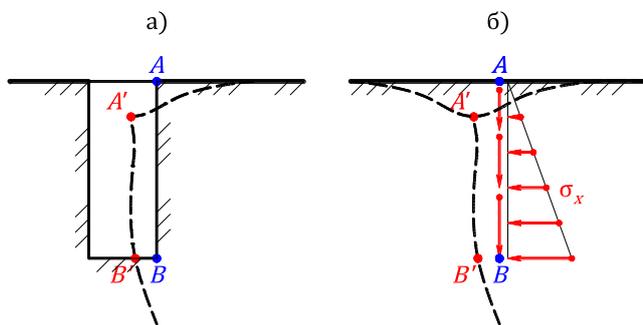


Рисунок 7 – К обоснованию расчётной схемы:

- а) деформации грунтового массива при откопке траншеи;  
б) принятая расчётная схема.

A–B – положение до откопки траншеи и приложения нагрузок;  
A'–B' – положение после откопки траншеи и приложения нагрузок.

Решение задачи о напряжённо-деформированном состоянии грунтового массива основано на следующем допущении: деформации грунта, вызванные разработкой траншеи равны деформациям в упругом полупространстве, вызванным воздействием некоторых дополнительных нормальных горизонтальных и касательных вертикальных напряжений (рисунок 7) на вертикальные поверхности, расположенные в пространстве идентично граням траншеи. Принятое допущение позволяет использовать решения теории упругости для данной задачи, так как рассматривается упругое полупространство, а не траншея в

упругом полупространстве.

При этом нормальные горизонтальные напряжения – это сумма давления покоя грунта  $\sigma_0$ , давления грунтовых вод  $\sigma_w$  и давления глинистого раствора внутри траншеи  $\sigma_{гл}$ . Вертикальные касательные напряжения – это трение грунта.

$$\sigma_x = \sigma_0 + \sigma_w - \sigma_{zl} \quad (5)$$

$$\tau_z = \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi$$

Давление покоя вычисляется по формуле:

$$\sigma_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z \quad (6)$$

где:  $\nu$  – коэффициент Пуассона грунта.

Расчётная схема для случая действия горизонтального давления, возрастающего с глубиной представлена на рисунке 8.

Принято, что на некоторый слой грунта, прорезаемый траншеей действует горизонтальное давление, равное на кровле слоя  $\sigma_{нач,i}$  и возрастающее с глубиной по линейному закону. Аналогично увеличивается с глубиной и вертикальное касательное давление.

$$\sigma_{h,i} = \sigma_{нач,i} + kh \quad (7)$$

где:  $k$  – величина, характеризующая изменение напряжения с глубиной.

