

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет»  
Министерства образования и науки Российской Федерации

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

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Мангушев Р. А.

Санкт-Петербург – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1. ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ОГРАЖДЕНИЙ КОТЛОВАНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА «СТЕНА В ГРУНТЕ» В УСЛОВИЯХ СЛАБЫХ ГРУНТОВ.....</b>	<b>11</b>
1.1 Основные принципы проектирования и устройства ограждений котлованов в условиях слабых пылевато-глинистых грунтов и плотной городской застройки.....	11
1.2 Опыт выполнения ограждений котлованов по технологии траншейной «стены в грунте» в Санкт-Петербурге.....	15
1.3 Понятие о технологической осадке. Величина технологической осадки зданий, вызванная устройством траншейной стены в грунте по данным мониторинга при строительстве в стеснённых условиях центральной части Санкт-Петербурга.....	23
1.4 Анализ существующих методов расчета и подходов к проектированию ограждений котлованов с применением «метода стена в грунте».....	26
Выводы по первой главе.....	31
<b>ГЛАВА 2. ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСАДКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ «СТЕНА В ГРУНТЕ» .....</b>	<b>32</b>
2.1 Основные положения численного моделирования работы ограждающих конструкций котлованов.....	32
2.2 Методика численного моделирования для оценки технологической осадки при использовании технологии «стена в грунте».....	35
2.3 Изучение влияния различных факторов на дополнительные осадки зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте.....	41
Выводы по второй главе.....	62
<b>ГЛАВА 3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ НАПРЯЖЁННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В МАССИВЕ ГРУНТА ПРИ УСТРОЙСТВЕ ТРАНШЕЙНОЙ «СТЕНЫ В ГРУНТЕ».....</b>	<b>65</b>
3.1 Обоснование расчётной схемы захватки (участка) стены в грунте на стадии откопки под защитой глинистого раствора.....	65
3.2 Решение задачи о влиянии откопки траншеи на окружающий массив грунта.....	71
3.3 Инженерный метод расчёта влияния откопки траншеи на дополнительную осадку соседних фундаментов.....	76
Выводы по третьей главе.....	86
<b>ГЛАВА 4. ПРИМЕРЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА ПО РАЗРАБОТАННЫМ МЕТОДИКАМ С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ .....</b>	<b>88</b>
4.1 Жилой дом с коммерческими помещениями и подземным паркингом в Петроградском районе Санкт-Петербурга. ....	89
4.2 Административное здание в Центральном районе Санкт-Петербурга .....	108

Выводы по четвёртой главе.....	130
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>132</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>134</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....</b>	<b>150</b>
Акт внедрения.....	150
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....</b>	<b>151</b>
Формулы для вычисления коэффициентов $\alpha_x$ и $\alpha_z$ в программе MS Office Excel.....	151
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....</b>	<b>152</b>
Формулы для вычисления коэффициентов $\alpha_x$ и $\alpha_z$ в программе Maple и при использовании различных языков программирования .....	152
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....</b>	<b>153</b>
Таблицы для определения коэффициентов $\alpha_x$ и $\alpha_z$ .....	153

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** 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 буросекущихся 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 натуральных наблюдений, показано, что для траншейной «стены в грунте» технологические осадки могут составлять до 80% общей осадки зданий соседней застройки, вызванной новым строительством.

Оценка и учёт дополнительной осадки зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте с помощью численного моделирования и аналитических методик расчёта является актуальной задачей проектирования и устройства ограждений котлованов подземных сооружений по технологии траншейной стены в грунте, требующей дополнительных исследований.

Осадка зданий соседней застройки во время устройства «стены в грунте» может быть вызвана также сторонними факторами, связанными ошибками при строительстве или грубыми нарушениями технологии устройства траншейной стены в грунте (снижение плотности глинистого раствора, перебор грунта, проходка валунов, чрезмерное динамическое воздействие на тиксотропные грунты) – такие ситуации в данной работе не рассматриваются.

**Целью работы** является: 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**, которые необходимо решить для выполнения поставленной цели:

- 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 работы:**

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 напряжённо-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 (Приложение 1). Кроме того, результаты работы получили отражение в учебном пособии для студентов строительных вузов «Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах» [82], Справочнике геотехника [130], а также при проведении учебных занятий для студентов строительных специальностей на кафедре геотехники СПбГАСУ.

**Методология и методы исследований.** 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 натуральных 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 исследований и выводов диссертационной работы подтверждаются 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 результатов работы в процесс проектирования строительной организации.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях: 6-я научно-техническая конференция пользователей программного комплекса Plaxis (26-27 июня 2012 г, Санкт-Петербург), Всероссийская конференция научных работников, молодых учёных и специалистов «ГЕОТЕХНИКА: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА» (7-8 февраля 2013 г, СПбГАСУ, Санкт-Петербург), 64-й МНТК молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (5 апреля 2011, СПбГАСУ, Санкт-Петербург), 1-й международный конгресс студентов и молодых учёных (аспирантов, докторантов) «Актуальные проблемы современного строительства», посвящённый 180-летию СПбГАСУ (11 апреля 2012, СПбГАСУ, Санкт-Петербург), 2-й международный конгресс студентов и молодых учёных (аспирантов, докторантов) «Актуальные проблемы современного строительства» (5 апреля 2013, СПбГАСУ, Санкт-Петербург).

**Публикации.** Основные положения диссертации получили отражение в учебном пособии для студентов строительных вузов «Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах» [82], Справочнике геотехника [130], 2 патентах на изобретение, 6-ми научных работах, 4 из которых опубликованы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК.

**Структура 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.

Диссертационная работа выполнена на кафедре геотехники Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета под руководством чл.-корр. РААСН, д.т.н., профессора Рашида Абдулловича Мангушева. Большая методическая помощь и техническая поддержка оказана автору сотрудниками кафедры геотехники, НПК «Центра Геотехнологий» СПбГАСУ, а именно доц., к.т.н. В. В. Конюшковым, профессором кафедры железобетонных конструкций СПбГАСУ, д.т.н. А.А. Веселовым, а также: генеральным директором ЗАО «Геострой», к.т.н., доц. А.И. Осокиным и техническим директором ГК «ГЕОИЗОЛ» М.А. Зайцевым.

## **ГЛАВА 1. ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ОГРАЖДЕНИЙ КОТЛОВАНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА «СТЕНА В ГРУНТЕ» В УСЛОВИЯХ СЛАБЫХ ГРУНТОВ**

### **1.1 Основные принципы проектирования и устройства ограждений котлованов в условиях слабых пылевато-глинистых грунтов и плотной городской застройки**

Современные требования к новым зданиям обязывают проектировщиков предусматривать ряд технических помещений и необходимое число парковочных мест. При строительстве в плотной городской застройке, а в условиях центральной части Санкт-Петербурга ещё и с жёстким высотным регламентом, зачастую единственным решением является устройство одного или нескольких подземных этажей.

Устройство котлованов в условиях городской застройки невозможно без ограждения [130, 63]. В слабых пылевато-глинистых водонасыщенных грунтах Санкт-Петербурга в качестве ограждений котлованов чаще всего применяются металлический шпунт или железобетонная стена в грунте, которая может быть либо траншейной, либо состоять из секущихся свай [102, 97].

Основным критерием при проектировании системы ограждения котлована и системы его раскрепления в условиях городской застройки является безопасность соседних зданий, что обеспечивается ограничением их дополнительных осадок. При этом, согласно действующим федеральным нормам [10], величина предельно допустимой дополнительной осадки для зданий исторической застройки (построенных более 100 лет назад) составляет всего 0,5...2 см. В инженерно-геологических условиях центра Санкт-Петербурга уложиться в данные ограничения крайне сложно, поэтому для таких случаев нормы допускают при наличии слабых грунтов ( $E \leq 7$  МПа) назначать предельную дополнительную осадку существующих зданий по территориальным нормам. Для Санкт-Петербурга региональные нормы [17, 16] ограничивают

дополнительную осадку исторической застройки 2...5 см. В эти ограничения и приходится укладываться при строительстве зданий с развитым подземным пространством в центре Санкт-Петербурга.

Отечественный и зарубежный опыт проектирования котлованов [32, 31, 34] показывает, что осадка земной поверхности за ограждением  $s_{\text{доп}}$  может быть связана с горизонтальным перемещением самого ограждения  $u_{\text{гор}}$  следующей зависимостью:

$$s_{\text{доп}} = (0,5 \dots 1) u_{\text{гор}} \quad (1.1)$$

В случае нарушения структуры слабых тиксотропных грунтов при производстве работ по разработке котлована, зависимость между вертикальными перемещениями грунтового массива за пределами ограждения и горизонтальными перемещениями ограждения котлована может достигать до отношения:

$$s_{\text{доп}} = 2 u_{\text{гор}} \quad (1.2)$$

Таким образом, фактически, снижение дополнительных осадок существующей застройки достигается путём снижения горизонтальных перемещений ограждения, поэтому основной целью при проектировании ограждения является подбор его изгибной жёсткости и необходимой глубины заделки ниже дна котлована.

Оценим изгибную жёсткость  $EI$  погонного метра для различных типов ограждения. При этом следует иметь ввиду, что если для стального шпунта различных видов модуль упругости постоянен и равен 200 000 МПа, то для железобетонных конструкций стен в грунте, согласно требованиям действующих нормативных документов, начальный модуль деформации должен быть снижен для учёта явления ползучести бетона [12, 13]. Так для расчёта ограждающих элементов, подверженным длительным нагрузкам, вызывающим изгиб, начальный модуль упругости бетона, согласно [12] должен умножаться на коэффициент 0,3. Это как раз относится к конструкциям стен в грунте, основная нагрузка на которые оказывается грунтом и грунтовыми водами. С учётом этого

модуль упругости бетона класса В25 составит не 30 000 МПа, а только 10 000 МПа.

На рисунке 1.2 представлен график сравнения жесткостей различных ограждений, часть из которых представлена на рисунке 1.1. Как видно из сравнения, даже с учётом снижения модуля деформации бетона в три раза, с изгибной жёсткостью плоских стен в грунте может соперничать только трубошпунт. Обычные корытные и Z-образные профили значительно уступают ей в жёсткости. Однако использование трубошпунта в условиях плотной городской застройки на данный момент затруднительно, так как в Санкт-Петербурге отсутствует оборудование для его статического вдавливания. У стен в грунте с контрфорсами «конкурентов» по жёсткости нет.

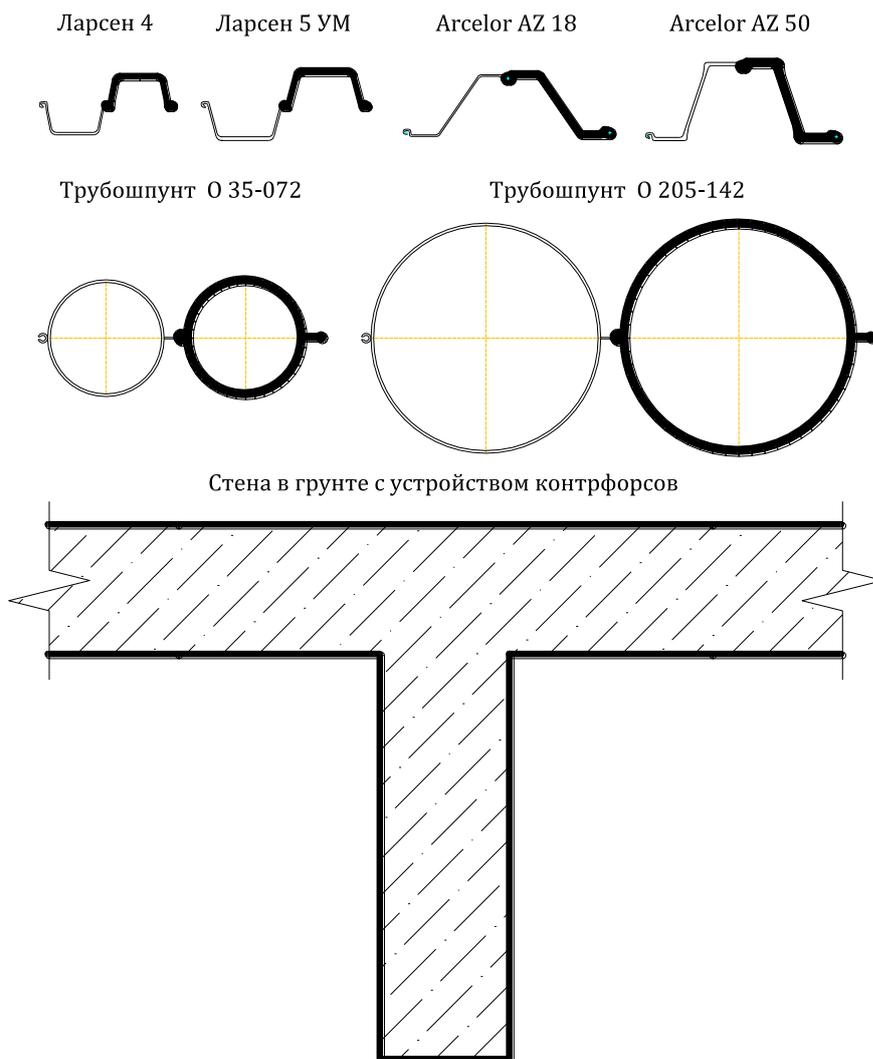


Рисунок 1.1 – Сечения различных типов ограждений

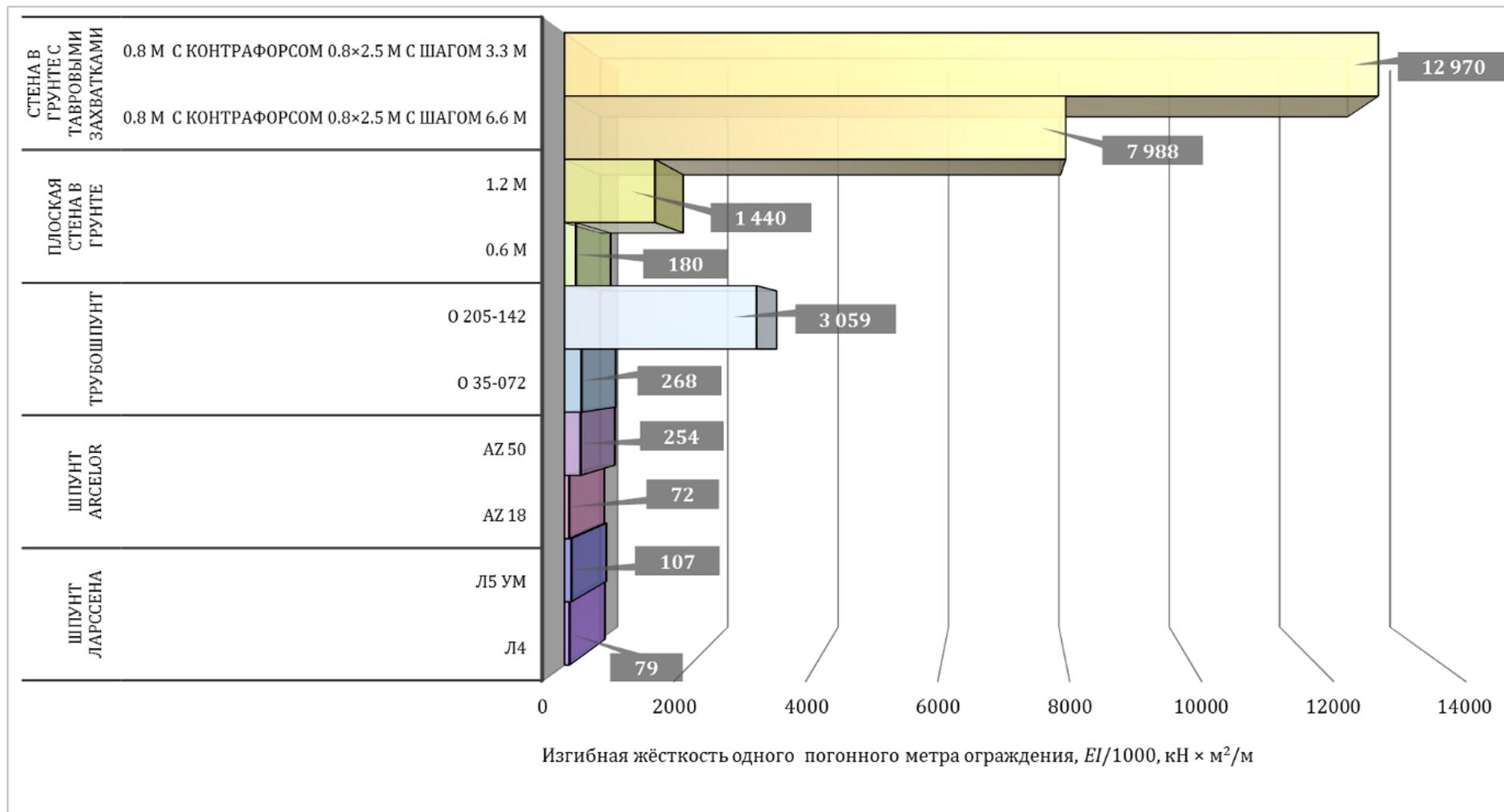


Рисунок 1.2 – Сравнение жесткостей различных типов ограждений котлованов

## 1.2 Опыт выполнения ограждений котлованов по технологии траншейной «стены в грунте» в Санкт-Петербурге

Технология «стена в грунте» заключается в устройстве стен подземных сооружений в узких (0,4...1,5 м) и глубоких (иногда более 50 м) траншеях под защитой глинистого раствора. При бетонировании глинистый раствор вытесняется за счёт меньшей, чем у бетона, плотности [82, 41, 42].

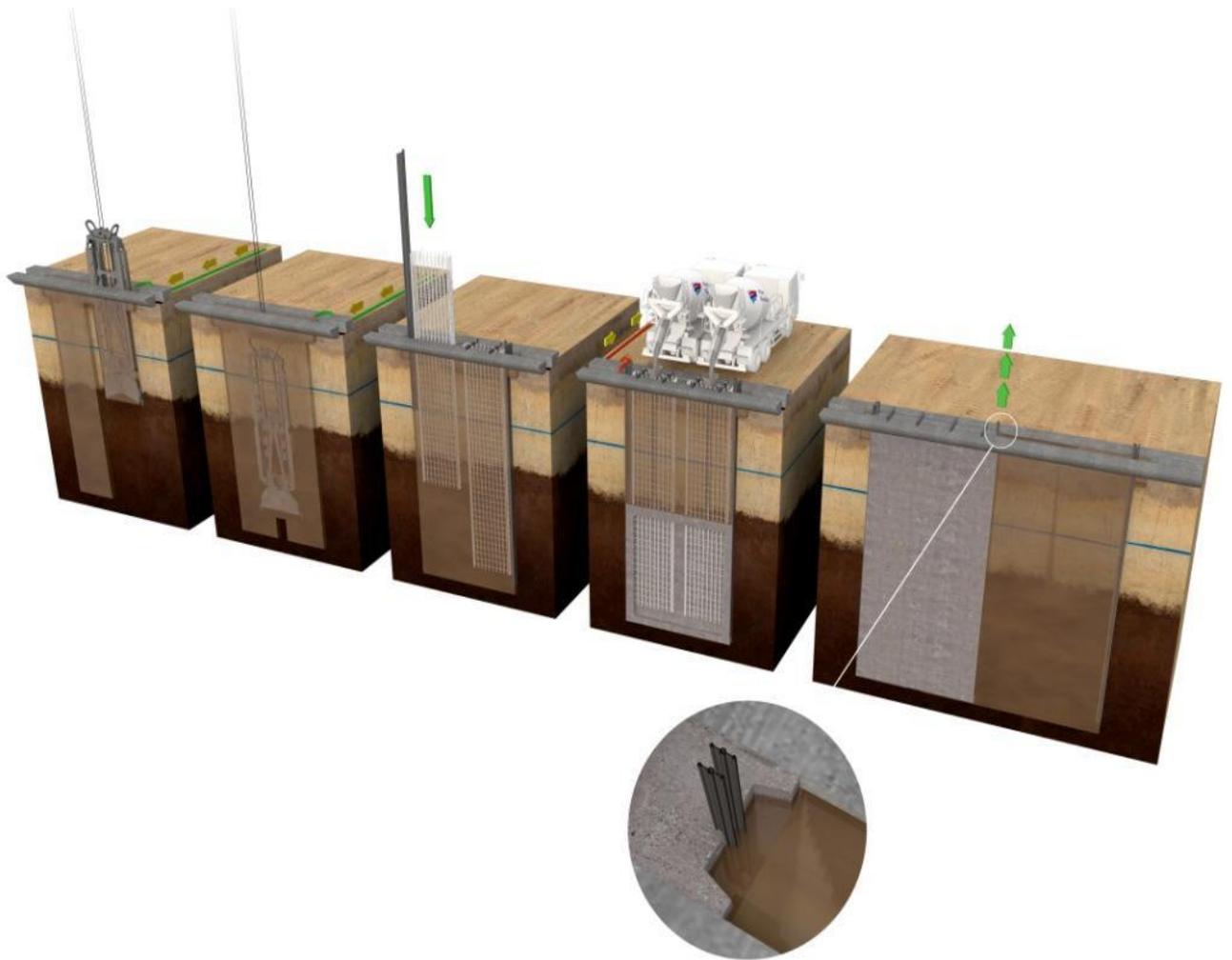


Рисунок 1.3 – Технология производства стены в грунте  
(материал с сайта производственной фирмы Franki Foundation – <http://www.ffgb.be>)

В Санкт-Петербурге технология «стена в грунте» для строительства подземных объёмов жилых и общественных зданий начала применяться с конца 1980-х годов [83, 137].

### **Гостиница «Петроградская»**

Первым зданием в Санкт-Петербурге (Ленинграде) при строительстве которого была использована траншейная стена в грунте, была гостиница «Петроградская».

Проектную документацию для отеля начали разрабатывать в 1985 г., заказчиком был ГОСКОМТУРИЗМ СССР. Предполагалось построить гостиницу общей площадью около 50 000 м<sup>2</sup>. Изначально она называлась «Петроградская», позднее была переименована в «Северную Корону».

В 1988 г. начались строительные работы, но спустя три года из-за сложной экономической ситуации строительство было свернуто. Основные работы по возведению гостиницы были завершены в октябре-ноябре 1991 г. Специальных мероприятий по консервации конструкций здания не проводилось. Строительные конструкции гостиницы были выполнены примерно на 95%. В настоящее время гостиница так и не введена в эксплуатацию.

Ввиду того, что гостиница возводилась в условиях плотной городской застройки и проектом предусматривалось устройство одного подземного этажа необходимо было обеспечить сохранность зданий соседней застройки. Для минимизации осадок соседних зданий было выполнено ограждение котлована по технологии траншейной стены в грунте толщиной 0,8 м и глубиной 15 м.

Данных об осадках соседней застройки, вызванных строительством гостиницы не найдено.

### **ТРК «Атмосфера», Комендантская площадь д. 1**

Одним из первых объектов, на котором выполнялось ограждение котлована по технологии «стена в грунте» после кризисных 90-х годов, был торговый центр «Атмосфера» на Комендантской площади. Производство работ началось в 2006 г. и велось компаниями «Геоизол» [119] и «Franki». Ближайшие здания окружающей застройки находились на расстоянии около 50 м, поэтому

основной задачей при проектировании ограждения было обеспечение устойчивости стенок траншеи. Из-за этого применялся тяжёлый бентонитовый раствор с добавлением цемента, плотность такого раствора доходила до  $15 \text{ кН/м}^3$ . Так как плотность бурового раствора близка к плотности литого бетона, возникает риск перемешивания бетона с раствором, поэтому было решено отказаться от бетонирования, а в бентонитово-цементный раствор погружать металлический шпунт полукруглого сечения.



Рисунок 1.4 – Устройство внутренней стены, усиленной горизонтальными рёбрами и вертикальными контрфорсами внутри шпунтового ограждения

Подземное пространство имеет круглую в плане форму диаметром около 78 м. Глубина котлована составляла почти 20 м, нижний конец ограждения был заглублён относительно дневной поверхности на 24 м. Так как стена в грунте была выполнена не из железобетона, а из шпунта в глино-цементном растворе, её жёсткости было недостаточно для восприятия давления грунта. Поэтому проектом предусматривалось устройство стенок, усиленных вертикальными контрфорсами и горизонтальными рёбрами жёсткости внутри шпунтового

ограждения (рисунки 1.4, 1.6). Из-за низкой относительно классической стены в грунте жёсткости применяемого ограждения, горизонтальные перемещения ограждения были довольно значительны – около 25 см (рисунок 1.5).

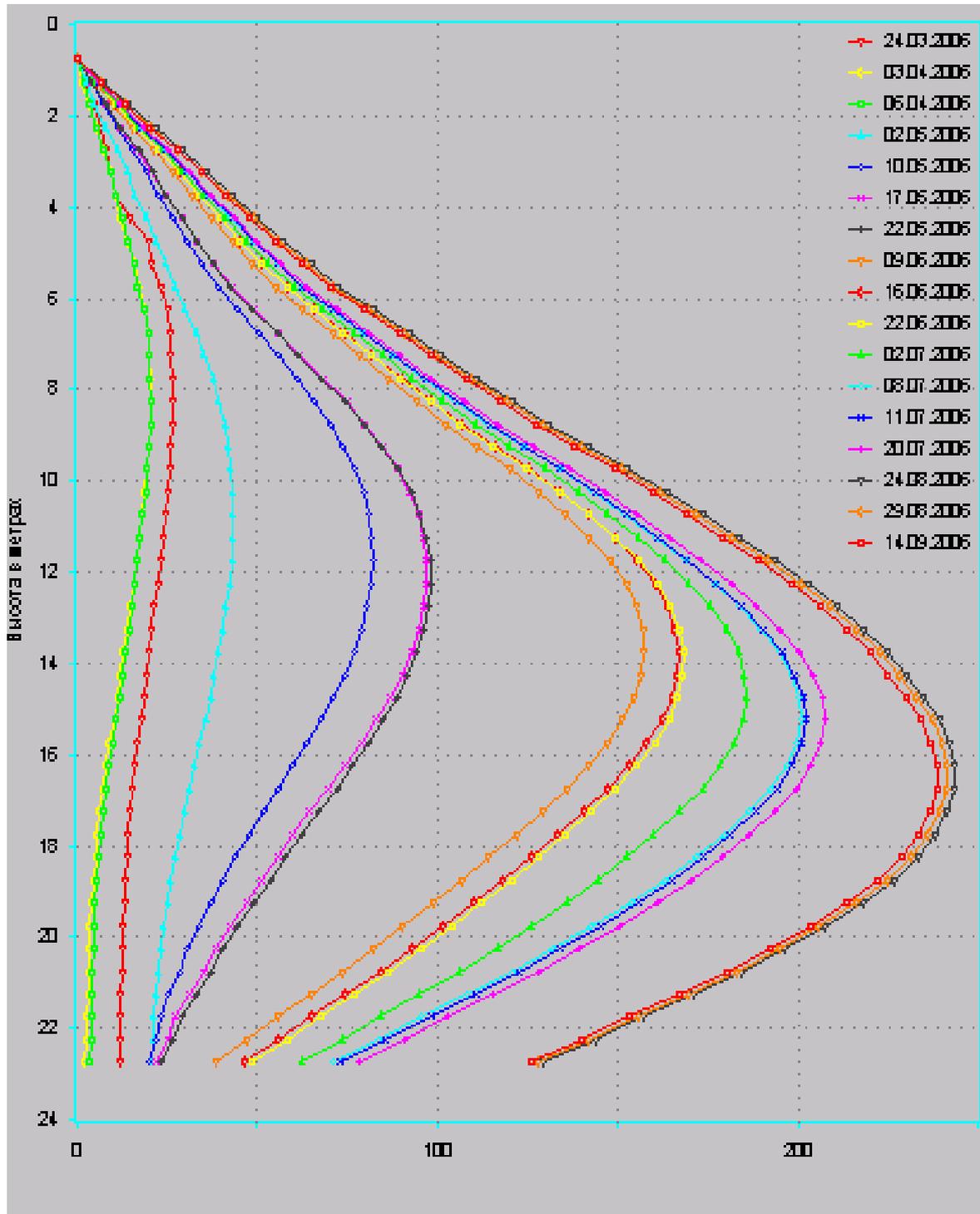


Рисунок 1.5 – Горизонтальные перемещения ограждения по результатам инклинометрических измерений [83]

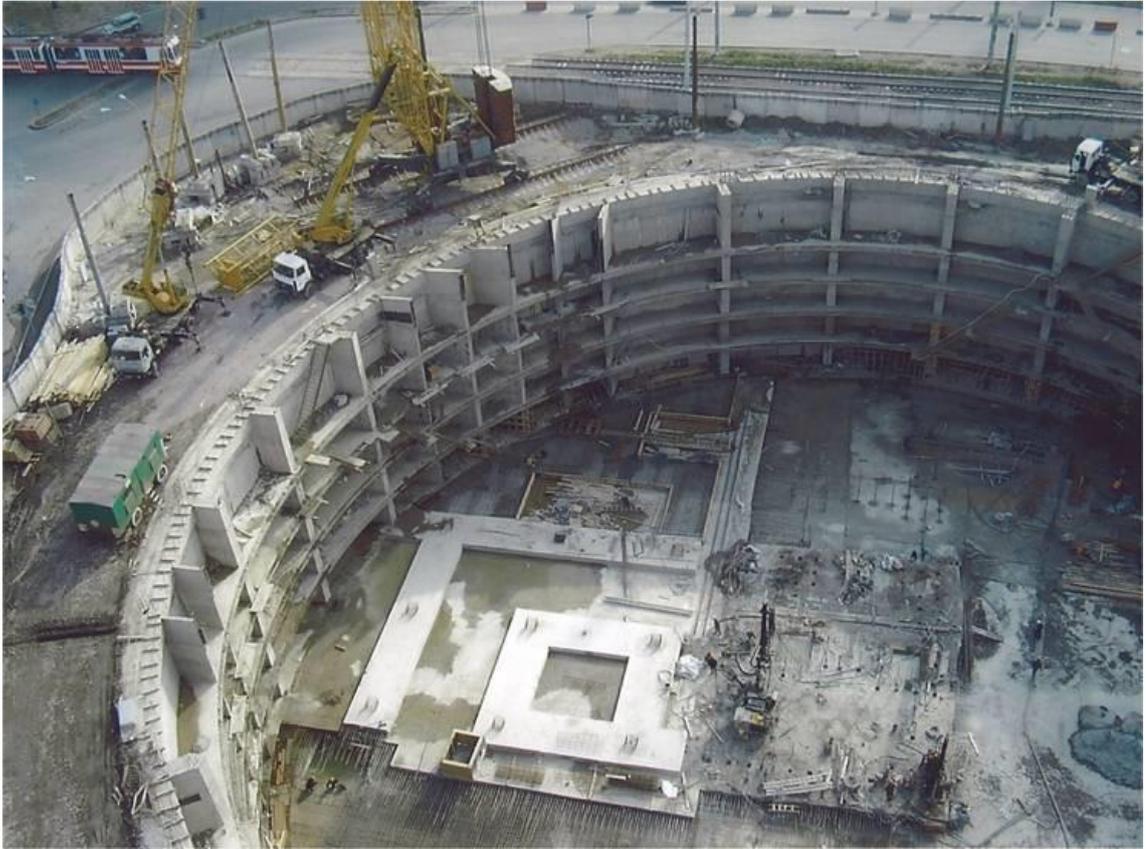


Рисунок 1.6 – Общий вид готового котлована  
(материал с сайта производственной фирмы Franki Foundation – <http://www.ffgb.be>)

### **Опускная камера для погружения проходческого щита Орловского тоннеля**

Несмотря на то, что проект тоннеля под рекой Невой, соединяющего Свердловскую и Смольную набережные, на данный момент заморожен, были проведены значительные подготовительные работы, в частности сооружение опускной камеры, в которую должен был быть опущен тоннелепроходческий щит. Проект был выполнен компанией «Геореконструкция», производство работ проведено компанией «Геоизол».

Вблизи площадки отсутствовали здания соседней застройки, что позволило отработать технологию «стена в грунте» в условиях Санкт-Петербурга. На этой площадке впервые в городе была реализована стена в грунте с контрфорсами [45, 135].



Рисунок 1.7 – Распорные крепления стенок приёмной шахты [45]



Рисунок 1.8 – Опускная камера [45]

### **Жилой дом с коммерческими помещениями по адресу Зоологический переулок, д. 2-4**

Компанией «Геоизол» в 2009-12 гг. был спроектирован и построен жилой дом с трёхуровневым подземным паркингом в сложных инженерно-геологических условиях центра города вблизи существующих зданий.

Проект предусматривал откопку котлована с использованием метода «top-down». В качестве ограждения котлована была принята стена в грунте, глубиной почти 30 м, толщиной 0,8 м с контрфорсами, сечением 0,8×2,5 м, расположенными с шагом 6,6 м. Расстояние до ближайших зданий окружающей застройки составляло около 2 м.

Данный объект был первым успешно реализованным проектом с применением ограждения котлована, выполняемого по технологии «стена в грунте», в условиях плотной городской застройки. Одной из главных причин успешной реализации проекта стала готовность заказчика выполнить опытную площадку [152] для изучения и адаптации технологии стены в грунте к инженерно-геологическим условиям объекта.

На протяжении всего периода строительства за зданиями окружающей застройки велся мониторинг, результаты которого были использованы для изучения, в том числе и осадок фундаментов, полученных в процессе производства ограждения котлована по технологии траншейной «стены в грунте».

Анализ развития осадок зданий соседних с котлованом данного объекта рассмотрен в главе 4.

### **Административное здание по адресу наб. реки Мойки, д. 74**

В 2009-12 гг. компанией «Геоизол» был спроектирован и реализован проект бизнес-центра, встраиваемого в дворовое пространство исторического квартала, выходящего на наб. реки Мойки. Внутри двора, под новым встраиваемым

корпусом выполнен трёхуровневый паркинг, расположенный практически вплотную к фундаментам существующих зданий (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Разработка котлована, наб. реки Мойки, д. 74

В качестве ограждения котлована была применена траншейная стена в грунте глубиной около 30 м, толщиной 1 м.

На протяжении всего периода строительства за зданиями окружающей застройки вёлся геотехнический мониторинг. Результаты, полученные в ходе мониторинга были в дальнейшем использованы нами для изучения осадок фундаментов, полученных во время устройства ограждения котлована по технологии траншейной «стены в грунте» (см. главу 4).

### **1.3 Понятие о технологической осадке. Величина технологической осадки зданий, вызванная устройством траншейной стены в грунте по данным мониторинга при строительстве в стеснённых условиях центральной части Санкт-Петербурга**

Технологической осадкой принято называть дополнительное вертикальное перемещение фундаментов существующих зданий, полученное в процессе производства каких-либо строительных работ вблизи этих зданий.

В ряде норм, в том числе территориальных нормах Санкт-Петербурга [17], имеется понятие «техногенный фактор» – это вид динамических, статических или иных воздействий, создаваемых строительной деятельностью людей и оказывающих влияние на соседнюю застройку и окружающую среду.

Оценим величину технологической осадки и её долю в общей дополнительной осадке соседней застройки, вызванной новым строительством (устройство ограждения, откопка котлована, строительство здания, эксплуатация здания) для объектов Зоологический пер., 2-4 и наб. реки Мойки, 74. Так как оба объекта строились в условиях плотной городской застройки, за ними, в соответствии с требованиями действующих нормативных документов велся геотехнический мониторинг, в состав которого входит регулярное геодезическое измерение плано-высотного положения зданий окружающей застройки.

Данные геодезического мониторинга были обработаны с целью получения характера зависимости вертикальных перемещений геодезических марок от расстояния между отдельно взятой марки и стеной в грунте. На графиках, приведённых на рисунках 1.10 и 1.11, синим цветом отмечены осадки геодезических марок, полученные за период устройства траншейной стены в грунте. Каждой синей точке соответствует красная, обозначающая полную осадку данной точки здания или сооружения.

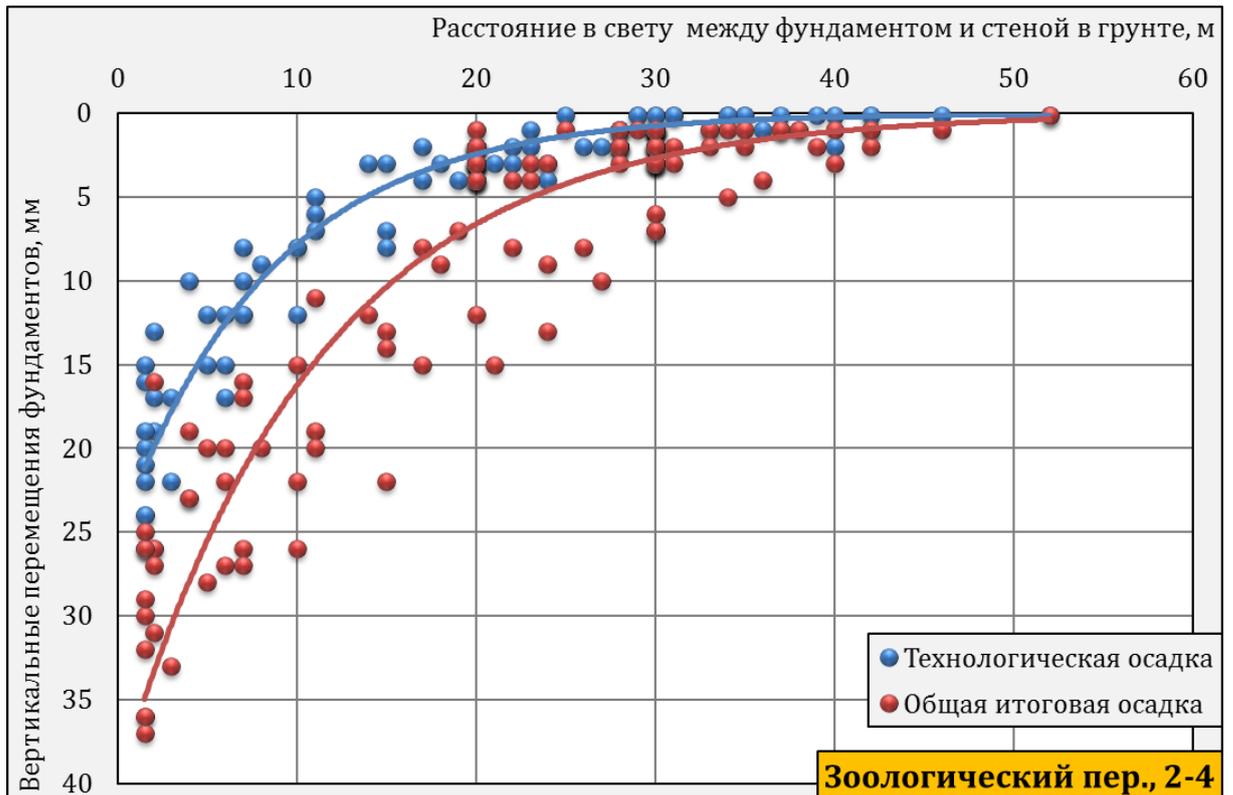


Рисунок 1.10 – Осадки полученные в процессе устройства стены в грунте и полные осадки окружающей застройки от влияния строительства комплекса

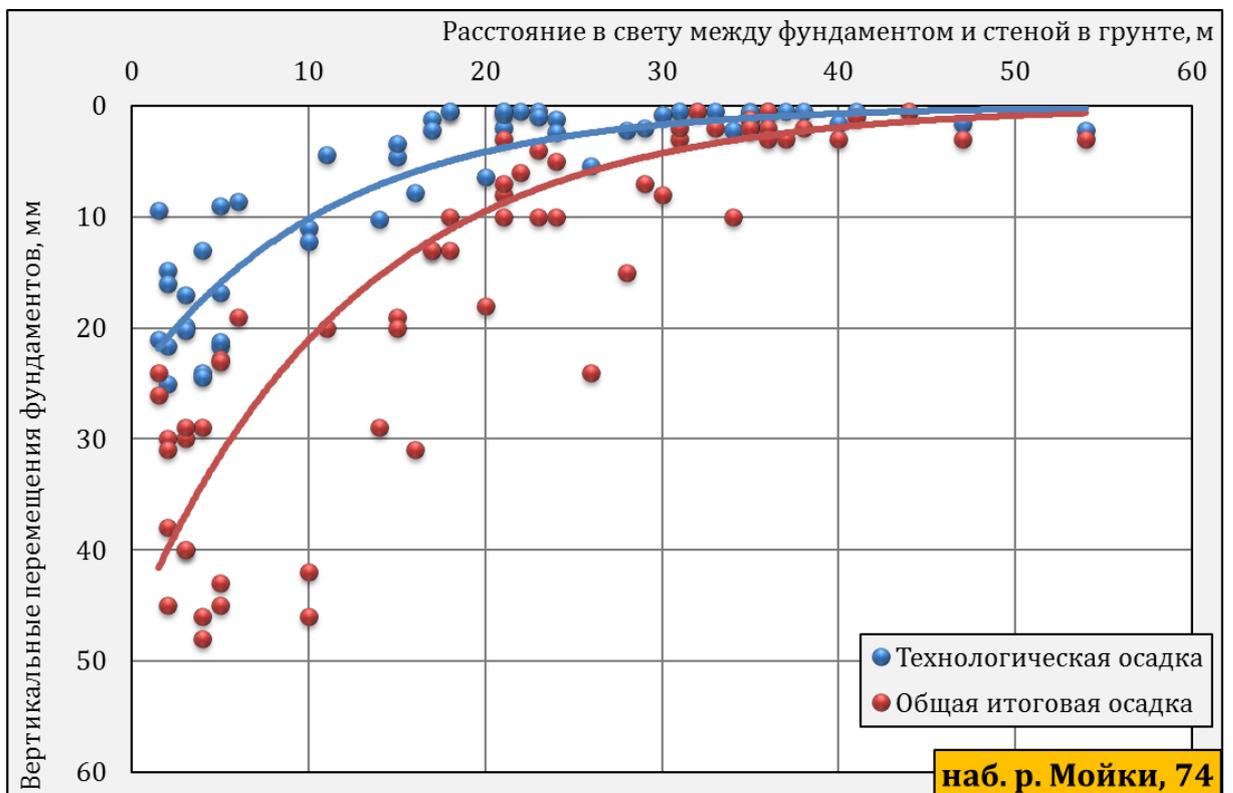


Рисунок 1.11 – Осадки полученные в процессе устройства стены в грунте и полные осадки окружающей застройки от влияния строительства бизнес-центра



Рисунок 1.12 – Доля технологической осадки в общей итоговой осадке в зависимости от расстояния до стены в грунте



Рисунок 1.13 – Доля технологической осадки в общей итоговой осадке в зависимости от расстояния до стены в грунте

Представленные на рисунках 1.10 и 1.11 графики чётко демонстрируют, что величина технологической осадки при устройстве стены в грунте составляет значительную долю от общей дополнительной осадки, вызванной новым строительством. Для точной оценки доли технологической осадки в общей представим графики на рисунках 1.10 и 1.11 как зависимость отношения технологической и общей осадок от расстояния между рассматриваемой маркой и стеной в грунте (рисунки 1.12, 1.13).

Полученные 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.

Из-за значительной жёсткости стены в грунте, величины осадок соседних зданий, вызванные откопкой котлована, невелики. Также незначительны и осадки, вызванные строительством нового здания, так как практически во всех случаях фундамент нового здания является свайным, с доведением низа свай до коренных вендских и кембрийских твёрдых глин. Таким образом можно сделать вывод о том, что основная доля дополнительных осадок существующих зданий окружающей застройки происходит в процессе устройства траншейной стены в грунте.

#### **1.4 Анализ существующих методов расчета и подходов к проектированию ограждений котлованов с применением «метода стена в грунте»**

Объекты с развитым подземным пространством, расположенные в стеснённых условиях плотной городской застройки, вошли в практику

строительства в России относительно недавно – 15...20 лет назад [66]. 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:

- общая устойчивость ограждения и определение внутренних усилий;
- устойчивость стенок траншеи, связанная с технологическими аспектами подбора бентонитового раствора и погружения бетонной смеси;
- численное моделирование работы ограждения.

Первой работой, положившей начало расчётам подпорных стенок, стал труд Ш. Кулона 1773 г. [21], в котором он предложил теорию давления грунта на вертикальные стенки, согласно которой в состоянии предельного равновесия призмы обрушения и выпирания ограничены прямолинейными поверхностями. Это решение является довольно простым, и поэтому нашло широкое применение в практике проектирования подпорных сооружений. Выполнено множество работ, уточняющих теорию Ш. Кулона (по данным Н.А. Цытовича на 1979 г. [150] более

300 различных работ, анализ которых можно найти в литературных источниках [49, 112, 125, 68, 69]), поэтому ниже рассмотрим только самые основные.

Понселе Ж.В. [40] вывел решение для определения давления на стенку с любым углом наклона. Энгессер Ф. [22] впервые предложил применять ломанные поверхности скольжения вместо прямолинейных. Соколовский В.В. [129] вывел общую теорию предельного равновесия грунтового массива в условиях плоской задачи, получив криволинейные поверхности скольжения. Новотворцев В.И. [101] впервые применил теорию пластичности к грунтовым основаниям. Шихиев Ф.М. [155, 154] предложил теорию определения давления на стенки, учитывающую их деформации.

Якоби Э.К. [157] предложил новый метод расчёта подпорных стен, предложив принимать эпюру предельного сопротивления грунта, а в качестве нагрузки на стенку рассматривать разность активного и пассивного давлений. Этот метод позволил вычислять внутренние усилия в конструкциях ограждения котлована. Развитием этого подхода стала методика Блюма-Ломейера [48], предназначенная для расчёта усилий в стенке. Авторы предлагают заменить эпюру результирующего давления на стенку на систему сосредоточенных сил, по которым проводятся графические построения.