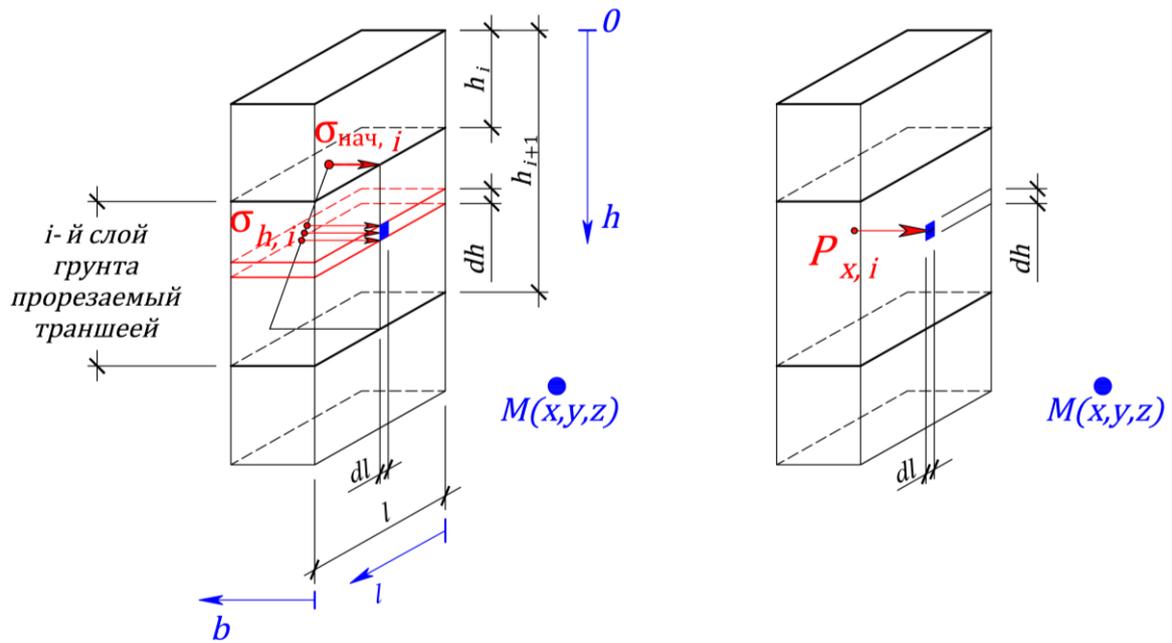


Рисунок 8 – Расчётная схема задачи о влиянии откопки траншеи на напряжения в грунтовом массиве для случая горизонтального давления на стенки траншеи.

Полное дополнительное напряжение в точке  $M$ , вызванное откопкой траншеи будет определяться, в рамках теории упругости, следующим обобщённым выражением:

$$\sigma_z(M) = \sigma_z^z(M) + \sigma_z^x(M)$$

$$\sigma_z(M) = \sum_{i=1}^n \left( \int_0^l \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\sigma_{нач,i} + k_{x,i}h) x \alpha'_{x,l} dl dh + \int_0^b \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\sigma_{нач,i} + k_{x,i}h) x \alpha'_{x,b} db dh + \right. \\ \left. + \int_0^l \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\tau_{нач,i} + k_{z,i}h) \alpha'_{z,l} dl dh + \int_0^b \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\tau_{нач,i} + k_{z,i}h) \alpha'_{z,b} db dh \right)$$

$$\text{где: } \alpha'_z = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left[ -\frac{(1-2\mu)(z-h)}{R_1^3} + \frac{(1-2\mu)(z-h)}{R_2^3} - \frac{3(z-h)^3}{R_1^5} - \right. \\ \left. - \frac{3(3-4\mu)z(z+h)^2 - 3h(z+h)(5z-h)}{R_2^5} - \frac{30hz(z+h)^3}{R_2^7} \right] \quad (8)$$

$$\alpha'_x = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left[ \frac{(1-2\mu)}{R_1^3} - \frac{(1-2\mu)}{R_2^3} - \frac{3(z-h)^2}{R_1^5} - \right. \\ \left. - \frac{3(3-4\mu)(z+h)^2 - 6h[h+(z+h)(1-2\mu)]}{R_2^5} - \frac{30hz(z+h)^2}{R_2^7} \right]$$

$$R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}; \quad R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2}$$

$\sigma_z^z, \sigma_z^x$  – дополнительное вертикальное напряжение в точке  $M$ , вызванное соответственно горизонтальными нормальными и вертикальными касательными напряжениями, действующими на стенку траншеи;

- $x, y, z$  – координаты произвольной точки пространства  $M$ , в которой вычисляются напряжения и перемещения;
- $h$  – глубина от поверхности упругого полупространства, на которой действует сосредоточенная вертикальная  $P_z$  либо горизонтальная  $P_x$  сила;
- $\nu$  – коэффициент Пуассона;

Полученное обобщённое аналитическое решение (8) является довольно громоздким и его сложно использовать в практических расчётах, так как оно включает в себя множество величин, зависящих от переменных интегрирования.

Разработано применимое для инженерной практики решение, полученное из обобщённого путём введения ряда допущений, которые не влияют существенным образом на конечный результат:

- вклад каждой элементарной площадки, расположенной на одном уровне боковой поверхности траншеи одинаков. Определение коэффициентов  $\alpha'_x$  и  $\alpha'_z$  производится для точек, соответствующих центру поперечного сечения траншеи;
- влиянием напряжений, действующих по короткой стороне сечения траншеи можно пренебречь;
- напряжения в слое грунта допускается осреднить;
- напряжения от фундаментов допустимо не учитывать при расстоянии между фундаментами и стеной в грунте более 2-х ширин фундамента.