Другим подходом к определению усилий и перемещений в ограждении котлована является использование моделей коэффициента постели (винклеровского основания) и упругого полупространства. Первые работы в этом направлении были выполнены Жемочкиным Б.Н. [57] для изучения работы свай на горизонтальную нагрузку и Кречмером В.В. [71] для шпунтовых стенок. Изучением работы конструкций, внедрённых в упругое полупространство, занимались Жемочкин Б.Н. [58, 59], Горбунов-Посадов М.И. [53, 54], Снитко А.Н. [122, 121], Симвулиди И.А. [117] Модель винклеровского основания в своих исследованиях использовали Пузыревский Н.П. [111], Снитко Н.К. [126, 123, 120, 124], Крылов А.Н. [72].

Среди работ отечественных авторов, изучающих устойчивость стенок траншеи, заполненной глинистым раствором, можно выделить исследования

Малояна Э.А., который занимался этим вопросом применительно к строительству московского метрополитена [79, 78]. Беленькая В.В. и Перлей Е.М. изучали устойчивость стенок траншей, под бентонитовым раствором, при нагрузках по поверхности грунта вблизи траншей и разработали ряд рекомендаций по назначению плотности глинистого раствора и параметров траншеи [130]. Исследование Стаина А.В. посвящено устойчивости стенок траншей сложной формы, а именно стен в грунте с контрфорсами [131]. Автор предлагает эмпирическую зависимость для определения коэффициента устойчивости стенок траншеи, полученную по результатам статистической обработки серии численных расчётов методом конечных элементов.

Ряд значимых работ [51, 50] 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.

Среди зарубежных авторов, рассматривающих вопрос устойчивости стенок траншеи под защитой глинистого раствора, отметим работы Morgenstern N.R. [33] и Bishop A.W. [19], которые рассматривали устойчивость стенок траншеи с учетом наличия у глинистого раствора некоторого минимального сопротивления сдвигу. Kowalewski Z. [27] предложил рассматривать арочный эффект, возникающий при откопке траншеи, по аналогии с подобным эффектом при проходке тоннелей. Совместно с Piaskowski A. было проведено исследование зависимости активного давления грунта на стенку траншеи в зависимости от отношения глубины траншеи к её длине [35]. В результате были получены номограммы для определения коэффициента активного давления. Huder J. в своей работе [25] предложил учитывать арочный эффект при разработке траншеи введением поправочного коэффициента  $A$  к величине активного давления в зависимости от угла внутреннего трения грунта и отношения глубины траншеи к длине захватки  $n$ .

С 70-х годов XX века начали применяться численные методы расчётов. Появившись в области гидротехники, постепенно, с развитием и распространением ЭВМ, численные расчёты стали применяться и в промышленно-гражданском строительстве. Первыми в промышленно-гражданском строительстве метод конечных элементов стали применять Фадеев А.Б. [142, 143, 141] в Ленинграде и Федоровский В.Г. [144, 145] в Москве. Сейчас из-за относительной простоты, а также из-за возможности численно смоделировать сложные геотехнические ситуации, которые невозможно рассчитать имеющимися аналитическими методиками, МКЭ получил широкое распространение в практике геотехнических расчётов. Моделированием работы ограждающих конструкций и расчётом влияния на существующие здания занимались Ильичёв В.А. [65, 64], Мангушев Р.А. [81, 80, 84, 86, 85], Никифорова Н.К. [97, 98, 99], Парамонов В.Н. [106, 105, 104], Мирсаяпов И.Т. [93, 92], Петрухин В.П. [109, 110], Сахаров И.И. [114, 116, 115], Улицкий В.М. [138, 139], Шашкин А.Г. [136], Шашкин К.Г. [151, 137], Татаринцов С.В. [133, 132] и другие. Стоит выделить работы Парамонова В.Н. и Шашкина К.Г. по разработке новых моделей грунта, учитывающих специфические свойства слабых пылевато-глинистых напластований Санкт-Петербурга.

Отдельно отметим работы, посвящённые развитию технологических осадок зданий. Никифорова Н.К. [98, 99] изучала влияние устройства отсечных экранов на существующую застройку по результатам мониторинга ряда объектов в Москве. Наблюдения показали, что доля технологических осадок от общих, полученных зданиями в результате нового строительства, составляет до 60%. Технологическим осадкам посвящена работа Конюхова Д.С. и Свиридова А.И. [70]. Авторы по данным мониторинга предлагают эмпирическую зависимость для расчёта технологических осадок зданий для условий Москвы. Знаменский В.В., Чунюк Д.Ю., Морозов Е.Б. изучали технологические осадки существующей застройки, рассматривая задачу о траншейной стене в грунте в плоской постановке [62, 61].

Анализ существующей нормативной документации, регламентирующей проектирование и расчёт фундаментов [1, 6, 10, 16, 17], а также устройство конструкций по технологии стены в грунте [4, 5, 14, 15] показывает, что хотя в отдельных документах и присутствует требование о необходимости учёта технологических осадок зданий, в процессе устройства траншейной стены в грунте, методики для выполнения таких расчётов отсутствуют.

### **Выводы по первой главе**

1) Вследствие значительной жёсткости стены в грунте, величины осадок соседних зданий, вызванные откопкой котлована, невелики. Также незначительны и осадки, вызванные строительством нового здания, так как практически во всех случаях фундаменты нового здания являются свайными, с доведением низа свай до прочных грунтов. Основная доля дополнительных осадок существующих зданий окружающей застройки происходит в процессе устройства траншейной стены в грунте.

2) 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 фактом обусловлено некоторое отставание аналитических методик расчёта подобных сооружений. Основными направлениями исследований технологии траншейной стены в грунте являются общая устойчивость ограждения и определение внутренних усилий; устойчивость стенок траншеи; численное моделирование работы ограждения. В ряде работ, посвящённых технологической осадке, предложены эмпирические зависимости для её оценки на основании мониторинга объектов, выполненных в отдельных регионах.

3) В сложившейся практике численных геотехнических расчётов не принято учитывать дополнительные осадки сооружений в результате строительных технологических воздействий, что во многом обусловлено отсутствием методик расчёта.

## **ГЛАВА 2. ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСАДКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ «СТЕНА В ГРУНТЕ»**

В настоящее время численное моделирование широко используется в области геотехнических расчётов, позволяя решать всё более широкий спектр задач. Популярность метода конечных элементов заключается в скорости решения сложных задач и относительной простоте выполнения по сравнению с аналитическими расчётами по методикам, изложенным в нормативных документах. Для некоторых задач, альтернативные численному моделированию аналитические методы расчёта непригодны (например, в силу неприменимости отдельных основополагающих допущений) или вообще отсутствуют.

В данной главе рассматривается методика численного моделирования осадок фундаментов существующих зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте.

Для моделирования поставленной задачи прежде всего необходимо определиться с исходными данными, которые можно условно разделить на три группы: инженерно-геологические условия, параметры фундаментов соседней застройки, параметры траншейной стены в грунте.

С помощью численного моделирования, на основе вариантных расчётов, необходимо определить какие из конструктивных и технологических параметров ограждения и окружающей застройки имеют наибольшее влияние на величину дополнительной осадки существующих зданий.

### **2.1 Основные положения численного моделирования работы ограждающих конструкций котлованов**

Основным способом моделирования ограждающих конструкций котлована в современных геотехнических расчётах методом конечных элементов является

моделирование ограждения котлована изгибно-плосконапряжёнными конечными элементами (элементами плоской оболочки), которые имеют в узле шесть стандартных степеней свободы (3 линейные и 3 вращательные) и способны воспринимать продольные и поперечные силы, изгибающие моменты в двух ортогональных направлениях, а также крутящие моменты (в Plaxis – это элементы «plate») [65, 81, 97, 106, 137]. Эти плоские элементы, с точки зрения геометрии конечноэлементной модели, имеют фактически нулевую толщину. Их эффективная толщина учитывается только через жесткостные параметры при построении общей матрицы жёсткости модели. Численно решить задачу о дополнительных осадках существующих зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте при подобном подходе к конечноэлементному моделированию невозможно.

Рассмотрим численное решение типовой задачи по расчёту ограждения глубокого котлована, разрабатываемого по технологии «top-down» с тремя уровнями откопки. Поскольку наибольший интерес представляет характер распределения дополнительных осадок здания, а не их конкретные величины, не будем подробно останавливаться на рассмотрении исходных данных. Пространственная расчётная схема представлена на рисунке 2.1. Стена в грунте моделируется пластинчатыми элементами.

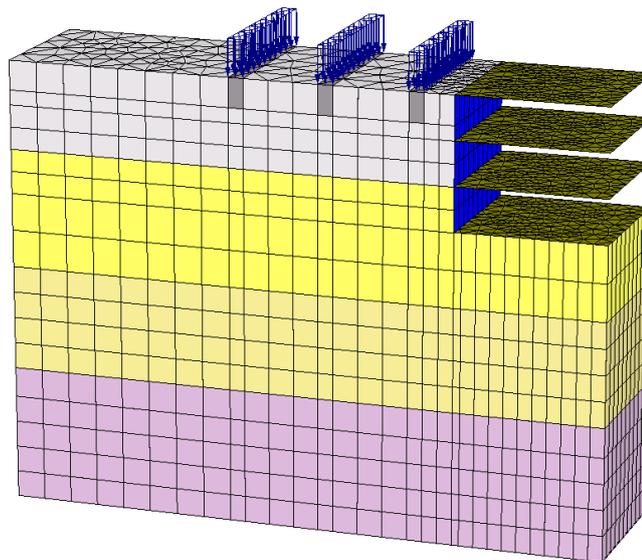


Рисунок 2.1 – Пространственная расчётная схема

Расчёт производится с учётом стадийности работ (рисунок 2.2). Для нашей задачи моделировались загруженные ленточные фундаменты существующей застройки, поочерёдно устраиваемые перекрытия и разработка грунта до отметки следующего перекрытия и т.д.

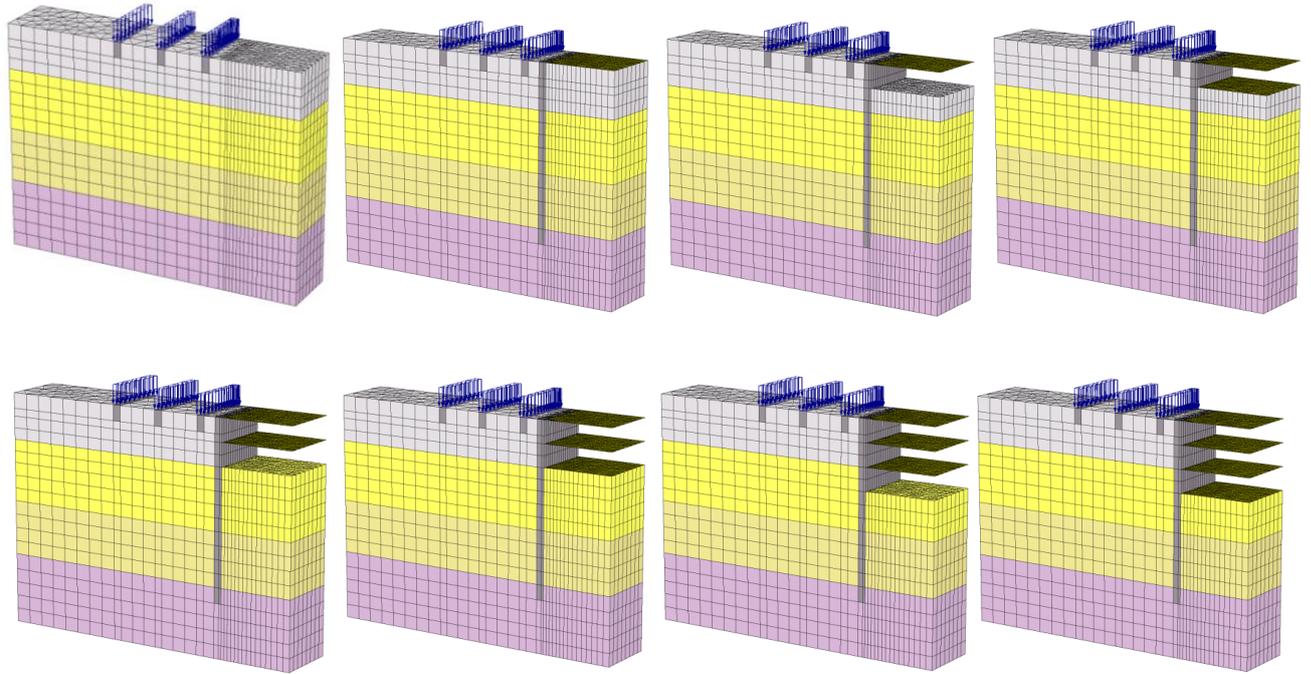


Рисунок 2.2 – Стадии расчёта в Plaxis 3DF

Ниже приведены результаты расчёта в Plaxis 3DF – картина характерных изополей осадок окружающей застройки и изгибающие моменты в ограждающей конструкции (рисунки 2.3 и 2.4).

Следует отметить, что максимальная осадка по результатам расчёта прогнозируется не у ближнего к котловану фундамента, а наоборот у дальних, что противоречит результатам мониторинга реальных объектов, реализованных с ограждением котлована, выполненного методом стены в грунте. Таким образом, можно сделать вывод о том, что неучёт технологической осадки приводит к качественно неверной картине напряжённо-деформированного состояния грунта, особенно при строительстве методом «top-down». Далее рассмотрим предлагаемую методику численного моделирования ограждения, выполняемого по технологии траншейной стены в грунте.

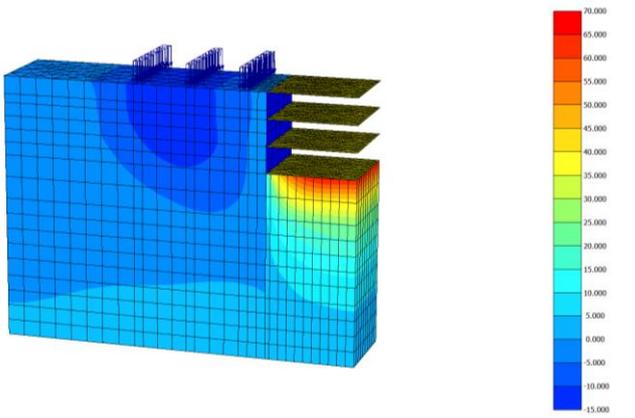


Рисунок 2.3 – Изополя дополнительной осадки окружающей застройки от устройства котлована

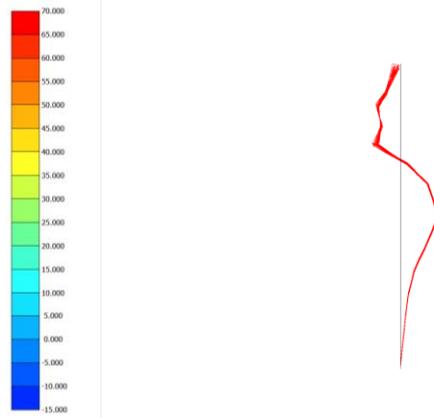


Рисунок 2.4 – Эпюра изгибающих моментов,  $M_{\text{Макс}} = 950 \text{ кН}\times\text{м}$

## 2.2 Методика численного моделирования для оценки технологической осадки при использовании технологии «стена в грунте»

Рассмотрим способ моделирования стены в грунте объёмными элементами. В этом случае программа будет воспринимать ограждающую конструкцию не как пластину с нулевой толщиной, а как реальный железобетонный элемент.

У этого метода тоже есть свои недостатки. Во-первых, он более трудоёмок, а во-вторых, при использовании объёмных элементов выходными данными будут являться не величины моментов и поперечных сил, а значения нормальных и касательных напряжений, что на первый взгляд может вызвать ряд трудностей при конструктивных расчётах. Однако, данный способ моделирования ограждения даёт возможность учесть технологические осадки.

Как показал опыт проведения многочисленных расчётов, решение задачи по оценке технологической осадки при устройстве траншейной стены в грунте возможно с применением численных методов в пространственной постановке с моделированием ограждения объёмными элементами в Plaxis 3DF [36-39]. В нашем случае, расчёт технологической осадки производился путём моделирования операций, выполняющихся при устройстве стены в грунте на площадке [87, 113]. К таким операциям были отнесены:

- разработка траншеи под глинистым раствором;
- заполнение траншеи литым бетоном с вытеснением глинистого раствора;
- готовый участок стены в грунте.

Моделирование глинистого раствора и литого бетона производилось путём назначения соответствующего давления на стенки захватки траншеи, возрастающего с глубиной по гидростатическому закону. При этом моделировались различные варианты последовательности устройства захваток стены в грунте.

При моделировании стены в грунте объёмными элементами выходными параметрами расчёта являются напряжения. При этом от вычисленных напряжений можно легко 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 2.5, а изгибающие моменты в сечении с известными напряжениями будут определяться по ( 2.1 ).

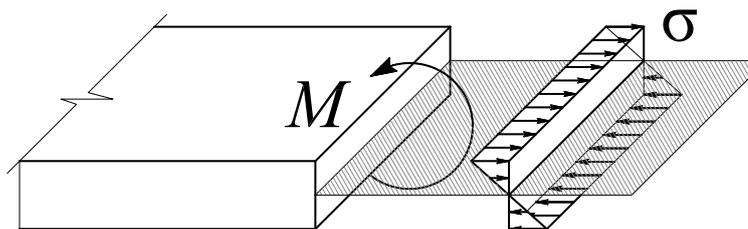


Рисунок 2.5 – Напряжения в изгибаемом элементе

$$M = \sigma \times W \quad (2.1)$$

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 ( 2.1 ) приобретает вид:

$$M = \sigma \times b^2 / 6 \quad ( 2.2 )$$

Для случаев, когда стена в грунте работает не только на изгиб, но и на сжатие (если стена является несущим элементом для надземных конструкций), следует отделить напряжения, вызываемые изгибом от напряжений, вызываемых продольным усилием по схеме, приведённой на рисунке 2.6 и выражению ( 2.3 ).

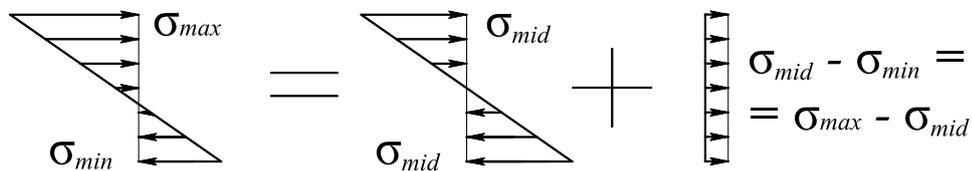


Рисунок 2.6 – Схема к определению напряжений для вычисления изгибающего момента в сечении внецентренно сжатого элемента

$$\sigma_{mid} = 0,5(\sigma_{max} + \sigma_{min}) \quad ( 2.3 )$$

Рассмотрим численное решение задачи из предыдущего раздела с использованием предлагаемой методики.

К расчётным стадиям, приведённым на рисунке 2.2, добавляются стадии моделирования технологических операций по устройству стены в грунте (рисунок 2.7): участок траншеи с приложением на её стенки давления от глинистого раствора, участок траншеи с приложением на её стенки давления от литой бетонной смеси и моделирование затвердевшего бетона. Видно, что при устройстве траншеи под защитой глинистого раствора, стенки траншеи сжимаются, а при заливке бетонной смеси раздвигаются в стороны, что объясняется увеличением давления на внутренние поверхности траншеи почти в два раза.

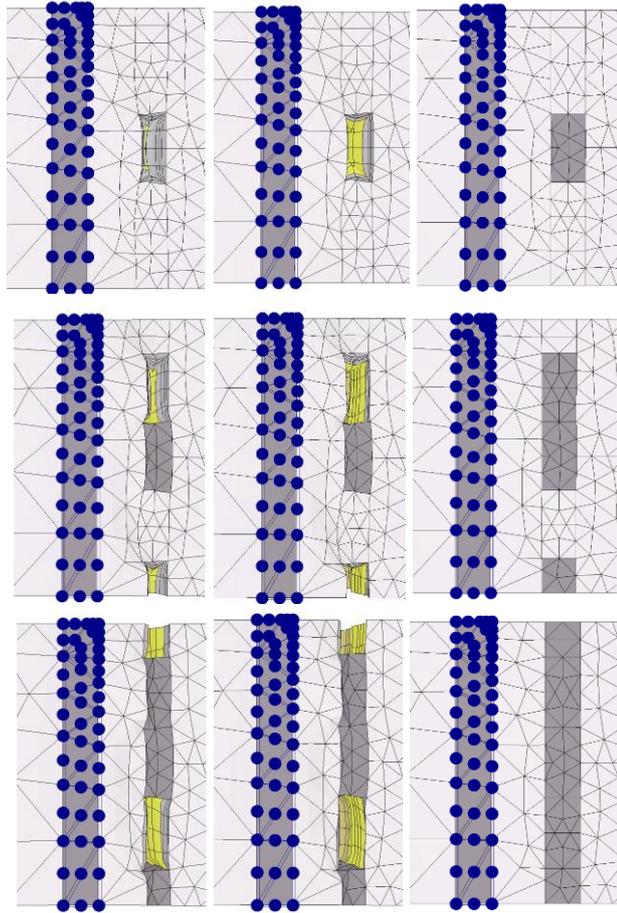


Рисунок 2.7 – Моделирование устройства стены в грунте

На рисунке 2.8 представлено уширение стены, вызванное давлением литого бетона на внутренние грани траншеи.

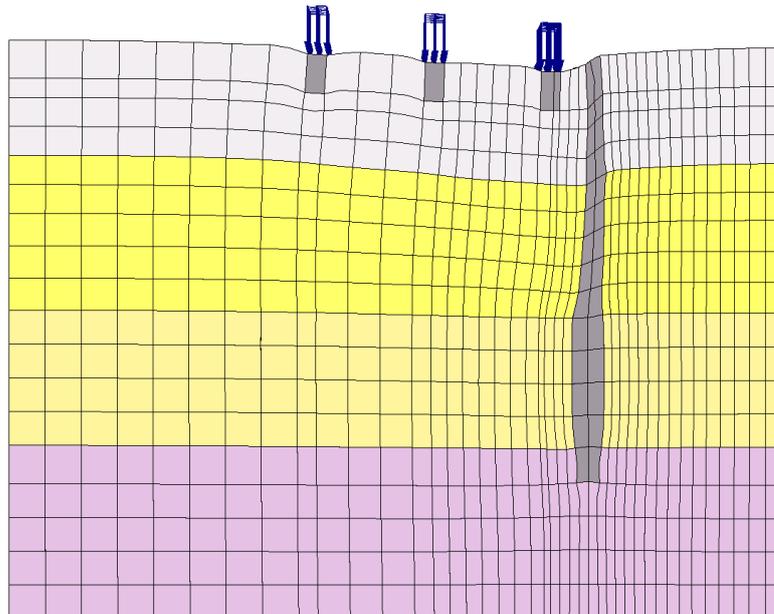


Рисунок 2.8 – Уширение стены в грунте под давлением столба литой бетонной смеси (масштаб увеличен в 100 раз)

Ниже приведены результаты расчёта в Plaxis 3DF – изополя осадок окружающей застройки (рисунок 2.9) и напряжений (рисунок 2.10) в ограждающей конструкции при расчёте по предлагаемой методике.

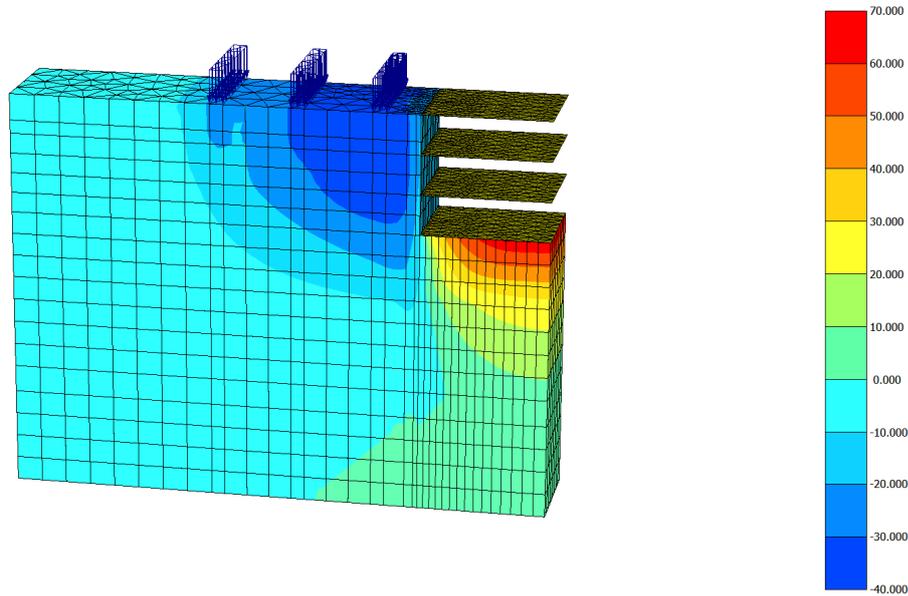


Рисунок 2.9 – Изополя дополнительной осадки окружающей застройки от устройства котлована

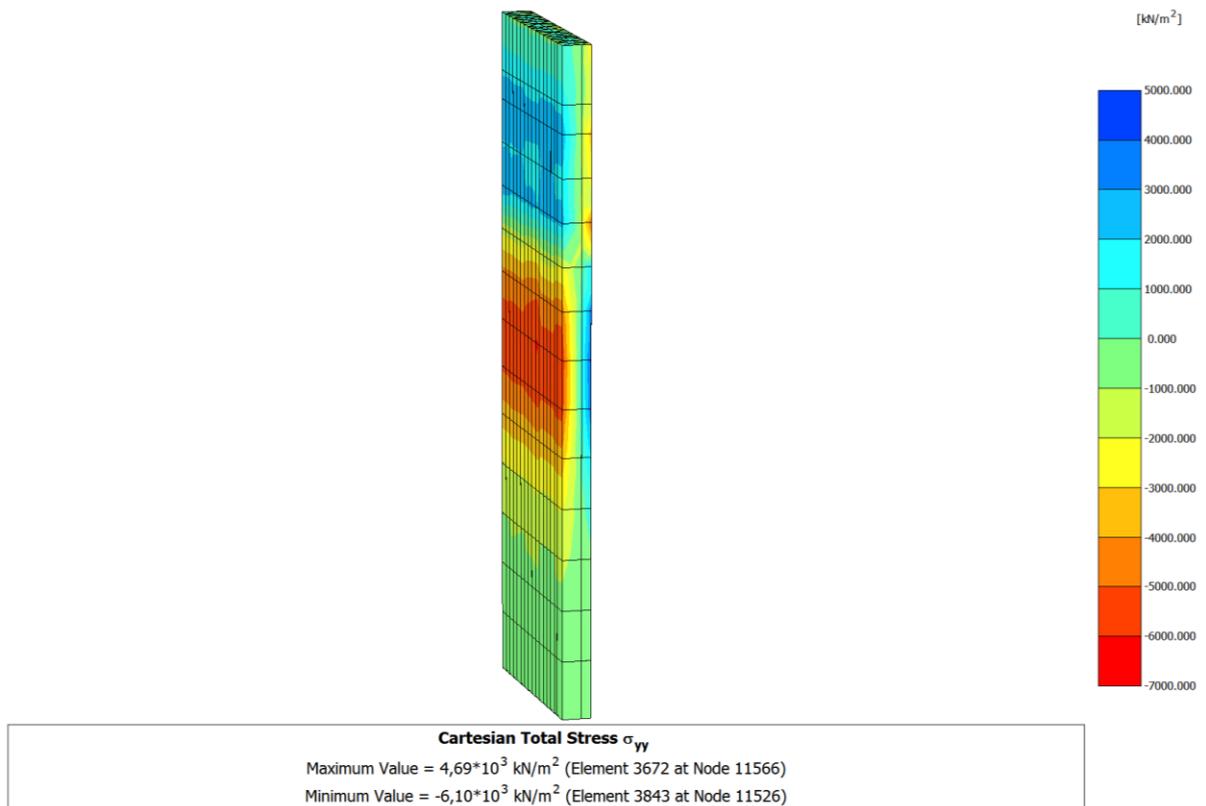


Рисунок 2.10 – Изополя нормальных напряжений в ограждающей конструкции

Сравним характерное распределение полученных дополнительных осадок фундаментов, вычисленных по предлагаемой методике (рисунок 2.9), и определённых классическим способом моделирования ограждения (рисунок 2.3). Из сопоставления результатов следует, что при расчёте по предлагаемой методике максимальные дополнительные осадки происходят у ближнего фундамента, а не у дальних, как происходит при классическом расчёте. Это объясняется тем, что у ближнего фундамента значительную долю общей дополнительной осадки составляет осадка, вызванная устройством стены в грунте, то есть так называемая «технологическая» осадка, что, в свою очередь, хорошо согласуется с данными мониторинга на возведённых объектах с ограждением котлованов, выполненных по технологии стены в грунте.

Оценим величину изгибающего момента в ограждении при расчётах по классической и предложенной методике. При расчёте по предложенной методике максимальные величины сжимающих и растягивающих напряжений в ограждении котлована составляют соответственно 4690 и 6100 кН / м<sup>2</sup>

Таким образом, в нашем случае изгибающий момент составит:

$$M = [ ( [ 6100 + 4690 ] / 2 ) \times 1^2 ] / 6 = 900 \text{ кН} \times \text{м} / \text{м} \quad (2.4)$$

Значение изгибающего момента, полученное по расчёту по разработанной методике, хорошо коррелируется со значением, получаемым по классической методике расчёта (рисунок 2.4) равным 950 кН × м / м.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет более достоверно определить осадки ближайших зданий при устройстве траншейной стены в грунте, за счёт учёта технологических осадок, в то время как величины внутренних усилий в конструкциях ограждения котлована близки к вычисленным по «классической» методике численного моделирования.

### **2.3 Изучение влияния различных факторов на дополнительные осадки зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте**

Для изучения влияния различных факторов на дополнительную осадку фундаментов существующей застройки от устройства вблизи неё траншейной стены в грунте также воспользуемся возможностями численного моделирования для выполнения вариантных расчётов.

Для проведения численных расчётов представляется целесообразным задаться не произвольными исходными инженерно-геологическими данными и технологическими и геометрическими параметрами стены в грунте, а параметрами, максимально соответствующими реальным условиям и конструкциям.

#### **Исходные данные для изучения влияния различных факторов на величину технологической осадки соседних зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте**

##### **а) Анализ геологического строения территории Санкт-Петербурга**

Особенности геологического строения и физико-механических свойств грунтов Санкт-Петербурга довольно подробно изучены в работах: Ауслендер В.Г. [43], Дашко Р.Э. [55], Заварзина Л.Г. [60, 94], Каган А.А. [128], Лавровой М.А. [73], Маркова К.К. [90, 89, 88], Соколова Н.Н. [127, 128], Фурсы В.М. [103, 148], Яковлева С.А. [158, 159], Яцкевич З.В. [160] и других исследователей.

Характерной особенностью геологического строения Санкт-Петербурга, как и ряда других прибрежных городов северной Европы, является наличие значительной толщи слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов, возникновение которых вызвано несколькими стадиями оледенения (рисунок 2.11).

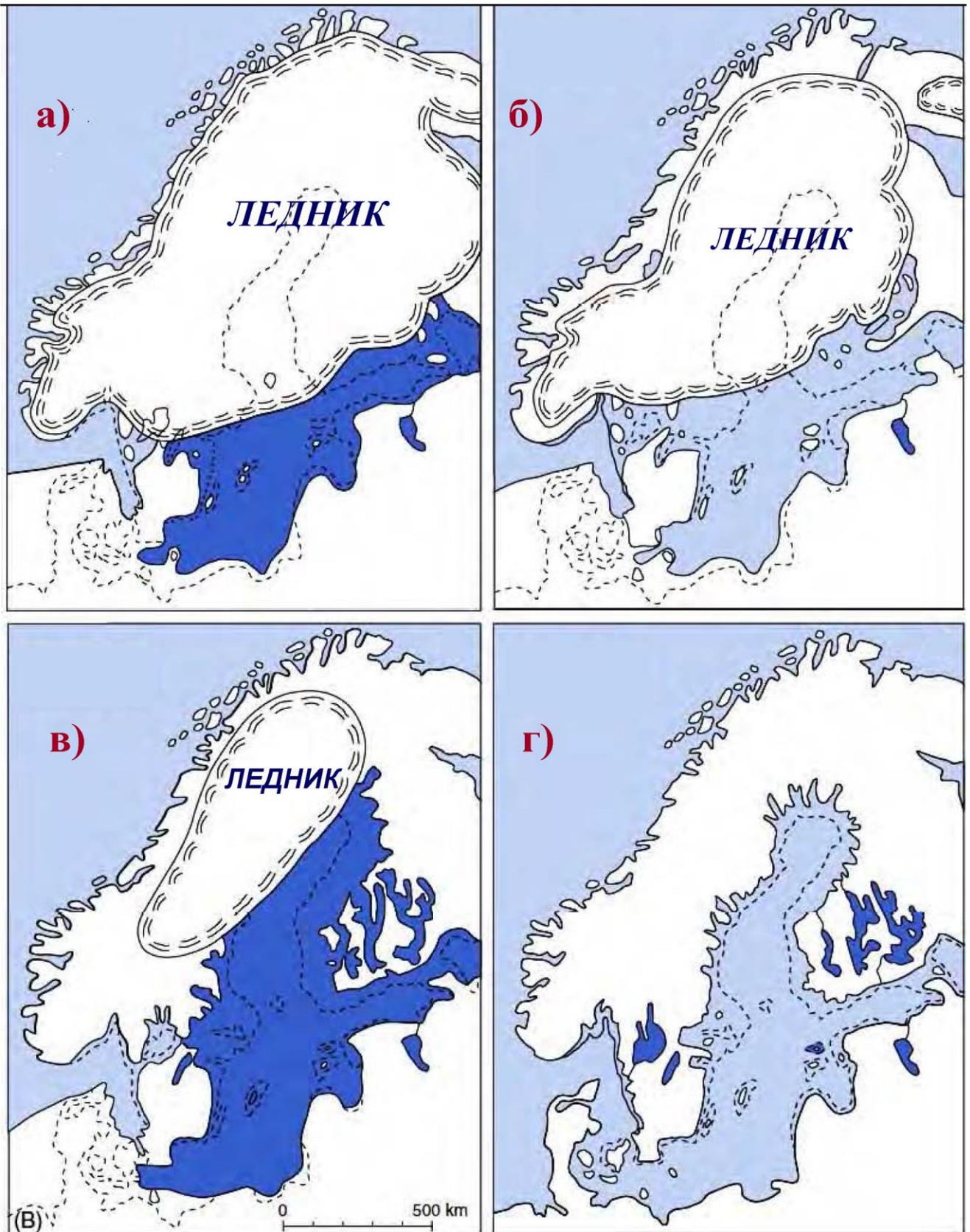


Рисунок 2.11 – Этапы оледенения северной Европы:  
 а) Балтийское ледниковое озеро – 12,5...11 тыс. лет назад;  
 б) Иольдиевое море – 11...10,8 тыс. лет назад;  
 в) Анциловое озеро – 10,5...8,5 тыс. лет назад;  
 г) Литориновое море 8,5...4,5 тыс. лет назад.

На кристаллическом основании залегают осадки покрывавших его древних морей – так называемый осадочный чехол (рисунок 2.12), который состоит из грунтов, сильно отличающихся друг от друга по возрасту, генезису, составу, состоянию и свойствам. В составе осадочного чехла можно выделять две основных группы грунтов – четвертичные и дочетвертичные отложения.

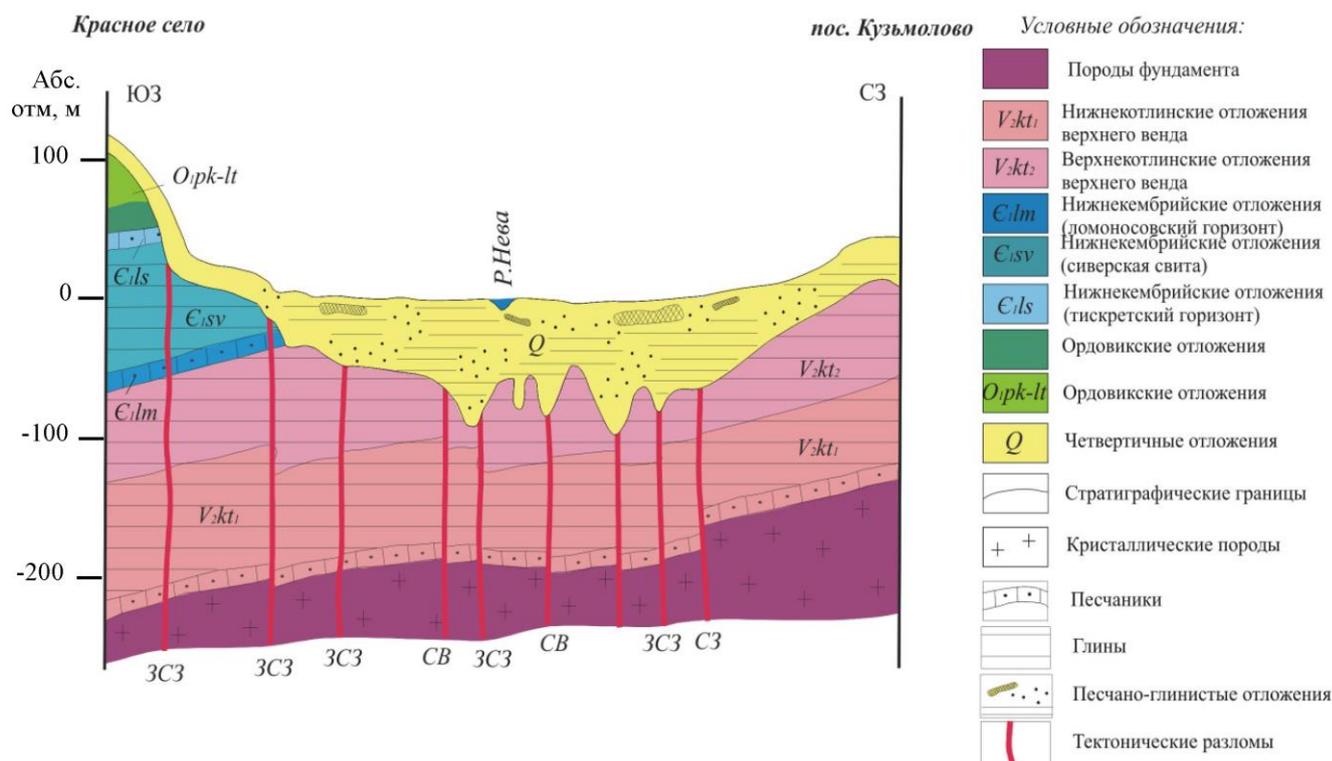


Рисунок 2.12 – Инженерно-геологическое строение территории Санкт-Петербурга [55]

Коренные породы, имеют возраст 550...650 млн. лет, и испытали несколько стадий уплотнения при прохождении ледников, что определяет их физико-механические свойства – низкие влажность и коэффициент пористости, а также сравнительно высокий модуль деформации. В южной части города коренные породы представлены нижнекембрийскими «синими» глинами ( $Є1sv$ ), под которыми залегают ломоносовские песчаники с прослоями глин ( $V2-Є1lm$ ). В центральной и северной частях города коренные породы представлены верхнекотлинскими глинами верхнего венда с прослоями песчаников ( $V2kt2$ ). Мощность этих отложений колеблется от 15 до 120 м, что обуславливается древними эрозионными врезами от древней речной системы Невы (палеодолины или погребённые долины). Эти врезы после прохождения нескольких стадий

оледенения заполнились слабыми водонасыщенными пылевато-глинистыми отложениями.

Четвертичные отложения представлены разнородными песчаными и пылевато-глинистыми грунтами и имеют возраст около 390 тыс. лет. Появление этих отложений связано с тремя ледниковыми, двумя межледниковыми, позднеледниковым и послеледниковым периодами. Это наиболее молодые и наиболее слабые грунты в геологическом разрезе Санкт-Петербурга.

Ряд учёных-геологов занимались разработкой специальных карт по районированию территории Санкт-Петербурга в зависимости от типовых инженерно-геологических условий.

В 1978 г. в связи с разработкой генерального плана использования подземного пространства территории Ленинграда трестом ГРИИ был выпущен «Отчёт по составлению обобщённой карты инженерно-геологического районирования территории Ленинграда и Лесопарковой зоны (для подземного строительства)» [103]. Работа была выполнена авторским коллективом под руководством В.М. Фурсы.

Основными факторами, положенными в основу схемы районирования, являлись отметка кровли лужской морены и её мощность (в то время именно морена рассматривалась в качестве основного несущего слоя для промышленной и гражданской застройки). По глубине залегания морены на территории города выделено четыре основных района: кровля морены залегает с поверхности, на глубине 0...6 м, 6...20 м, более 20 м. В составе основных районов выделены подрайоны по стратиграфическому напластованию и гидрогеологическим условиям.

Карта инженерно-геологического районирования территории Ленинграда приведена на рисунке 2.13. Стоит отметить высокий уровень детализации и точности при разбиении территории города на районы. Фрагмент центральной части Санкт-Петербурга представлен на рисунке 2.14.

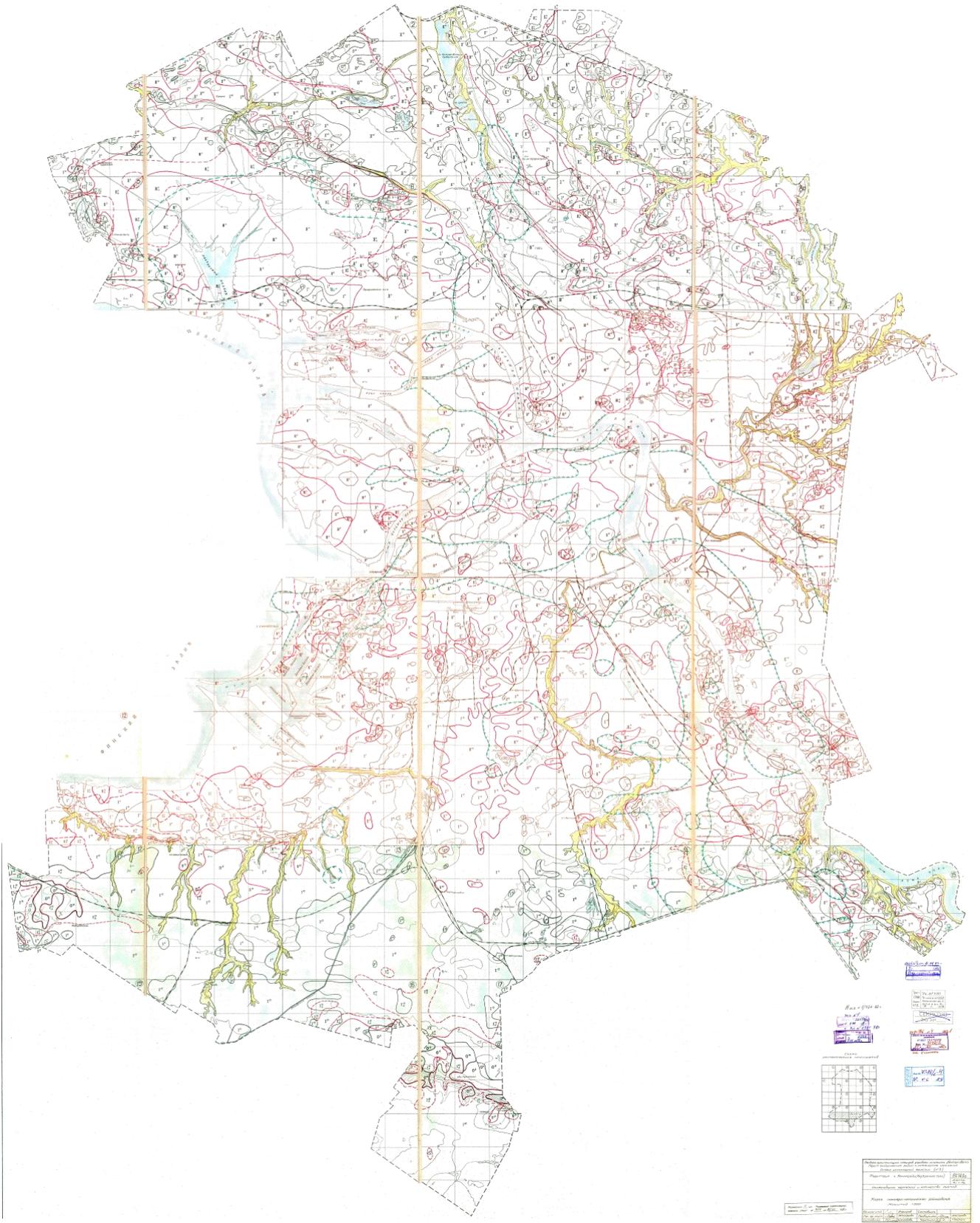


Рисунок 2.13 – Инженерно-геологическое районирование территории Ленинграда по данным отчёта треста ГРИИ (1978 г) [103]

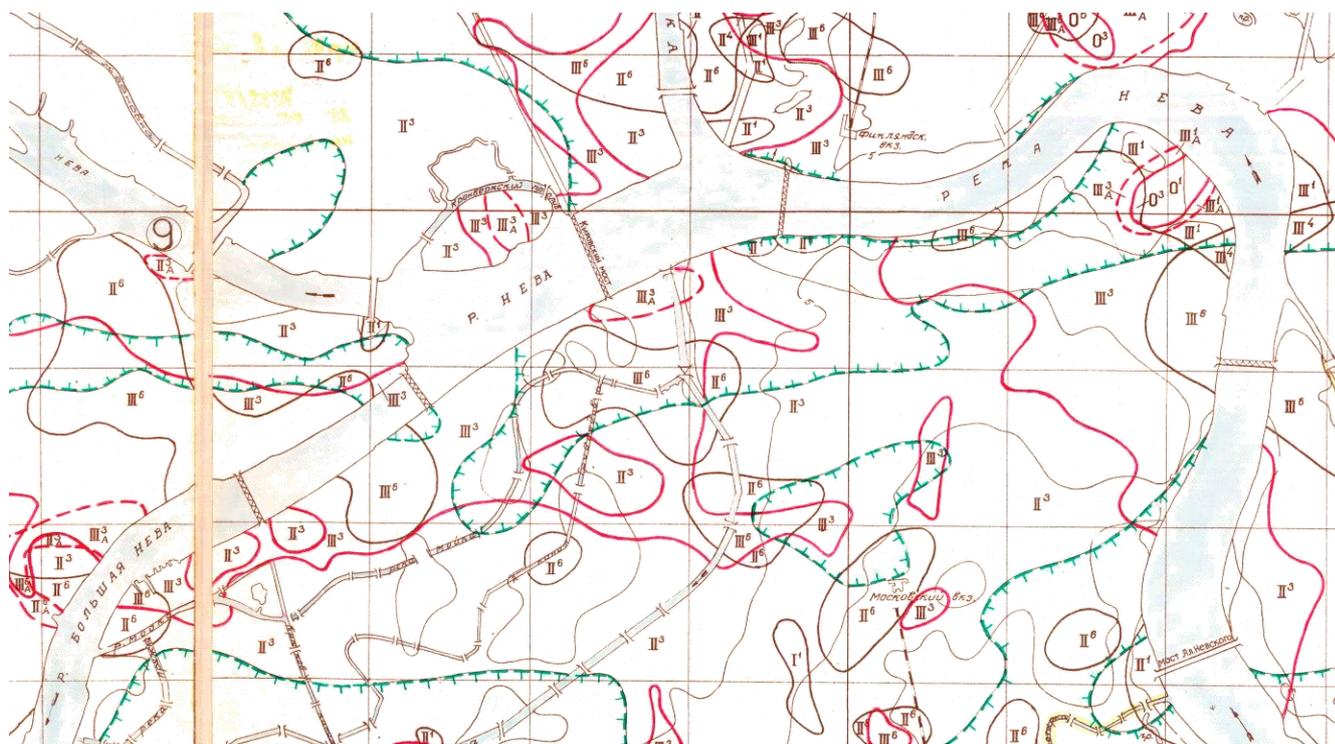


Рисунок 2.14 – Фрагмент карты инженерно-геологического районирования территории Ленинграда по данным отчёта треста ГРИИ (1978 г) [103]

Помимо классификации стратиграфии, были также изучены физико-механические характеристики основных отложений, слагающих территорию города. На основе статической обработки данных инженерно-геологических изысканий разных лет были получены характеристики грунтов, представленные в таблице 2.1.

Другой важной работой по инженерно-геологическому районированию территории Ленинграда является картирование, предложенное Л.Г. Заварзиным [60, 94]. По сравнению с районированием треста ГРИИ, картирование Л.Г. Заварзина выполнено более укрупнённо (рисунок 2.15). Выделено 13 инженерно-геологических районов.

Л.Г. Заварзиным рассматривалась толща четвертичных отложений до кровли лужской морены (рисунок 2.16), что недостаточно для моделирования поставленной задачи по изучению влияния различных факторов на дополнительную осадку зданий при устройстве траншейной стены в грунте вблизи них.

Таблица 2.1 – Осреднённые характеристики грунтов Ленинграда по данным [103]

Индекс	$V_{kt}$	$g_{III}$	$lg_{III}$	$ml_{IV}$
Характерный тип грунта	твёрдые глины	валунные суглинки тугопластичные	ленточные мягкопластичные суглинки	от песков до суглинков, иногда с включ. органики
Естественная влажность, %	14	20	35	40
Объёмная масса, г/см <sup>3</sup>	2.2	2.1	1.9	1.8
К-т пористости	0.5	0.53	0.85	1.08
Число пластичности	15	9	11	9
Показатель консистенции, Св	-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

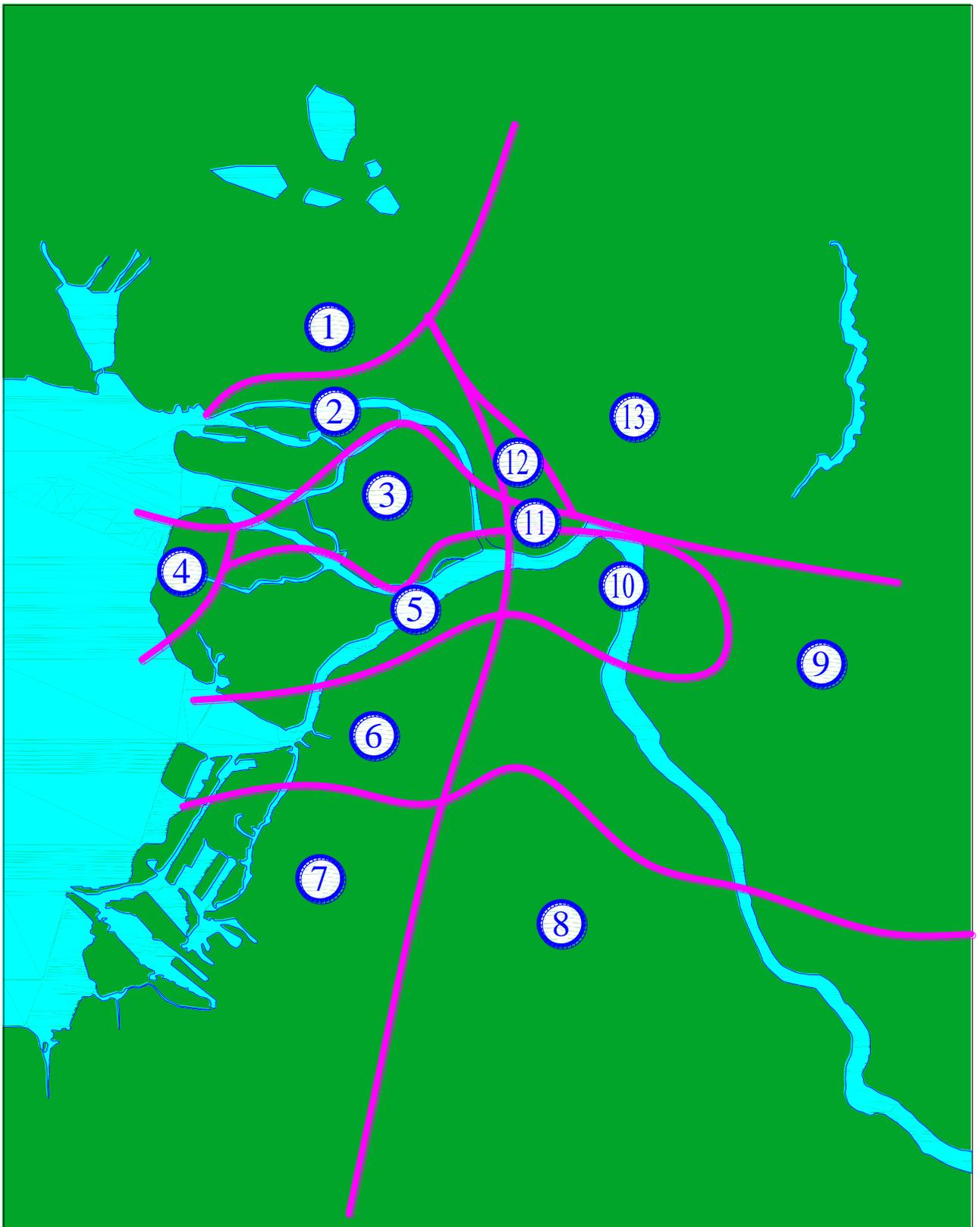


Рисунок 2.15 – Инженерно-геологическое районирование территории Санкт-Петербурга по Л.Г Заварзину.

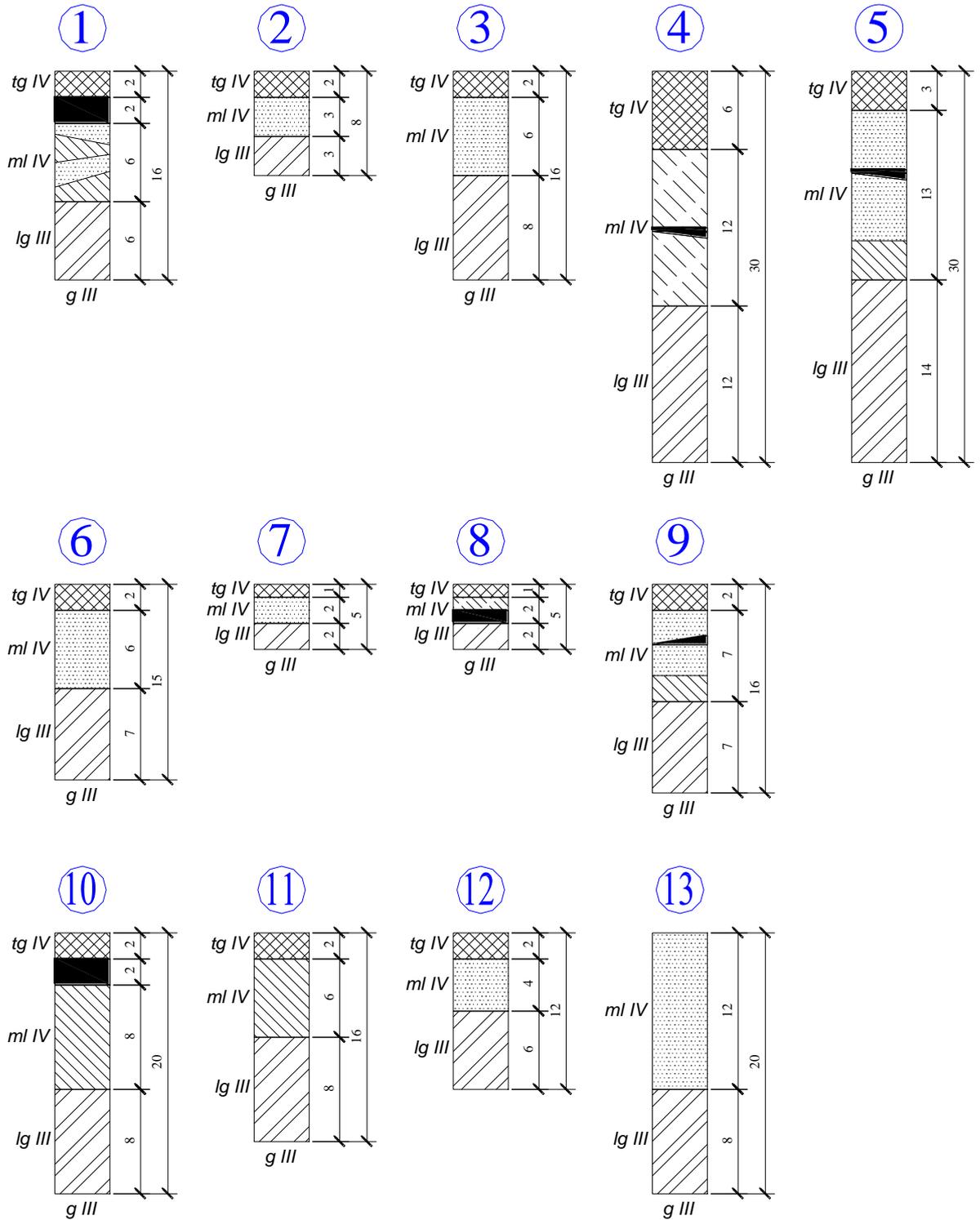


Рисунок 2.16 – Инженерно-геологическое строение четвертичных отложений различных районов по Л.Г Заварзину.

Недостающие данные по мощности лужской морены и соответственно по глубине залегания кровли коренных пород были приняты нами на основании

данных геологического атласа Санкт-Петербурга (рисунок 2.17, [52]) и работ ряда учёных-геологов [55, 148].

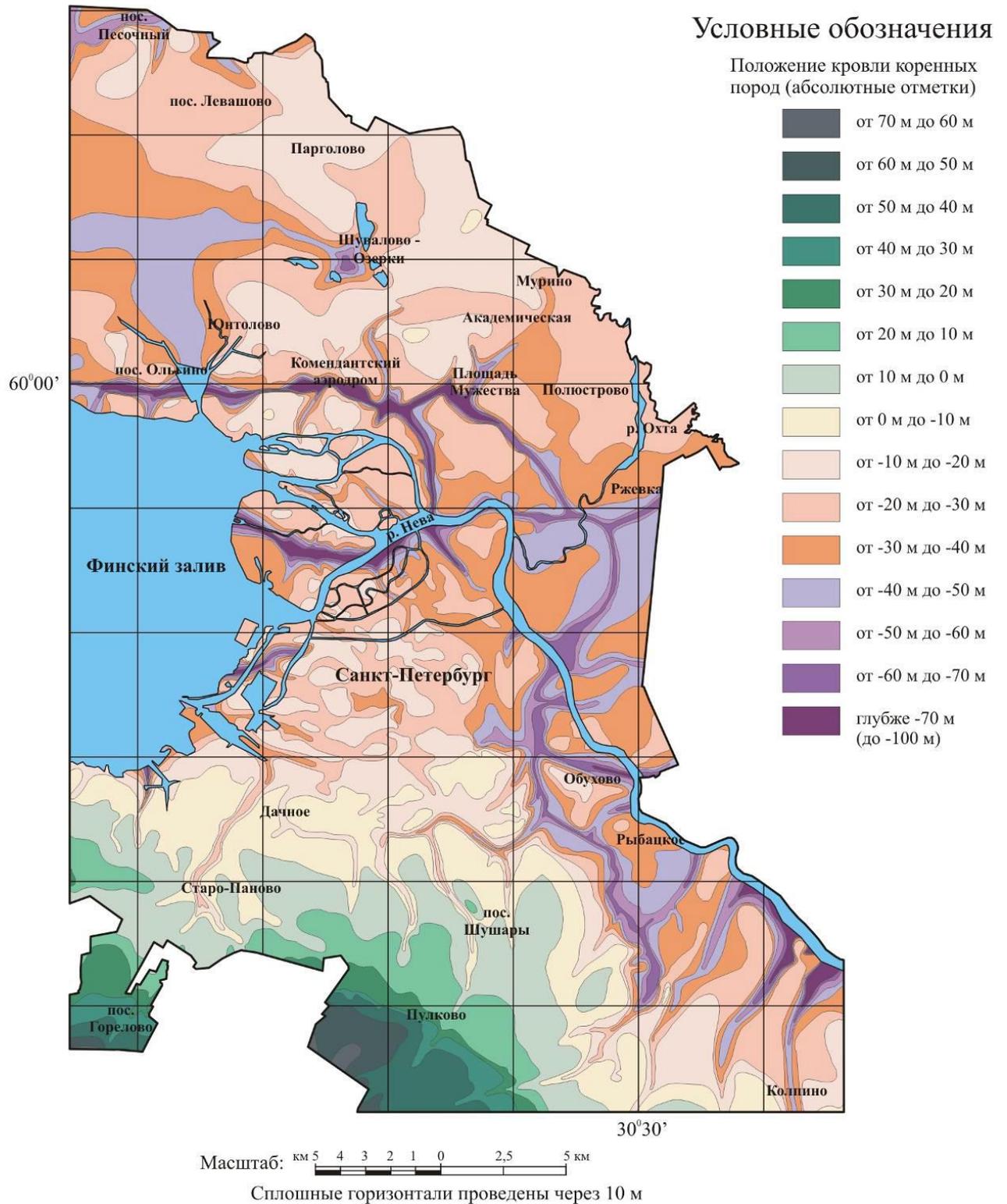


Рисунок 2.17 – Глубина залегания кровли коренных пород на территории Санкт-Петербурга [55]

Таким образом, с учетом дополнения данными указанных выше источников, геологическое строение районов по Л.Г. Заварзину можно представить следующим образом:

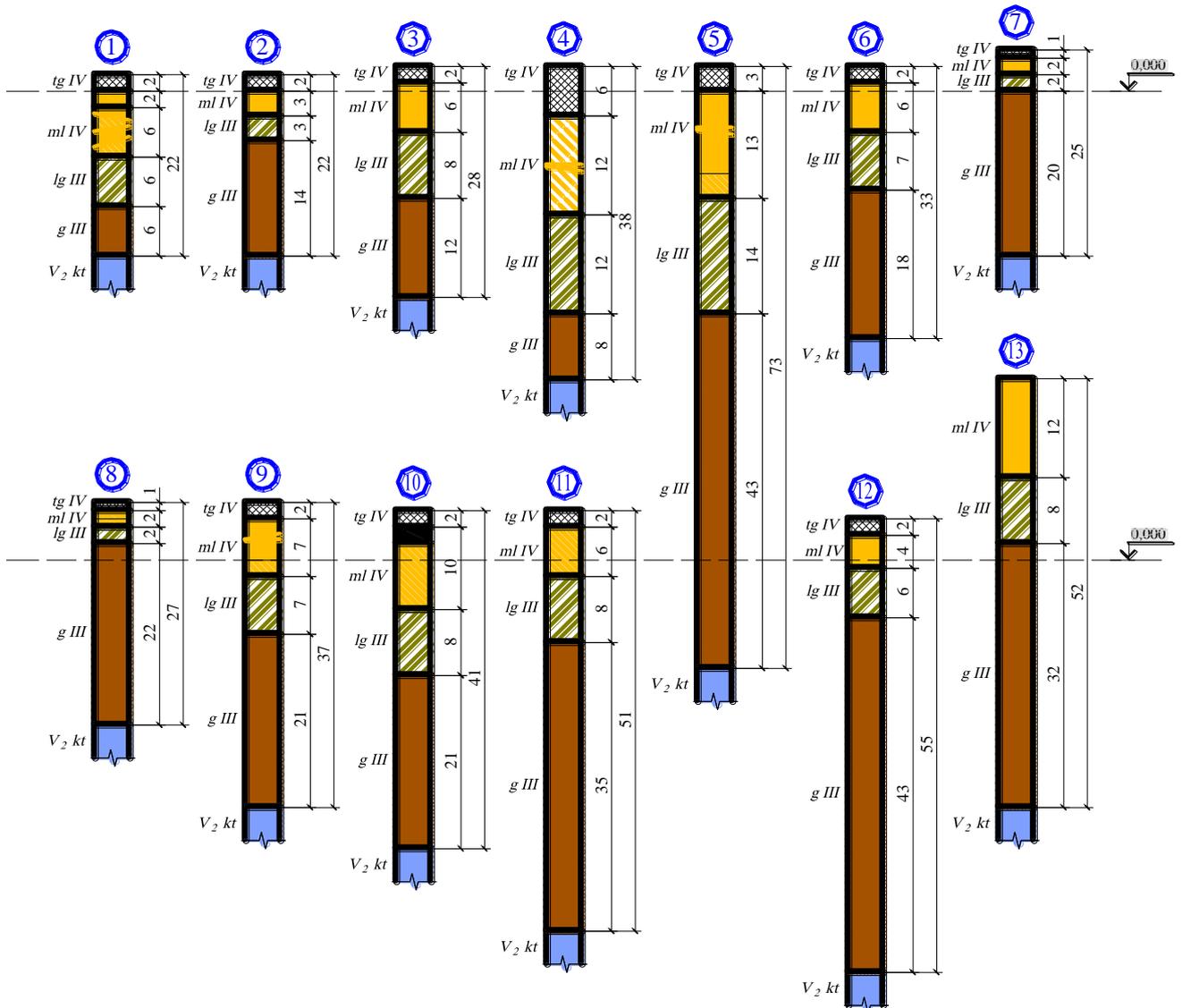


Рисунок 2.18 – Разрезы по инженерно-геологическим районам по Л. Г. Заварзину, дополненные данными геологического Атласа Санкт-Петербурга.

Таким образом, на основе анализа исследований по геологическому районированию территории Санкт-Петербурга, было выделено два основных варианта – подробный (по отчёту треста ГРИИ) и упрощённый (по Л.Г. Заварзину, дополненный данными геологического атласа). Так как задачей является не расчёт конкретного объекта с целью проверки правильности геологического районирования, а оценка влияния различных факторов на осадку зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте, то в качестве исходных

данных для численного моделирования принят упрощённый вариант районирования по Л.Г. Заварзину.

### **б) Типовые параметры стены в грунте и фундаментов исторической застройки**

Параметры зданий соседней застройки 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  $k_{\text{ф}} < 10^{-5}$  м/сут. Данным параметрам в Санкт-Петербурге отвечают только коренные дочетвертичные 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.

### **в) Разработка расчётной схемы для численного моделирования процесса устройства траншейной стены в грунте и вычисления дополнительной осадки зданий**

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 данной работе в качестве изменяемых параметров расчётной модели рассматривались следующие: длина захватки траншейной «стены в грунте»; ширина захватки; плотность глинистого раствора; расстояние от фундамента здания до «стены в грунте» в свету.

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

Для изучения влияния каждого параметра на осадку здания при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте методом вариантного численного анализа с применением МКЭ для каждого из изучаемых факторов принималось по три различных значения:

- длина захватки: 2,0 м; 2,5 м; 3,3 м;
- ширина захватки: 0,8 м; 1,0 м; 1,2 м;
- плотность глинистого раствора: 11,0 кН/м<sup>3</sup>; 11,7 кН/м<sup>3</sup>; 12,0 кН/м<sup>3</sup>;
- расстояние до застройки в свету: 1 м; 5 м; 10 м.

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

## Анализ результатов численных расчётов

Результаты расчётов осадок зданий в зависимости от расстояния между «стеной в грунте» и фундаментами здания, а также от различных параметров захватки стены в грунте для геологического района №3 по Л.Г. Заварзину приведены в таблице 2.2.

В представленной таблице через  $s_1$ ,  $s_2$  и  $s_3$  обозначены осадки соответственно ближнего, среднего и дальнего от «стены в грунте» фундаментов.

На основе полученных результатов построены графики зависимости осадок от расстояния до здания (рисунок 2.19), рассчитаны и проведены экспоненциальные линии тренда для случая минимального и максимального влияний устройства стены в грунте на фундаменты существующего здания.

Аналогично получены результаты для геологического района №6 по классификации Л.Г. Заварзина (таблица 2.3, рисунок 2.20).

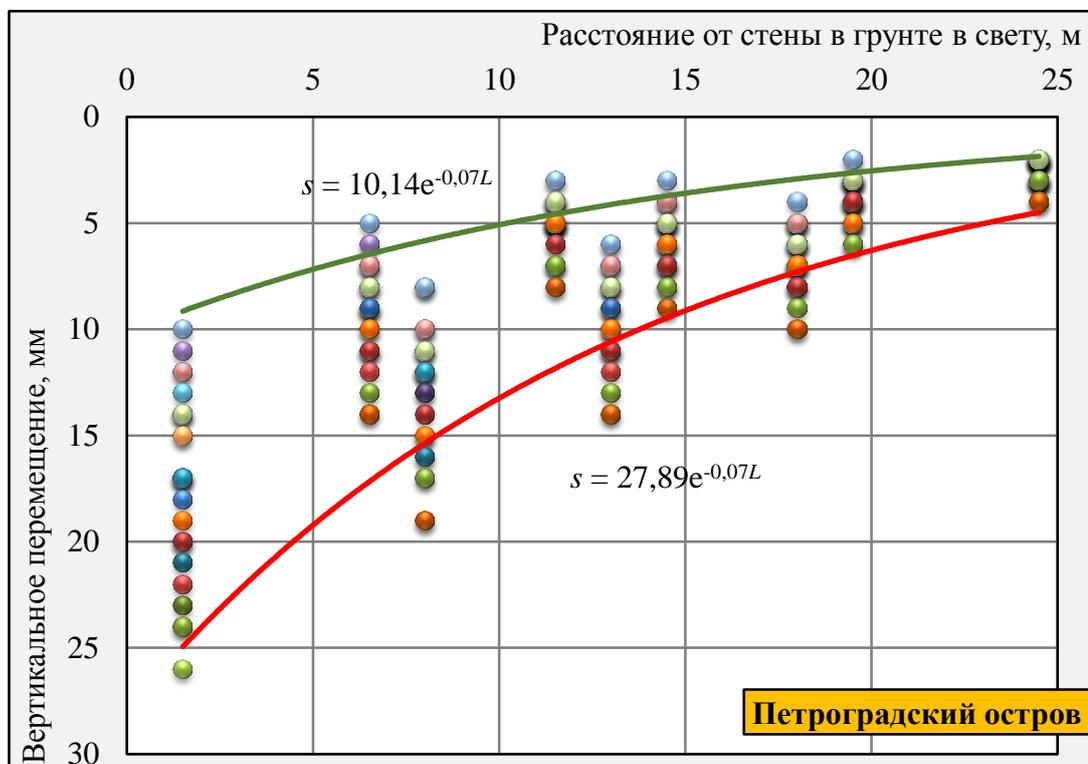


Рисунок 2.19 – Осадки существующих зданий в зависимости от расстояния до «стены в грунте» для третьего геологического района по Л. Г. Заварзину.

Таблица 2.2 – Рассчитанные осадки зданий при устройстве вблизи них траншейной «стены в грунте» для третьего инженерно-геологического района по Л. Г. Заварзину

№	Параметры захватки		$\gamma_{\text{гл. р-ра, кН/м}^3}$	Расстояние до здания в свету, м								
				1			5			10		
	$b_{\text{захв, м}}$	$l_{\text{захв, м}}$		Осадки под подошвами, мм								
				$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_1$	$s_2$	$s_3$
1	1,2	3,3	12,5	18	13	7	10	10	4	5	7	3
2			11,7	22	16	8	12	12	5	7	8	4
3			11	26	19	9	14	14	6	8	10	4
4		2,6	12,5	15	11	5	8	8	3	4	5	2
5			11,7	17	12	6	9	10	4	5	7	3
6			11	20	15	7	11	11	5	7	8	3
7		2	12,5	12	8	4	6	7	3	4	5	2
8			11,7	14	11	5	8	8	3	5	6	2
9			11	16	12	6	10	10	4	5	7	3
10	1	3,3	12,5	17	13	6	9	9	4	5	7	3
11			11,7	21	16	7	11	11	5	7	8	3
12			11	24	19	9	14	14	6	8	10	4
13		2,6	12,5	14	11	5	7	7	3	4	5	2
14			11,7	17	12	6	9	9	4	5	6	2
15			11	20	15	7	11	11	5	6	7	3
16		2	12,5	11	8	4	6	6	2	3	5	2
17			11,7	13	10	4	7	8	3	4	6	2
18			11	15	12	6	9	9	4	5	7	2
19	0,8	3,3	12,5	17	12	5	9	9	4	5	6	2
20			11,7	20	14	7	11	11	4	6	8	3
21			11	24	17	8	13	13	6	7	9	3
22		2,6	12,5	14	10	5	7	7	3	4	5	2
23			11,7	17	12	5	8	8	3	5	6	2
24			11	19	15	6	10	10	5	5	7	2
25		2	12,5	10	8	3	5	6	2	3	4	2
26			11,7	12	10	4	7	7	3	4	5	2
27			11	14	11	5	8	8	3	4	6	2

Таблица 2.3 – Рассчитанные осадки зданий при устройстве вблизи них траншейной «стены в грунте» для шестого инженерно-геологического района по Л. Г. Заварзину

№	Параметры захватки		$\gamma_{\text{гл. р-ра, кН/м}^3}$	Расстояние до здания в свету, м								
				1			5			10		
	$b_{\text{захв, м}}$	$l_{\text{захв, м}}$		Осадки под подошвами, мм								
				$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_1$	$s_2$	$s_3$
1	1,2	3,3	12,5	18	13	5	9	9	3	6	7	2
2			11,7	22	15	7	12	12	5	7	8	3
3			11	25	18	9	14	13	5	8	10	4
4		2,6	12,5	15	10	5	8	8	3	4	5	2
5			11,7	17	13	6	9	9	4	5	6	3
6			11	20	15	7	10	10	4	6	7	3
7		2	12,5	12	8	4	6	6	2	4	5	2
8			11,7	14	11	6	8	8	3	5	6	2
9			11	16	13	6	9	9	4	5	7	3
10	1	3,3	12,5	18	12	5	9	9	3	5	6	2
11			11,7	21	15	7	11	11	4	7	8	3
12			11	25	17	8	13	13	5	8	9	4
13		2,6	12,5	14	10	5	7	7	3	4	5	2
14			11,7	17	13	5	9	9	4	5	6	3
15			11	20	15	7	10	10	4	6	7	3
16		2	12,5	11	8	4	6	6	2	3	5	2
17			11,7	13	10	4	7	7	3	4	5	2
18			11	15	11	5	8	8	3	5	7	2
19	0,8	3,3	12,5	17	12	5	8	8	3	5	6	2
20			11,7	20	14	7	10	10	4	7	7	3
21			11	24	17	8	12	12	5	8	8	4
22		2,6	12,5	14	10	5	7	7	3	4	5	2
23			11,7	17	12	5	8	8	3	4	6	2
24			11	19	13	6	10	10	4	6	7	3
25		2	12,5	10	7	3	5	5	2	3	4	2
26			11,7	12	9	4	7	7	3	4	5	2
27			11	14	11	5	8	8	3	4	6	2

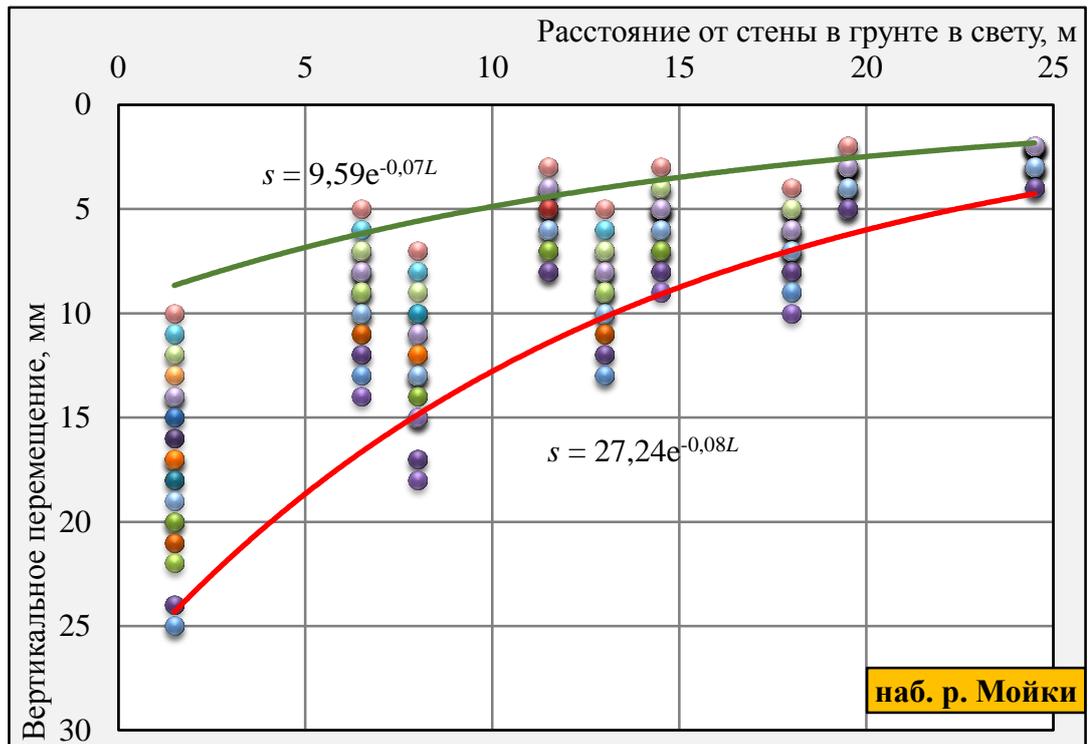


Рисунок 2.20 – Осадки существующих зданий в зависимости от расстояния до «стены в грунте» для шестого геологического района по Л. Г. Заварзину.

Полученные результаты показывают, что несмотря на некоторую разницу в инженерно-геологических условиях двух центральных районов Санкт-Петербурга, осадки зданий описываются практически одинаковыми зависимостями.

На основе проведённых расчётов, предлагается следующее эмпирическое выражение для инженерной оценки дополнительных осадок фундаментов зданий, вызванных устройством траншейной стены в грунте:

$$s = \alpha A e^{-BL} \quad (2.5)$$

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, равная 2,71;
- $L$  — расстояние от «стены в грунте» до здания, м;
- $\alpha$  — поправочный коэффициент равный 1,3.

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. Значения коэффициентов  $A$  и  $B$  рассчитаны по методу экспоненциальной аппроксимации значений, полученных при фиксированных параметрах  $b$ ,  $l$ , и  $\gamma_{\text{гл}}$  с помощью программного комплекса MS Excel.

Таблица 2.4 – 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

## Оценка степени влияния рассмотренных факторов на дополнительную осадку зданий

В предыдущем разделе с помощью численного вариантного моделирования были рассчитаны осадки фундаментов соседних зданий для всех возможных комбинаций следующих четырёх факторов (по три значения каждого фактора): ширина и длина захватки траншеи для устройства стены в грунте, плотность глинистого раствора и расстояние между стеной в грунте и существующим зданием. На их основе установлены зависимости дополнительных осадок здания от расстояния до стены в грунте.

Оценим зависимость дополнительных осадок от остальных факторов.

Для любого значения каждого фактора имеется группа результатов расчётов по всем возможным комбинациям из оставшихся трёх факторов. Например, для стен в грунте шириной 0,8 м имеем группу результатов из комбинаций факторов длины захватки (3 различных значения), плотности глинистого раствора (3 различных значения) и расстояния до здания (3 различных значения) всего  $3^3=27$  значений. Так же имеются две группы по 27 значений для ширины стены в грунте 1,0 м и 1,2 м.

Пересчитаем полученные результаты в относительных величинах  $b_i / b_0$  и  $s_i / s_0$ , где:  $b_0$  – значение фактора, соответствующее максимальным осадкам фундаментов,  $b_i$  – два оставшиеся значения фактора,  $s_0$  – значения осадок при значениях  $b_0$ ,  $s_i$  – значения осадок при значениях  $b_i$ . Аналогично пересчитаем полученные результаты для всех остальных рассматриваемых факторов. По результатам полученных данных построим график влияния отдельных факторов на величину дополнительной осадки (рисунок 2.21).

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.

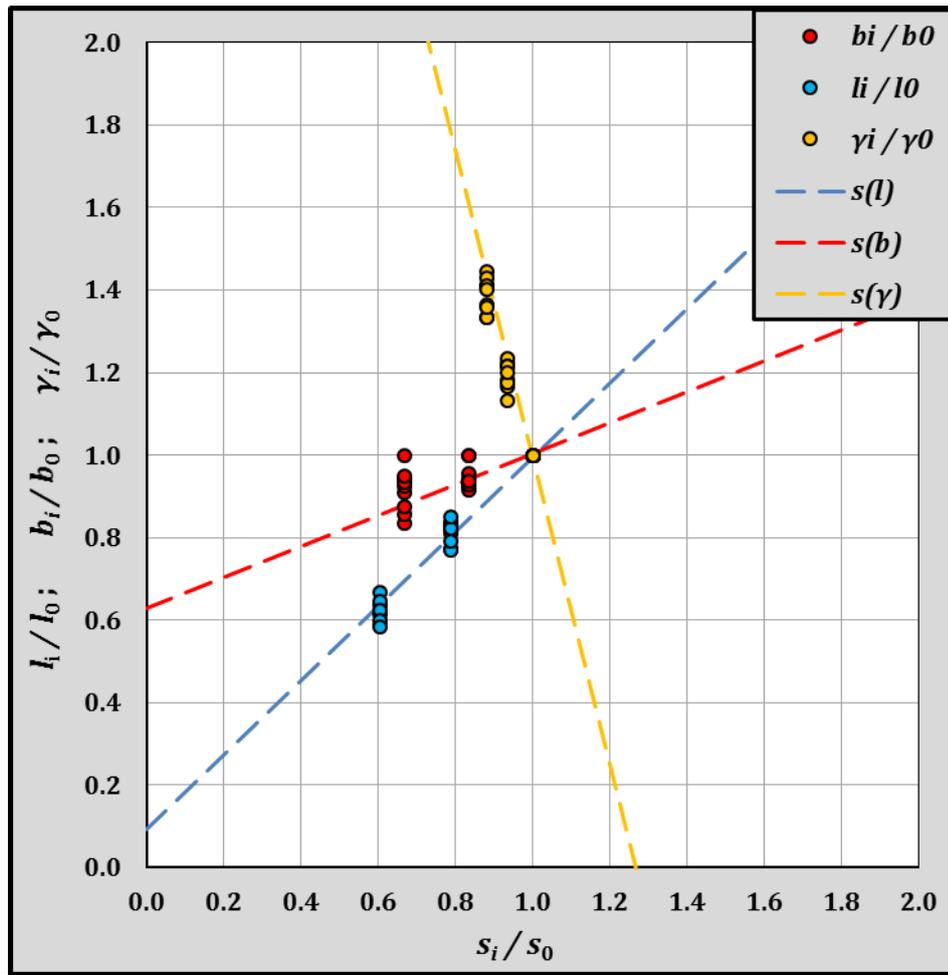


Рисунок 2.21 – Графическая интерпретация силы влияния отдельных факторов на величину дополнительной осадки зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте

Из графика на рисунке 2.21 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 из трёх рассматриваемых факторов имеет плотность глинистого раствора, а влияние длины захватки несколько слабее фактора плотности глинистого раствора.

Дополнительно оценим силу влияния факторов с помощью инструментов математической статистики.

Для оценки степени влияния различных факторов на результат эксперимента в математике существует специальный раздел статистики – дисперсионный анализ [153, 118] (в англоязычной литературе принято

обозначение ANOVA (от англ. *ANalysis Of VAriance*). Дисперсионный анализ был разработан британским учёным генетиком Р. Фишером в 1925 г [23].

Дисперсный анализ позволяет выделить из общей изменчивости результата частные изменчивости, вызванные влиянием отдельных факторов, изменчивости, вызванные совместным действием факторов, а также так называемую остаточную или случайную изменчивость – результат не учтённых в эксперименте факторов.

Принцип дисперсионного анализа заключается в следующем:

- 1) формулирование нулевой гипотезы: выдвигается предположение о том, что исследуемые факторы не влияют на значения результативного признака, что говорит о том, что полученные различия результатов являются случайными;
- 2) определение вероятности получить разброс результатов не меньше наблюдаемого при условии справедливости выдвинутой нулевой гипотезы;
- 3) в случае, если эта вероятность меньше определённого порога (максимальная приемлемая вероятность отвергнуть верную нулевую гипотезу называется уровнем значимости  $\alpha$  и принимается равной 0,05), то нулевая гипотеза отвергается и, следовательно, полученные результаты исследования считаются статистически значимыми.

Выполним многофакторный дисперсионный анализ данных, полученных при численном моделировании задачи о дополнительных осадках зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте (таблицы 2.2 и 2.3). Для вычисления коэффициента Фишера, характеризующего степень влияния каждого фактора использован программный математический комплекс для статистической обработки данных STATISTICA 10 [46, 47]. Помимо критерия Фишера  $F$ , вычисляется также величина  $p$  в долях единицы – вероятность того, что рассматриваемый фактор не влияет на результат. Результаты статистических расчётов приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты определения степени влияния различных факторов на дополнительную осадку зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте

Фактор	Критерий Фишера, $F$	Вероятность того, что рассматриваемый фактор не влияет на осадку, $p$
Расстояние до фундаментов, $r$	394,2	0,000
Ширина захватки траншеи стены в грунте, $b$	16,6	0,000
Длина захватки траншеи стены в грунте, $l$	130,9	0,000
Плотность глинистого раствора, $\gamma_{\text{гл}}$	158,4	0,000

Полученные в программном комплексе STATISTICA 10 результаты подтвердили полученные ранее выводы. Значение  $p = 0$  для всех факторов означает, что все рассмотренные факторы влияют на величину осадки зданий при устройстве траншейной стены в грунте. При этом минимальное влияние на осадку имеет ширина захватки стены в грунте. Факторы плотности глинистого раствора и длины захватки траншейной стены в грунте имеют приблизительно одинаковую степень влияния на технологическую осадку. Наибольшее влияние на величину дополнительной осадки зданий при устройстве стены в грунте имеет фактор удалённости фундамента от траншеи.

### Выводы по второй главе

1) Наиболее широко распространённый метод численного моделирования ограждений котлованов пластинчатыми элементами, дающий хорошую сходимость с данными натурных наблюдений для шпунтовых ограждений, не позволяет достоверно оценить осадки существующих зданий соседней застройки при устройстве ограждения котлована по технологии «стена в грунте».

2) Предложена методика моделирования ограждения, выполняемого по технологии «стена в грунте», с помощью объёмных элементов, которая позволила учесть технологические осадки соседних зданий путём поэтапного моделирования технологических операций по устройству стены в грунте (этап откопки захватки ограждения под защитой глинистого раствора и этап заполнения захватки литым бетоном).

Выполненные расчёты показали, что величина изгибающего момента в ограждении, определённая по предлагаемой методике, коррелируется с величиной изгибающего момента, полученного при моделировании с использованием классического подхода.

3) Для изучения влияния различных факторов на дополнительную осадку существующих зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте были выполнены серии численных расчётов. В качестве исходных инженерно-геологических данных приняты результаты исследований Л.Г. Заварзина по геологическому районированию территории Ленинграда, дополненные данными геологического атласа Санкт-Петербурга. Параметры зданий соседней застройки приняты на основании данных по обследованиям, выполненным сотрудниками кафедры геотехники СПбГАСУ в различные годы.

4) По результатам проведённого многофакторного анализа сделан вывод о том, что изменение геологии в пределах центральной части города незначительно сказывается на технологической осадке зданий, вызванной устройством траншейной стены в грунте. На основании многовариантных численных расчётов, проведённых с применением МКЭ, и анализа полученных данных предлагается эмпирическое выражение для расчёта значений технологических осадок зданий.

5) Выполнена качественная оценка степени влияния рассмотренных факторов на технологическую осадку. Статистическая обработка результатов численных расчётов подтвердила наличие влияния всех рассмотренных факторов на дополнительную осадку зданий. Отмечено, что наибольшее влияние на дополнительную осадку зданий оказывает расстояние между зданием и стеной в

грунте, минимальное влияние из всех рассмотренных факторов оказывает ширина стены в грунте. Влияние плотности глинистого раствора и длины захватки траншейной стены в грунте примерно одинаково.

### ГЛАВА 3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В МАССИВЕ ГРУНТА ПРИ УСТРОЙСТВЕ ТРАНШЕЙНОЙ «СТЕНЫ В ГРУНТЕ»

#### 3.1 Обоснование расчётной схемы захватки (участка) стены в грунте на стадии откопки под защитой глинистого раствора

Как было показано в предыдущей главе, решение задачи о напряжённо-деформированном состоянии грунтового массива при разработке траншейной «стены в грунте» возможно численными методами.

Однако, помимо экспериментальных зависимостей и численного решения, рассмотрим также аналитическое, позволяющее получить замкнутые общие выражения, которые могут быть, как дополнительной проверкой численного, так и самостоятельным решением, например, для объектов пониженного уровня ответственности.

В данной главе представлен вывод аналитического решения задачи о напряжённо-деформированном состоянии грунтового массива при разработке траншейной «стены в грунте», выполненный в рамках теории упругости, а также инженерный метод, разработанный путём введения ряда допущений.

Рассмотрим некоторую плоскость  $A-B$ , расположенную в массиве грунта (рисунок 3.1). На данную плоскость действуют взаимно компенсирующие друг друга нормальные горизонтальные и вертикальные напряжения (3.1). В рассматриваемом случае нормальные горизонтальные напряжения – это геометрическая сумма давления покоя грунта  $\sigma_0$ , давления грунтовых вод  $\sigma_w$  и давления глинистого раствора внутри траншеи  $\sigma_{гг}$ . Вертикальные напряжения – это трение грунта.

При разработке траншеи в грунте на плоскость  $A-B$ , перестают действовать напряжения со стороны траншеи, что приводит к появлению

некомпенсированного давления со стороны грунта и соответственно деформациям грунтового массива (рисунок 3.2).

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_0 + \sigma_w - \sigma_{2l} \\ \tau_z &= \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi\end{aligned}\quad (3.1)$$

Давление покоя вычисляется по формуле:

$$\sigma_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z \quad (3.2)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона грунта.