С учётом принятых допущений дополнительное напряжение будет определяться следующим образом:

$$\sigma_z(M) = \sigma_z^z(M) + \sigma_z^x(M); \quad \sigma_z(M) = l \sum_{i=1}^n \left( x \sigma_{cp,i} \int_{h_i}^{h_{i+1}} \alpha'_x dh + \tau_{cp,i} \int_{h_i}^{h_{i+1}} \alpha'_z dh \right) \quad (9)$$

Полученное для  $\sigma_z(M)$  решение позволяет интегрировать по глубине только коэффициенты  $\alpha'_x$  и  $\alpha'_z$ . В конечном итоге, после составления таблиц с коэффициентами  $\alpha_x$  и  $\alpha_z$  решение можно представить в виде:

$$\sigma_z(M) = l \sum_{i=1}^n \left( x \sigma_{cp,i} (\alpha_{x,i} - \alpha_{x,i-1}) + \tau_{cp,i} (\alpha_{z,i} - \alpha_{z,i-1}) \right) \quad (10)$$

Суть предлагаемого метода схожа с известным в механике грунтов методом угловых точек. Но в отличие от вышеназванного метода, где для нахождения напряжения в произвольной точке упругого полупространства необходимо выполнить суммирование по элементарным площадям загрузки поверхности, в предлагаемом методе – напряжение суммируется по слоям грунта, прорезаемых траншеей, а затем по захваткам траншеи.

**4. Применимость разработанных методик расчёта и численного моделирования подтверждена сравнительным анализом результатов расчетов, выполненных по предлагаемым методикам, с данными геотехнического мониторинга, проведённого на реализованных в Санкт-Петербурге объектах с применением ограждения котлована, выполненного по технологии траншейной стены в грунте.**

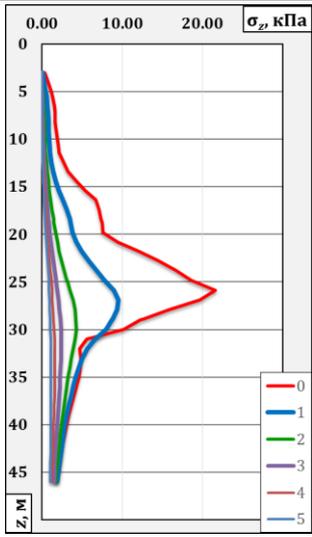
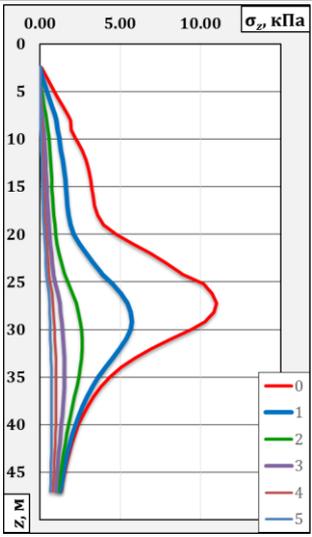
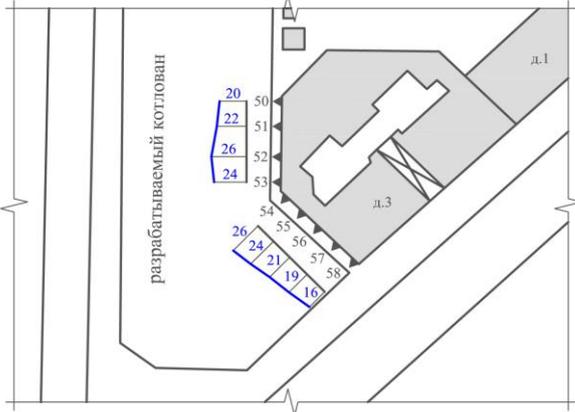
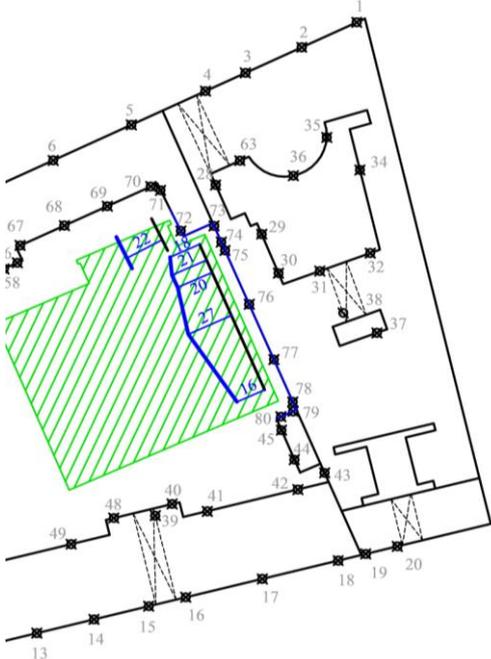
Поставленные в диссертации задачи весьма сложны для масштабного моделирования в условиях лотковых испытаний из-за целого ряда причин, основной из которых является необходимость моделирования самого *процесса устройства* стены в грунте (откопки захватки траншеи под защитой глинистого раствора, бетонирования захватки, разработки соседних захваток).