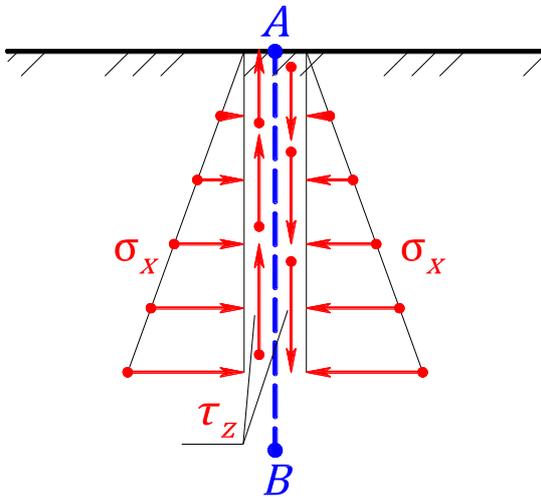


Рисунок 3.1 – Напряжения, действующие на произвольную плоскость  $A-B$  в массиве грунта

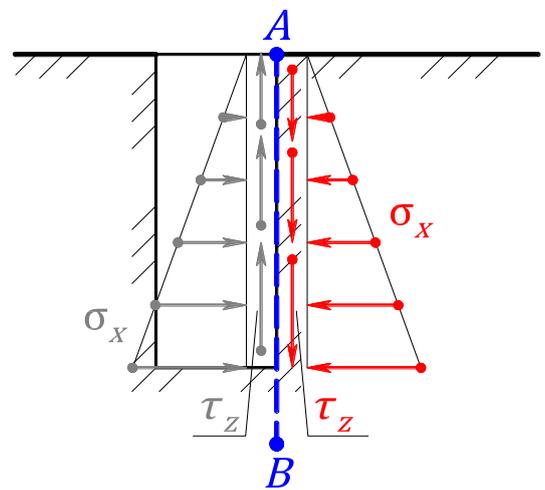


Рисунок 3.2 – Напряжения, действующие на произвольную плоскость  $A-B$  в массиве грунта при разработке траншеи

Для решения задачи о напряжённо-деформированном состоянии грунтового массива введём следующее допущение. Деформации грунта, вызванные разработкой траншеи, равны деформациям в упругом полупространстве, вызванным воздействием некоторых дополнительных нормальных горизонтальных и касательных вертикальных напряжений (рисунок 3.3) на вертикальные поверхности, расположенные в пространстве идентично граням траншеи. Принятое допущение позволяет использовать решения теории упругости для рассматриваемой задачи, так как рассматривается упругое полупространство, а не траншея в упругом полупространстве.

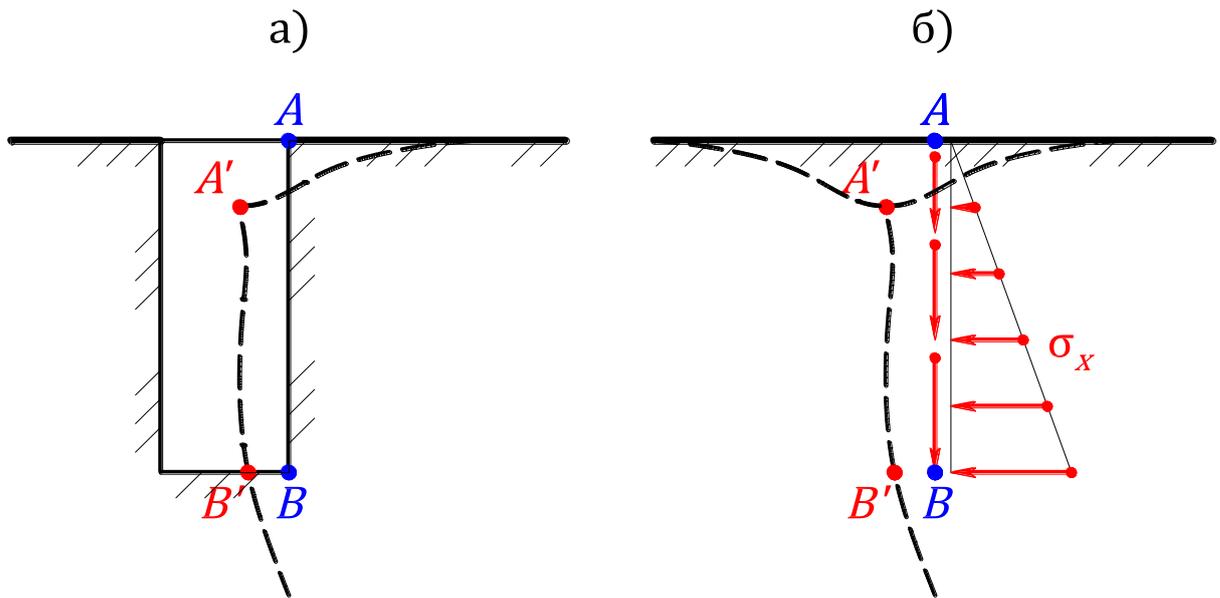


Рисунок 3.3 – К обоснованию расчётной схемы:

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

Развитие математической теории упругости и решение основных её задач рассмотрено в основных работах Marsden J.E. & Hughes T.J.R. [28], В.В. Леденева [74], А.И. Лурье [76, 75], Н.И. Мусхелишвили [95], Новацкого В. [100], В.З. Партон и П.И. Перлина [107, 108], С.П. Тимошенко и Д. Гудьера [134], К. Трусделла [135], В.А. Флорина [147, 146], Х. Хана [149] и др.

Математическая теория упругости выделилась в самостоятельную науку в начале XIX века. Рассмотрение задач о напряжённо-деформированном состоянии упругого полупространства началось со второй половины XIX века.

В 1855 г была опубликована работа лорда Л. Кельвина [26], в которой давалось решение задачи о действии вертикальной сосредоточенной силы, расположенной в упругом полупространстве на такой глубине, при которой влиянием граничной плоскости можно пренебречь.

Задача о действии горизонтальной сосредоточенной силы, действующей на границе упругого полупространства, была решена Черрути В. в 1882 г. [20].

Ж. Буссинеск в 1885 г. представил решение задачи о действии вертикальной сосредоточенной силы, действующей на границу упругого полупространства [18]. Это решение используется в ряде прикладных задач по определению напряжений в массиве грунта, вызванных нагрузками различной конфигурации в плане.

В 1892 г. А. Фламан представил решение задачи о плоской деформации массива при действии погонной линейной нагрузки, приложенной на границе упругого полупространства [24].

Несмотря на широкое применение вышеперечисленных задач в практических вопросах механики грунтов, данные решения не подходят для предложенной выше расчётной схемы, так как необходимо учесть действие распределённых нагрузок на некотором интервале глубин – от нуля до глубины равной глубине захватки траншеи под «стену в грунте».

В начале XX века с развитием промышленности и машиностроения значительно возросли требования к расчёту различных элементов конструкций и механизмов. Точность решений, получаемых на основе сопротивления материалов в некоторых случаях была недостаточна, что и привело к развитию теории упругости. Развитие математического аппарата (метод Рунге-Кутты, метод Релея-Ритца) позволило решать приближенными численными методами гораздо более сложные задачи, чем те, для которых имеется строгое математическое решение.

В 1932 г. Е. Мелан опубликовал решение плоской задачи о действии сосредоточенной вертикальной или горизонтальной силы, расположенной внутри упругого полупространства [29]. Позже М.И. Горбунов-Посадов и О.Я. Шехтер дополнили решение, определив перемещения в массиве [53]. Однако, для предложенной ранее расчётной схемы отдельной захватки «стены в грунте» данное решение будет являться некорректным, так как, очевидно, необходимо рассмотрение поставленной задачи в пространственной постановке.

В 1936 г. Р.Д. Миндлиным было представлено решение задачи о действии сосредоточенной вертикальной или горизонтальной силы, расположенной внутри упругого полупространства в пространственной постановке [30].

Решение Р.Д. Миндлина широко используется в практических вопросах механики грунтов и фундаментостроения: в работах Н.М. Дорошкевич, А.А. Бартоломея, и др. при разработке методов расчета свай; в работах А.Н. Снитко, В.В. Леденева при расчёте заглубленных фундаментов.

Решение Р.Д. Миндлина может быть использовано для поставленной задачи о напряжённо-деформированном состоянии грунтового массива при разработке траншейной «стены в грунте», выполненный в рамках теории упругости.

Отметим что, задача Миндлина является обобщающей для задач Буссинеска, Черрути и Мелана. Сосредоточенная сила  $P$  (вертикальная или горизонтальная) действует внутри упругого полупространства на глубине  $h$  от поверхности (рисунок 3.4).

Решение задачи Р.Д. Миндлин получил путём наложения вектора Буссинеска (первые три составляющие которого дают функцию Лява) и потенциала деформаций Ламе [149]. Полученные выражения для определения всех компонентов напряжений позволяют удовлетворить граничным условиям рассматриваемой задачи  $\sigma_z = \tau_{rz} = 0$  (оси компонентов напряжений см. рисунок 3.4) при  $z = h = 0$ .

Ниже представлены выражения (3.3)...(3.6) для вертикальных напряжений и перемещений. Именно эти компоненты напряжённо-деформированного состояния представляют практический интерес для вычисления осадок фундаментов зданий. Влияние остальных компонентов напряженно-деформированного состояния в данной работе не рассматривалось.

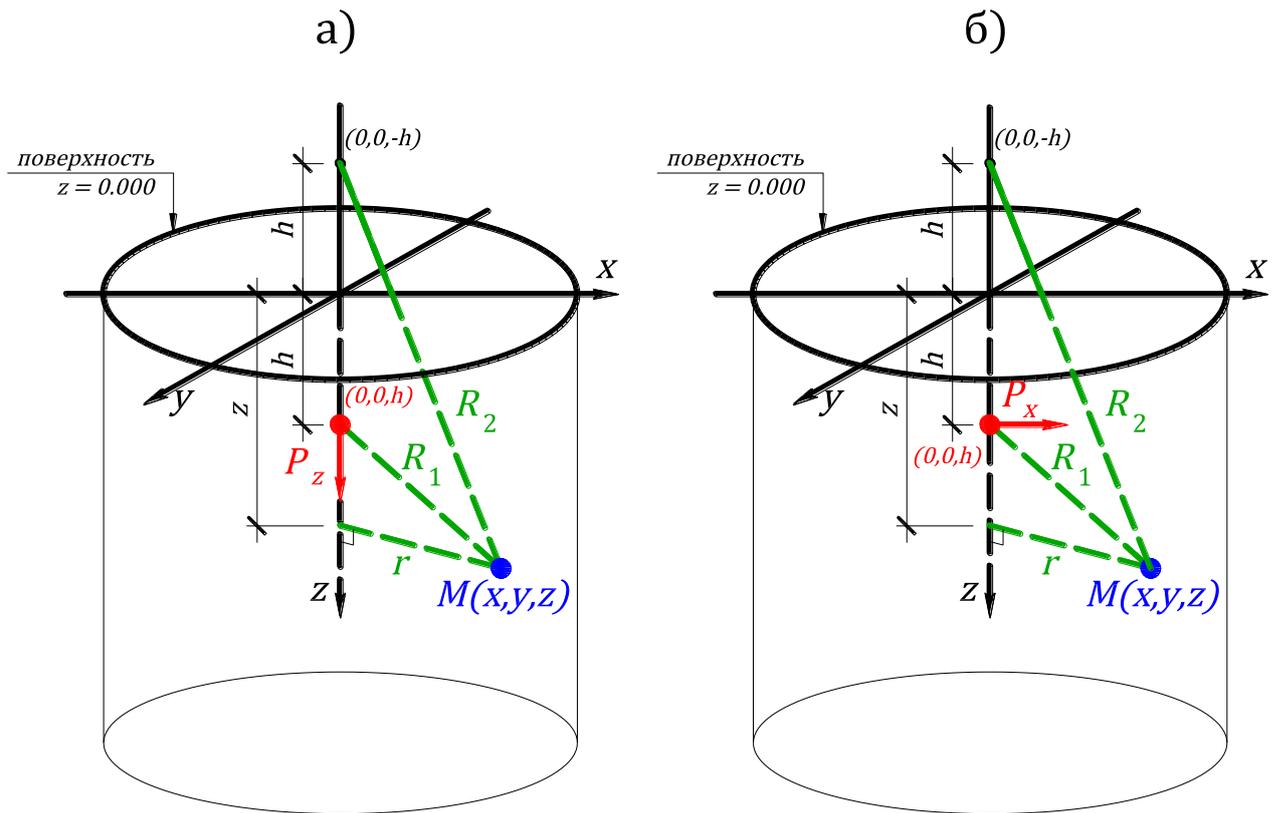


Рисунок 3.4 – Расчётная схема задачи Миндлина:  
а) действие вертикальной силы; б) действие горизонтальной силы.

Для случая действия вертикальной силы в полупространстве:

$$\sigma_z^z = \frac{P_z}{8\pi(1-\nu)} \left[ -\frac{(1-2\nu)(z-h)}{R_1^3} + \frac{(1-2\nu)(z-h)}{R_2^3} - \frac{3(z-h)^3}{R_1^5} - \frac{3(3-4\nu)z(z+h)^2 - 3h(z+h)(5z-h)}{R_2^5} - \frac{30hz(z+h)^3}{R_2^7} \right] \quad (3.3)$$

$$u_z^z = \frac{P_z}{16\pi G(1-\nu)} \left[ \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{R_2} + \frac{(z-h)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z+h)^2 - 2hz}{R_2^3} + \frac{6hz(z+h)^2}{R_2^5} \right] \quad (3.4)$$

Для случая действия горизонтальной силы в полупространстве:

$$\sigma_z^x = \frac{P_x x}{8\pi(1-\nu)} \left[ \frac{(1-2\nu)}{R_1^3} - \frac{(1-2\nu)}{R_2^3} - \frac{3(z-h)^2}{R_1^5} - \frac{3(3-4\nu)(z+h)^2 - 6h[h+(z+h)(1-2\nu)]}{R_2^5} - \frac{30hz(z+h)^2}{R_2^7} \right] \quad (3.5)$$

$$u_z^x = \frac{P_x x}{16\pi G(1-\nu)} \left[ \frac{z-h}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z-h)}{R_2^3} - \frac{6hz(z+h)}{R_2^5} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z+h)} \right] \quad (3.6)$$

В выражениях ( 3.3 )... ( 3.6 ):

$$R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}; \quad R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2} \quad (3.7)$$

В выражениях ( 3.3 )... ( 3.7 ) приняты следующие обозначения:

- $x, y, z$  – 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;
- $G$  – модуль сдвига;
- $\sigma_z^z$  – дополнительное вертикальное напряжение в точке  $M$ , вызванное действием вертикальной силы  $P_z$ ;
- $u_z^z$  – дополнительное вертикальное перемещение в точке  $M$ , вызванное действием вертикальной силы  $P_z$ ;
- $\sigma_z^x$  – дополнительное вертикальное напряжение в точке  $M$ , вызванное действием горизонтальной силы  $P_x$ ;
- $u_z^x$  – дополнительное вертикальное перемещение в точке  $M$ , вызванное действием горизонтальной силы  $P_x$ .

## 3.2 Решение задачи о влиянии откопки траншеи на окружающий массив грунта

### Учёт многослойности основания

Учёт многослойности основания в решении различных задач механики грунтов обычно происходит двумя возможными способами:

- осреднением характеристик грунтов;
- вычислением осадок фундаментов в два этапа.

Осреднение характеристик грунтов является наиболее простым способом решения задач с учётом напластования различных слоёв грунта. Этот подход используется, например, при расчёте осадок одиночных свай и влияния свай друг на друга в кусте [11, 3].

Для учёта многослойности основания, нами предложено решать задачу вычисления осадки фундаментов соседних зданий при устройстве траншейной стены в грунте в два этапа. На первом этапе определяются напряжения вдоль вертикальной оси, проходящей через точку в которой вычисляется осадка, на втором этапе – по полученной эпюре вертикальных напряжений рассчитывается осадка. Подобный подход реализован в известных методах расчёта – линейно-деформируемого слоя и линейно-деформируемого полупространства [10, 6].

Первый подход проще, однако может давать неточности в случае, если характеристики грунтов имеют большой разброс. Так, например, для условий Санкт-Петербурга у сильнодеформируемых глинистых озёрно-морских и озёрно-ледниковых отложений модуль деформации может быть в 10 раз меньше, чем у слоёв плотных песков или твёрдых коренных глин.

Второй подход более трудоёмок и сложен математически, однако он более точен из-за того, что распределение напряжений меньше зависит от деформационных характеристик грунта (а в некоторых случаях вообще не зависят, например, в задаче Буссинеска [18]). Методы расчёта, основанные на вычислении осадок через определение эпюры напряжений, имеют хорошую сходимость с данными наблюдений [151, 77].

При разработке аналитического метода расчёта технологических осадок при устройстве «стены в грунте» нами использован второй подход – вычисление эпюры вертикальных напряжений, по которой затем рассчитывается осадка соседних фундаментов.

### Разработка решения в рамках теории упругости

Для определения дополнительного вертикального напряжения в произвольной точке  $M$  необходимо проинтегрировать уравнения Миндлина по боковой поверхности стенок траншеи в пределах каждого отдельного слоя грунта, при этом учитывая изменение напряжений (как вертикальных, так и горизонтальных) с глубиной.

Введём обозначения:

$$\alpha'_z = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left[ -\frac{(1-2\mu)(z-h)}{R_1^3} + \frac{(1-2\mu)(z-h)}{R_2^3} - \frac{3(z-h)^3}{R_1^5} - \frac{3(3-4\mu)z(z+h)^2 - 3h(z+h)(5z-h)}{R_2^5} - \frac{30hz(z+h)^3}{R_2^7} \right] \quad (3.8)$$

$$\alpha'_x = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left[ \frac{(1-2\mu)}{R_1^3} - \frac{(1-2\mu)}{R_2^3} - \frac{3(z-h)^2}{R_1^5} - \frac{3(3-4\mu)(z+h)^2 - 6h[h+(z+h)(1-2\mu)]}{R_2^5} - \frac{30hz(z+h)^2}{R_2^7} \right] \quad (3.9)$$

Представим выражения для определения вертикальных напряжений  $\sigma_z$  в произвольной точке грунтового массива  $M$ , вызванных действием вертикальной (3.3) и горизонтальной (3.5) сил, действующих в упругом полупространстве с учётом принятых обозначений (3.8) и (3.9):

$$\sigma_z^z(M) = P_z \alpha'_z \quad (3.10)$$

$$\sigma_z^x(M) = P_x \alpha'_x \quad (3.11)$$

Для определения дополнительных вертикальных напряжений в произвольной точке грунтового массива необходимо проинтегрировать выражения (3.10) и (3.11) по толщине каждого слоя грунта по глубине траншеи, и просуммировать полученные значения.

Расчётная схема для случая действия горизонтального давления, возрастающего с глубиной, представлена ниже (рисунок 3.5).

На некоторый слой грунта, прорезаемый траншеей, действует горизонтальное давление, равное на кровле слоя  $\sigma_{нач,i}$ , и возрастающее с глубиной по линейному закону. Рассмотрим бесконечно малую часть боковой поверхности траншеи, имеющую длину  $dl$  и ширину  $dh$ , расположенную на глубине  $h$  от кровли слоя. На эту площадку действует напряжение  $\sigma_{h,i}$  определяемое как

$$\sigma_{h,i} = \sigma_{нач,i} + kh \quad (3.12)$$

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

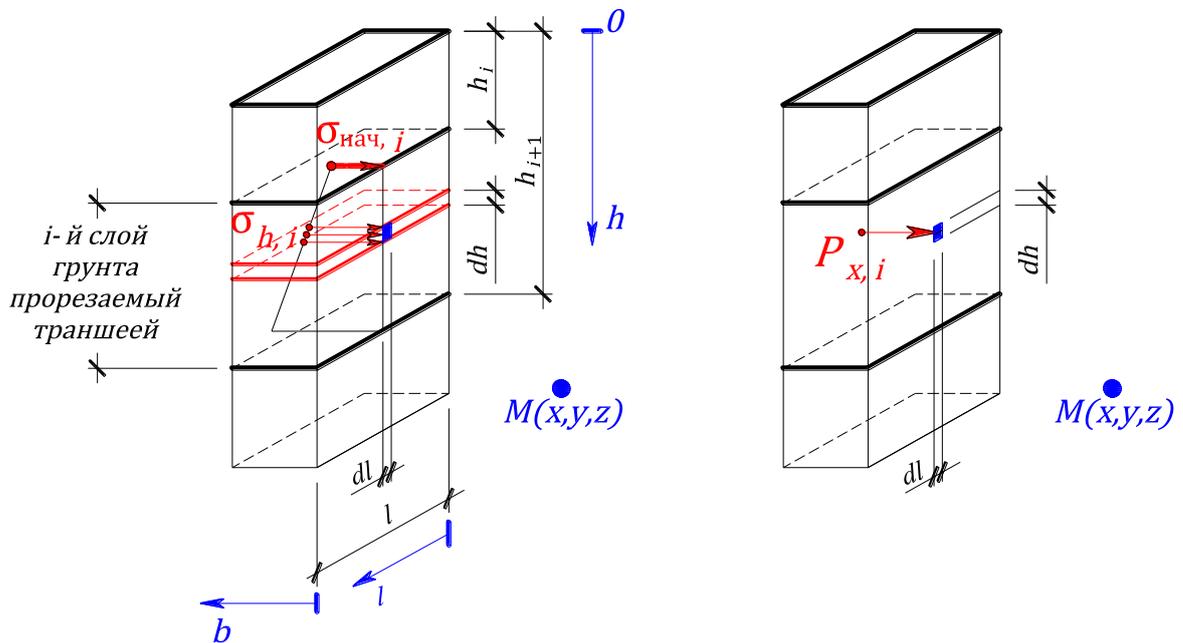


Рисунок 3.5 – Расчётная схема задачи о влиянии откопки траншеи на напряжения в грунтовом массиве.

Тогда результирующая горизонтальная сила, действующая на рассматриваемую площадку, будет равна

$$P_{x,i} = (\sigma_{нач,i} + k_{x,i}h)dldh \quad (3.13)$$

По (3.5) и (3.9) можно выразить значение дополнительного вертикального напряжения в точке  $M$ , вызванного действием результирующей горизонтальной силы по элементарной площадке на боковой поверхности траншеи

$$d \sigma_{z,i}^x(M) = P_{x,i} x \alpha'_x = ((\sigma_{нач,i} + k_{x,i} h) dl dh) x \alpha'_x \quad (3.14)$$

Тогда влияние от действия горизонтальной нагрузки по боковой поверхности всего слоя грунта будет определяться интегрированием по  $dl$  (по длине траншеи) и  $db$  (по ширине траншеи), а также по  $dh$  (глубине от кровли слоя грунта).

$$\sigma_{z,i}^x(M) = \int_0^l \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\sigma_{нач,i} + k_{x,i} h) x \alpha'_{x,l} dl dh + \int_0^b \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\sigma_{нач,i} + k_{x,i} h) x \alpha'_{x,b} db dh \quad (3.15)$$

Величина дополнительного вертикального напряжения в точке  $M$  будет определяться суммированием выражения (3.15) по всем слоям грунтов, прорезаемых траншеей.

$$\sigma_z^x(M) = \sum_{i=1}^n \sigma_{z,i}^x(M) \quad (3.16)$$

Рассуждая аналогичным образом, из (3.3) и (3.8) можно получить выражения для дополнительного вертикального напряжения в точке  $M$ , вызванного действием вертикальных напряжений по боковой поверхности траншеи

$$d \sigma_{z,i}^z(M) = P_{z,i} \alpha'_{z,i} = ((\tau_{нач,i} + k_{z,i} h) dl dh) \alpha'_{z,i} \quad (3.17)$$

$$\sigma_{z,i}^z(M) = \int_0^l \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\tau_{нач,i} + k_{z,i} h) \alpha'_{z,l} dl dh + \int_0^b \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\tau_{нач,i} + k_{z,i} h) \alpha'_{z,b} db dh \quad (3.18)$$

$$\sigma_z^z(M) = \sum_{i=1}^n \sigma_{z,i}^z(M) \quad (3.19)$$

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

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

$$\sigma_z(M) = \sum_{i=1}^n \left( \int_0^l \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\sigma_{нач,i} + k_{x,i}h) x \alpha'_{x,l} dldh + \int_0^b \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\sigma_{нач,i} + k_{x,i}h) x \alpha'_{x,b} dbdh + \right. \quad (3.20)$$

$$\left. + \int_0^l \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\tau_{нач,i} + k_{z,i}h) \alpha'_{z,l} dldh + \int_0^b \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\tau_{нач,i} + k_{z,i}h) \alpha'_{z,b} dbdh \right)$$

### 3.3 Инженерный метод расчёта влияния откопки траншеи на дополнительную осадку соседних фундаментов

Полученное обобщённое аналитическое решение ( 3.20 ). довольно сложно использовать в практических расчётах, так как оно включает в себя множество переменных, зависящих от переменных интегрирования. Из-за этого интегрирование выражения ( 3.20 ) возможно только численными методами, а полученное таким образом решение будет весьма громоздким.

Для разработки применимого в инженерной практике решения введём ряд допущений, которые не повлияют существенным образом на конечный результат. Отметим, что основным критерием достоверности и применимости инженерной методики может быть сравнение полученных по ней результатов расчётов с данными натурных наблюдений.

#### Принятые допущения

##### а) Интегрирование по длине захватки траншеи

Так как в уравнениях, определяющих коэффициенты  $\alpha'_x$  и  $\alpha'_z$ , содержатся параметры расстояния от каждой элементарной площадки боковой поверхности стенки траншеи до рассматриваемой точки  $M$ , в решении ( 3.20 ). вводится интегрирование по длине захватки траншеи, что существенно затрудняет практические вычисления.

Введём допущение о том, что вклад каждой элементарной площадки, расположенной на одном уровне боковой поверхности траншеи одинаков.

Определение коэффициентов  $\alpha'_x$  и  $\alpha'_z$  будем производить для точек, соответствующих центру поперечного сечения траншеи.

Рассмотрим случай с горизонтальной нагрузкой на стенки траншеи.

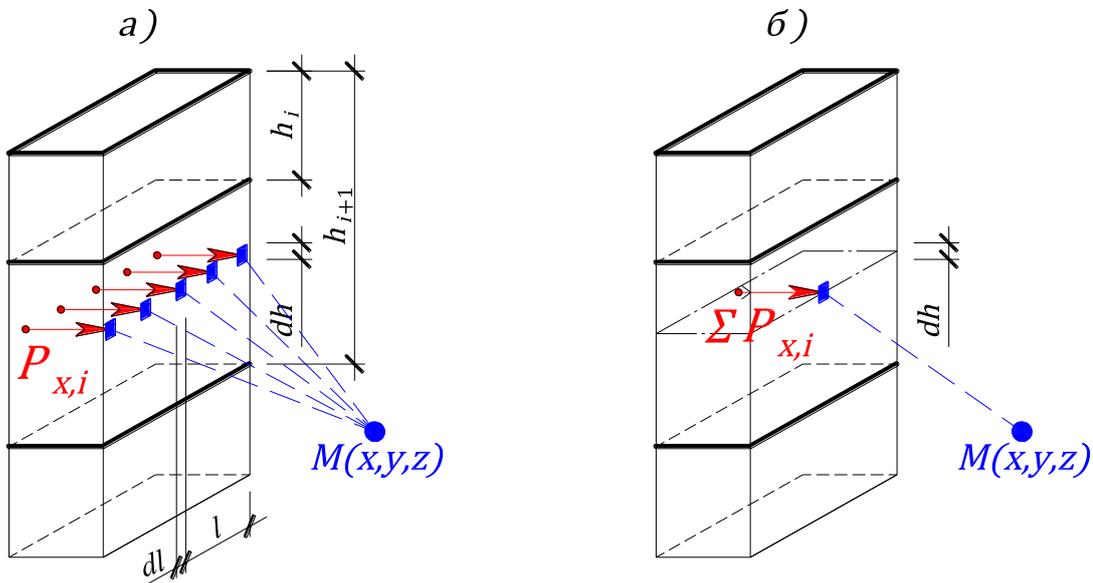


Рисунок 3.6 – Пояснение к первому допущению

Тогда в случае обобщённого решения (рисунок 3.6, а) дополнительные вертикальные напряжения при откопке траншеи на  $dh$  будут вычисляться по выражению ( $\alpha'_x$  зависит от положения на боковой поверхности траншеи, т.е. от  $l$ )

$$\sigma_z^x(M) = \sum_{i=1}^n P_x x_i \alpha'_{x,i} = P_x x \alpha'_x dl \quad (3.21)$$

В случае принятого нами допущения (рисунок 3.6, б) выражение может быть значительно упрощено из-за того, что отпадает необходимость производить интегрирование (и  $x$  и  $\alpha'_x$  зависят от положения на боковой поверхности траншеи, т.е. от  $l$ )

$$\sigma_z^x(M) = l P_x x \alpha'_x \quad (3.22)$$

В этом случае обобщённое решение (3.20) можно представить следующим образом:

$$\sigma_z(M) = \sigma_z^z(M) + \sigma_z^x(M) \text{ или}$$

$$\sigma_z(M) = \sum_{i=1}^n \left( l \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\sigma_{0,i} + k_{x,i}h) x \alpha'_x dh + \int_0^b \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\sigma_{0,i} + k_{x,i}h) x \alpha'_{x,b} db dh + \right. \\ \left. + l \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\tau_{0,i} + k_{z,i}h) \alpha'_{z,l} dh + \int_0^b \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\tau_{0,i} + k_{z,i}h) \alpha'_{z,b} db dh \right) \quad (3.23)$$

### б) Интегрирование по торцевым граням захватки траншеи

С точки зрения математической строгости интегрирование по коротким сторонам траншеи ( $db$ ) необходимо, также, как и по длинным ( $dl$ ) – см. выражение (3.20). Однако на практике давление, действующее по ширине траншеи, не оказывает существенного влияния на фундамент.

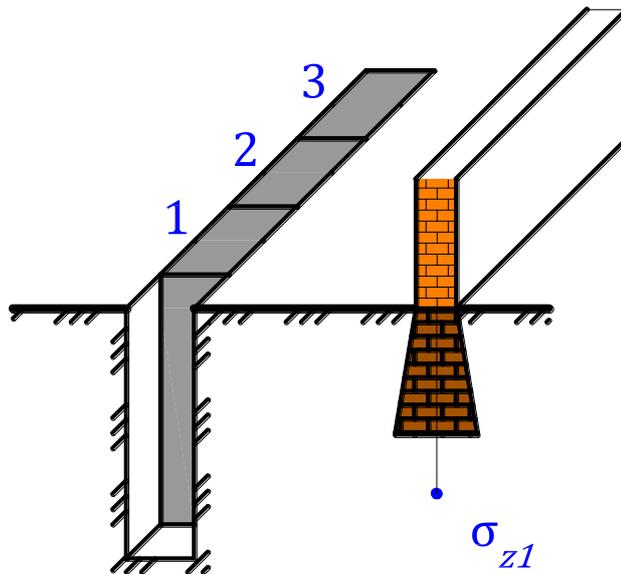


Рисунок 3.7 – Пояснение к второму допущению

На рисунке 3.7 представлена схема устройства «стены в грунте» вблизи существующего фундамента. Цифры обозначают последовательность выполнения захваток. В этом случае, единственной короткой боковой поверхностью траншеи, оказывающей влияние на фундамент, будет ближний к нам торец захватки №1. В случае выполнения захваток в порядке 3–2–1 влияние на осадку будут оказывать

уже три торца. Таким образом, вопрос учёта влияния граней по коротким сторонам траншеи зависит от последовательности производства работ, которая разрабатывается в рамках ППР (проекта производства работ), который обычно разрабатывается после выполнения конструктивной части проекта.

Кроме того, как показывает анализ результатов численного моделирования (см. раздел 2.3), влияние фактора ширины траншеи на величину дополнительной осадки фундаментов является минимальным из всех рассмотренных. Так, влияние длины захватки на дополнительные осадки в 5 раз, а влияние плотности бентонитового раствора в 10 раз больше.

Таким образом, принимаем второе допущение, которое состоит в том, что влиянием напряжений, действующих по короткой стороне сечения траншеи можно пренебречь. Тогда точное решение (3.20) с учётом двух принятых допущений можно представить как:

$$\sigma_z(M) = \sigma_z^z(M) + \sigma_z^x(M) \text{ или} \quad (3.24)$$

$$\sigma_z(M) = \sum_{i=1}^n l \left( x \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\sigma_{0,i} + k_{x,i} h) \alpha'_x dh + \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\tau_{0,i} + k_{z,i} h) \alpha'_z dh \right)$$

### в) Определение напряжений в слое грунта

Решение (3.20) получено для линейно возрастающих с глубиной напряжений, что приводит к необходимости интегрирования произведения функций, так как и значения коэффициентов  $\alpha'_x$  и  $\alpha'_z$ , и значения напряжений, действующих на стенку траншеи, в пределах слоя грунта зависят от глубины  $h$ .

Принимаем допущение о возможности осреднения напряжения в слое грунта. Тогда, за напряжение в слое грунта будем принимать напряжение в середине этого слоя, по аналогии с осреднением напряжений в сжатой зоне бетона.

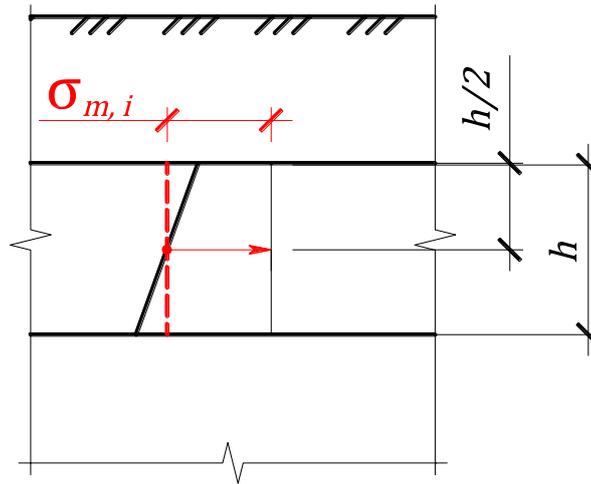


Рисунок 3.8 – Схема к допущению об осреднении напряжений в слое грунта

В результате принятых допущений решение (3.20) может быть представлено следующим выражением:

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

$$\sigma_z(M) = l \sum_{i=1}^n \left( x \sigma_{cp,i} \int_{h_i}^{h_{i+1}} \alpha'_x dh + \tau_{cp,i} \int_{h_i}^{h_{i+1}} \alpha'_z dh \right) \quad (3.25)$$

Полученное таким образом решение для  $\sigma_z(M)$  позволяет интегрировать по глубине только коэффициенты  $\alpha'_x$  и  $\alpha'_z$ , что позволяет получить табулированные значения этих коэффициентов, и избавляет от необходимости при каждом расчёте выполнять операции по интегрированию.

В конечном итоге, после составления таблиц с коэффициентами  $\alpha_x$  и  $\alpha_z$  решение (3.25) можно представить в виде

$$\sigma_z(M) = \sigma_z^z(M) + \sigma_z^x(M) \text{ или}$$

$$\sigma_z(M) = l \sum_{i=1}^n \left( x \sigma_{cp,i} (\alpha_{x,i} - \alpha_{x,i-1}) + \tau_{cp,i} (\alpha_{z,i} - \alpha_{z,i-1}) \right) \quad (3.26)$$

Из выражения (3.26) ясно видны размерности коэффициентов: для  $\alpha_x$  это  $1/m^2$ , а для  $\alpha_z$  –  $1/m$ .

### г) Нагрузка от фундаментов существующих зданий

Решение (3.20) содержит компоненты напряжений, которые помимо давления грунта, вызваны также нагрузками, от фундаментов существующих зданий. Распределение напряжений в массиве грунта от действия полосовой нагрузки хорошо известно. Линии равных горизонтальных и вертикальных напряжений (изобар) для полосовой нагрузки приведены на рисунке 3.9. Как следует из приведённых схем напряжения на расстоянии  $2b$  от центра фундамента в 10 раз меньше давления под подошвой. Для фундаментов зданий центральной части Санкт-Петербурга застройки XVIII – начала XX веков величина  $2b$  составляет 1,5...2 м [83].

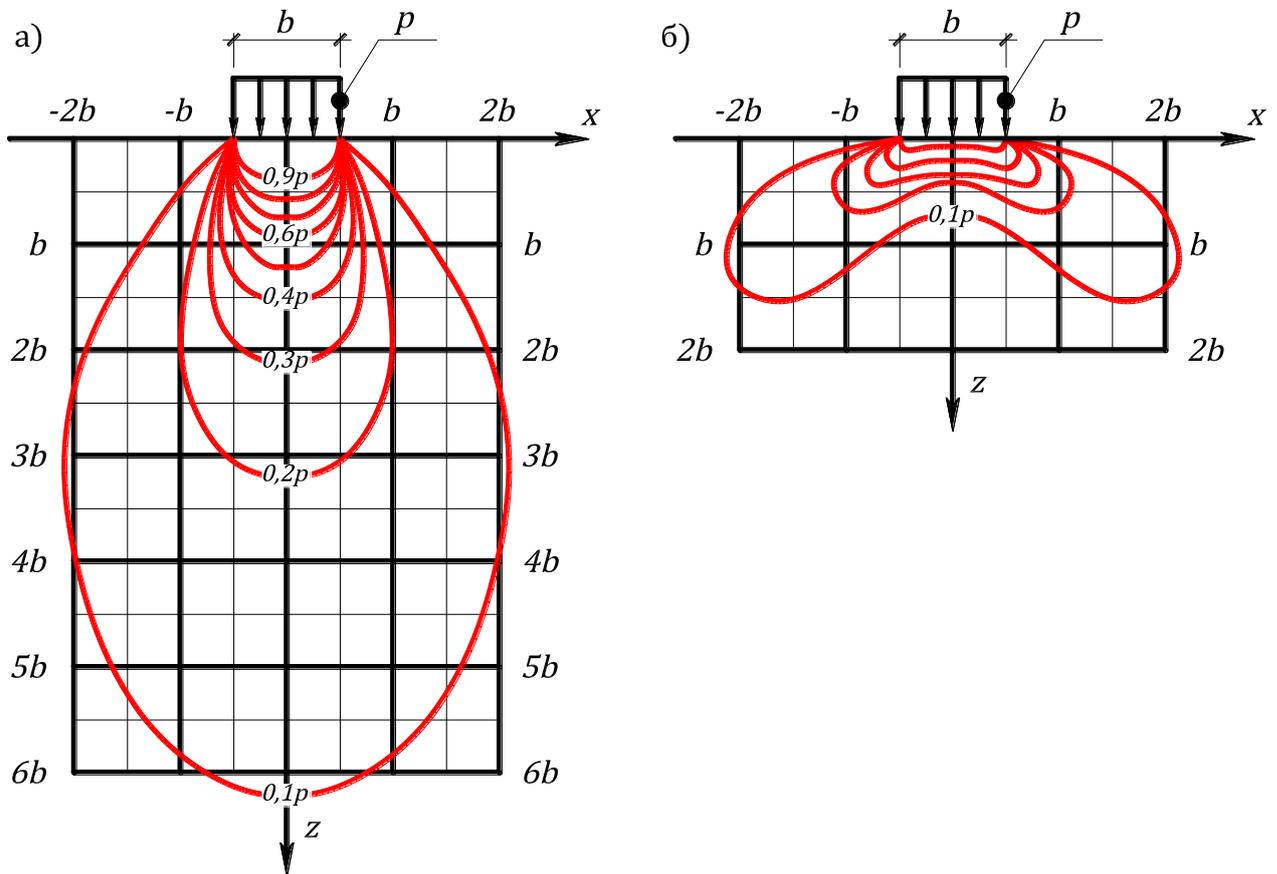


Рисунок 3.9 – Линии равных вертикальных (а) и горизонтальных (б) напряжений для полосовой нагрузки

Для устройства стены в грунте, между ней и стенами существующих зданий должно быть некоторое расстояние, необходимое для нормальной работы строительных механизмов (грейфера, крана и пр.), а также для устройства

форшахты. Как правило, по опыту производства ограждений методом «стена в грунте» в Санкт-Петербурге, расстояние в свету между стеной и существующими зданиями составляет не менее 2...2,5 м.

Таким образом, можно принять допущение о том, что напряжения от фундаментов допустимо не учитывать при расчёте дополнительных осадок существующих зданий при устройстве траншейной стены в грунте предложенным методом.

### Интегрирование коэффициентов $\alpha'_x$ и $\alpha'_z$ по глубине траншеи $h$

Проинтегрировать выражения ( 3.8 ) и ( 3.9 ) аналитическими замкнутыми методами (получить решение в конечном виде) практически невозможно. Выходом из данной ситуации являются специализированные математические программные комплексы (Maple, Mathematica, MatLab и др. [91, 156, 56, 96]), которые позволяют получить приближенные решения, используя различные вариации алгоритма интегрирования, в основном, путём разложения в ряд.

Для решения поставленной задачи был использован математический программный комплекс Maple.

Для получения коэффициентов влияния вертикальных напряжений, действующих по стенкам траншеи проинтегрируем выражение ( 3.3 ) по глубине траншеи  $h$ .

$$\alpha_z = \int \alpha'_z dh = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \int \left[ -\frac{(1-2\mu)(z-h)}{R_1^3} + \frac{(1-2\mu)(z-h)}{R_2^3} - \frac{3(z-h)^3}{R_1^5} - \frac{3(3-4\mu)z(z+h)^2 - 3h(z+h)(5z-h)}{R_2^5} - \frac{30hz(z+h)^3}{R_2^7} \right] dh = \quad (3.27)$$

$$= \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left( \frac{5z^4}{R_2^5} + \frac{2\mu}{R_1} - \frac{2\mu}{R_2} - \frac{3z^2}{R_1^3} - \frac{2r^2}{R_1^3} + \frac{2z^2}{R_2^3} + \frac{2r^2}{R_2^3} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{3h^2}{R_1^3} + \frac{3h^2}{R_2^3} + \frac{15zh^3}{R_2^5} + \frac{5z^2r^2}{R_2^5} + \frac{35z^2h^2}{R_2^5} + \frac{25z^3h}{R_2^5} + \frac{6zh}{R_1^3} - \frac{zh}{R_2^3} - \frac{4z^2\mu}{R_2^3} + \frac{9zhr^2}{R_2^5} - \frac{4h\mu z}{R_2^3} \right)$$

Сгруппируем слагаемые:

$$\alpha_z = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left( \frac{5z^4 + 15h^3z + 5r^2z^2 + 35h^2z^2 + 25hz^3 + 9hr^2z}{R_2^5} + \frac{2z^2 + 2r^2 + 3h^2 - zh - 4\mu z^2 - 4h\mu z}{R_2^3} - \frac{2\mu - 1}{R_2} - \frac{3z^2 + 2r^2 + 3h^2 - 6hz}{R_1^3} + \frac{2\mu - 1}{R_1} \right) \quad (3.28)$$

Для получения коэффициентов влияния горизонтальных напряжений, действующих по стенкам траншеи проинтегрируем выражение (3.5) по глубине траншеи  $h$ .

$$\alpha'_x = \int \alpha'_x dh = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \int \left[ \frac{(1-2\mu)}{R_1^3} - \frac{(1-2\mu)}{R_2^3} - \frac{3(z-h)^2}{R_1^5} - \frac{3(3-4\mu)(z+h)^2 - 6h[h+(z+h)(1-2\mu)]}{R_2^5} - \frac{30hz(z+h)^2}{R_2^7} \right] dh = \quad (3.29)$$

$$= \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left( -\frac{2\mu h}{r^2 R_1} + \frac{2\mu z}{r^2 R_1} + \frac{2\mu h}{r^2 R_2} + \frac{2\mu z}{r^2 R_2} + \frac{4z^3}{r^2 R_2^3} + \frac{8z^3}{r^4 R_2} - \frac{4\mu z}{R_2^3} + \frac{14z^2 h}{R_2^5} + \frac{4zr^2}{R_2^5} + \frac{10zh^2}{R_2^5} + \frac{4hz^2}{r^2 R_2^3} + \frac{8hz^2}{r^4 R_2} - \frac{z}{R_1^3} + \frac{5z}{R_2^3} + \frac{4z^3}{R_2^5} + \frac{h}{R_1^3} - \frac{h}{R_2^3} \right)$$

Сгруппируем слагаемые:

$$\alpha_x = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left( \frac{14hz^2 + 4r^2z + 10h^2z + 4z^3}{R_2^5} + \frac{5z - 4\mu z - h}{R_2^3} + \frac{4z^2(h+z)}{r^2R_2^3} + \frac{8z^2(h+z)}{r^4R_2} + \frac{2\mu(h+z)}{r^2R_2} + \frac{h-z}{R_1^3} - \frac{2\mu(h-z)}{r^2R_1} \right) \quad (3.30)$$

Таким образом, получены выражения коэффициентов ( 3.28 ), ( 3.30 ) для определения вертикального напряжения в произвольной точке пространства от горизонтальных и вертикальных напряжений, действующих по стенкам траншеи.

Для удобства работы с полученными функциями нами составлены таблицы (см. Приложение 4), приведены формулы для вычисления коэффициентов  $\alpha_x$  и  $\alpha_z$  в программе Excel в среде Microsoft Office (см. Приложение 2), а также в программном комплексе Maple, либо других программах или языках программирования (см. Приложение 3).

### **Алгоритм расчёта по предлагаемой методике**

Для реализации поставленной цели– вычисления дополнительной осадки фундамента при устройстве вблизи него захватки траншеи, необходимо построить эпюру дополнительных вертикальных напряжений под подошвой фундамента.

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

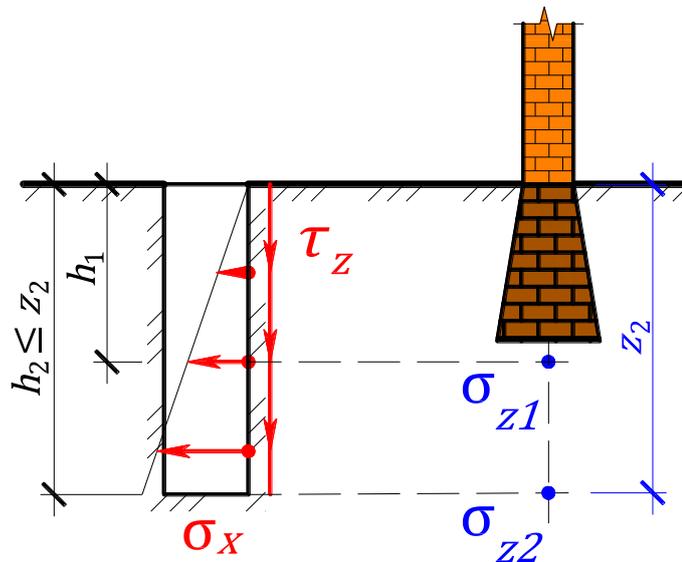


Рисунок 3.10 – Схема к расчёту дополнительных напряжений от разработки траншеи

При этом принимается, что на точку, в которой отыскиваются напряжения, влияет только разработка траншеи до глубины выше рассматриваемой точки. Таким образом, на приведённой расчётной схеме (рисунок 3.10) представлено напряжение  $\sigma_{z1}$ , вызванное разработкой траншеи только до глубины  $h_1$ , а напряжение  $\sigma_{z2}$  – до глубины  $h_2$ .

Так как метод основан на решениях теории упругости, эпюра напряжений будет асимптотически стремиться к нулю с увеличением глубины основания до бесконечности, поэтому, как и в методе расчёта осадки методом послойного суммирования, необходимо ввести ограничение сжимаемой толщи. Деформации окружающей новое строительство застройки по СП 22.13330.2011 жёстко ограничены величинами от 5 до 40 мм. На основе выполненных верификационных расчётов и сравнения результатов с данными мониторинга нами предлагается ограничивать сжимаемую толщину величиной напряжений, вызывающих дополнительную осадку равную 0,1 мм на слой толщиной 1 м.

В результате предлагается следующий алгоритм расчета дополнительной осадки фундаментов соседних с разрабатываемой траншеей зданий:

- 1) строятся эпюры гидростатического давления грунтовых вод  $\sigma_w$ , горизонтального давления грунта в состоянии покоя  $\sigma_0$ , находятся

- результатирующие эпюры нормального горизонтального  $\sigma_x$  и касательного вертикального  $\tau_z$  давлений ( 3.1 );
- 2) выбираются точки для вычисления дополнительных вертикальных напряжений (для вычисления дополнительных осадок фундаментов предлагается расположить точки по оси, проходящей через центр подошвы фундамента, с шагом до 1 м по вертикали);
  - 3) по формулам ( 3.28 ) и ( 3.30 ) определяются коэффициенты  $\alpha_z$  и  $\alpha_x$  для слоёв грунта выше рассматриваемой точки;
  - 4) вычисляются дополнительные напряжения, вызванные разработкой траншеи в слоях грунта выше рассматриваемой точки от вертикальных и горизонтальных напряжений действующих на стенки траншеи;
  - 5) вычисленные напряжения суммируются по слоям, получаем дополнительное напряжение в точке  $\sigma_z(M)$ , вызванное разработкой траншеи;
  - 6) повторяются указанные действия для следующих точек ниже по вертикали проходящей через центр фундамента для построения эпюры дополнительных вертикальных напряжений, вызванных разработкой одной захватки траншеи стены в грунте;
  - 7) аналогичные действия повторяются для соседних захваток до тех пор, пока напряжения от них не будут пренебрежимо малы;
  - 8) по полученным значениям дополнительных напряжений, вычисляем дополнительную осадку фундамента здания, вызванную устройством траншейной «стены в грунте».

### **Выводы по третьей главе**

- 1) Помимо численного вычисления дополнительной осадки зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте, представленного в главе 2, предлагается также и аналитическое, которое может рассматриваться, как

дополнительная проверка численного, так и самостоятельное решение, например, для объектов пониженного уровня ответственности.

2) Поставлена и на основе теории упругости решена задача вычисления дополнительных осадок фундаментов при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте с выводом обобщённого аналитического решения (формула ( 3.20 )).

3) Так как обобщённое решение задачи вычисления дополнительных осадок фундаментов при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте является весьма трудоёмким для практических расчётов из-за необходимости многократного интегрирования сложных функций, то с учётом обоснованных допущений разработан инженерный метод расчёта, позволяющий интегрировать лишь отдельные части (множители) точного решения, обозначенные как коэффициенты  $\alpha'_z$  и  $\alpha'_x$ .

4) В результате интегрирования коэффициентов  $\alpha'_z$  и  $\alpha'_x$  были получены соответствующие выражения  $\alpha_z$  и  $\alpha_x$ , для которых выполнено табулирование (см. Приложение 4). Приведены формулы для вычисления коэффициентов  $\alpha_x$  и  $\alpha_z$  в программе MS Office Excel (см. Приложение 2), а также в программном комплексе Maple, либо в других программах или языках программирования (см. Приложение 3).

#### **ГЛАВА 4. ПРИМЕРЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА ПО РАЗРАБОТАННЫМ МЕТОДИКАМ С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Поставленные в диссертации задачи весьма сложны для масштабного моделирования в условиях лотковых испытаний, вследствие целого ряда сложностей, основная из которых заключается в необходимости моделирования самого процесса устройства стены в грунте (откопки захватки траншеи под защитой глинистого раствора, бетонирования захватки, разработки соседних захваток), а не работы готовой конструкции в грунтовом массиве.

Однако, несмотря на пока ещё недостаточную изученность влияния процесса устройства конструкций ограждения котлованов, выполняемых по технологии стены в грунте, на соседние здания, рассматриваемая технология всё чаще применяется при освоении подземного пространства в условиях слабых грунтов Санкт-Петербурга.

На настоящий момент построено несколько объектов в условиях плотной городской застройки и мощной толщии слабых глинистых грунтов в историческом центре Санкт-Петербурга. За всеми возводящимися в условиях плотной существующей застройки зданиями, в соответствии с требованиями действующих нормативных документов, ведётся геотехнический мониторинг. Геотехнический мониторинг как самих строящихся объектов, так и зданий соседней застройки как раз и может быть рассмотрен в качестве натуральных экспериментов для изучения процесса устройства стены в грунте и его влияния на ближайшие здания. Данные геотехнического мониторинга соседней застройки во многом являются тем 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.

## 4.1 Жилой дом с коммерческими помещениями и подземным паркингом в Петроградском районе Санкт-Петербурга.

### Исходные данные

#### а) Характеристика строящегося здания и зданий окружающей застройки

В 2009–2010 гг. были выполнены работы по строительству в центре города (Зоологический пер., д. 2-4) жилого дома с коммерческими помещениями с трёхуровневым подземным паркингом в сложных инженерно-геологических условиях центральной части Санкт-Петербурга, вблизи существующих зданий.<sup>1</sup>

Новое семиэтажное здание с видом на стрелку Васильевского острова и Зимний дворец спроектировано с трёхуровневым подземным паркингом (рисунок 4.1). Глубина котлована составила 10,9 м от дневной поверхности. Проект предусматривал устройство подземного пространства по методу «top-down».

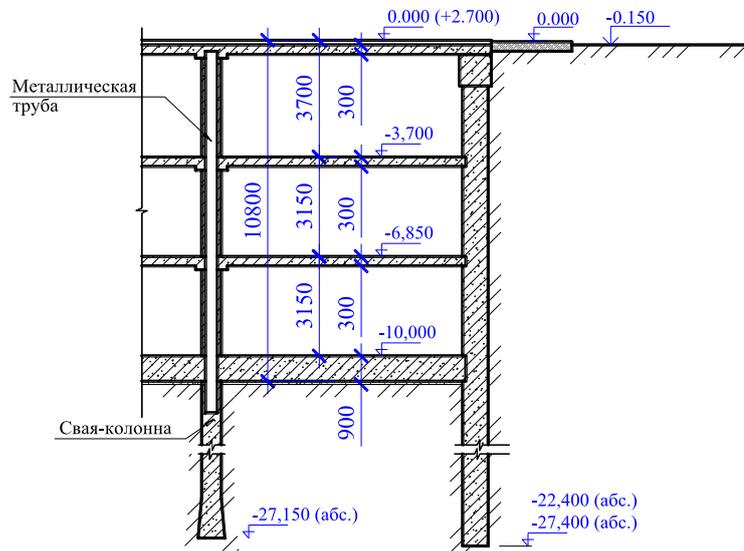


Рисунок 4.1 – Разрез подземной части здания

В качестве ограждения котлована была принята стена в грунте толщиной 0,8 м. Вблизи существующих зданий для увеличения жёсткости ограждения были выполнены захватки с контрфорсами, сечением 0,8×2,5 м, расположенные

<sup>1</sup> Работы выполнены компанией «ГЕОИЗОЛ»

поочерёдно с обычными плоскими секциями, таким образом шаг контрфорсов составил 6,6 м (рисунки 4.2, 4.3).

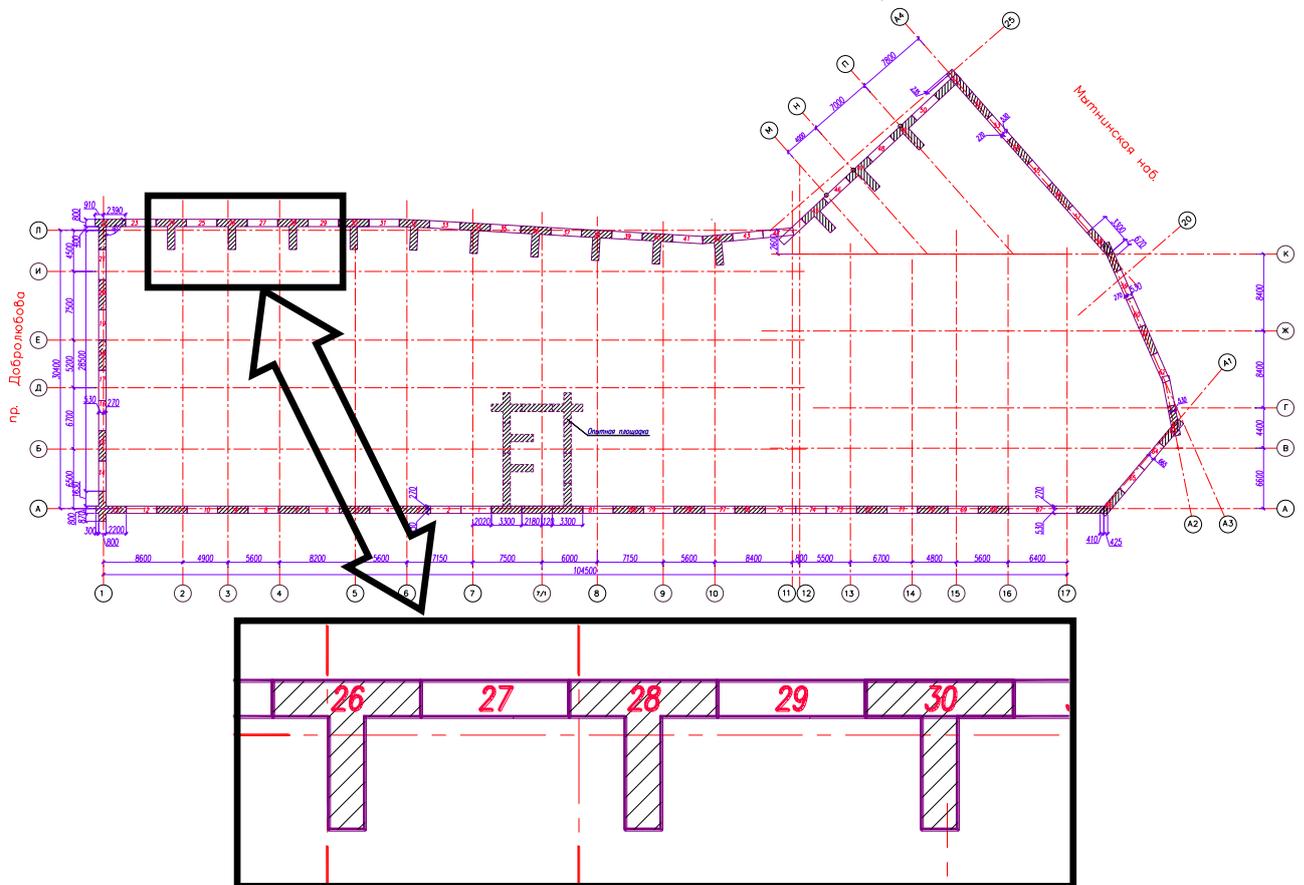


Рисунок 4.2 – Конструктивное решение ограждения котлована



Рисунок 4.3 – Выполненные тавровые захваты, форшахта ещё не демонтирована

Окружающая площадку строительства застройка представлена историческими четырёх-шестиэтажными кирпичными зданиями на бутовых ленточных фундаментах с глубиной заложения 2,5...3 м. Новое здание вплотную примыкает к двум существующим жилым зданиям. Минимальное расстояние между стенами в грунте и фундаментами соседней застройки составляет 1,7 м.

В соответствии с действующими нормативными документами за всей окружающей застройкой проводился постоянный геотехнический мониторинг, результаты которого рассмотрены далее.

### б) Инженерно-геологические условия площадки

Основанием для фундаментов существующей застройки служат водонасыщенные пылеватые пески, классифицируемые по ГОСТ 25100-2011 как сильнодеформируемые. Пески подстилаются текучими морскими и озёрно-ледниковыми очень сильно деформируемыми суглинками. Ниже, с глубины 11,4 м, залегают моренные среднедеформируемые супеси и суглинки. Моренные отложения подстилаются коренными породами – твёрдыми среднедеформируемыми протерозойскими глинами (рисунок 4.4).

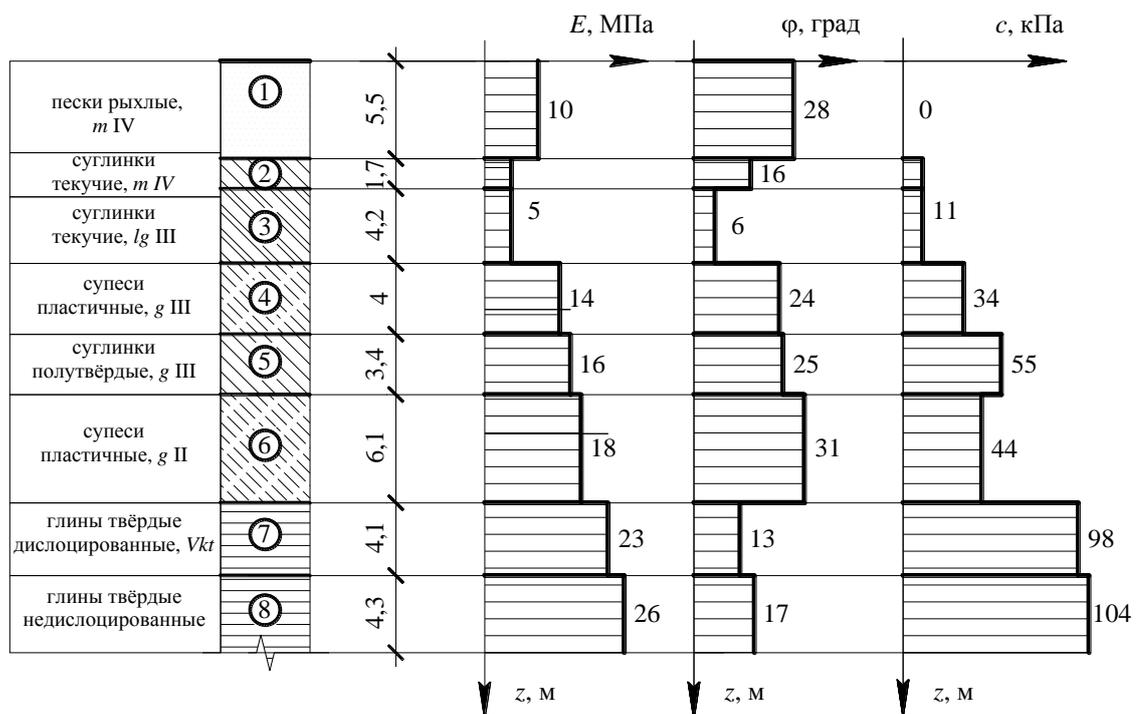


Рисунок 4.4 – Инженерно-геологические условия площадки

Физико-механические характеристики грунтов, слагающих площадку, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Физико-механические свойства грунтов

№	Грунт	$\gamma$ , кН / м <sup>3</sup>	$E$ , МПа	$c$ , кН / м <sup>2</sup>	$\phi$ , град
1	пески рыхлые	19,1	10	0	28
2	суглинки текучие	18,9	5	11	16
3	суглинки текучие	18,3	5	11	6
4	супеси пластичные	21,7	14	34	24
5	суглинки полутвёрдые	21,4	16	55	25
6	супеси пластичные	22,0	18	44	31
7	глины твёрдые, дислоцированные	20,9	23	98	13
8	глины твёрдые, недислоцированные	21,4	26	104	17

### **Численный метод прогноза осадки фундамента при устройстве вблизи него траншейной стены в грунте**

Решение задачи об осадке фундаментов, вызванной устройством вблизи них траншейной стены в грунте с помощью численного моделирования в пространственной постановке, производилось путём поэтапного моделирования технологических операций, проводимых на площадке при устройстве траншейной стены в грунте. Методика численного моделирования поставленной задачи подробно приведена в главе 2.

Как отмечалось ранее, при устройстве ограждения с применением тавровых захваток важную роль играет последовательность их выполнения. При численном моделировании устройства ограждения принят наиболее щадящий для зданий режим. Вначале устраивались плоские секции стены в грунте, затем между ними выполнялись участки таврового сечения.

Расчётная схема для определения осадки здания от устройства стены в грунте представлена на рисунке 4.5, а последовательность устройства секций – на рисунке 4.6.

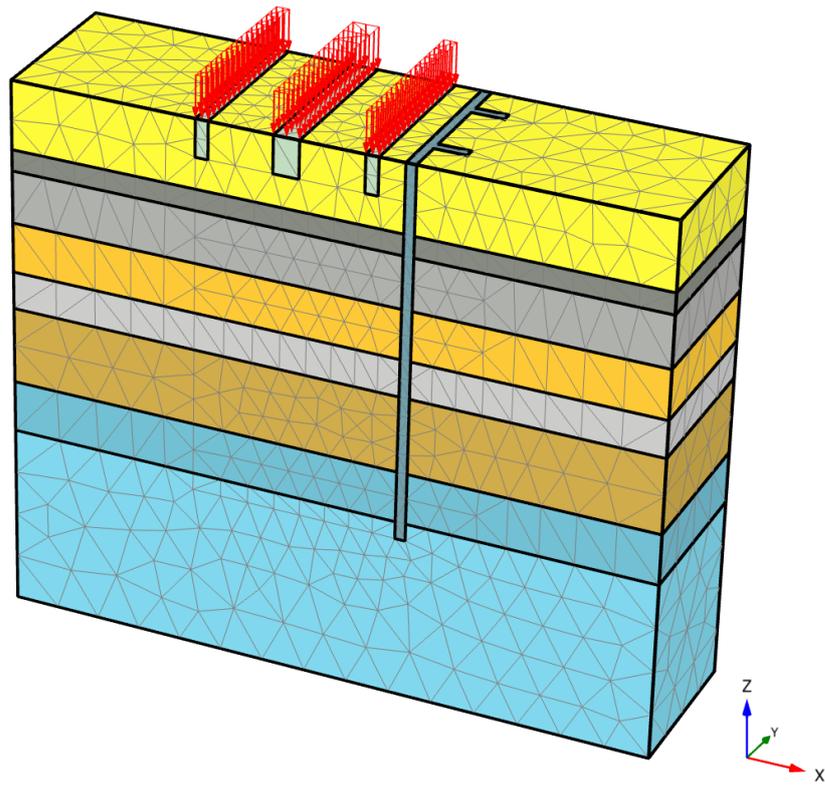


Рисунок 4.5 – Конечно-элементная расчётная схема для вычисления дополнительных осадок здания при устройстве возле него стены в грунте

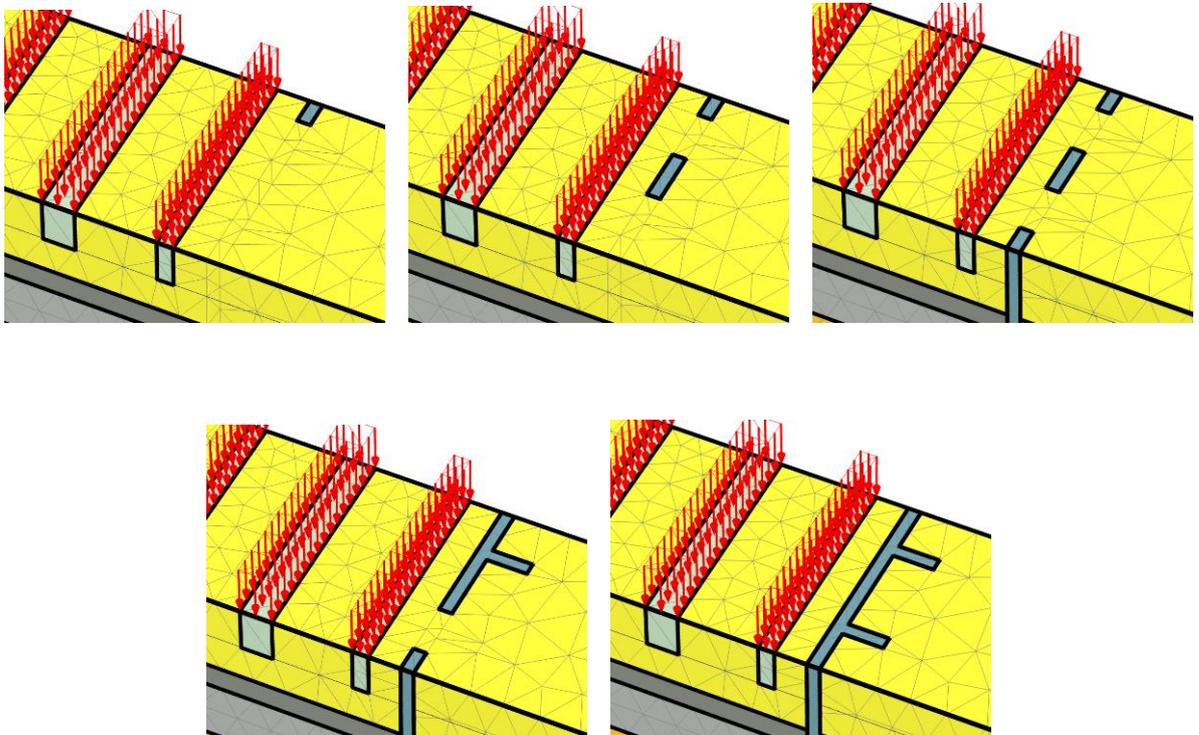


Рисунок 4.6 – Последовательность устройства захваток стены в грунте

Полученные в результате расчёта изополя дополнительных вертикальных перемещений в грунтовом массиве приведены на рисунке 4.7, дополнительные осадки фундаментов здания представлены на рисунке 4.8.

В результате численного моделирования по предлагаемой методике получено значение расчётной осадки фундамента ближайшего здания равное 26 мм.

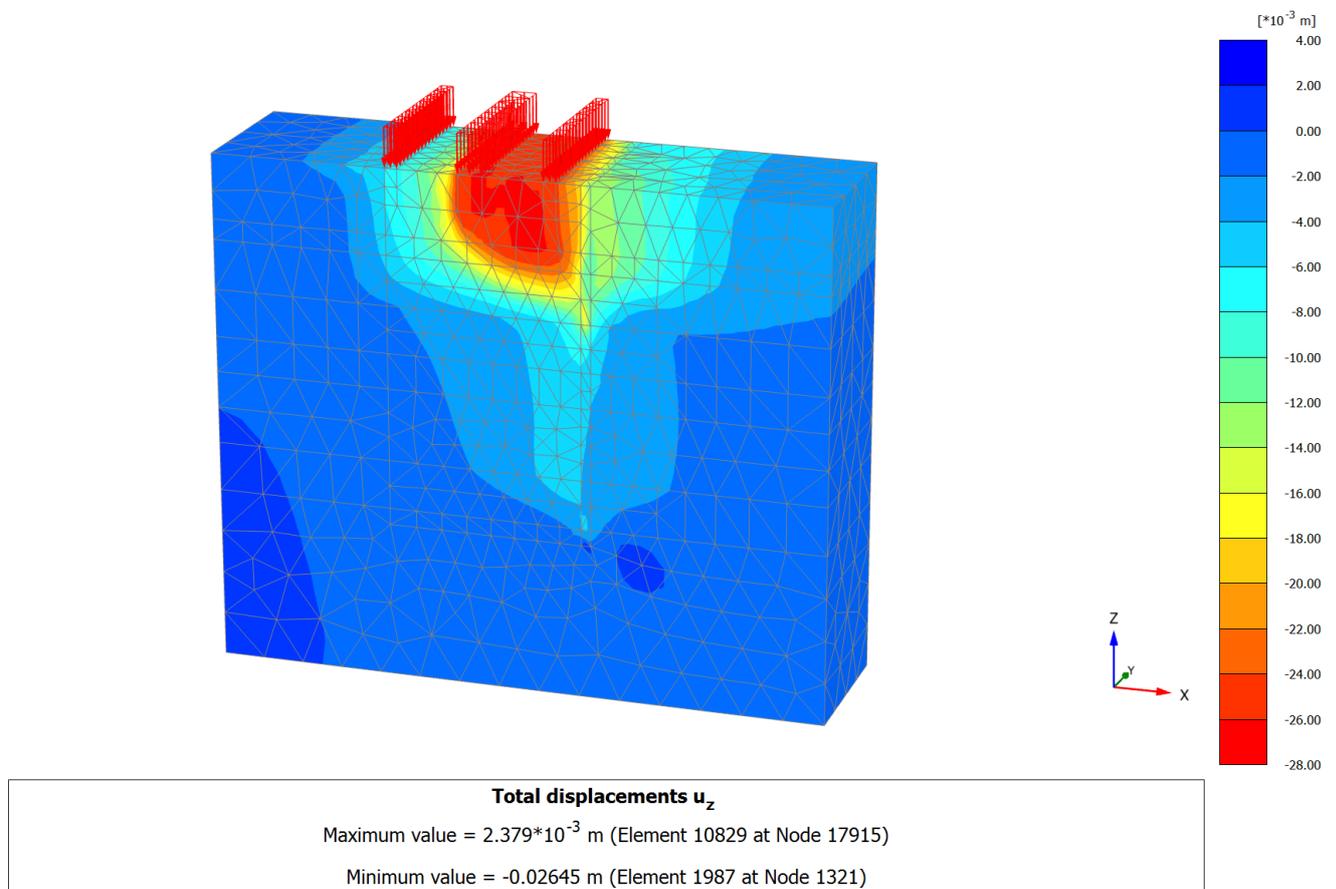


Рисунок 4.7 – Изополя дополнительных вертикальных перемещений в грунтовом массиве, вызванные устройством стены в грунте

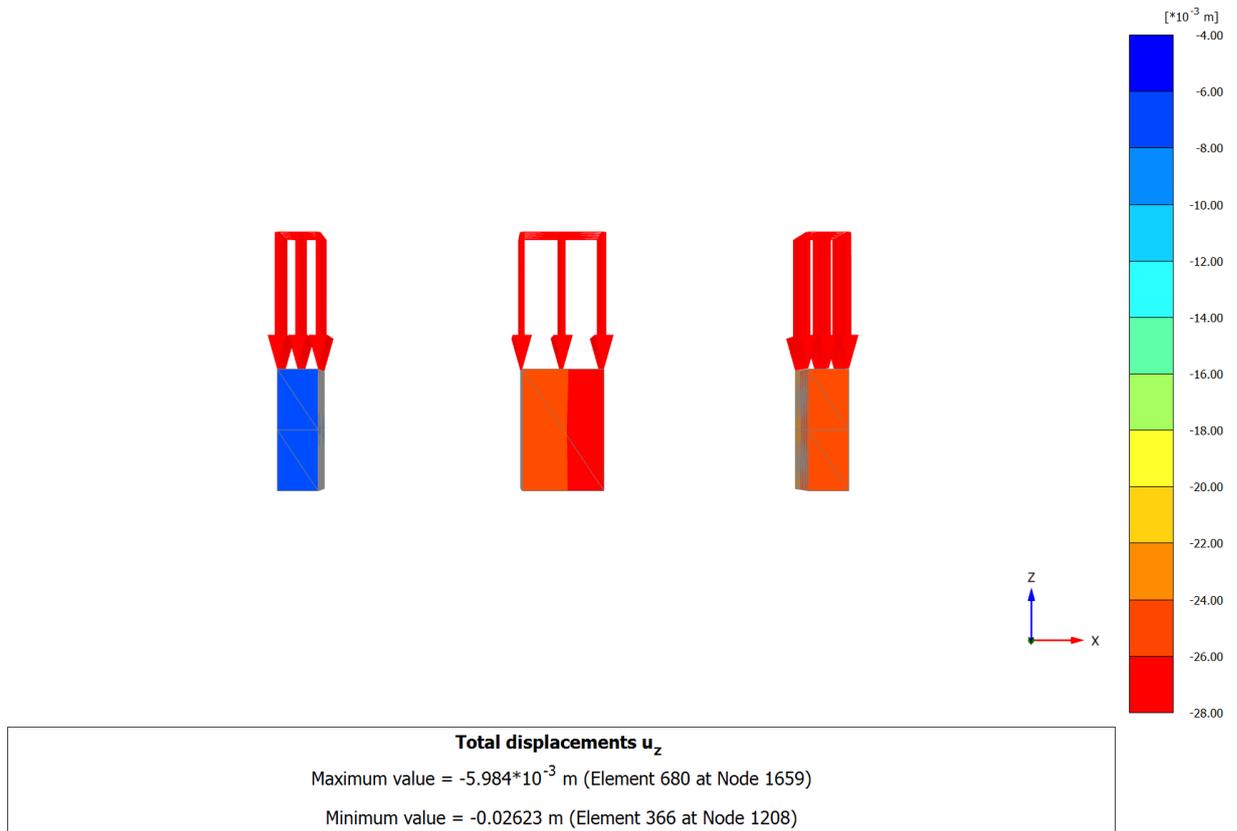


Рисунок 4.8 – Дополнительные осадки фундаментов здания, вызванные устройством стены в грунте

### Аналитическое решение задачи прогноза осадки фундамента при устройстве вблизи него траншейной стены в грунте

Рассмотрим аналитическое решение задачи о напряжённо-деформированном состоянии грунтового массива при разработке траншейной «стены в грунте» на основе решений, полученных в главе 3.

Последовательность расчёта по предлагаемой методике представлена в разделе 3.3.

Вначале строятся эпюры гидростатического давления грунтовой воды  $\sigma^w$ , глинистого раствора  $\sigma^{гл}$ , бокового давления грунта в состоянии покоя (давления покоя)  $\sigma_0$ . Для вычисления давления покоя грунта необходимо будет дополнительно построить эпюру вертикального давления грунта  $\sigma_z^{гп}$ .

Различные составляющие давления в грунте определяются по ( 4.1 ).

$$\begin{aligned}\sigma_z^{zp} &= \sum \gamma_i h_i \\ \sigma_0 &= \sigma_z^{zp} \frac{\nu}{1-\nu} \\ \sigma^w &= \sum \gamma_i^w h_i^w \\ \sigma^{zl} &= \sum \gamma_i^{zl} h_i^{zl}\end{aligned}\quad (4.1)$$

Далее вычисляется вертикальное касательное давление  $\tau_z$  и суммарное горизонтальное нормальное  $\sigma_x$  по (4.2).

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_0 + \sigma_w - \sigma_{zl} \\ \tau_z &= \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi\end{aligned}\quad (4.2)$$

Ниже в таблице 4.2 приведены величины давлений воды и глинистого раствора, вертикальное напряжение от веса грунта, давление покоя и суммарное горизонтальное давление на стенку траншеи для рассматриваемой площадки. По этим данным построены эпюры (рисунок 4.9).

Таблица 4.2 – Данные для построения эпюр давлений по глубине

$$\gamma_{\text{гл}} = 12 \text{ кН/м}^3$$

ИГЭ	$z_i$ , м	$\gamma$ ( $\gamma_{sb}$ ), кН/м <sup>3</sup>	$\varphi_i$ , °	$\operatorname{tg} \varphi$	$c$ , кПа	$\nu$	$E$ , МПа	$\sigma_z^{zp}$ , кПа	$\sigma^w$ , кПа	$\sigma_0$ , кПа	$\sigma^{zl}$ , кПа	$\sigma_x$ , кПа	$\tau_z$ , кПа
1	0	19.1	28	0.53	0	0.3	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3							57.3	0.0	-24.6	36.0	11.4	-13.1
1	3	9.1	28	0.53	0	0.3	10	57.3	0.0	-24.6	36.0	11.4	-13.1
	5.5							80.1	-25.0	-34.3	66.0	6.7	-18.2
2	5.5	8.9	16	0.29	11	0.3	5	80.1	-25.0	-34.3	66.0	6.7	-9.8
	7.2							95.2	-42.0	-40.8	86.4	3.6	-11.7
3	7.2	8.3	6	0.11	11	0.35	5	95.2	-42.0	-51.3	86.4	-6.9	-5.4
	11.4							130.0	-84.0	-70.0	136.8	-17.2	-7.4
4	11.4	21.7	24	0.45	34	0.35	14	214.0	0.0	-115.3	136.8	21.5	-51.3
	15.4							300.8	0.0	-162.0	184.8	22.8	-72.1
5	15.4	21.4	25	0.47	55	0.3	16	300.8	0.0	-128.9	184.8	55.9	-60.1
	18.8							373.6	0.0	-160.1	225.6	65.5	-74.7
6	18.8	22	31	0.6	44	0.35	18	373.6	0.0	-201.2	225.6	24.4	-120.9
	24.9							507.8	0.0	-273.4	298.8	25.4	-164.3
7	24.9	20.9	13	0.23	98	0.2	23	507.8	0.0	-127.0	298.8	171.9	-29.3
	29							593.5	0.0	-148.4	348.0	199.6	-34.3
8	29	21.4	17	0.31	104	0.2	26	593.5	0.0	-148.4	348.0	199.6	-45.4
	30							614.9	0.0	-153.7	360.0	206.3	-47.0

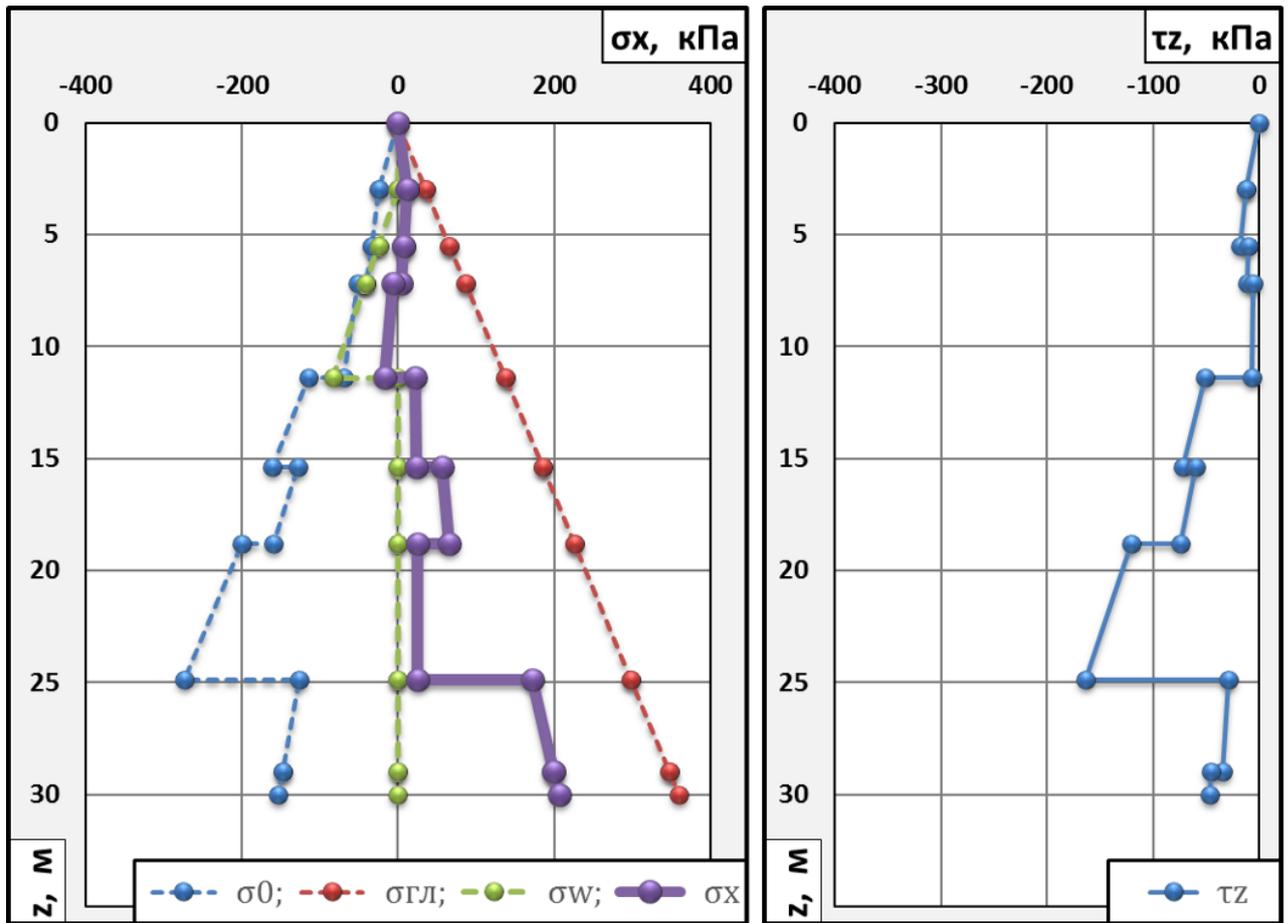


Рисунок 4.9 – Эпюры давлений, действующих на стенку траншеи: гидростатического давления грунтовой воды  $\sigma^W$ , глинистого раствора  $\sigma^{ГЛ}$ , бокового давления грунта в состоянии покоя  $\sigma_0$ , суммарное горизонтальное нормальное  $\sigma_x$ , вертикальное касательное давление  $\tau_z$

Дополнительные напряжения в точке, расположенной на оси проходящей через центр подошвы фундамента и ниже, вызываются влиянием разработки участка траншеи, расположенного выше этой точки.

Обозначим номера захваток стены в грунте относительно сечения ленточного фундамента, для которого вычисляется осадка. Захватку, расположенную прямо напротив расчётного сечения, обозначим как нулевую (рисунок 4.10), смежные с нулевой захватки обозначим как первые и так далее.

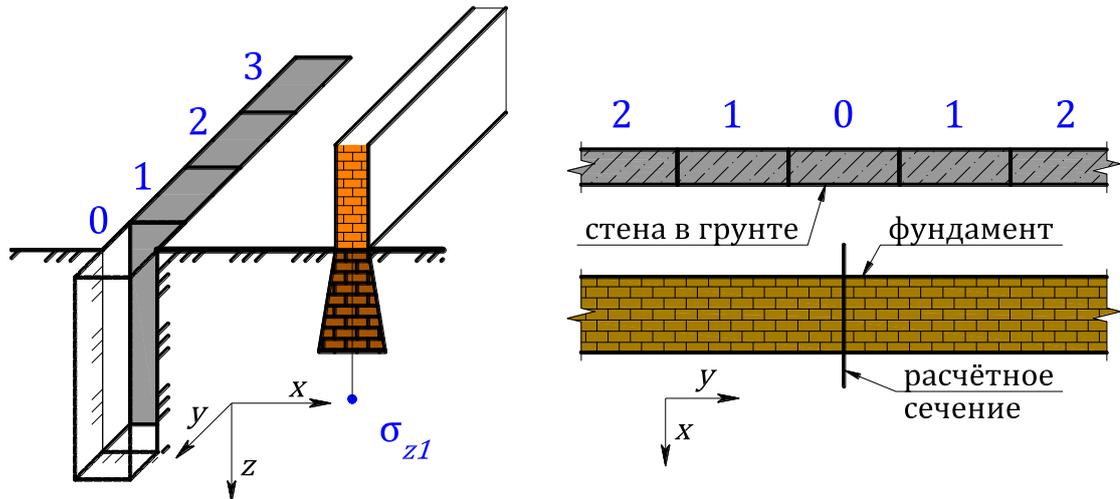


Рисунок 4.10 – Нумерация захваток

Расчёты представим в табличной форме.

Вычислим дополнительные вертикальные напряжения, вызванные разработкой нулевой захватки, в точках, расположенных на вертикальной оси, проходящей через центр расчётного сечения фундамента.

Определим значения суммарного горизонтального нормального  $\sigma_x$  и вертикального касательного давления  $\tau_z$ . По формулам (3.7) определяются расстояния  $R_1$  и  $R_2$ . Далее вычисляются коэффициенты  $\alpha_z$  и  $\alpha_x$  по (3.28) и (3.30). Суммарное дополнительное напряжение в рассматриваемой точке  $\Sigma\sigma_z$  складывается из напряжений, вызванных вертикальным касательным давлением  $\tau_z - \sigma_z^z$  и горизонтальным нормальным давлением  $\sigma_x - \sigma_z^x$ . Эти составляющие –  $\sigma_z^z$  и  $\sigma_z^x$  – являются двумя слагаемыми из выражения (3.26).

$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$z, \text{ м}$	$r, \text{ м}$
2.2	0	3	2.2

$$\Sigma\sigma_z = 0.40 \text{ кПа}$$

ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}, \text{ м}$	$\nu$	$\tau_z, \text{ кПа}$	$\sigma_x, \text{ кПа}$	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z, \text{ кПа}$	$\sigma_z^x, \text{ кПа}$
1	0	0.3	0.0	0.0	3.7	3.7	0.0278201	0.1994021	0.931	-0.535
	3		-13.1	11.4	2.2	6.4	-0.0153983	0.1865317		

Таким образом, в точке, удалённой от траншеи на 2,2 м в плане, и находящейся на 3 м ниже уровня дневной поверхности дополнительное

вертикальное напряжение от устройства части захватки стены в грунте на глубину 3 м составит 0,4 кПа.

Далее повторим эту операцию для точек, расположенных с шагом 1 м ниже первой по оси  $z$ , а также на границах слоёв грунта.

$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$z, \text{ м}$	$r, \text{ м}$
2.2	0	4	2.2

$$\Sigma\sigma_z = 0.79 \text{ кПа}$$

ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}, \text{ м}$	$\nu$	$\tau_z, \text{ кПа}$	$\sigma_x, \text{ кПа}$	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z, \text{ кПа}$	$\sigma_z^x, \text{ кПа}$
1	0	0.3	0.0	0.0	4.6	4.6	0.0267666	0.3323413	0.955	-0.486
	3		-13.1	11.4	2.4	7.3	-0.0175807	0.3206295		
1	3	0.3	-13.1	11.4	2.4	7.3	-0.0175807	0.3206295	0.326	-0.002
	4		-15.1	9.5	2.2	8.3	-0.0245831	0.3206072		

$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$z, \text{ м}$	$r, \text{ м}$
2.2	0	5	2.2

$$\Sigma\sigma_z = 1.15 \text{ кПа}$$

ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}, \text{ м}$	$\nu$	$\tau_z, \text{ кПа}$	$\sigma_x, \text{ кПа}$	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z, \text{ кПа}$	$\sigma_z^x, \text{ кПа}$
1	0	0.3	0.0	0.0	5.5	5.5	0.0244097	0.5049725	0.854	-0.364
	3		-13.1	11.4	3.0	8.3	-0.0152346	0.4962008		
1	3	0.3	-13.1	11.4	3.0	8.3	-0.0152346	0.4962008	0.790	-0.129
	5		-17.2	7.6	2.2	10.2	-0.0310486	0.4943358		

$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$z, \text{ м}$	$r, \text{ м}$
2.2	0	5.5	2.2

$$\Sigma\sigma_z = 1.35 \text{ кПа}$$

ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}, \text{ м}$	$\nu$	$\tau_z, \text{ кПа}$	$\sigma_x, \text{ кПа}$	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z, \text{ кПа}$	$\sigma_z^x, \text{ кПа}$
1	0	0.3	0.0	0.0	5.9	5.9	0.0231617	0.6061147	0.778	-0.302
	3		-13.1	11.4	3.3	8.8	-0.0129659	0.5988453		
1	3	0.3	-13.1	11.4	3.3	8.8	-0.0129659	0.5988453	1.064	-0.192
	5.5		-18.2	6.7	2.2	11.2	-0.0335634	0.5959253		

$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$z, \text{ м}$	$r, \text{ м}$
2.2	0	6.5	2.2

$$\Sigma\sigma_z = 1.55 \text{ кПа}$$

ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}, \text{ м}$	$\nu$	$\tau_z, \text{ кПа}$	$\sigma_x, \text{ кПа}$	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z, \text{ кПа}$	$\sigma_z^x, \text{ кПа}$
1	0	0.3	0.0	0.0	6.9	6.9	0.0208091	0.8378967	0.628	-0.204
	3		-13.1	11.4	4.1	9.8	-0.0083177	0.8329846		
1	3	0.3	-13.1	11.4	4.1	9.8	-0.0083177	0.8329846	1.311	-0.355
	5.5		-18.2	6.7	2.4	12.2	-0.0336940	0.8275867		
2	5.5	0.3	-9.8	6.7	2.4	12.2	-0.0336940	0.8275867	0.133	0.035
	6.5		-10.9	4.9	2.2	13.2	-0.0375872	0.8284134		

$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$z, \text{ м}$	$r, \text{ м}$
2.2	0	7.2	2.2

$$\Sigma \sigma_z = 1.66 \text{ кПа}$$

ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}, \text{ м}$	$\nu$	$\tau_z, \text{ кПа}$	$\sigma_x, \text{ кПа}$	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z, \text{ кПа}$	$\sigma_z^x, \text{ кПа}$
1	0	0.3	0.0	0.0	7.5	7.5	0.0193348	1.0234628	0.537	-0.156
	3		-13.1	11.4	4.7	10.4	-0.0055783	1.0196976		
1	3	0.3	-13.1	11.4	4.7	10.4	-0.0055783	1.0196976	1.314	-0.338
	5.5		-18.2	6.7	2.8	12.9	-0.0310268	1.0145563		
2	5.5	0.3	-9.8	6.7	2.8	12.9	-0.0310268	1.0145563	0.312	-0.008
	7.2		-11.7	3.6	2.2	14.6	-0.0398098	1.0143536		

Если подобным образом выполнить вычисления дополнительных напряжений до глубины 45 м, а затем рассчитать дополнительную осадку методом послойного суммирования, то получим результаты, приведённые в таблице 4.3. При этом, согласно предлагаемой методике, в случае если осадка в слое грунта имеет величину менее 0,1 мм, она обнуляется.