К настоящему времени уже построено несколько объектов в условиях плотной городской застройки и мощной толщи слабых глинистых грунтов в историческом центре Санкт-Петербурга. Геотехнический мониторинг построенных зданий и соседней застройки рассмотрен в качестве натуральных экспериментов по изучению процесса устройства стены в грунте и его влияния на ближайшие здания. Данные геотехнического мониторинга соседней застройки во многом являются основным критерием, по которому возможно оценить достоверность разработанных методик численного и аналитического решений задачи об оценке напряжённо-деформированного состояния грунтового массива при разработке траншейной стены в грунте.

Таблица 4 – Сравнение результатов расчётов по разработанным методикам оценки технологической осадки зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте с данными мониторинга

	Жилой дом с коммерческими помещениями	Административное здание
Ситуационный план и геодезические марки		
Результат численного моделирования технологической осадки	<p style="text-align: center;"><b>Total displacements <math>u_z</math></b></p> <p style="text-align: center;">Maximum value = <math>2.379 \cdot 10^{-3}</math> m (Element 10829 at Node 17915)</p> <p style="text-align: center;">Minimum value = <math>-0.02645</math> m (Element 1987 at Node 1321)</p> <p style="text-align: center;"><b>26 мм</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Total displacements <math>u_z</math></b></p> <p style="text-align: center;">Maximum value = <math>0.9430 \cdot 10^{-3}</math> m (Element 4643 at Node 6350)</p> <p style="text-align: center;">Minimum value = <math>-0.03139</math> m (Element 2406 at Node 4083)</p> <p style="text-align: center;"><b>31 мм</b></p>

Продолжение таблицы 4

	Жилой дом с коммерческими помещениями	Административное здание
Результат аналитического расчёта: дополнительные вертикальные напряжения, вызванные разработкой нескольких захваток	 <p style="text-align: center;">25 мм</p>	 <p style="text-align: center;">26,1 мм</p>
	Схема нумерации захваток стены в грунте относительно расчётного сечения:	
Данные мониторинга	 <p style="text-align: center;">осадка 16...26 мм</p>	 <p style="text-align: center;">осадка 16...27 мм</p>

Результаты применения разработанных методик численного моделирования и аналитического расчёта осадок соседней застройки, вызванных устройством траншейной стены в грунте, для двух объектов, построенных в стеснённых условиях центральной части Санкт-Петербурга, а также сравнение их с данными мониторинга приведены в таблице 4.

Результаты численного моделирования и аналитических расчётов дополнительных осадок фундаментов при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте, выполненные по разработанным методикам, для двух объектов, реализованных в Санкт-Петербурге, показали хорошую сходимость с данными геотехнического мониторинга, что говорит о достоверности предлагаемых методик и возможности их использования в инженерной практике.

По данным мониторинга оценена величина технологической осадки и её доля в общей дополнительной осадке соседней застройки, полученной за весь период строительства для обоих рассмотренных объектов.