Выполним аналогичные вычисления для двух соседних смежных захваток (№1 по рисунку 4.10). Для захваток одинаковой длины, расположенных симметрично относительно расчётного сечения, расчёт выполняем только для одной захватки (таблица 4.4), а полученную дополнительную осадку умножим на два.

Таким образом, осадка, вызванная устройством трёх захваток, составит:

$$11,2 + 5,4 \times 2 = 22,0 \text{ мм} \quad (4.3)$$

Выполним аналогичные вычисления для двух следующих соседних смежных захваток (№2 по рисунку 4.10). Результаты вычислений сведены в таблицу 4.5.

Таким образом, осадка, вызванная устройством трёх захваток, составит:

$$11,2 + 5,4 \times 2 + 1,6 \times 2 = 25,2 \text{ мм} \quad (4.4)$$

Далее, выполним аналогичные вычисления для двух следующих соседних смежных захваток №3. Результаты вычислений сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.3 – Дополнительные вертикальные напряжения и дополнительные осадки при производстве захватки стены в грунте с №0 по рис. 4.10

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$S_{\text{доп}}$ , мм
3.0	0	0.40	0.00
4.0	10	0.79	0.00
5.0	10	1.15	0.00
5.5	10	1.35	0.00
6.5	5	1.55	0.25
7.2	5	1.66	0.19
8.2	5	1.64	0.26
9.2	5	1.78	0.28
10.2	5	1.95	0.31
11.2	5	2.10	0.34
11.4	5	2.13	0.00
12.4	14	2.66	0.15
13.4	14	3.28	0.19
14.4	14	4.28	0.24
15.4	14	5.44	0.31
16.4	16	6.69	0.33
17.4	16	7.16	0.36
18.4	16	7.40	0.37
18.8	16	7.51	0.15
19.8	18	7.64	0.34
20.8	18	9.44	0.42
21.8	18	12.01	0.53
22.8	18	14.49	0.64
23.8	18	16.66	0.74

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$S_{\text{доп}}$ , мм
24.8	18	18.55	0.82
24.9	18	18.72	0.00
25.9	23	21.57	0.75
26.9	23	19.65	0.68
27.9	23	15.90	0.55
28.9	23	12.58	0.44
29.0	23	12.29	0.00
30.0	26	10.16	0.31
31.0	26	5.60	0.17
32.0	26	4.72	0.15
33.0	26	4.85	0.15
34.0	26	4.82	0.15
35.0	26	4.59	0.14
36.0	26	4.28	0.13
37.0	26	3.95	0.12
38.0	26	3.64	0.11
39.0	26	3.35	0.10
40.0	26	3.08	0.00
41.0	26	2.85	0.00
42.0	26	2.64	0.00
43.0	26	2.45	0.00
44.0	26	2.28	0.00
45.0	26	2.13	0.00

Дополнительная осадка от  
разработки одной захватки:

$$\Sigma s_{\text{доп}} = 11.20 \text{ мм}$$

Таблица 4.4 – Дополнительные вертикальные напряжения и дополнительные осадки при производстве захватки стены в грунте с №1 по рис. 4.10

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$S_{\text{доп}}$ , мм
3.0	0	0.09	0.00
4.0	10	0.28	0.00
5.0	10	0.48	0.00
5.5	10	0.58	0.00
6.5	5	0.71	0.11
7.2	5	0.78	0.00
8.2	5	0.83	0.13
9.2	5	0.88	0.14
10.2	5	0.93	0.15
11.2	5	0.98	0.16
11.4	5	0.99	0.00
12.4	14	1.20	0.00
13.4	14	1.42	0.00
14.4	14	1.74	0.00
15.4	14	2.16	0.12
16.4	16	2.66	0.13
17.4	16	3.10	0.15
18.4	16	3.46	0.17
18.8	16	3.60	0.00
19.8	18	3.85	0.17
20.8	18	4.27	0.19
21.8	18	4.95	0.22
22.8	18	5.82	0.26
23.8	18	6.78	0.30

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$S_{\text{доп}}$ , мм
24.8	18	7.75	0.34
24.9	18	7.85	0.00
25.9	23	8.99	0.31
26.9	23	9.55	0.33
27.9	23	9.41	0.33
28.9	23	8.81	0.31
29.0	23	8.74	0.00
30.0	26	8.02	0.25
31.0	26	6.65	0.20
32.0	26	5.65	0.17
33.0	26	5.02	0.15
34.0	26	4.60	0.14
35.0	26	4.25	0.13
36.0	26	3.93	0.12
37.0	26	3.64	0.11
38.0	26	3.37	0.10
39.0	26	3.12	0.00
40.0	26	2.90	0.00
41.0	26	2.69	0.00
42.0	26	2.51	0.00
43.0	26	2.34	0.00
44.0	26	2.19	0.00
45.0	26	2.05	0.00

Дополнительная осадка от  
разработки одной захватки:

$$\Sigma S_{\text{доп}} = 5.43 \text{ мм}$$

Таблица 4.5 – Дополнительные вертикальные напряжения и дополнительные осадки при производстве захватки стены в грунте с №2 по рис. 4.10

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$S_{\text{доп}}$ , мм
3.0	0	0.01	0.00
4.0	10	0.05	0.00
5.0	10	0.13	0.00
5.5	10	0.17	0.00
6.5	5	0.24	0.00
7.2	5	0.29	0.00
8.2	5	0.33	0.00
9.2	5	0.38	0.00
10.2	5	0.41	0.00
11.2	5	0.45	0.00
11.4	5	0.45	0.00
12.4	14	0.57	0.00
13.4	14	0.69	0.00
14.4	14	0.81	0.00
15.4	14	0.96	0.00
16.4	16	1.11	0.00
17.4	16	1.28	0.00
18.4	16	1.46	0.00
18.8	16	1.53	0.00
19.8	18	1.73	0.00
20.8	18	1.93	0.00
21.8	18	2.17	0.00
22.8	18	2.45	0.11
23.8	18	2.77	0.12

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$S_{\text{доп}}$ , мм
24.8	18	3.13	0.14
24.9	18	3.17	0.00
25.9	23	3.54	0.12
26.9	23	3.87	0.13
27.9	23	4.12	0.14
28.9	23	4.26	0.15
29.0	23	4.26	0.00
30.0	26	4.30	0.13
31.0	26	4.12	0.13
32.0	26	3.89	0.12
33.0	26	3.67	0.11
34.0	26	3.46	0.11
35.0	26	3.27	0.10
36.0	26	3.08	0.00
37.0	26	2.91	0.00
38.0	26	2.75	0.00
39.0	26	2.59	0.00
40.0	26	2.45	0.00
41.0	26	2.31	0.00
42.0	26	2.18	0.00
43.0	26	2.06	0.00
44.0	26	1.95	0.00
45.0	26	1.84	0.00

Дополнительная осадка от  
разработки одной захватки:

$$\Sigma s_{\text{доп}} = 1.62 \text{ мм}$$

Таблица 4.6 – Дополнительные вертикальные напряжения и дополнительные осадки при производстве захватки стены в грунте с №3 по рис. 4.10

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$S_{\text{доп}}$ , мм
3.0	0	0.00	0.00
4.0	10	0.01	0.00
5.0	10	0.03	0.00
5.5	10	0.05	0.00
6.5	5	0.08	0.00
7.2	5	0.11	0.00
8.2	5	0.14	0.00
9.2	5	0.17	0.00
10.2	5	0.20	0.00
11.2	5	0.22	0.00
11.4	5	0.23	0.00
12.4	14	0.31	0.00
13.4	14	0.40	0.00
14.4	14	0.48	0.00
15.4	14	0.57	0.00
16.4	16	0.65	0.00
17.4	16	0.74	0.00
18.4	16	0.83	0.00
18.8	16	0.87	0.00
19.8	18	1.00	0.00
20.8	18	1.13	0.00
21.8	18	1.27	0.00
22.8	18	1.42	0.00
23.8	18	1.58	0.00

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$S_{\text{доп}}$ , мм
24.8	18	1.76	0.00
24.9	18	1.78	0.00
25.9	23	1.92	0.00
26.9	23	2.06	0.00
27.9	23	2.20	0.00
28.9	23	2.32	0.00
29.0	23	2.33	0.00
30.0	26	2.43	0.00
31.0	26	2.44	0.00
32.0	26	2.43	0.00
33.0	26	2.40	0.00
34.0	26	2.35	0.00
35.0	26	2.29	0.00
36.0	26	2.23	0.00
37.0	26	2.16	0.00
38.0	26	2.08	0.00
39.0	26	2.01	0.00
40.0	26	1.93	0.00
41.0	26	1.86	0.00
42.0	26	1.78	0.00
43.0	26	1.71	0.00
44.0	26	1.64	0.00
45.0	26	1.57	0.00

Дополнительная осадка от  
разработки одной захватки:

$$\Sigma s_{\text{доп}} = 0.00 \text{ мм}$$

Результаты расчётов показывают, что захваты, выполняемые на расстоянии  $4l_{\text{захв}}$  (в нашем случае  $\approx 13$  м) от расчётного сечения фундамента, уже не оказывают существенного влияния на осадку здания.

Таким образом, общая осадка фундамента составляет 25,2 мм.

Эпюры дополнительных вертикальных напряжений в массиве грунта по вертикальной оси, проходящей через центр фундамента, вызванные устройством нескольких захваток стены в грунте, приведены на рисунке 4.11.

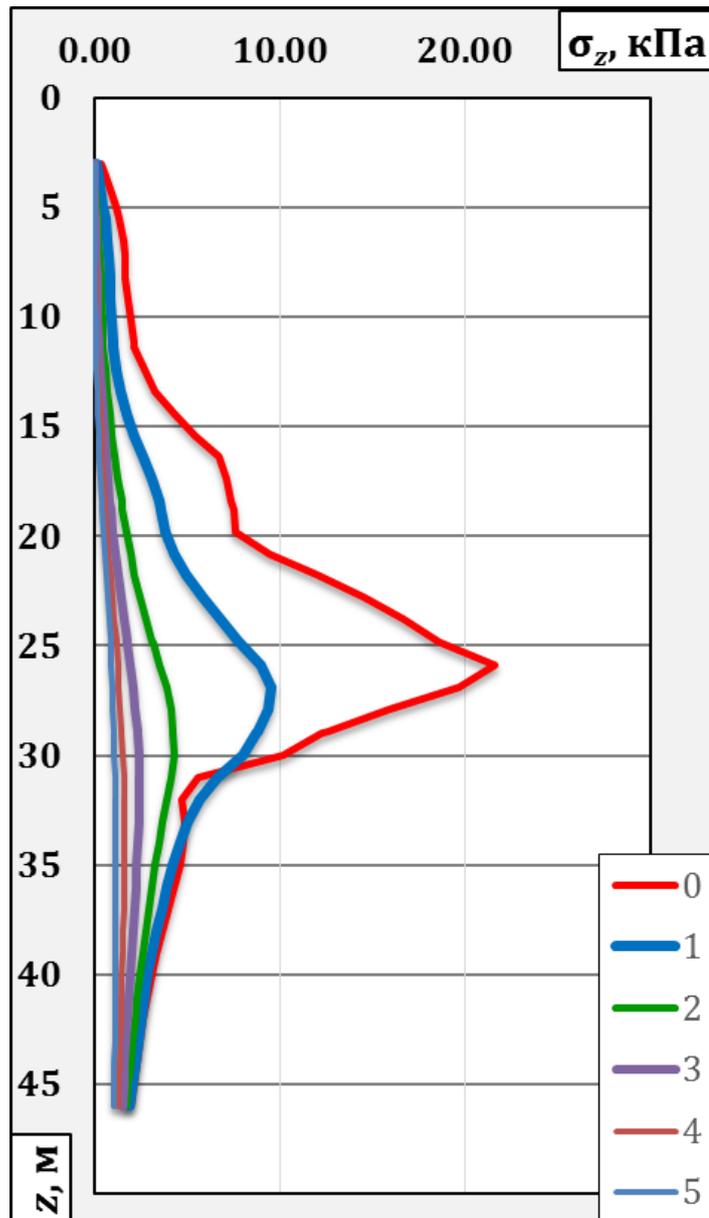


Рисунок 4.11 – Эпюры дополнительных вертикальных напряжений в массиве грунта по вертикальной оси, проходящей через центр фундамента, цифрами обозначены номера захваток в соответствии с рисунком 4.10.

## Сопоставление результатов расчётов с данными геотехнического мониторинга

В соответствии с действующими нормативными документами по всем зданиям окружающей застройки входящим в зону риска, проводился постоянный мониторинг. Схема установки геодезических марок представлена на рисунке 4.12.

Данные по осадкам зданий окружающей застройки были обработаны, и выделены осадки зданий, полученные за период устройства стены в грунте до производства работ по откопке котлована. На рисунке 4.13 приведён график вертикальных перемещений геодезических марок за период устройства стены в грунте в зависимости от расстояния этих марок до стены в грунте.

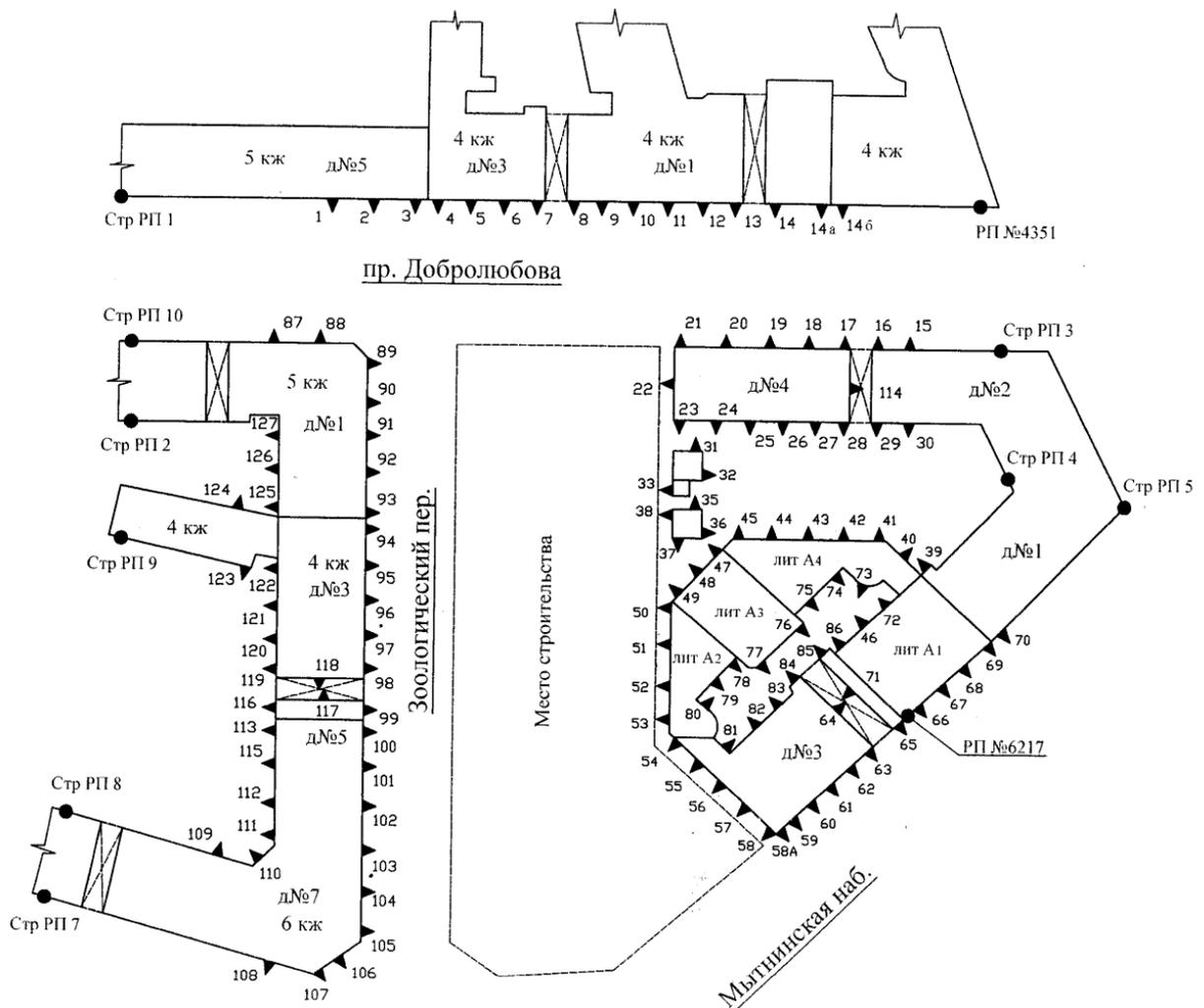


Рисунок 4.12 – Схема установки геодезических марок на здания соседней застройки

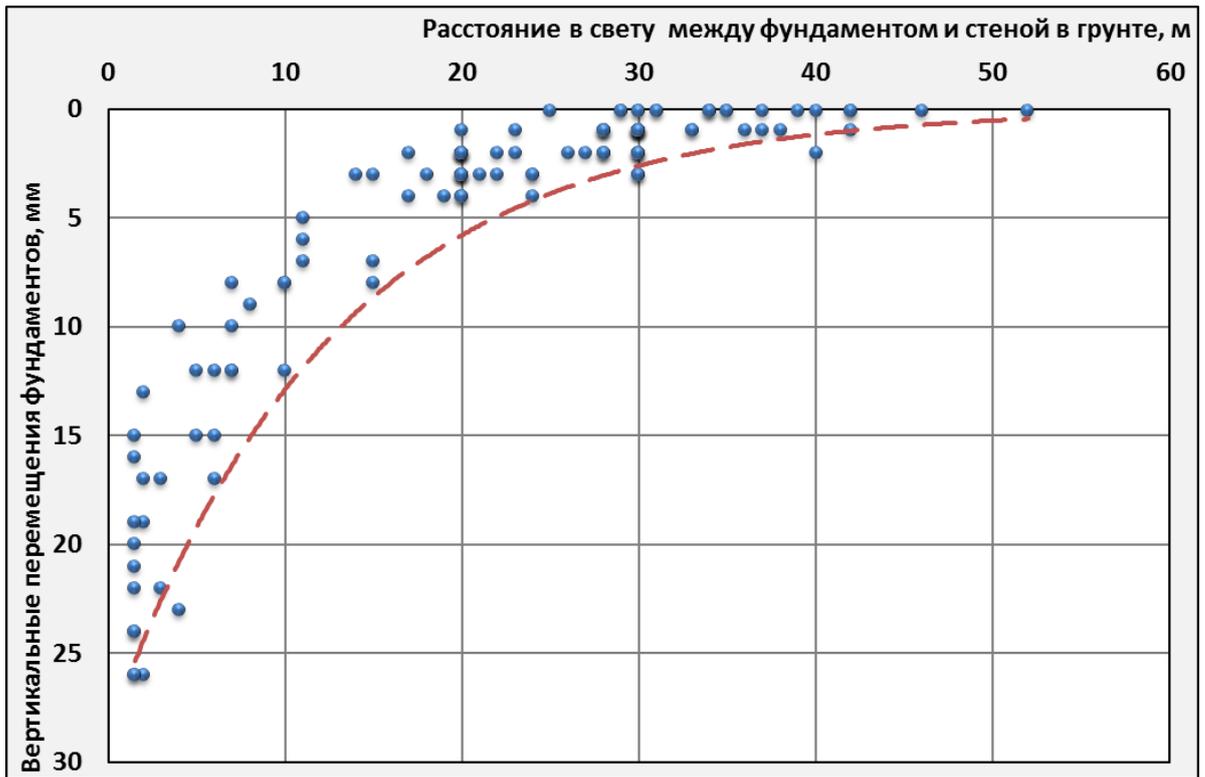


Рисунок 4.13 – Осадки фундаментов в зависимости от расстояния до стены в грунте

Более подробно рассмотрим данные по осадкам дома 3 по Мытнинской наб. (рисунок 4.14) – дома имеющего наибольшую зону соприкосновения с границей котлована.

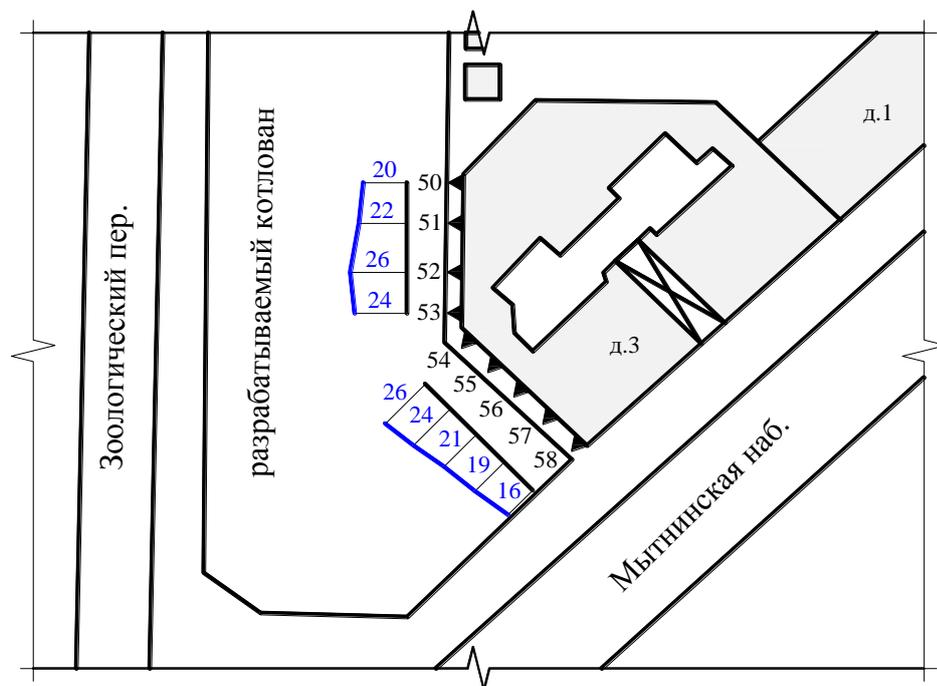


Рисунок 4.14 – Осадки здания по Мытнинской наб., д. 3, вызванные устройством траншейной стены в грунте

В таблице 4.7 сведены результаты численного и аналитического расчётов по предлагаемой методике, а также результаты мониторинга. Важно отметить хорошую сходимость результатов расчётов с данными наблюдений.

Таблица 4.7 – Сравнение результатов расчётов по предлагаемым методикам с данными натурных наблюдений по объекту Зоологический пер., д. 2-4

Осадка по численному моделированию, мм	Осадка по аналитическим расчётам, мм	Данные мониторинга
26	25	19...26

## 4.2 Административное здание в Центральном районе Санкт-Петербурга

### Исходные данные

#### а) Характеристика строящегося здания и зданий окружающей застройки

В 2010–2012 гг. были выполнены работы по строительству в центре города в дворовом пространстве дома 74 по наб. реки Мойки административного здания, обладающего развитым подземным пространством, включающим один цокольный этаж и два подземных этажа. Общее заглубление конструкций здания составляет порядка 8,2 м от существующей отметки планировки (рисунок 4.15).<sup>2</sup>

Новое семиэтажное здание встраивается в дворовое пространство существующих зданий. Проект предусматривал устройство подземного пространства по методу «top-down».

В качестве ограждения котлована была принята стена в грунте толщиной 1,0 м. План ограждения котлована приведён на рисунке 4.16. Основания фундаментов ближайших зданий были усилены цементацией (рисунок 4.17).

<sup>2</sup> Работы выполнены компанией «ГЕОИЗОЛ»

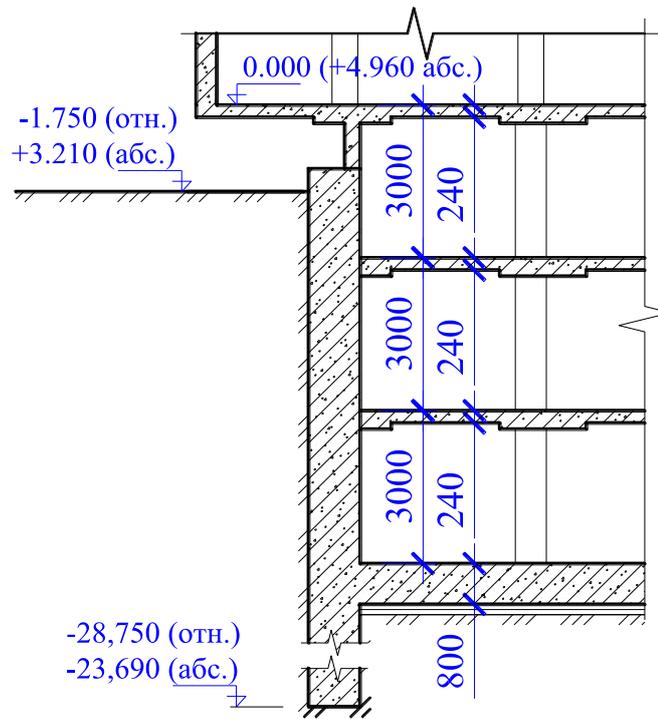


Рисунок 4.15 – Разрез подземной части здания

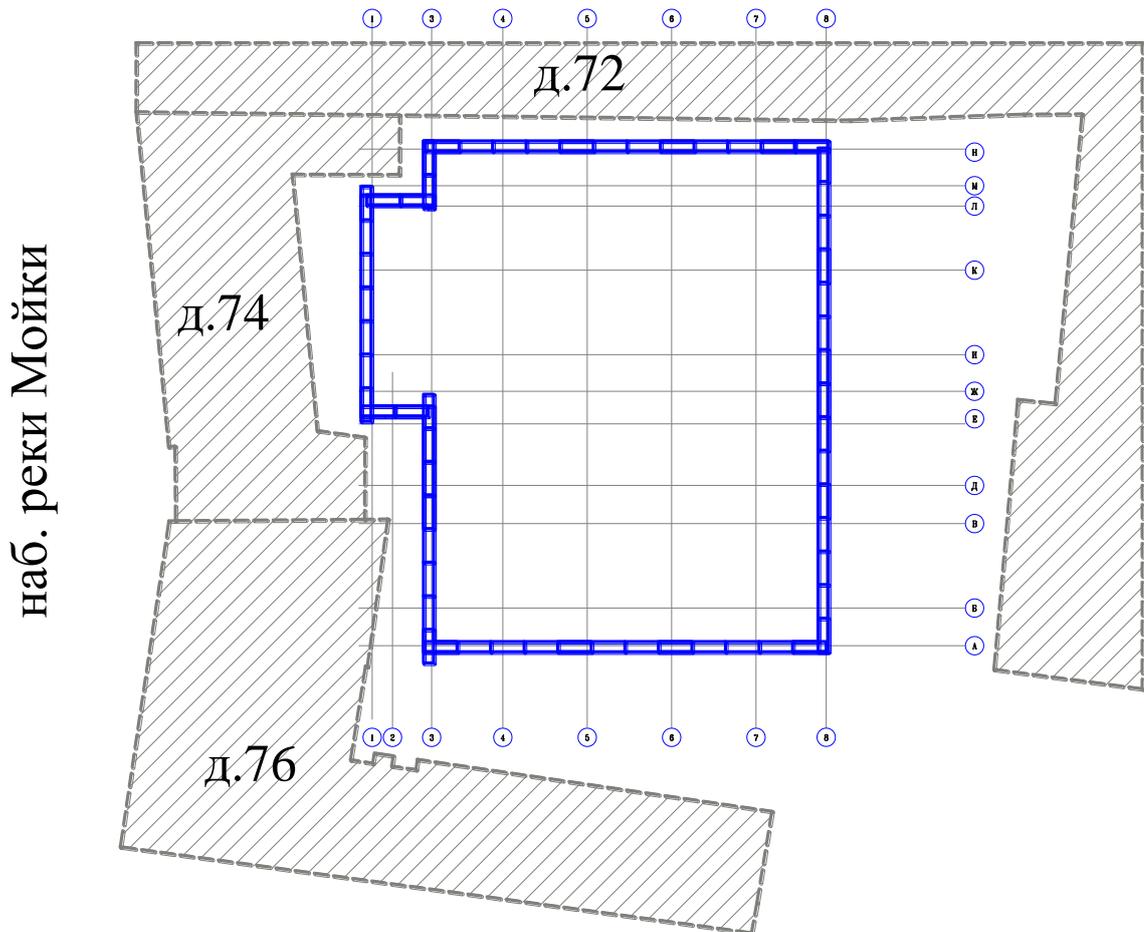


Рисунок 4.16 – План расположения секций стены в грунте

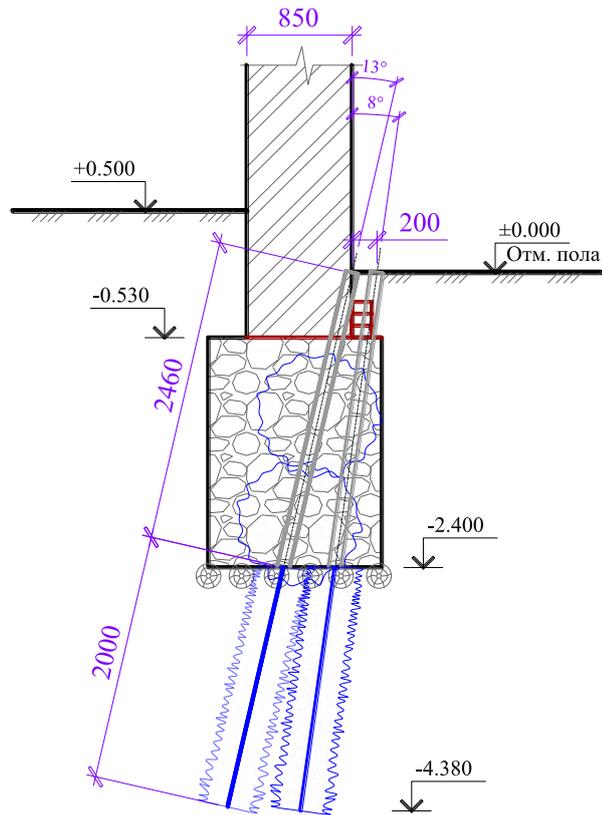


Рисунок 4.17 – Принципиальная схема усиления зданий соседней застройки



Рисунок 4.18 – Разработка котлована

Окружающая площадку строительства застройка представлена историческими четырёх-шестиэтажными кирпичными зданиями на бутовых ленточных фундаментах с глубиной заложения 2...3 м. Новое здание вплотную примыкает к существующему жилому зданию по наб. р. Мойки, д.72. Расстояние между фундаментом этого здания и стеной в грунте в свету составляет 2,2 м.

В соответствии с действующими нормативными документами за всеми зданиями окружающей застройки, попадающей в зону риска, вёлся постоянный геотехнический мониторинг. Подробнее информация о результатах геотехнического мониторинга рассмотрена в далее.

### б) Инженерно-геологические условия площадки

Основанием для фундаментов существующей застройки служат водонасыщенные пылеватые пески, классифицируемые по ГОСТ 25100-2011 как среднедеформируемые. Пески подстилаются текучими морскими и озёрно-ледниковыми сильнодеформируемыми суглинками. С глубины 18 м залегают моренные среднедеформируемые супеси и суглинки (рисунок 4.19).

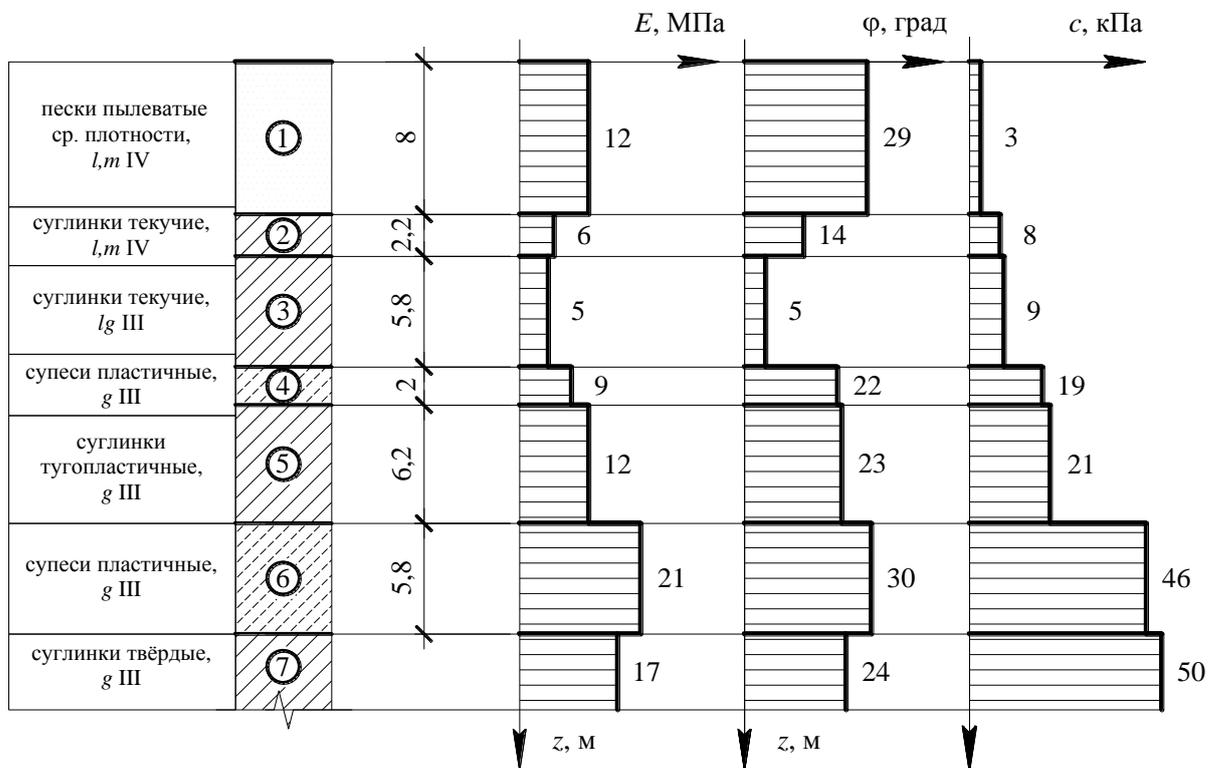


Рисунок 4.19 – Инженерно-геологические условия площадки

Физико-механические характеристики грунтов, слагающих площадку, приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Физико-механические свойства грунтов

№	Грунт	$\gamma$ , кН / м <sup>3</sup>	$E$ , МПа	$c$ , кН / м <sup>2</sup>	$\varphi$ , град
1	пески пылеватые, средней плотности	19,3	12	3	29
2	суглинки текучие	18,8	6	8	14
3	суглинки текучие	17,7	5	9	5
4	супеси пластичные	20,8	9	19	22
5	суглинки тугопластичные	21	12	21	23
6	супеси пластичные	22,0	21	46	30
7	суглинки твёрдые	21,7	17	50	24

### **Численный метод прогноза осадки фундамента при устройстве вблизи него траншейной стены в грунте**

Решение задачи об осадке фундаментов, вызванной устройством вблизи них траншейной стены в грунте с помощью численного моделирования в пространственной постановке, производилось путём поэтапного моделирования технологических операций, проводимых на площадке для устройства траншейной стены в грунте. Подробнее методика численного моделирования поставленной задачи представлена в главе 2.

Как отмечалось выше, основания фундаментов ближайших зданий были усилены цементацией. С целью оценки эффективности такого усиления для защиты от технологических осадок на период устройства стены в грунте выполнены расчёты двух геотехнических моделей – с учётом усиления и без него. Усиление основания фундаментов цементацией моделировалось увеличением глубины заложения усиливаемых ленточных фундаментов существующих зданий окружающей застройки.

**а) Численное моделирование технологической осадки без учёта усиления соседних зданий**

Расчётная схема для определения осадки здания от устройства стены в грунте представлена на рисунке 4.20. В расчётной схеме смоделирован сохраняемый фундамент демонтированного здания.

Последовательность устройства секций стены в грунте, представлена на рисунке 4.21.

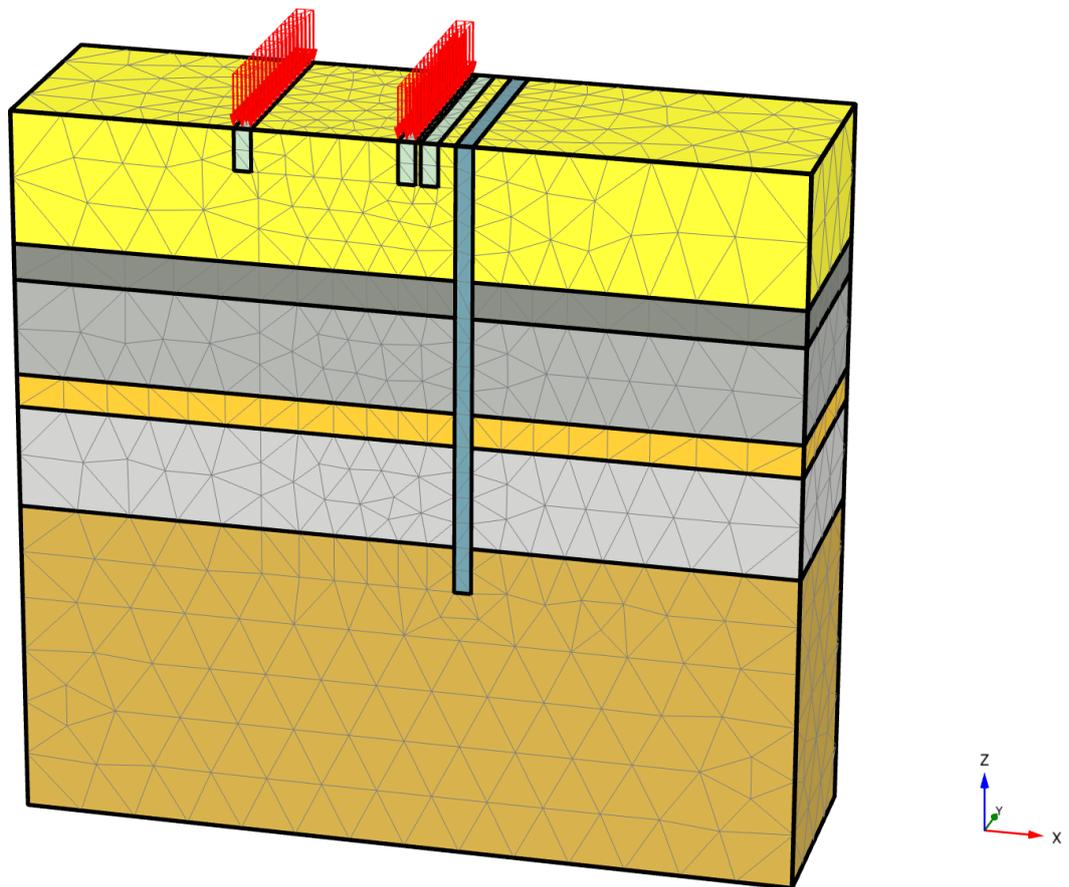


Рисунок 4.20 – Конечно-элементная расчётная схема для вычисления дополнительных осадок здания при устройстве возле него стены в грунте

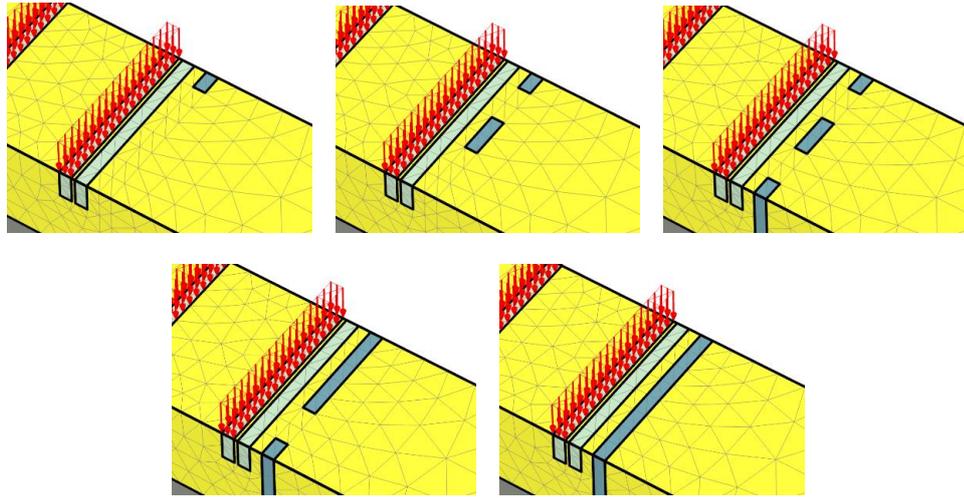


Рисунок 4.21 – Последовательность устройства захваток стены в грунте

Полученные в результате расчёта изополя дополнительных вертикальных перемещений в грунтовом массиве приведены на рисунке 4.22, дополнительные осадки фундаментов здания представлены на рисунке 4.23.

В результате численного моделирования по предлагаемой в главе 2 методике получено значение расчётной осадки фундамента ближайшего здания равное 30 мм.

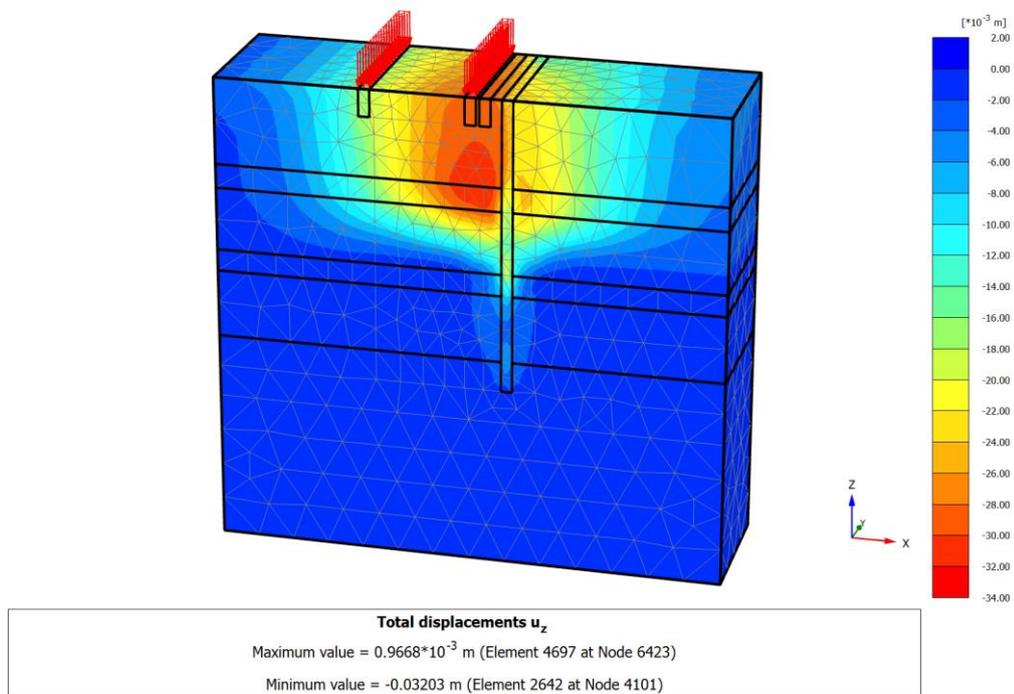


Рисунок 4.22 – Изополя дополнительных вертикальных перемещений в грунтовом массиве, вызванные устройством стены в грунте

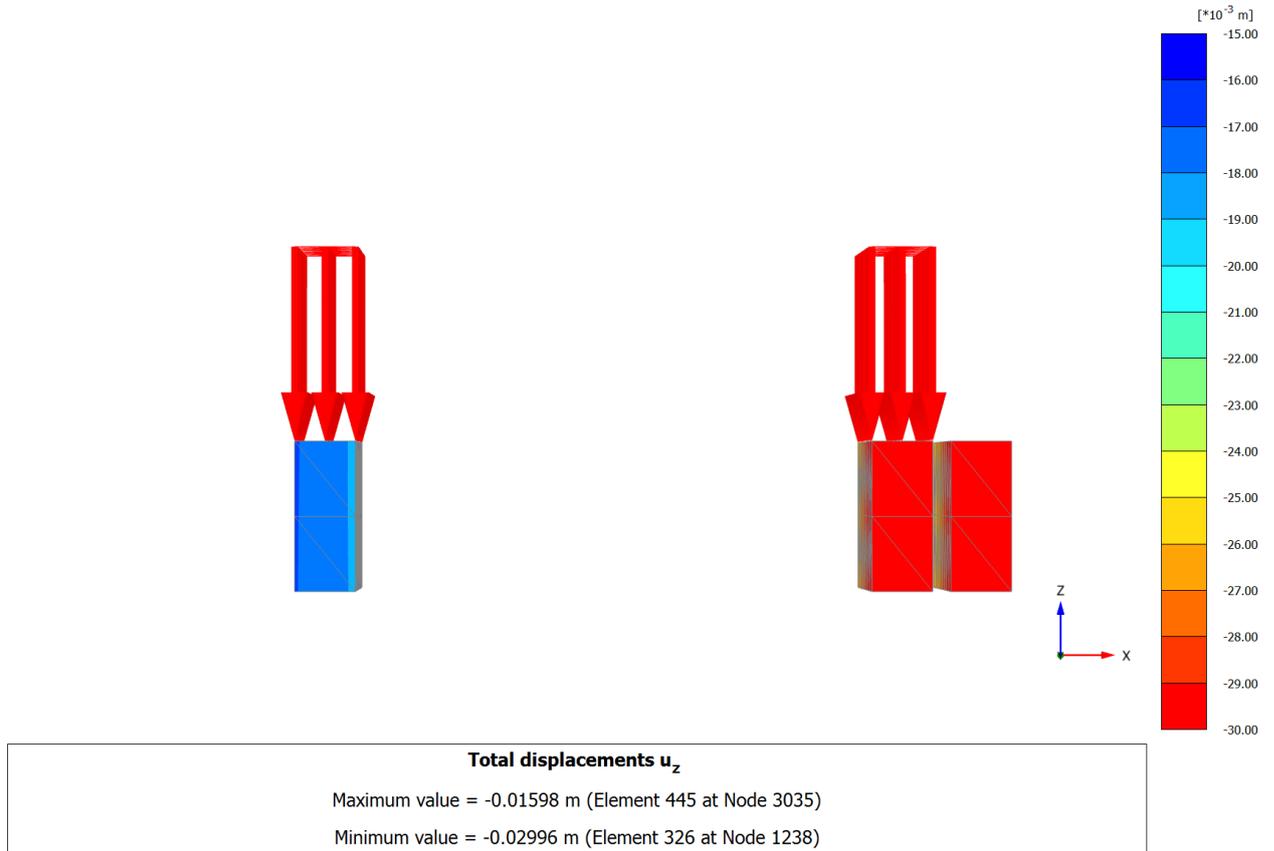


Рисунок 4.23 – Дополнительные осадки фундаментов здания, вызванные устройством стены в грунте

### б) Численное моделирование технологической осадки с учётом усиления соседних зданий

Расчётная схема для определения осадки здания от устройства стены в грунте представлена на рисунке 4.24. Усиление основания ближайшего к стене в грунте фундамента цементацией моделировалось увеличением его глубины заложения.