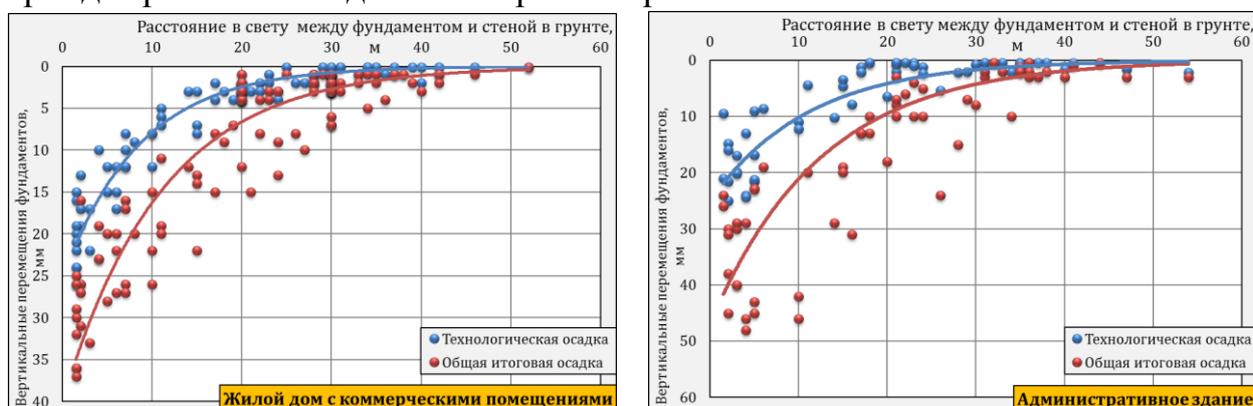


Рисунок 9 – Осадки полученные в процессе устройства стены в грунте и полные осадки окружающей застройки от влияния нового строительства



Рисунок 10 – Доля технологической осадки в общей итоговой осадке в зависимости от расстояния до стены в грунте

На графиках, приведённых на рисунке 9 представлены данные геотехнического мониторинга в виде зависимости вертикальных перемещений геодезических марок от расстояния между марками и стеной в грунте. Синим цветом отмечены осадки геодезических марок, полученные за период устройства траншейной стены в грунте. Каждой синей точке соответствует красная, обозначающая полную осадку данной геодезической марки.

Представленные выше графики хорошо демонстрируют то, что величина технологической осадки при устройстве стены в грунте составляет

значительную долю от общей дополнительной осадки, вызванной новым строительством. На рисунке 10 приведена доля технологической осадки в общей осадке зданий соседней застройки в зависимости от расстояния между фундаментом и стеной в грунте.

Представленные данные наглядно демонстрируют значимость технологической осадки. Согласно данным мониторинга на двух объектах, реализованных в условиях плотной городской застройки центральной части Санкт-Петербурга, осадки существующих зданий, вызванные устройством траншейной стены в грунте, составляют до 80% от общих дополнительных осадок существующих зданий. При этом прослеживается чёткая зависимость: чем меньше расстояние между зданием и стеной в грунте, тем больше доля технологической осадки в общей.

**5. Даны рекомендации по возможности снижения технологической осадки соседней застройки при устройстве траншейной стены в грунте путём корректировки параметров захватки, плотности глинистого раствора и выбора оптимальных технологий усиления фундаментов.**

Произведённые расчёты и опыт устройства стены в грунте в условиях плотной застройки и мощной толщи слабых пылевато-глинистых грунтов, показывают, что технологические осадки вызваны дополнительными напряжениями, возникающими на глубинах 20...30 м, что определяет эффективность тех или иных методов усиления соседней застройки. Так усиление путём устройства коротких свай шпор или закреплением грунта под подошвой фундамента с помощью цементации или по струйной технологии не приведёт к существенному снижению технологических осадок в инженерно-геологических условиях центральной части Санкт-Петербурга. Уменьшения технологических осадок можно добиться корректировкой параметров устройства стены в грунте (уменьшение длины захватки, увеличение плотности глинистого раствора) или компенсационными мероприятиями, например, нагнетанием цементного раствора.

### **III ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

1. Основным достоинством технологии траншейной стены в грунте является высокая жёсткость получаемой ограждающей конструкции. Это позволяет значительно снизить дополнительные осадки соседних зданий при устройстве глубоких котлованов по сравнению со шпунтовым ограждением. При этом необходимо учитывать, что значительная доля дополнительной осадки соседней застройки при ограждении котлована стеной в грунте может быть вызвана самим процессом устройства ограждения (технологическая осадка). Установлено, что доля технологической осадки при устройстве траншейной стены в грунте, может достигать 60...80% от общей осадки, вызванной влиянием нового строительства. При этом максимальное значение технологической осадки (как и доля в общей осадке) приходится на ближайшие к ограждению котлована фундаменты зданий. С увеличением расстояния, как величина технологической осадки, так и её вклад в итоговую осадку, снижаются.

2. Предложенная в диссертации методика моделирования ограждений котлованов объёмными элементами позволяет рассчитать технологические осадки, вызванные устройством ограждения, выполняемого по технологии траншейной «стены в грунте», путём поэтапного моделирования технологических операций по её устройству – откопки траншеи под защитой бентонитового раствора, с последующим заполнением траншеи литой бетонной смесью и её дальнейшим затвердеванием.

3. На основе многофакторного статистического анализа результатов многовариантных численных расчётов установлено, что наибольшее влияние на технологическую осадку здания оказывает расстояние между зданием и стеной в грунте. Минимальное влияние имеет величина ширины траншеи для устройства ограждения (ширина стены в грунте). Влияние факторов плотности глинистого раствора и длины захватки стены в грунте примерно одинаково.

4. На основании решений теории упругости получено замкнутое решение для вычисления дополнительных вертикальных напряжений в массиве грунта, вызванных разработкой захватки траншеи, заполненной глинистым раствором, что позволяет определить дополнительную осадку зданий существующей застройки, вызываемую этими напряжениями. На основе обобщённого решения предложен инженерный метод расчёта дополнительных вертикальных напряжений, вызванных устройством траншеи.

5. Выполненное сравнение результатов расчётов по разработанным в диссертации методикам численного и аналитического расчётов с данными натурных наблюдений, полученных в ходе геотехнического мониторинга объектов с развитым подземным пространством, подтверждает хорошую сходимость.

6. Снижение технологических осадок зданий может быть достигнуто путём корректировки технологических параметров при устройстве ограждения, выполняемого по технологии траншейной стены в грунте, в частности уменьшением длины захватки и увеличением плотности глинистого раствора или применением компенсационных мероприятий (нагнетание цементного раствора для поднятия зданий).

#### **IV ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации:**

1. Мангушев, Р. А. Влияние формы сечения конструкции «стена в грунте» на дополнительную осадку соседних зданий / Р. А. Мангушев, А. А. Веселов, Д. А. Сапин // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 6 (35). – С. 71–77 (0,7 п.л. / 0,17 п.л.).

2. Мангушев, Р. А. Численное моделирование технологической осадки соседних зданий при устройстве траншейной «стены в грунте» / Р. А. Мангушев, А. А. Веселов, В. В. Конюшков, Д. А. Сапин // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 5 (34). – С.87-98 (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).

3. Сапин, Д. А. Технологическая осадка соседних зданий при устройстве траншейной «стены в грунте» / **Д. А. Сапин** // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 6 (47). – С. 133–139 (0,4 п.л.).

4. Сапин, Д. А. Осадки фундаментов зданий соседней застройки при устройстве траншейной «стены в грунте» / **Д. А. Сапин** // Жилищное строительство – 2015. – № 4. – С. 8–13 (0,3 п.л.).

#### **Патенты:**

5. Пат. № 2482243 Российская Федерация, МПК Е 02 D 5/20. Несъёмная опалубка для возведения стен в грунте [Текст] / Мангушев Р. А., **Сапин Д. А.** ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ СПбГАСУ – № 2011144046/03 ; заявл. 31.10.2011 ; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 14. – 5 с. : ил.

6. Пат. № 2523269 Российская Федерация, МПК E02D 5/44. Фибробетонная свая [Текст] / Мангушев Р. А., **Сапин Д. А.** ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ СПбГАСУ – № 2013109518/03 ; заявл. 04.03.2013 ; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20. – 6 с. : ил.

#### **В других изданиях:**

7. Сапин, Д. А. Технологическая осадка окружающей застройки при устройстве траншейной «стены в грунте». Сравнение результатов расчёта с данными наблюдений / **Д. А. Сапин** // Инженерные подходы к решению геотехнических задач: сб. науч. тр., посвящ. 80-летию К. Ш. Шадунца / – Краснодар: КубГАУ, 2013. – С. 200–207.

8. Mangushev, R. A. Settlement of adjoining development in process of construction of trench diaphragm wall. Comparing calculations values with in-situ observed data / R. A. Mangushev, **D. A. Sapin** // Актуальные проблемы архитектуры и строительства: материалы V международной конференции. 25-28 июня 2013 г. / под общей редакцией Е. Б. Смирнова; СПбГАСУ. – В 2 ч. Ч 1. – СПб., 2013. – С. 326–332.

9. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах: учебное пособие / Р.А. Мангушев, Н.С. Никифорова, В.В. Конюшков, А.И. Осокин, **Д.А. Сапин** – М.: Изд-во АСВ, 2013. – 247 с.

10. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. (Гл. 13) / под общей редакцией В.А.Ильичева и Р.А.Мангушева – М. : Изд-во АСВ, 2014 – 756 с.