Последовательность устройства секций стены в грунте аналогична последовательности, принятой в предыдущей задаче (рисунке 4.21). Моделирование усиления основания производится до этапа устройства первой захватки траншейной стены в грунте.

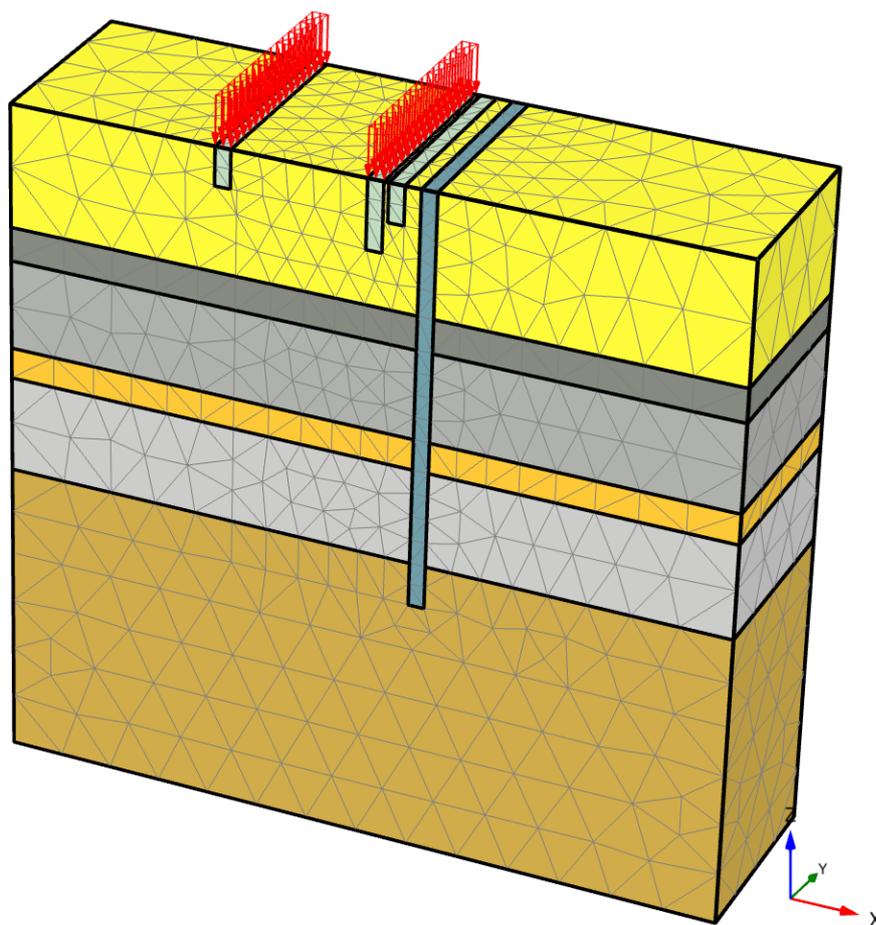


Рисунок 4.24 – Конечно-элементная расчётная схема для вычисления дополнительных осадок здания при устройстве возле него стены в грунте. Усиление ближнего к стене в грунте фундамента здания короткими сваями-шпорами моделируется увеличением его глубины.

Полученные в результате расчёта изополя дополнительных вертикальных перемещений в грунтовом массиве приведены на рисунке 4.25, дополнительные осадки фундаментов здания представлены на рисунке 4.26.

В результате численного моделирования по предлагаемой в главе 2 методике получено значение расчётной осадки фундамента ближайшего здания равное 29 мм.

Как показали выполненные расчёты, усиление соседней застройки путём закрепления грунта в основании фундаментов не даёт существенного эффекта. Это объясняется тем, что дополнительные напряжения, а следовательно, и деформации грунтового массива, возникают значительно ниже подошвы фундаментов.

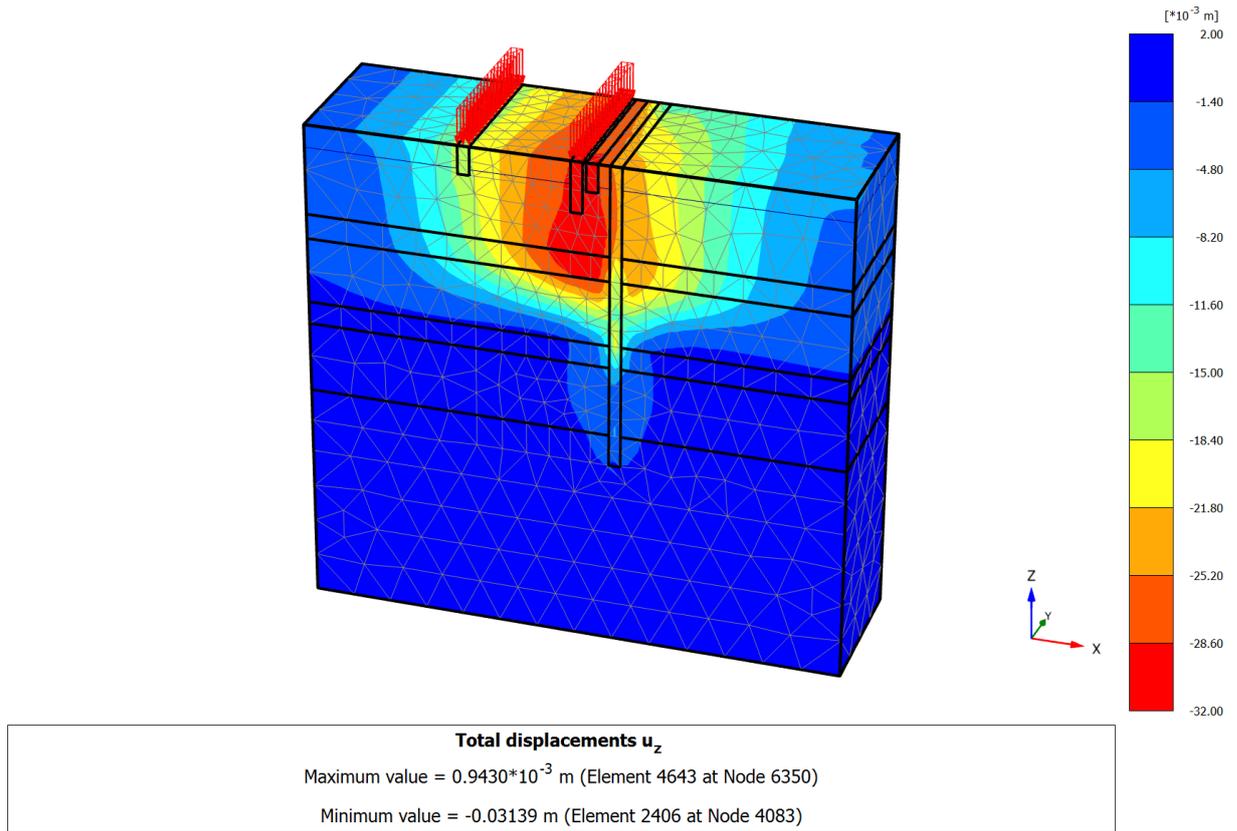


Рисунок 4.25 – Изополя дополнительных вертикальных перемещений в грунтовом массиве, вызванные устройством стены в грунте

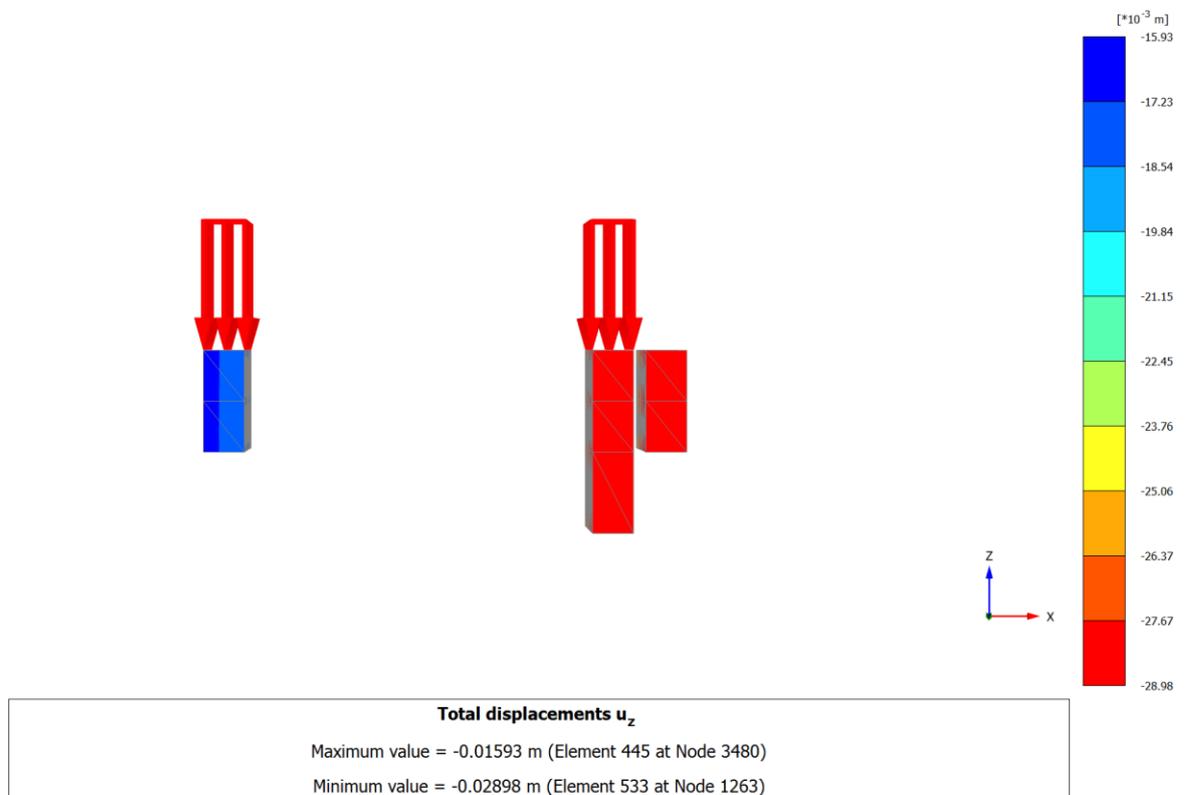


Рисунок 4.26 – Дополнительные осадки фундаментов здания, вызванные устройством стены в грунте

## Аналитическое решение задачи прогноза осадки фундамента при устройстве вблизи него траншейной стены в грунте

Рассмотрим аналитическое решение задачи о напряжённо-деформированном состоянии грунтового массива при разработке траншейной «стены в грунте».

Последовательность расчёта по предлагаемой методике представлена в разделе 3.3.

Построим эпюры гидростатического давления грунтовой воды  $\sigma^w$ , глинистого раствора  $\sigma^{гл}$ , бокового давления грунта в состоянии покоя (давления покоя)  $\sigma_0$ . Далее определим вертикальное касательное давление  $\tau_z$  и суммарное горизонтальное нормальное  $\sigma_x$ .

Ниже в таблице 4.9 приведены величины давлений воды и глинистого раствора, вертикальное напряжение от веса грунта, давление покоя и суммарное горизонтальное давление на стенку траншеи для рассматриваемой площадки. По этим данным построены эпюры (рисунок 4.27).

Таблица 4.9 – Данные для построения эпюр давлений по глубине

$$\gamma_{гл} = 12 \text{ кН/м}^3$$

ИГЭ	$z_i$ , м	$\gamma (\gamma_{sb})$ , кН/м <sup>3</sup>	$\varphi_i$ , °	$\text{tg}\varphi$	$c$ , кПа	$\nu$	$E$ , МПа	$\sigma_z^{zp}$ , кПа	$\sigma^w$ , кПа	$\sigma_0$ , кПа	$\sigma^{gl}$ , кПа	$\sigma_x$ , кПа	$\tau_z$ , кПа
1	0	19.3	29	0.55	3	0.3	12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2							38.6	0.0	-16.5	24.0	7.5	-9.2
2	2	9.3	29	0.55	3	0.3	12	38.6	0.0	-16.5	24.0	7.5	-9.2
	8							94.4	-60.0	-40.5	96.0	-4.5	-22.4
3	8	8.8	14	0.25	8	0.37	6	94.4	-60.0	-55.4	96.0	-19.4	-13.8
	10.2							113.8	-82.0	-66.8	122.4	-26.4	-16.7
4	10.2	7.7	5	0.09	9	0.37	5	113.8	-82.0	-66.8	122.4	-26.4	-5.8
	16							158.4	-140.0	-93.0	192.0	-41.0	-8.1
5	16	10.8	22	0.4	19	0.33	9	158.4	-140.0	-78.0	192.0	-26.0	-31.5
	18							180.0	-160.0	-88.7	216.0	-32.7	-35.8
6	18	11	23	0.42	21	0.37	12	180.0	-160.0	-105.7	216.0	-49.7	-44.9
	24.2							248.2	-222.0	-145.8	290.4	-77.4	-61.9
7	24.2	22	30	0.58	46	0.33	21	470.2	0.0	-231.6	290.4	58.8	-133.7
	30							597.8	0.0	-294.4	360.0	65.6	-170.0
8	30	21.7	24	0.45	50	0.35	17	597.8	0.0	-321.9	360.0	38.1	-143.3
	40							814.8	0.0	-438.7	480.0	41.3	-195.3

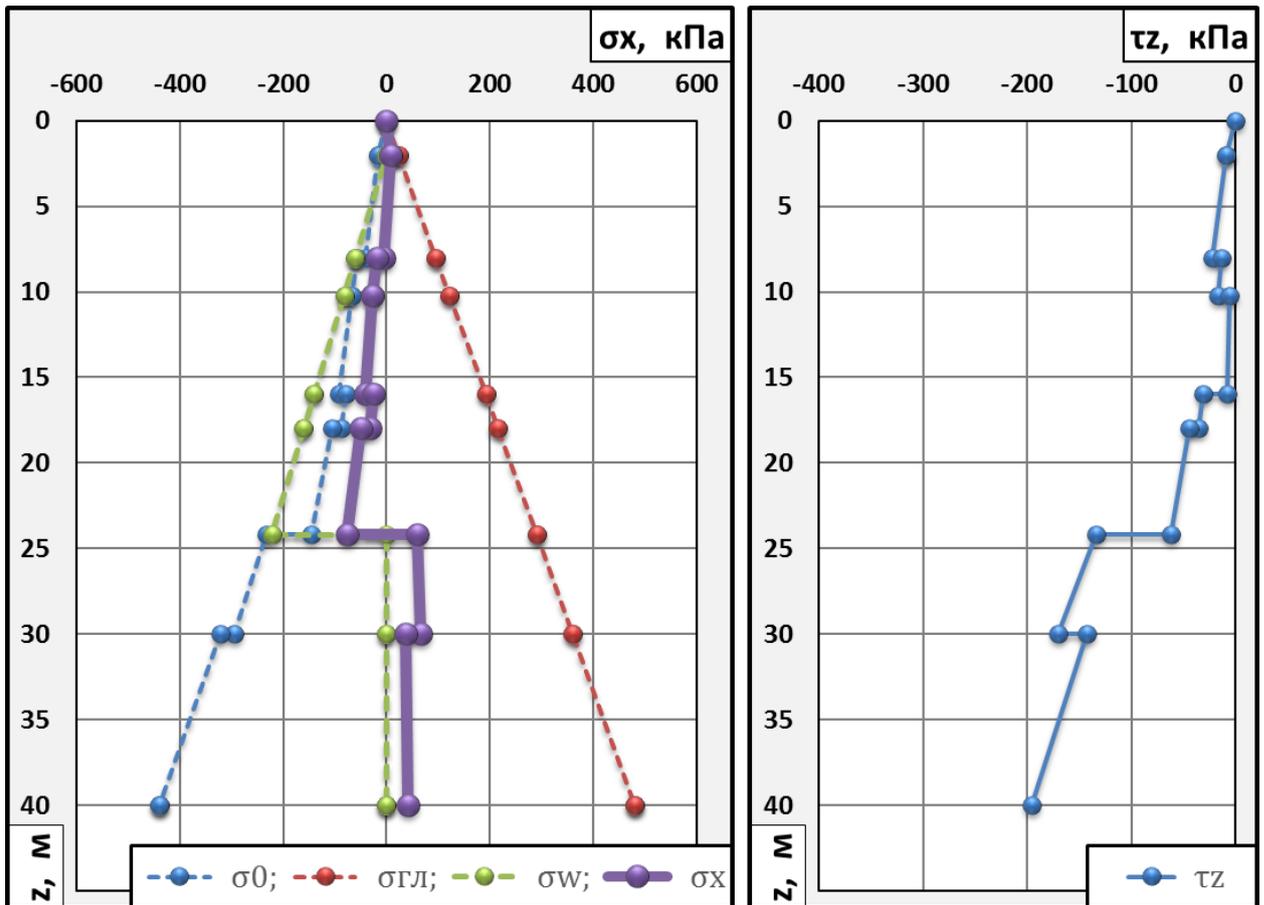


Рисунок 4.27 – Эпюры давлений, действующих на стенку траншеи: гидростатического давления грунтовой воды  $\sigma^w$ , глинистого раствора  $\sigma^{гл}$ , бокового давления грунта в состоянии покоя  $\sigma_0$ , суммарное горизонтальное нормальное  $\sigma_x$ , вертикальное касательное давление  $\tau_z$

Дополнительные напряжения в точке, расположенной на оси проходящей через центр подошвы фундамента и ниже, вызываются влиянием разработки участка траншеи, расположенного выше этой точки.

Обозначим номера захваток стены в грунте относительно сечения ленточного фундамента, для которого вычисляется осадка, аналогично расчёту технологических осадок фундамента по Зоологическому пер. (рисунок 4.10).

Вычислим дополнительные вертикальные напряжения в точках, расположенных на вертикальной оси, проходящей через центр расчётного сечения фундамента, вызванные разработкой нулевой захватки.

Определим значения суммарного горизонтального нормального  $\sigma_x$  и вертикального касательного давления  $\tau_z$ . По формулам (3.7) определяются

расстояния  $R_1$  и  $R_2$ . Далее вычислим коэффициенты  $\alpha_z$  и  $\alpha_x$  по ( 3.28 ) и ( 3.30 ). Суммарное дополнительное напряжение в рассматриваемой точке  $\Sigma\sigma_z$  складывается из напряжений, вызванных вертикальным касательным давлением  $\tau_z - \sigma_z^z$  и горизонтальным нормальным давлением  $\sigma_x - \sigma_z^x$ . Эти составляющие –  $\sigma_z^z$  и  $\sigma_z^x$  – являются двумя слагаемыми из выражения ( 3.26 ).

$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$z, \text{ м}$	$r, \text{ м}$							
2.7	0	2.5	2.7	$\Sigma\sigma_z = 0.11$ кПа						
ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}, \text{ м}$	$\nu$	$\tau_z, \text{ кПа}$	$\sigma_x, \text{ кПа}$	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z, \text{ кПа}$	$\sigma_z^x, \text{ кПа}$
1	0	0.3	0.0	0.0	3.7	3.7	0.0199651	0.0718662	0.291	-0.254
	2		-9.2	7.5	2.7	5.2	0.0007236	0.0642278		
2	2	0.3	-9.2	7.5	2.7	5.2	0.0007236	0.0642278	0.113	-0.042
	2.5		-10.3	6.5	2.7	5.7	-0.0028093	0.0635492		

Таким образом, в точке, удалённой от траншеи на 2,7 м в плане, и находящейся на 2,5 м ниже уровня дневной поверхности, дополнительное вертикальное напряжение от устройства части захватки стены в грунте на глубину 2,5 м составит 0,11 кПа.

Далее повторим эту операцию для точек, расположенных с шагом 1 м ниже первой по оси  $z$ , а также на границах слоёв грунта.

$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$z, \text{ м}$	$r, \text{ м}$							
2.7	0	3.5	2.7	$\Sigma\sigma_z = 0.41$ кПа						
ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}, \text{ м}$	$\nu$	$\tau_z, \text{ кПа}$	$\sigma_x, \text{ кПа}$	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z, \text{ кПа}$	$\sigma_z^x, \text{ кПа}$
1	0	0.3	0.0	0.0	4.4	4.4	0.0225720	0.1215445	0.350	-0.231
	2		-9.2	7.5	3.1	6.1	-0.0005425	0.1145780		
2	2	0.3	-9.2	7.5	3.1	6.1	-0.0005425	0.1145780	0.381	-0.088
	3.5		-12.5	4.5	2.7	7.5	-0.0112010	0.1129256		

$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$z, \text{ м}$	$r, \text{ м}$							
2.7	0	4.5	2.7	$\Sigma\sigma_z = 0.74$ кПа						
ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}, \text{ м}$	$\nu$	$\tau_z, \text{ кПа}$	$\sigma_x, \text{ кПа}$	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z, \text{ кПа}$	$\sigma_z^x, \text{ кПа}$
1	0	0.3	0.0	0.0	5.2	5.2	0.0222997	0.1882999	0.338	-0.177
	2		-9.2	7.5	3.7	7.0	-0.0000106	0.1829846		
2	2	0.3	-9.2	7.5	3.7	7.0	-0.0000106	0.1829846	0.701	-0.122
	4.5		-14.7	2.5	2.7	9.4	-0.0178250	0.1802399		

x, м	y, м	z, м	r, м
2.7	0	5.5	2.7

$$\Sigma\sigma_z = 1.09 \text{ кПа}$$

ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}$ , м	$\nu$	$\tau_z$ , кПа	$\sigma_x$ , кПа	$R_1$ , м	$R_2$ , м	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z$ , кПа	$\sigma_z^x$ , кПа
1	0	0.3	0.0	0.0	6.1	6.1	0.0209317	0.2725492	0.293	-0.125
	2		-9.2	7.5	4.4	8.0	0.0015543	0.2687717		
2	2	0.3	-9.2	7.5	4.4	8.0	0.0015543	0.2687717	1.047	-0.129
	5.5		-16.9	0.5	2.7	11.3	-0.0227916	0.2651303		

x, м	y, м	z, м	r, м
2.7	0	6.5	2.7

$$\Sigma\sigma_z = 1.43 \text{ кПа}$$

ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}$ , м	$\nu$	$\tau_z$ , кПа	$\sigma_x$ , кПа	$R_1$ , м	$R_2$ , м	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z$ , кПа	$\sigma_z^x$ , кПа
1	0	0.3	0.0	0.0	7.0	7.0	0.0192847	0.3742660	0.245	-0.088
	2		-9.2	7.5	5.2	8.9	0.0031157	0.3716080		
2	2	0.3	-9.2	7.5	5.2	8.9	0.0031157	0.3716080	1.384	-0.112
	6.5		-19.1	-1.5	2.7	13.3	-0.0265519	0.3673856		

x, м	y, м	z, м	r, м
2.7	0	7.5	2.7

$$\Sigma\sigma_z = 1.76 \text{ кПа}$$

ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}$ , м	$\nu$	$\tau_z$ , кПа	$\sigma_x$ , кПа	$R_1$ , м	$R_2$ , м	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z$ , кПа	$\sigma_z^x$ , кПа
1	0	0.3	0.0	0.0	8.0	8.0	0.0176755	0.4933580	0.202	-0.063
	2		-9.2	7.5	6.1	9.9	0.0043121	0.4914611		
2	2	0.3	-9.2	7.5	6.1	9.9	0.0043121	0.4914611	1.699	-0.081
	7.5		-21.3	-3.5	2.7	15.2	-0.0294625	0.4868974		

x, м	y, м	z, м	r, м
2.7	0	8	2.7

$$\Sigma\sigma_z = 1.92 \text{ кПа}$$

ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}$ , м	$\nu$	$\tau_z$ , кПа	$\sigma_x$ , кПа	$R_1$ , м	$R_2$ , м	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z$ , кПа	$\sigma_z^x$ , кПа
1	0	0.3	0.0	0.0	8.4	8.4	0.0169222	0.5593944	0.184	-0.054
	2		-9.2	7.5	6.6	10.4	0.0047637	0.5577790		
2	2	0.3	-9.2	7.5	6.6	10.4	0.0047637	0.5577790	1.848	-0.062
	8		-22.4	-4.5	2.7	16.2	-0.0306790	0.5531055		

x, м	y, м	z, м	r, м
2.7	0	9	2.7

$$\Sigma\sigma_z = 1.96 \text{ кПа}$$

ИГЭ	$h_i^{\text{расч}}$ , м	$\nu$	$\tau_z$ , кПа	$\sigma_x$ , кПа	$R_1$ , м	$R_2$ , м	$\alpha_z$	$\alpha_x$	$\sigma_z^z$ , кПа	$\sigma_z^x$ , кПа
1	0	0.3	0.0	0.0	9.4	9.4	0.0155395	0.7044100	0.153	-0.040
	2		-9.2	7.5	7.5	11.3	0.0054196	0.7032184		
2	2	0.3	-9.2	7.5	7.5	11.3	0.0054196	0.7032184	1.886	-0.073
	8		-22.4	-4.5	2.9	17.2	-0.0307493	0.6977525		
3	8	0.37	-13.8	-19.4	2.9	17.2	-0.0321392	0.7768685	0.092	-0.058
	9		-15.1	-22.6	2.7	18.2	-0.0340717	0.7771769		

Если подобным образом выполнить вычисления дополнительных напряжений до глубины 45 м, а затем рассчитать дополнительную осадку методом послойного суммирования, то получим результаты, приведённые в таблице 4.10. При этом, согласно предлагаемой методике, в случае если осадка в слое грунта имеет величину менее 0,1 мм, она обнуляется.

Выполним аналогичные вычисления для двух соседних смежных захваток (№1 по рис. 4.10). Для захваток одинаковой длины, расположенных симметрично относительно расчётного сечения, расчёт выполняем только для одной захватки (таблица 4.11), а полученную дополнительную осадку умножим на два.

Таким образом, осадка, вызванная устройством трёх захваток, составит:

$$11,3 + 6,0 \times 2 = 23,3 \text{ мм} \quad (4.5)$$

Выполним аналогичные вычисления для двух следующих соседних смежных захваток (№2 по рис. 4.10). Результаты вычислений сведены в таблицу 4.12.

Таким образом, осадка, вызванная устройством трёх захваток, составит:

$$11,3 + 6,0 \times 2 + 1,4 \times 2 = 26,1 \text{ мм} \quad (4.6)$$

Далее необходимо выполнить аналогичные вычисления для двух следующих соседних смежных захваток №3. Результаты вычислений сведены в таблицу 4.13.

Результаты расчётов показывают, что захватки, выполняемые на расстоянии  $4l_{\text{захв}}$  (в нашем случае  $\approx 13$  м) от расчётного сечения фундамента, уже не оказывают существенного влияния на осадку здания.

Таким образом, общая осадка фундамента составляет 26,1 мм.

Таблица 4.10 – Дополнительные вертикальные напряжения и дополнительные осадки при производстве захватки стены в грунте с №0 по рис. 4.10

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$S_{\text{доп}}$ , мм
2.5	0	0.11	0.00
3.5	12	0.41	0.00
4.5	12	0.74	0.00
5.5	12	1.09	0.00
6.5	12	1.43	0.00
7.5	12	1.76	0.12
8.0	12	1.92	0.00
9.0	6	1.96	0.26
10.0	6	2.25	0.30
10.2	6	2.33	0.00
11.2	5	2.64	0.42
12.2	5	2.87	0.46
13.2	5	3.03	0.48
14.2	5	3.14	0.50
15.2	5	3.24	0.52
16.0	5	3.31	0.42
17.0	9	3.38	0.30
18.0	9	3.59	0.32
19.0	12	3.96	0.26
20.0	12	4.76	0.32
21.0	12	5.82	0.39
22.0	12	6.88	0.46
23.0	12	7.84	0.52
24.0	12	8.70	0.58

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$S_{\text{доп}}$ , мм
24.2	12	8.87	0.12
25.2	21	10.21	0.39
26.2	21	10.71	0.41
27.2	21	11.02	0.42
28.2	21	10.86	0.41
29.2	21	10.29	0.39
30.0	21	9.42	0.29
31.0	17	8.14	0.38
32.0	17	6.93	0.33
33.0	17	5.90	0.28
34.0	17	5.06	0.24
35.0	17	4.38	0.21
36.0	17	3.82	0.18
37.0	17	3.36	0.16
38.0	17	2.98	0.14
39.0	17	2.67	0.13
40.0	17	2.40	0.11
41.0	17	2.18	0.10
42.0	17	1.98	0.00
43.0	17	1.82	0.00
44.0	17	1.67	0.00
45.0	17	1.54	0.00
46.0	17	1.43	0.00

Дополнительная осадка от  
разработки одной захватки:

$$\Sigma s_{\text{доп}} = 11.32 \text{ мм}$$

Таблица 4.11 – Дополнительные вертикальные напряжения и дополнительные осадки при производстве захватки стены в грунте с №1 по рис. 4.10

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$s_{\text{доп}}$ , мм
2.5	0	0.02	0.00
3.5	12	0.15	0.00
4.5	12	0.33	0.00
5.5	12	0.53	0.00
6.5	12	0.73	0.00
7.5	12	0.93	0.00
8.0	12	1.03	0.00
9.0	6	1.11	0.15
10.0	6	1.21	0.16
10.2	6	1.23	0.00
11.2	5	1.33	0.21
12.2	5	1.42	0.23
13.2	5	1.51	0.24
14.2	5	1.57	0.25
15.2	5	1.63	0.26
16.0	5	1.66	0.21
17.0	9	1.72	0.15
18.0	9	1.79	0.16
19.0	12	1.91	0.13
20.0	12	2.13	0.14
21.0	12	2.46	0.16
22.0	12	2.88	0.19
23.0	12	3.33	0.22
24.0	12	3.79	0.25

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$s_{\text{доп}}$ , мм
24.2	12	3.88	0.00
25.2	21	4.53	0.17
26.2	21	5.05	0.19
27.2	21	5.46	0.21
28.2	21	5.65	0.22
29.2	21	5.73	0.22
30.0	21	5.66	0.17
31.0	17	5.38	0.25
32.0	17	4.97	0.23
33.0	17	4.52	0.21
34.0	17	4.07	0.19
35.0	17	3.66	0.17
36.0	17	3.29	0.15
37.0	17	2.96	0.14
38.0	17	2.68	0.13
39.0	17	2.43	0.11
40.0	17	2.22	0.10
41.0	17	2.03	0.00
42.0	17	1.86	0.00
43.0	17	1.72	0.00
44.0	17	1.59	0.00
45.0	17	1.48	0.00
46.0	17	1.37	0.00

Дополнительная осадка от  
разработки одной захватки:

$$\Sigma s_{\text{доп}} = 6.01 \text{ мм}$$

Таблица 4.12 – Дополнительные вертикальные напряжения и дополнительные осадки при производстве захватки стены в грунте с №2 по рис. 4.10

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$S_{\text{доп}}$ , мм
2.5	0	0.00	0.00
3.5	12	0.02	0.00
4.5	12	0.08	0.00
5.5	12	0.16	0.00
6.5	12	0.26	0.00
7.5	12	0.37	0.00
8.0	12	0.43	0.00
9.0	6	0.50	0.00
10.0	6	0.57	0.00
10.2	6	0.58	0.00
11.2	5	0.62	0.00
12.2	5	0.66	0.11
13.2	5	0.70	0.11
14.2	5	0.73	0.12
15.2	5	0.76	0.12
16.0	5	0.79	0.10
17.0	9	0.83	0.00
18.0	9	0.88	0.00
19.0	12	0.93	0.00
20.0	12	1.00	0.00
21.0	12	1.09	0.00
22.0	12	1.20	0.00
23.0	12	1.34	0.00
24.0	12	1.50	0.00

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$S_{\text{доп}}$ , мм
24.2	12	1.53	0.00
25.2	21	1.78	0.00
26.2	21	2.03	0.00
27.2	21	2.26	0.00
28.2	21	2.40	0.00
29.2	21	2.52	0.00
30.0	21	2.60	0.00
31.0	17	2.65	0.12
32.0	17	2.66	0.12
33.0	17	2.61	0.12
34.0	17	2.53	0.12
35.0	17	2.42	0.11
36.0	17	2.29	0.11
37.0	17	2.16	0.10
38.0	17	2.03	0.00
39.0	17	1.91	0.00
40.0	17	1.79	0.00
41.0	17	1.67	0.00
42.0	17	1.57	0.00
43.0	17	1.47	0.00
44.0	17	1.38	0.00
45.0	17	1.30	0.00
46.0	17	1.22	0.00

Дополнительная осадка от  
разработки одной захватки:

$$\Sigma S_{\text{доп}} = 1.37 \text{ мм}$$

Таблица 4.13 – Дополнительные вертикальные напряжения и дополнительные осадки при производстве захватки стены в грунте с №3 по рис. 4.10

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$s_{\text{доп}}$ , мм
2.5	0	0.00	0.00
3.5	12	0.00	0.00
4.5	12	0.02	0.00
5.5	12	0.05	0.00
6.5	12	0.09	0.00
7.5	12	0.15	0.00
8.0	12	0.18	0.00
9.0	6	0.23	0.00
10.0	6	0.28	0.00
10.2	6	0.29	0.00
11.2	5	0.32	0.00
12.2	5	0.35	0.00
13.2	5	0.38	0.00
14.2	5	0.40	0.00
15.2	5	0.43	0.00
16.0	5	0.44	0.00
17.0	9	0.48	0.00
18.0	9	0.52	0.00
19.0	12	0.56	0.00
20.0	12	0.61	0.00
21.0	12	0.66	0.00
22.0	12	0.71	0.00
23.0	12	0.77	0.00
24.0	12	0.85	0.00

$H$ , м	$E$ , МПа	$\sigma_z$ , кПа	$s_{\text{доп}}$ , мм
24.2	12	0.86	0.00
25.2	21	0.99	0.00
26.2	21	1.12	0.00
27.2	21	1.24	0.00
28.2	21	1.30	0.00
29.2	21	1.37	0.00
30.0	21	1.41	0.00
31.0	17	1.47	0.00
32.0	17	1.51	0.00
33.0	17	1.53	0.00
34.0	17	1.54	0.00
35.0	17	1.53	0.00
36.0	17	1.51	0.00
37.0	17	1.48	0.00
38.0	17	1.44	0.00
39.0	17	1.39	0.00
40.0	17	1.34	0.00
41.0	17	1.29	0.00
42.0	17	1.24	0.00
43.0	17	1.18	0.00
44.0	17	1.13	0.00
45.0	17	1.08	0.00
46.0	17	1.03	0.00

Дополнительная осадка от  
разработки одной захватки:

$$\Sigma s_{\text{доп}} = 0.00 \text{ мм}$$

Эпюры дополнительных вертикальных напряжений в массиве грунта по вертикальной оси, проходящей через центр фундамента, вызванные устройством нескольких захваток стены в грунте, приведены на рисунке 4.28.

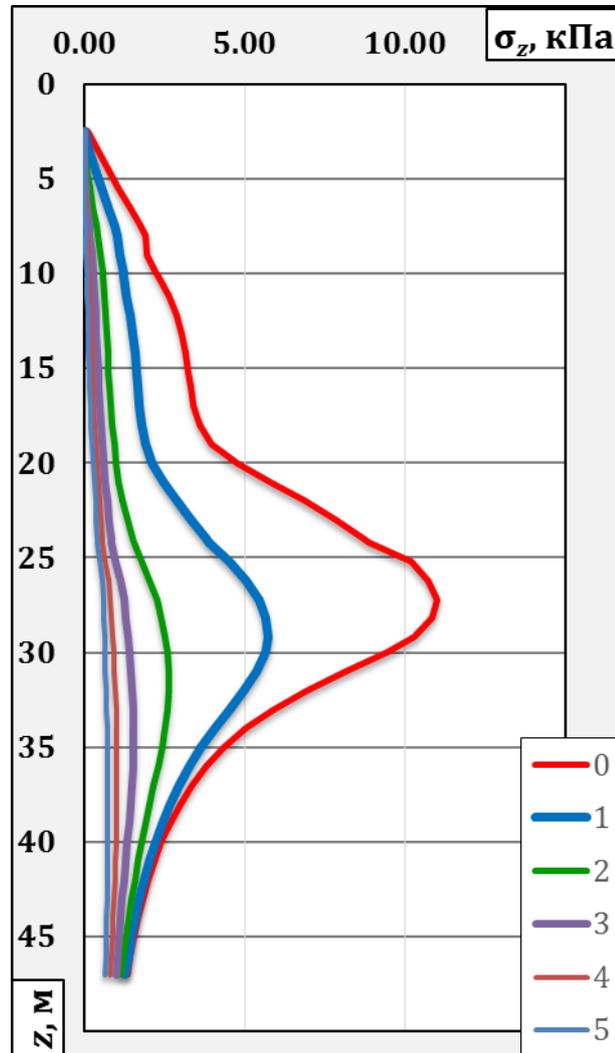


Рисунок 4.28 – Эпюры дополнительных вертикальных напряжений в массиве грунта по вертикальной оси, проходящей через центр фундамента, цифрами обозначены номера захваток в соответствии с рисунком 4.10.

Оценить осадки после проведения мероприятий по усилению фундаментов можно, приняв в расчёт увеличенную на высоту зоны цементации глубину заложения фундаментов (4,5 м вместо 2,5 м). Однако, как мы видим по полученным значениям дополнительных напряжений, они настолько малы, что не вызывают дополнительных осадок. Таким образом, принятое усиление не является эффективным способом снижения осадок фундаментов при устройстве

траншейной стены в грунте, так как напряжения, вызывающие основную долю осадок, возникают на глубинах, превышающих зону усиления.

### Сопоставление результатов расчётов с данными геотехнического мониторинга

В соответствии с действующими нормативными документами за всей окружающей застройкой вёлся постоянный геотехнический мониторинг. Схема установки геодезических марок представлена на рисунке 4.29.

Данные по осадкам зданий окружающей застройки, как и в предыдущем случае, были обработаны, и выделены осадки зданий, полученные за период устройства стены в грунте до производства работ по откопке котлована. На рисунке 4.30 приведён график вертикальных перемещений геодезических марок за период устройства стены в грунте в зависимости от расстояния этих марок до стены в грунте.

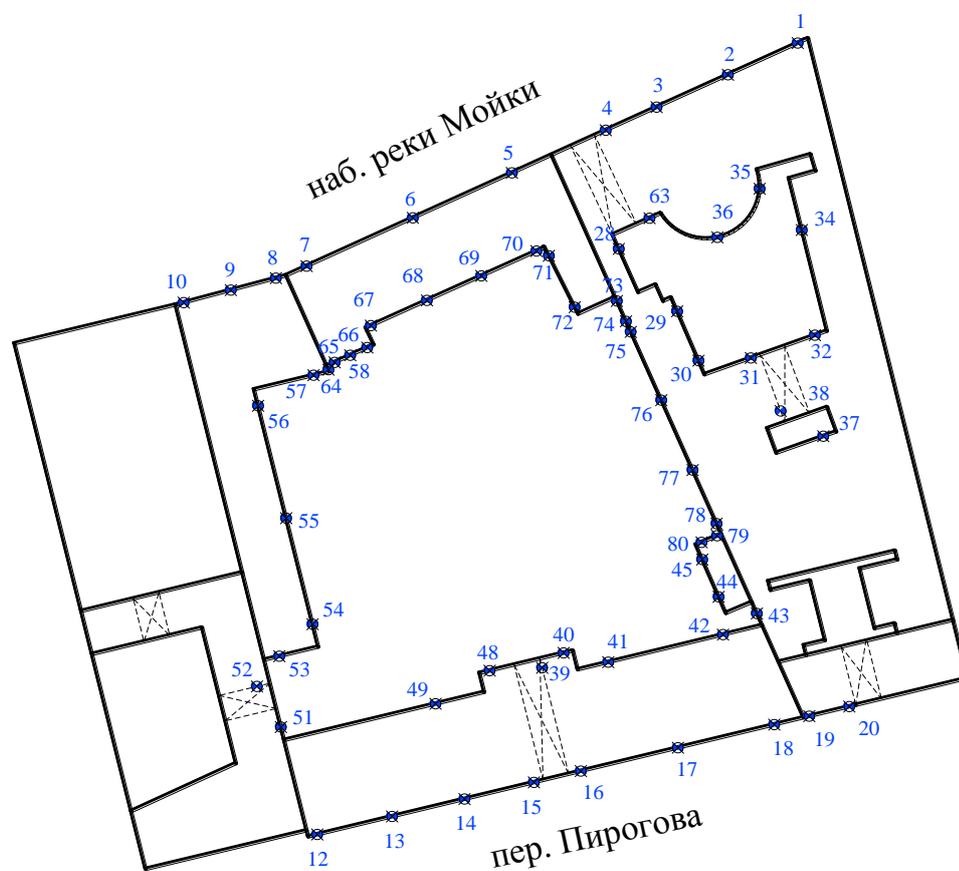


Рисунок 4.29 – Схема установки геодезических марок на здания соседней застройки

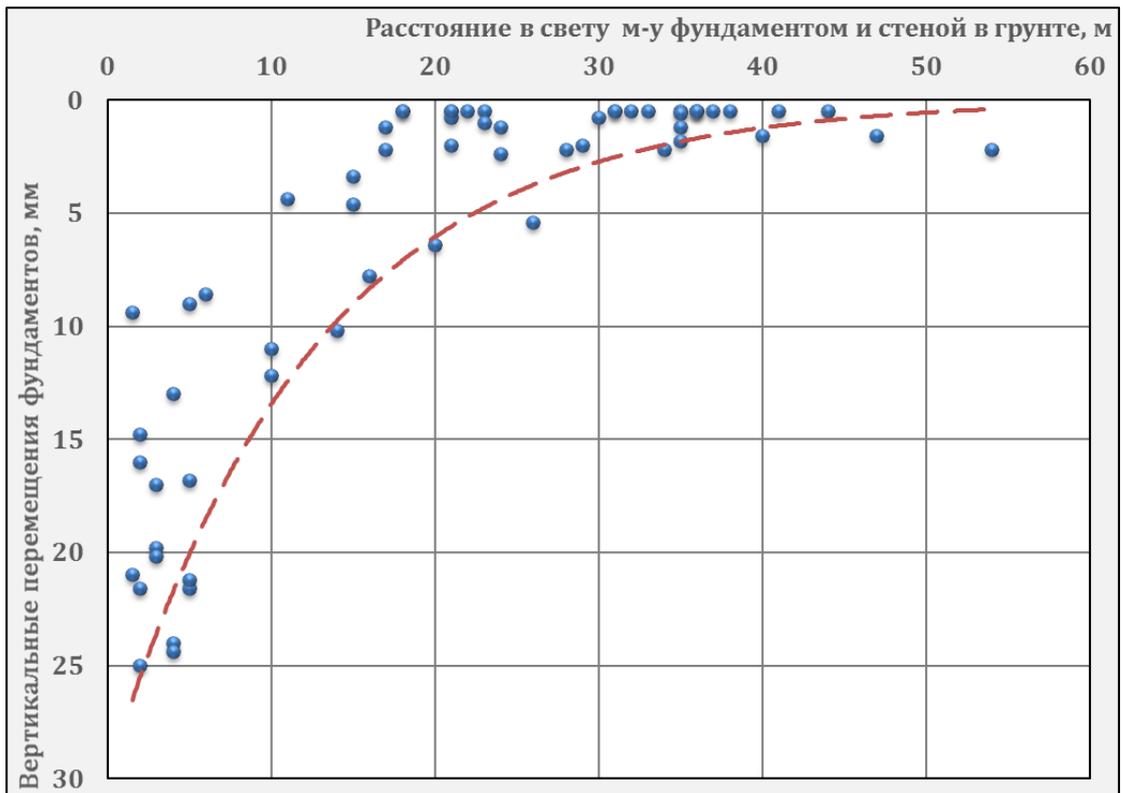


Рисунок 4.30 – Осадки фундаментов в зависимости от расстояния до стены в грунте

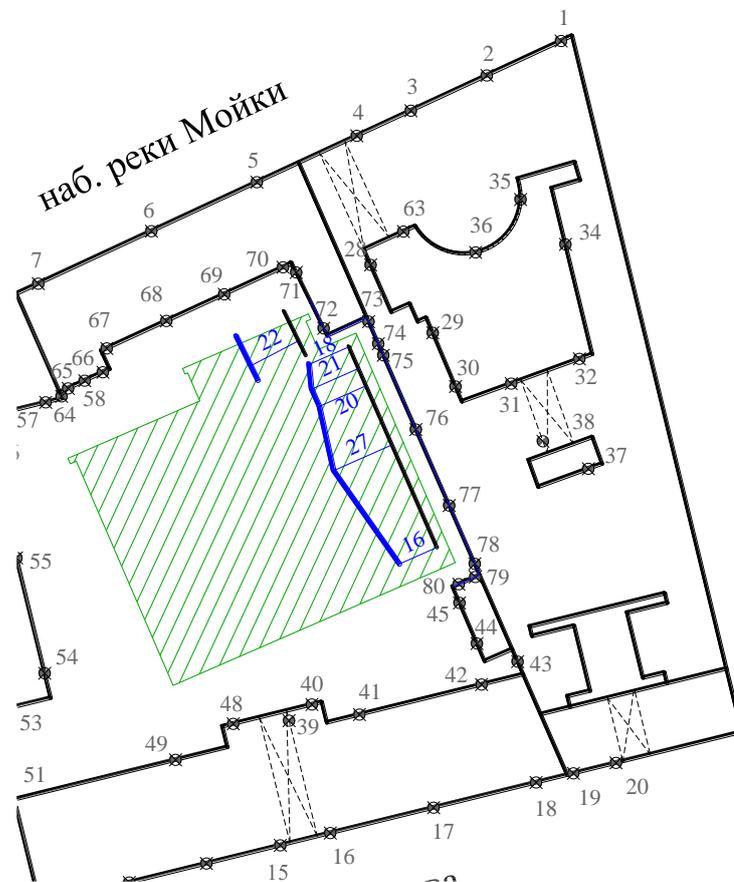


Рисунок 4.31 – Осадки здания по наб. реки Мойки, д. 72, вызванные устройством траншейной стены в грунте

Рассмотрим подробнее данные по осадкам дома 72 по наб. реки Мойки (рисунок 4.31) – дома имеющего наибольшую зону соприкосновения с границей котлована.

В таблице 4.14 сведены результаты численного и аналитического расчётов по предлагаемой методике, а также результаты мониторинга фундаментов ближайшего к стене в грунте здания. Важно отметить хорошую сходимость результатов расчётов с данными наблюдений.

Таблица 4.14 – Сравнение результатов расчётов по предлагаемым методикам с данными натурных наблюдений по объекту наб. р. Мойки, д. 74

Осадка по численному моделированию, мм	Осадка по аналитическим расчётам, мм	Данные мониторинга
30	26,1	16...27

### Выводы по четвёртой главе

1) Результаты численного моделирования и аналитических расчётов дополнительных осадок фундаментов при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте, выполненные по методикам, изложенным в главах 2 и 3, для двух объектов, реализованных в Санкт-Петербурге, показали хорошую сходимость с данными геотехнического мониторинга. Это говорит о достоверности предлагаемых методик и возможности их использования в инженерной практике.

2) Предлагаемая методика аналитических расчётов дополнительных осадок фундаментов при устройстве стены в грунте может быть рекомендована как для проверки результатов численного моделирования, так и в качестве самостоятельного расчёта для зданий пониженной ответственности.

3) 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 не приведёт к существенному снижению технологических осадок. Их уменьшения можно добиться корректировкой технологических параметров устройства стены в грунте (уменьшение длины захватки, увеличение плотности глинистого раствора) или компенсационными мероприятиями, например, нагнетанием цементного раствора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведённого диссертационного исследования можно сформулировать следующие выводы:

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).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### Нормативная литература

1. МГСН 2.07-97. Основания, фундаменты и подземные сооружения. – М. : Правительство Москвы, 1998.
2. РД 31.31.24-81. Рекомендации по проектированию причальных сооружений, возводимых способом «стена в грунте». – М. : В/О «Мортехинформреклама», 1983. – 16 с.
3. Руководство по проектированию свайных фундаментов / НИИОСП им. Н.М. Герсеванова Госстроя СССР. – М. : Стройиздат, 1980. – 151 с.
4. Руководство по проектированию стен сооружений и противодиффузионных завес, устраиваемых способом «стена в грунте» – М. : Стройиздат, 1977 – 128 с.
5. СН 477-75 Временная инструкция по проектированию стен сооружений и противодиффузионных завес, устраиваемых способом стена в грунте. – М. : Стройиздат, 1978.
6. СНиП 2.02.01-83. Основания зданий и сооружений. – М. : ФГУП ЦПП, 2006. – 48 с.
7. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. – М. : ФГУП ЦПП, 2006. – 46 с.
8. СНиП 2.06.07-87. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 40 с.
9. СН-РФ 54.1-85. Указания по проектированию причальных набережных. Кн. 1...4. – М. : Минречфлот СССР, 1987.
10. СП 22.13330.2011. Актуализированная версия СНиП 2.02.01-83. Основания зданий и сооружений. – М. : ФГУП ЦПП, 2011. – 162 с.
11. СП 24.13330.2011. Актуализированная версия СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. – М. : ФГУП ЦПП, 2011. – 86 с.
12. СП 52-103-2007. Железобетонные монолитные конструкции зданий. – М. : ФГУП ЦПП, 2007. – 17 с.

13. СП 63.13330.2012. Актуализированная версия СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции основные положения. – М. : ФГУП ЦПП, 2012. – 155 с.
14. СТО 36554501-017-2009 Проектирование и устройство монолитной конструкции, возводимой способом «стена в грунте». – М. : НИЦ «Строительство», 2010. – 34 с.
15. СТО-ГК «Трансстрой»-014-2007 Траншейная стена в грунте. Конструкция и технология сооружения для объектов транспортного строительства. – М. : Транснефть, 2007. – 45 с.
16. ТСН 50-302-1996. Устройство фундаментов гражданских зданий и сооружений в Санкт-Петербурге и на территориях, административно подчиненных Санкт-Петербургу. – М. : Госстрой России, 1996.
17. ТСН 50-302-2004. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге. – М. : Госстрой России, 2004.

#### **Научно-техническая литература**

18. *Boussinesq J.* Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. – Paris, 1885.
19. *Bishop A.W.* The stability of Earth Dams // Ph.D. Thesis. – University of London, 1952.
20. *Cerruti V.* Ricerche Intorno all'Equilibrio dei Corpi Elastici Isotropi, Atti della R. Accademia dei Lincei, Memoriae della Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali, vol. 13 – Roma, 1882.
21. *Coulomb C.A.* Essai sur une application des maximes et minimis a quelcus problems de statique rebatifs a ar chitecture // Mem. Acad. Riy. Pres. Div. Savents. – 1776. – Vol. 7. – pp. 343 – 348.
22. *Engesser F.* Geometrische Erddrucklehre. Z. Bauwesen, – 1880. – Band 30. – 189 p.
23. *Fisher R.* Theory of statistical estimation. – Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 22. – 1925. – pp.700–725.

24. *Flamant A.* Sur la répartition des pressions dans un solide rectangulaire chargé transversalement. *Compte. Rendu. Acad. Sci. – Paris: 1892. – Vol. 114.*
25. *Huder J.* Stability of bentonite slurry trenches with some experience in Swiss practice // *Proc. 5th Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng.– Madrid, 1972. – Vol. 1. – pp. 517–522.*
26. *Kelvin W. T.* A mathematical theory of elasticity. – London: *Trans. Roy. Soc., 1856.*
27. *Kowalewski Z.* Parcie czynne gruntu w wykopie a skonczoney dlugosci // *Blul. Inf. Naun.-Techn. – Warsaw, 1964.*
28. *Marsden J.E., Hughes T.J.R.* Mathematical foundations of elasticity. – Dover. 1994. – 556 p.
29. *Melan E.* Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft im innern beanspruchten Halbschiebe, *Zeitschrift fur angewandte Mathematik und Mechanik. – B. 12, H. 6. – 1932.*
30. *Mindlin R.D.* Force at a point in the interior of a semi-infinite solid // *Physics. – 1936. – №7.*
31. *Moormann Ch.* Actual trends in deep excavation technology and performance based on an international database // *Proc. the XIII<sup>th</sup> European conf. on soil mechanics and geotechnical engineering. «Geotechnical problems with man-made and man influenced grounds». Main Session 4: Foundation in urban areas. – Prague, Czech Republic, 25-28<sup>th</sup> August 2003. – Vol. 2. – p. 277–284.*
32. *Moormann Ch., Moormann H.R.* A study of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on worldwide experiences // *Proc. the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. (IS-Toulouse 2002) «Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground», 4<sup>th</sup> Session Deep Excavation: Design and analysis. – Toulouse, France, 23-25 October, 2002. – p. 477–482.*
33. *Morgnstern N.R.* Comments. // *Symp. Grouts Drilling Muds. – Butterworths, London, 1963.*
34. *Peck R.B.* Deep excavation and tunnelling in soft ground. State of the art report //

- Proc 7th Int Conf SMFE. – Mexico City, 1969. – pp 147–150.
35. *Piaskowski A., Kowalewski Z.* Application of thixotropic clay suspensions for stability of vertical sides of deep trenches without strutting. // Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. – Montreal, 1965. – Vol. 2. – pp. 526–529.
  36. Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, 3D Foundation. Tutorial Manual / R.B.J. Brinkgerve [и др.] – Balkema, 2006.
  37. Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, 3D Foundation. Reference Manual / R.B.J. Brinkgerve [и др.] – Balkema, 2006.
  38. Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, 3D Foundation. Material Models Manual / R.B.J. Brinkgerve [и др.] – Balkema, 2006.
  39. Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, 3D Foundation. Scientific Manual / R.B.J. Brinkgerve [и др.] – Balkema, 2006.
  40. *Ponsele J.V.* Mem. officier genie. – 1840. – XIII. – pp. 261-270.
  41. *Xanthakos P.P.* Slurry Walls as Structural Systems. Second Edition. – New York, 1994.
  42. *Xanthakos P.P.* Slurry Walls. – New York. : McGraw Hill, 1979.
  43. *Ауслендер В.Г.* Современные представления о строении четвертичной толщи Санкт-Петербурга и его окрестностей // История плейстоценовых озёр Восточно-Европейской равнины. – СПб : Наука, 1998. – с.311–312.
  44. *Беленькая В.В., Перлей Е.М.* Экспериментальные исследования устойчивости стен траншей, заполненных бентонитовым раствором, при нагрузках вблизи траншей. // «Труды ВНИИГС». – 1978. – № 47. – С. 15–18.
  45. *Богов С.Г., Васенин В.А., Шашкин А.Г.* Применение технологии «стена в грунте» в условиях распространения слабых глинистых грунтов // Развитие городов и геотехническое строительство. – СПб, 2012. – № 14. – С.227–234.
  46. *Боровиков В.П.* Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. — М. : Горячая линия-Телеком, 2013. — 288 с.
  47. *Боровиков В.П., Ивченко И.Г.* Прогнозирование в системе Statistica в среде Windows. – М. : Финансы и Статистика, 2000. – 380 с.

48. *Бреннеке Л., Ломейер Э.* Основания и фундаменты. : учебное пособие для строительных вузов / пер. с нем. К.Л. Клейн. – М. ; Л. : ОНТИ НКТП СССР. Госстройиздат, 1933-1936, – Т.1 : Строительные грунты, строительные материалы. – 1933. – 287 с.
49. *Будин А.Я.* Тонкие подпорные стенки. – Л. : Стройиздат (Ленингр. отд-ние). – 1974. – 192 с.
50. *Верстов В.В., Азбель Г.Г., Гольденштейн И.В.* Погружение и извлечение шпунта, труб и других элементов по вибрационной технологии в условиях городской застройки грунтов. // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2002. – № 5.
51. *Верстов В.В., Белов Г.А.* Вибрационная технология устройства «стены в грунте» для возведения подземной части малоэтажных зданий // «Геотехника: наука и практика» Сб. науч. Тр. СПбГАСУ. – СПб., 2000.
52. Геологический атлас Санкт-Петербурга. – С-Пб, Комильфо, 2009, – 57 с.
53. *Горбунов–Посадов М.И.* Давление грунта на жесткий закругленный фундамент и свободные деформации котлована / М.И. Горбунов–Посадов, О.Я. Шахтер, В.А. Кофман. // Труды НИИ оснований и фундаментов, Сборник № 24. – М., 1954.
54. *Горбунов-Посадов М.И.* Расчет конструкций на упругом основании. / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин – М. : Стройиздат, 1984. – 679 с.
55. *Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В.* Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. – № 13. – С. 25–71.
56. *Дьяконов В.П.* Mathematica 5.1/5.2/6 в математических и научно-технических расчетах. Изд-е второе дополненное и переработанное. – М. : «СОЛОН-Пресс», 2008. – С. 744.
57. *Жемочкин Б.Н.* Опыты с моделями свай, работающих на горизонтальную

- нагрузку, в лабораторных условиях. / Исследования по теории сооружений. – М. : Госстройиздат, 1949. – вып.IV.
58. *Жемочкин Б.Н.* Расчет упругой заделки стержня. Изгиб стержня в упругом полупространстве – М. : Стройиздат, 1948. – 68 с.
59. *Жемочкин Б.Н., Сеницын А.П.* Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1962г. – 240 с.
60. *Заварзин Л.Г.* Разработка методики инженерно-геологического картирования применительно к Ленинграду: Отчёт по научно-исслед. госбюджетной теме (Н-13) / 18 / ЛИСИ. – Л., 1975.
61. *Знаменский В.В., Чунюк Д.Ю., Морозов Е.Б.* Оценка влияния устройства защитного геотехнического экрана на деформации здания, расположенного в зоне влияния нового строительства, по результатам численного моделирования // Научное обозрение. – 2015. – №18. – С. 43–48.
62. *Знаменский, В.В.* Учет технологической составляющей геотехнического риска при устройстве ограждения котлована с помощью траншейной «стены в грунте» в стесненных городских условиях / В.В. Знаменский, Е.Б. Морозов, Д.Ю. Чунюк // Численные методы расчетов в практической геотехнике : сборник статей международной научно-технической конференции 1-3 февраля / Министерство образования и науки Российской Федерации, С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т, Рос. акад. архитектуры и строит. наук, Рос. о-во по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению. – СПб. : [б. и.], 2012. – 398 с.
63. *Ильичев В.А., Знаменский В.В., Морозов Е.Б., Чунюк Д.Ю.* Опыт устройства котлованов в городе Москве // Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции: сборник трудов научно-технической конференции / Санкт-Петербургский госуд. архит.-строит. ун-т. – СПб., 2010. – 404 с.
64. *Ильичёв В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С.* Прогноз деформаций зданий

- вблизи котлованов в условиях тесной городской застройки Москвы // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2004. – № 4. – С. 17–21.
65. *Ильичёв В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С.* Влияние строительства заглубленных сооружений на существующую застройку в Москве // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2001. – №4. – С. 19–24.
66. *Ильичев В.А., Мангушев Р.А., Никифорова Н.С.* Опыт освоения подземного пространства российских мегаполисов // Основания и фундаменты. – 2012. – № 2. – С. 17–20.
67. *Каган А.А., Солодухин М.А.* Моренные отложения северо-запада СССР. – М. : Недра, 1971
68. *Клейн Г.К.* Расчет подпорных стен. – М. : Высшая школа, 1964.
69. *Клейн Г.К.* Строительная механика сыпучих тел. – М. : Стройиздат, 1977.
70. *Конюхов Д.С., Свиридов А.И.* Расчёт технологических деформаций существующих зданий в процессе изготовления ограждающих конструкций котлованов // Вестник МГСУ. – 2011. – №5. – С. 99–103.
71. *Кречмер В.В.* Метод расчета шпунтовых стенок как упругих конструкций с учетом сжимаемости грунта в области заделки // Труды НИИ оснований и фундаментов, «Механика грунтов» – М. : Госстройиздат, 1956. – №30.
72. *Крылов А.Н.* О расчете балок, лежащих на упругом основании. – Изд. 2-е. – Л. : Изд. Акад. наук СССР, 1931. – 154 с.
73. *Лаврова М.А.* Основной разрез верхнего плейстоцена Ленинградского района // Вопросы стратиграфии четвертичных отложений северо-запада европейской части СССР. – Л., 1962. – с.125–139.
74. *Леденев В.В.* Теоретические основы механики деформирования и разрушения : монография / В.В. Леденев, В.Г. Однолько, З.Х. Нгуен. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 312 с.
75. *Лурье А.И.* Нелинейная теория упругости. – М. : Наука, 1980. – 512 с.
76. *Лурье А.И.* Теория упругости. – М. : Наука, 1970. – 940 с.

77. *Лучкин М.А.* Учёт развития деформаций основания во времени при совместном расчёте системы «основание–фундамент–здание»: Дисс... канд. техн. наук. – СПб, [б. и.], 2007. – 162 с.
78. *Малоян Э.А.* К вопросу сооружения тоннелей метрополитенов с бетонированием стен в траншеях, заполненных глинистым раствором // Сборник трудов: Вып. 29 / ВНИИ трансп. стр-ва – М. : [б. и.], 1969. – 77 с.
79. *Малоян Э.А.* Определение устойчивости грунтовых стен траншей, заполненных глинистым раствором // «Специальные строительные работы» Серия V, ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР. 1977. – № 3. – С. 23–25.
80. *Мангушев Р.А., Гутовский В.Э., Конюшков В.В.* Определение прочностных характеристик грунтоцементного массива, выполненного по технологии jet-grouting в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга // Вестник гражданских инженеров. – 2010. – №2. – С. 69-77.
81. *Мангушев Р.А. и др.* Основные концептуальные технические и технологические решения при строительстве подземной части второй сцены Санкт-Петербургского Государственного академического Мариинского театра / Р.А. Мангушев, А.А. Панфёров, А.П. Ледяев, Н.И. Кулагин, В.А. Ильичёв, В.Э. Гутовский, В.Н. Александров // Проектирование и строительство подземной части нового здания (второй сцены) Государственного академического Мариинского театра: сб. научн.-техн. статей / под общ. Ред. В.А. Ильичёва, А.П. Ледяева, Р.А. Мангушева; СПбГАСУ. – СПб. 2011. – С. 12-33.
82. *Мангушев Р.А., Никифорова Н.С., Конюшков В.В., Осокин А.И., Сапин Д.А.* Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах. Учебное пособие. – М., СПб : Изд-во АСВ, 2013. – 256 с.
83. *Мангушев Р.А., Осокин А.И.* Геотехника Санкт-Петербурга: Монография. – М. : Изд-во АСВ, 2010. – 264 с.
84. *Мангушев Р.А., Ошурков Н.В., Гутовский В.Э.* Влияние трёхуровневого подземного пространства на жилые здания окружающей застройки // Жилищное строительство. – 2010. – №5. – С. 23-27.

85. *Мангушев Р.А., Ошурков Н.В., Игошин А.В.* Использование передвижной установки для целей реконструкции и строительства в стесненных условиях Санкт-Петербурга // Сб. тр. междунар. научно-практ. конф. «Реконструкция Санкт-Петербурга – 2005». Часть 1. – СПб., 2005. – С. 214-218
86. *Мангушев Р.А., Ошурков Н.В., Игошин А.В.* Оценка влияния техногенных факторов на изменение характеристик грунтов при устройстве подземного пространства большого объёма // Материалы междунар. конф. «Геотехнические проблемы мегаполисов». – М., 2010.
87. *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.
88. *Марков К.К.* Очерки географии четвертичного периода. – М. : Географгиз, 1955
89. *Марков К.К.* Поздне- и послеледниковая история окрестностей Ленинграда на фоне поздне- и послеледниковой истории Балтики // Тр. Комиссии по изучению четвертичного периода. Т.IV. вып. 1. – Л. : Изд-во АН СССР, 1934. – с.5–70.
90. *Марков К.К.* Развитие рельефа северо-западной части Ленинградской области // Труды главного Геолого-разведочного управления ВСНХ СССР, вып.117. – М-л, 1931. – 256 с.
91. *Матросов А.В.* Maple 6: Решение задач высшей математики и механики: Практическое руководство. – СПб : ВНУ, 2001. – 528 с.
92. *Мирсаяпов И.Т., Сафин Д.Р.* Экспериментальные исследования грунтового массива при совместном деформировании с ограждающей конструкцией консольного типа в процессе поэтапной разработки котлована // Известия КГАСУ. – 2011. – №3 (17). – С. 79-84.
93. *Мирсаяпов И.Т., Хасанов Р.Р.* Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния гибких ограждений с распоркой в

- процессе поэтапной разработки грунта // Известия КГАСУ. – 2011. – №2 (16). – С. 129-135.
94. *Морарескул Н.Н., Заварзин Л.Г.* Опыт типизации оснований и фундаментов в районах массовой застройки : научное издание. – Л. : ЛДНТП, 1984. – 32 с.
95. *Мухелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М., Наука, 1966. – 709 с.
96. *Мэтьюз Д.Г., Финк К.Д.* Численные методы. Использование MATLAB = Numerical Methods: Using MATLAB. – 3-е изд. – М. : «Вильямс», 2001. – 720 с.
97. *Никифорова Н.С.* Влияние строительства уникальных объектов с подземной частью на примыкающие исторические здания / Н.С. Никифорова, Ф.Ф. Зехниев, С.В. Астафьев, О.В. Буртовая // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 2 (19). – С. 126–129.
98. *Никифорова Н.С.* Закономерности деформирования оснований зданий вблизи глубоких котлованов и защитные мероприятия: Дисс...д-ра техн. наук. – М., 2008. – 324 с.
99. *Никифорова Н.С.* Снижение геотехнического риска при устройстве глубоких котлованов в городских условиях // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2005. – №5. – С. 12–16.
100. *Новацкий В.* Теория упругости. : Пер. с польск. – М. : Мир, 1975. – 872 с.
101. *Новотворцев В.И.* Опыт применения теории пластичности к задачам об определении несущей способности оснований сооружений. // Изв. НИИ гидротехники, т. XXII. – 1938.
102. *Осокин А.И., Денисова О.О., Шахтарина Т.Н.* Технологическое обеспечение подземного строительства в условиях городской застройки // Жилищное строительство. – 2014. – №3. – С. 16–24.
103. Отчёт по составлению обобщённой карты инженерно-геологического районирования территории Ленинграда и Лесопарковой зоны (для подземного строительства) : Шифр 378–78(33) / Трест ГРИИ ; рук.

- Фурса В. М., Исполн. : И. Т. Мальцев, Б. М. Коршунов, А. В. Майорова. – Л., [б.и.], 1978.
104. *Парамонов В.Н.* Метод конечных элементов при решении нелинейных задач геотехники. – СПб : ГК «Геореконструкция», 2011. – 262 с.
105. *Парамонов В.Н.* Факторы риска при устройстве подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях // Жилищное строительство. 2009. – № 2. – С. 35–37.
106. *Парамонов В.Н.* Экспериментальная проверка применимости некоторых моделей грунта для расчета ограждений котлованов / В.Н. Парамонов, К.В. Сливец // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2008. – №4. – С. 139–145.
107. *Партон В.З., Перлин П.И.* Интегральные уравнения теории упругости. – М. : Наука. 1977. – 312 с.
108. *Партон В.З., Прелин П.И.* Методы математической теории упругости. – М. : Наука. 1981. – 688 с.
109. *Петрухин В.П., и др.* Строительство коммуникационных тоннелей в Москве и обеспечение сохранности существующих зданий / В.П. Петрухин, О.А. Исаев, Д.В. Наятов, С.Р. Гилынтейн // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2002. – № 4. – С. 12 –16.
110. *Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Мозгачева О.А.* Опыт проектирования и мониторинга подземной части турецкого торгового центра // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2004. – №5. – с.2–8.
111. *Пузыревский Н.П.* Фундаменты. – Изд-во: М.-Л: Госстройиздат, 1934. – 516 с.
112. *Ренгач В.Н.* Шпунтовые стенки (расчёт и проектирование). – Л. : Стройиздат, 1970. – 111 с.
113. *Сатин Д.А.* Осадки фундаментов зданий соседней застройки при устройстве траншейной «стены в грунте» // Жилищное строительство. – 2015. – № 4. – С. 8–13.

114. Сахаров И.И., Лыкова Н.И. Расчет подземных сооружений в условиях тесной городской застройки // «Жилищное строительство». – 2009. – № 2. – С. 19–21.
115. Сахаров И.И., Парамонов В.Н. Mathematical modeling of thermal and deformation processes in problems of freezing and thawing of soils // The 5-th International geotechnical symposium / IGS5. – Incheon, May 22-24, 2013. – pp. 122–127.
116. Сахаров И.И., Парамонов В.Н. Некоторые особенности застройки территорий над эскалаторными тоннелями метрополитена в Санкт-Петербурге // «Геотехника». – 2010. – №6. – С. 60–63.
117. Симвулиди И.А. Расчет инженерных конструкций на упругом основании – М. : Изд-во «Высшая школа», 1973. – 431 с.
118. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – т.2. – М. : Наука, 1969. – 512 с.
119. Смоленков В. Ю. Опыт фирмы «Геоизол» при строительстве заглубленных объектов в Санкт-Петербурге // Жилищное строительство. – 2009. – № 2. – С. 43–45.
120. Снитко Н.К. Теория и расчет балок на упругом основании. – Воен.-трансп. акад. РККА им. л.М. Кагановича. – М. : Учеб. отд., Центр. тип. К. Ворошилова, 1937. – 93 с.
121. Снитко А.Н. О решении контактной задачи для жёсткой стенки в упругой среде // Сб. докладов по гидротехнике. – ВНИИГ, 1970. – вып. 11.
122. Снитко А.Н. Расчет гибких опор в грунтовой среде с изменяющимся коэффициентом постели // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1968. – №3. – С.6–7.
123. Снитко Н.К. Вынужденные колебания жесткой стенки в грунтовой среде при действии периодической силы. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1968. – № 6.

124. *Снитко Н.К. Ежов Е.Ф.* Деформационный расчет шпунтовых стенок при учете переменности модуля деформации грунта по глубине / Основания, фундаменты и механика грунтов : межвузовский тематический сборник трудов / Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР, Ленинградский ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт. – Л. : [б. и.], 1978. – С.42.
125. *Снитко Н.К.* Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок. – Л. : Стройиздат, 1968.
126. *Снитко Н.К.* Новый метод нахождения деформаций бруса. – Труды МИИТ. – 1932. – вып. 24.
127. *Соколов Н.Н.* Геологическое строение и история развития рельефа северо-запада РСФСР. – М. : Изд-во АН СССР, 1949.
128. *Соколов Н.Н.* О стратиграфии четвертичных отложений территории Ленинграда и его окрестностей. – Вопр. инж. геол. Ленингр. эконом. р-на. – Л. : ЦБТИ, 1960.
129. *Соколовский В.В.* Статика сыпучей среды. – М. : Физматгиз, 1960. – 121 с.
130. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. / под общей редакцией Ильичева В.А. и Мангушева Р.А. – М. : Изд-во АСВ, 2014 – 756 с.
131. *Стаин А.В.* Взаимодействие конструкций контрфорсных «стен в грунте» с грунтовым массивом при строительстве городских тоннелей : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.11 / Стаин Александр Валерьевич; [Место защиты: Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т (техн. ун-т)]. – М., 2008. – 185 с.
132. *Татаринов С.В., Бронин В.Н., Осокин А.И., Денисова О.О.* Совмещенный метод разработки котлована по технологии top-down и открытым способом при строительстве в стесненной городской застройке // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 3 (38). – С. 93–100.
133. *Татаринов С.В., Осокин А.И., Денисова О.О., Макарова Е.В.* Система

- геотехнического мониторинга как средство обеспечения безопасности строительства // *Жилищное строительство*. – 2014. – № 9. – С. 10–18.
134. *Тимошенко С.П.* Теория упругости : учебник / С.П. Тимошенко, Д. Гудьер. – М. : Наука, 1975. – 576 с.
135. *Трусделл К.* Первоначальный курс рациональной механики сплошной среды. – М. : Мир, 1975. – 592 с.
136. *Улицкий В.М., Шашкин А.Г.* Подземные сооружения в условиях городской застройки на слабых грунтах // *Гидротехника*. – 2010. – №2. – С. 46–50.
137. *Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г.* Геотехническое сопровождение развития городов. – СПб. : Стройиздат Северо-запад, ГК «Геореконструкция-Фундаментпроект». – 2010. – 551 с.
138. *Улицкий В.М., Шашкин В.Г.* Геотехническое сопровождение реконструкции городов. – М. : Изд-во АСВ, 1999. – 324 с.
139. *Улицкий В.М., Алексеев С.И.* Обеспечение сохранности зданий при устройстве котлованов и прокладке инженерных сетей в Санкт-Петербурге. // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2002. – №4. – с. 17–21.
140. *Фадеев А.Б. Бабанов, В.В.* Подземные сооружения. – Л., ЛИСИ, 1987.
141. *Фадеев А.Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. – М. : Недра, 1987.
142. *Фадеев А.Б., Прегер А.И.* Решение геотехнических задач методом конечных элементов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994.
143. *Фадеев А.Б., Репина П.И., Абдылдаев Э.К.* Метод конечных элементов при решении геотехнических задач и программа «Геомеханика». – Л. : ЛИСИ, 1983.
144. *Федоровский В.Г.* Учет геометрической нелинейности в конечноэлементных расчетах грунтовых массивов // *Сб. трудов НИИ оснований и подземных сооружений*. – М., 1986. – вып.86. – С. 3–9.
145. *Федоровский В.Г.* Численное моделирование работы образца грунта при трехосном сжатии. // *Численные методы решения задач механики грунтов и*

- расчеты фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях : Сб. науч. тр. – Москва : [б. и.], 1985. – С. 145–154.
146. *Флорин В.А.* Основы механики грунтов. – М. : Госстройиздат, 1959. – Т. 1. – 360 с.
147. *Флорин В.А.* Основы механики грунтов. – М. : Госстройиздат, 1961. – Т. 2. – 544 с.
148. *Фурса В.М.* Строительные свойства грунтов района Ленинграда. // Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1975. – 143 с.
149. *Хан Х.* Теория упругости: Основы линейной теории и ее применения: Пер. с нем. – М. : Мир, 1988. – 344 с.
150. *Цытович Н.А.* Механика грунтов. – М. : Высшая школа, 1979. – 272 с.
151. *Шашкин А.Г.* Расчёт осадок зданий и сооружений на слабых глинистых грунтах с учётом развития деформаций сдвига во времени / М.А. Лучкин, В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2007. – № 11.
152. *Шашкин А.Г., Богов С.Г.* Апробация технологии «стена в грунте» в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – №11. – С. 20–22.
153. *Шеффе Г.* Дисперсионный анализ, пер. с англ. – М. : Наука, 1980. – 512 с.
154. *Шихиев Ф.М.* Исследования деформаций и напряжённого состояния грунтов. ММФ СССР. Отдел учебных заведений. Научные труды. – «Гидротехника», вып. 2, 1962.
155. *Шихиев Ф.М.* О распределении давления грунтов по высоте подпорных стен. // Одесск. ин-т инженеров морского флота. Научные труды, юбилейный выпуск. – ММФ СССР, 1955.
156. *Эдвардс Ч.Г., Пенни Д.Э.* Дифференциальные уравнения и краевые задачи. Моделирование и вычисление с помощью Mathematica, Maple и MATLAB. Пер. с англ. Я. К. Шмидского = Differential Equations and Boundary Value Problems: Computing and Modeling. – 3-е изд. – М. : изд-во «Вильямс»,

2008. – 1104 с.

157. *Якоби Э.К.* Расчёт шпунтовых стенок. – СПб, 1912.
158. *Яковлев С.А.* Наносы и рельеф г. Ленинграда и его окрестностей // Тр. Научно-мелиоративного ин –та. – Л., 1925. – 264 с.
159. *Яковлев С.А.* Четвертичные отложения окрестностей Большого Ленинграда (фонды СЗГУ) . – 1935.
160. *Яцкевич З.В. и др.* Отчёт о комплексных геологических и гидрогеологических исследованиях, произведённых на территории пригородной зоны г. Ленинграда в 1953-1955 гг.

## Акт внедрения



**Закрытое акционерное общество «Геострой»**  
 191180, Санкт-Петербург, Загородный проспект, д. 27/21  
 Телефон: +7(812)315-0236 E-mail: info@geostroy.ru  
 Факс: +7(812)713-5373 http://www.geostroy.ru

Р/с 40702810639000001422, кор/с 30101810200000000791  
 в филиале ОПЕРУ-5 ОАО «Банк ВТБ Северо-запад»  
 г. Санкт-Петербург БИК 044030791  
 ИНН 7803041470 КПП 783601001 ОГРН 1037843073256

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ЗАО "Геострой"

/Осокин А.И. /

Дата "18" сентября 2014 г.

Для предоставления в  
 диссертационный совет  
 Д 212.223.01 при  
 ФГБОУ ВПО СПб ГАСУ

## АКТ

о внедрении результатов  
 кандидатской диссертационной работы  
 Сапина Дмитрия Александровича

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы Сапина Дмитрия Александровича на тему «Технологические осадки фундаментов зданий соседней застройки при устройстве траншейной «стены в грунте», выполненной в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» на кафедре Геотехники под руководством член-корреспондента РААСН, д. т. н., профессора Мангушева Рашида Александровича **внедрены в процесс проектирования** строительных объектов, содержащих конструкцию типа «стена в грунте».

Новизна научной работы заключается в возможности прогнозирования осадок зданий, вызванных процессом устройства вблизи них конструкций по технологии «стена в грунте». Данные конструкции используются в качестве ограждения котлованов при возведении объектов с развитым подземным пространством в глубоких котлованах в условиях стеснённой городской застройки и сложных инженерно-геологических условиях, что характерно для строительства в центральной части Санкт-Петербурга.

Использование указанных результатов позволяет повысить качество проектирования конструкций типа «стена в грунте» и обеспечить безопасность существующей застройки, расположенной вблизи объектов нового строительства.

Генеральный директор  
 ЗАО "Геострой",  
 заслуженный строитель России, к. т. н.



/Осокин А.И. /

**Формулы для вычисления коэффициентов  $\alpha_x$  и  $\alpha_z$**   
**в программе MS Office Excel**

При составлении в программе MS Office Excel таблицы с расположением исходных данных по форме представленной на рисунке П.1.1 значения коэффициентов  $\alpha_z$  и  $\alpha_x$  (см. главу 3, выражения ( 3.28 ), ( 3.30 )) будут вычисляться по приведённым ниже формулам ( П.1.1 ) и ( П.1.2 ).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2		x, м	y, м	z, м	r, м	$h_i^{\text{расч}}$ , м	v	$R_1$ , м	$R_2$ , м	$\alpha_z$ , 1/м	$\alpha_x$ , 1/м <sup>2</sup>	
3		2.2	0	3	2.2	0	0.3	3.7	3.7	0.0278201	0.1994021	
4												

Рисунок П.1.1 – Порядок представления исходных данных

$$\begin{aligned}
 \alpha_z &= ((15 * F3^3 * D3 + 35 * F3^2 * D3^2 + 9 * F3 * E3^2 * D3 + 25 * F3 * D3^3 + 5 * E3^2 * D3^2 + 5 * D3^4) / I3^5) + (- \\
 &4 * F3 * G3 * D3 - 4 * G3 * D3^2 + 3 * F3^2 - \\
 &F3 * D3 + 2 * E3^2 + 2 * D3^2) / I3^3 - (-1 + 2 * G3) / I3^1 - \\
 &(3 * F3^2 - 6 * F3 * D3 + 2 * E3^2 + 3 * D3^2) / H3^3 + (- \\
 &1 + 2 * G3) / H3^1) / (8 * \text{ПИ}() * (1 - G3))
 \end{aligned}
 \tag{ П.1.1 }$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_x &= ((10 * F3^2 * D3 + 14 * F3 * D3^2 + 4 * E3^2 * D3 + 4 * D3^3) / \\
 &I3^5) + (-4 * G3 * D3 - \\
 &F3 + 5 * D3) / I3^3 + 4 * D3^2 * (D3 + F3) / (E3^2 * I3^3) + 8 * \\
 &D3^2 * (D3 + F3) / (E3^4 * I3^1) + 2 * G3 * (D3 + F3) / (E3^2 * \\
 &I3^1) + (-D3 + F3) / H3^3 - 2 * G3 * (- \\
 &D3 + F3) / (E3^2 * H3^1) / (8 * \text{ПИ}() * (1 - G3))
 \end{aligned}
 \tag{ П.1.2 }$$

**Формулы для вычисления коэффициентов  $\alpha_x$  и  $\alpha_z$**   
**в программе Maple и при использовании различных языков**  
**программирования**

Значения коэффициентов  $\alpha_z$  и  $\alpha_x$  (см. главу 3, выражения ( 3.28 ), ( 3.30 )) в различных программах и языках программирования, использующим буквенное обозначение переменных, вычисляются по формулам ( П.2.1 ) и ( П.2.2 ).

$$\alpha_z = \frac{((15*h^3*z+35*h^2*z^2+9*h*r^2*z+25*h*z^3+5*r^2*z^2+5*z^4)/(R_2)^5+(-4*h*nu*z-4*nu*z^2+3*h^2-h*z+2*r^2+2*z^2)/(R_2)^3-(-1+2*nu)/(R_2)^1)-(3*h^2-6*h*z+2*r^2+3*z^2)/(R_1)^3+(-1+2*nu)/(R_1)^1)/(8*pi*(1-nu))}{(P.2.1)}$$

$$\alpha_x = \frac{((10*h^2*z+14*h*z^2+4*r^2*z+4*z^3)/(R_2)^5+(-4*nu*z-h+5*z)/(R_2)^3+4*z^2*(z+h)/(r^2*(R_2)^3)+8*z^2*(z+h)/(r^4*(R_2)^1)+2*nu*(z+h)/(r^2*(R_2)^1)+(-z+h)/(R_1)^3-2*nu*(-z+h)/(r^2*(R_1)^1))/(8*pi*(1-nu))}{(P.2.2)}$$

**Таблицы для определения коэффициентов  $\alpha_x$  и  $\alpha_z$** 

Для повышения точности расчёта дополнительных осадок зданий, вызванных устройством вблизи них траншейной стены в грунте рекомендуется вычислять значения коэффициентов  $\alpha_z$  и  $\alpha_x$  (см. главу 3, выражения ( 3.28 ), ( 3.30 )) по формулам, приведённым в Приложениях 2 и 3.



$r = 2$   
 $v = 0.2$

$\alpha_x, 1/\mu$

$h, \mu$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	0.0520476	0.0446202	0.0397544	0.0346879	0.0310000	0.0287793	0.0274666	0.0266661	0.0261575	0.0258214	0.0255916	0.0253120	0.0251592	0.0250699	0.0250124	0.0249751	0.0249496	0.0249316	0.0249185	0.0249088	0.0249014
2	0.1266070	0.1166921	0.1129923	0.1118131	0.1085365	0.1055720	0.1036147	0.1023786	0.1015810	0.1010483	0.1006803	0.1002270	0.0999748	0.0998236	0.0997274	0.0996633	0.0996190	0.0995874	0.0995642	0.0995468	0.0995336
3	0.2460684	0.2388958	0.2337030	0.2335000	0.2342086	0.2318972	0.2294292	0.2277732	0.2266344	0.2259107	0.2254170	0.2248158	0.2244837	0.2242844	0.2241573	0.2240722	0.2240131	0.2239706	0.2239393	0.2239158	0.2238977
4	0.4163811	0.4119251	0.4076524	0.4046401	0.4057419	0.4072018	0.4053260	0.4031156	0.4015741	0.4005722	0.3999084	0.3991285	0.3987120	0.3984665	0.3983112	0.3982076	0.3981356	0.3980839	0.3980457	0.3980169	0.3979947
5	0.6377430	0.6349765	0.6321220	0.6291314	0.6269599	0.6285912	0.6303846	0.6287218	0.6266497	0.6251995	0.6242589	0.6232097	0.6228817	0.6223819	0.6221963	0.6220740	0.6219896	0.6219293	0.6218848	0.6218512	0.6218254
6	0.9097005	0.9079177	0.9060485	0.9039591	0.9015101	0.8997049	0.9015821	0.9035420	0.9019932	0.9000000	0.8986055	0.8971108	0.8964153	0.8964020	0.8958191	0.8956755	0.8955779	0.8955087	0.8954579	0.8954198	0.8953905
7	1.2319199	1.2307214	1.2294629	1.2280657	1.2263319	1.2241377	1.2225127	1.2245178	1.2265689	1.2250859	1.2231407	1.2209066	1.2199412	1.2194597	1.2191863	1.2190161	1.2189028	1.2187662	1.2187234	1.2186905	1.2186605
8	1.6042015	1.6033640	1.6024861	1.6015293	1.6003713	1.5988174	1.5967560	1.5952289	1.5973063	1.5994113	1.5979688	1.5947183	1.5933014	1.5926516	1.5923058	1.5920998	1.5919668	1.5918758	1.5918108	1.5917627	1.5917262
9	2.0264279	2.0258226	2.0251896	2.0245112	2.0237195	2.0226906	2.0212355	2.0193494	2.0177797	2.0199010	2.0220397	2.0187292	2.0165651	2.0156425	2.0151878	2.0149317	2.0147727	2.0146668	2.0145926	2.0145385	2.0144979
10	2.4985288	2.4980786	2.4976086	2.4971116	2.4965498	2.4958524	2.4948980	2.4935013	2.4915608	2.4901267	2.4922761	2.4930382	2.4898496	2.4884719	2.4878475	2.4875185	2.4873239	2.4871986	2.4871130	2.4870517	2.4870062
12	3.5921948	3.5919276	3.5916495	3.5913603	3.5910476	3.5906676	3.5902398	3.5896631	3.5887556	3.5874192	3.5855273	3.5863136	3.5871226	3.5839656	3.5826095	3.5820002	3.5816818	3.5814947	3.5813750	3.5812933	3.5812349
14	4.8850038	4.8846330	4.8846557	4.8844730	4.8842805	4.8840691	4.8838240	4.8835213	4.8831214	4.8825568	4.8817106	4.8785329	4.8793545	4.8801885	4.8770492	4.8757059	4.8751060	4.8747945	4.8746126	4.8744968	4.8744181
16	6.3768668	6.3767514	6.3766318	6.3765091	6.3763818	6.3762460	6.3760955	6.3759210	6.3757077	6.3754322	6.3750556	6.3736814	6.3705303	6.3713714	6.3722198	6.3690912	6.3677560	6.3671622	6.3668554	6.3666771	6.3665641
18	8.0677392	8.0676577	8.0675734	8.0674871	8.0673984	8.0673055	8.0672055	8.0670942	8.0669655	8.0668099	8.0666132	8.0659879	8.0646340	8.0614982	8.0623509	8.0632082	8.0600864	8.0587566	8.0581669	8.0578634	8.0576877
20	9.9575969	9.9575372	9.9574756	9.9574127	9.9573483	9.9572817	9.9572114	9.9571353	9.9570505	9.9569528	9.9568361	9.9565038	9.9558941	9.9545522	9.9514259	9.9522859	9.9531490	9.9500318	9.9487056	9.9481188	9.9478177
22	12.0464256	12.0463807	12.0463343	12.0462871	12.0462389	12.0461894	12.0461378	12.0460831	12.0460237	12.0459575	12.0458816	12.0456824	12.0453621	12.0447620	12.0434277	12.0403075	12.0411724	12.0420393	12.0389253	12.0376017	12.0370170
24	14.3342169	14.3341822	14.3341465	14.3341101	14.3340731	14.3340353	14.3339962	14.3339553	14.3339117	14.3338644	14.3338117	14.3336812	14.3334914	14.3331788	14.3325949	14.3312557	14.3281395	14.3290078	14.3298775	14.3267657	14.3254440
26	16.8209653	16.8209379	16.8209099	16.8208813	16.8208522	16.8208226	16.8207922	16.8207608	16.8207277	16.8206923	16.8206539	16.8205628	16.8204398	16.8202362	16.8199487	16.8193590	16.8180332	16.8149199	16.8157906	16.8166623	16.8135522
28	19.5066670	19.5066451	19.5066226	19.5065998	19.5065765	19.5065529	19.5065288	19.5065040	19.5064782	19.5064510	19.5064219	19.5063552	19.5062701	19.5061521	19.5059727	19.5056687	19.5050820	19.5037586	19.5006474	19.5015198	19.5023929
30	22.3913197	22.3913019	22.3912836	22.3912650	22.3912462	22.3912271	22.3912076	22.3911877	22.3911671	22.3911456	22.3911229	22.3910722	22.3910103	22.3909293	22.3908149	22.3906384	22.3903369	22.3897522	22.3884307	22.3853210	22.3861947
32	25.4749216	25.4749069	25.4748919	25.4748766	25.4748611	25.4748454	25.4748294	25.4748131	25.4747964	25.4747791	25.4747610	25.4747213	25.4746745	25.4746160	25.4745580	25.4744260	25.4742516	25.4739520	25.4733689	25.4720487	25.4689401
34	28.7574715	28.7574592	28.7574467	28.7574339	28.7574210	28.7574080	28.7573947	28.7573812	28.7573675	28.7573533	28.7573385	28.7573208	28.7572703	28.7572263	28.7571703	28.7570943	28.7569842	28.7568114	28.7565131	28.7559312	28.7546120
36	32.2389683	32.2389580	32.2389475	32.2389368	32.2389259	32.2389149	32.2389038	32.2388925	32.2388810	32.2388692	32.2388570	32.2388311	32.2388020	32.2387679	32.2387260	32.2386717	32.2385973	32.2384369	32.2383169	32.2380197	32.2374386
38	35.9194116	35.9194028	35.9193938	35.9193847	35.9193755	35.9193662	35.9193568	35.9193472	35.9193375	35.9193276	35.9193174	35.9192959	35.9192722	35.9192450	35.9192127	35.9191723	35.9191194	35.9190462	35.9189385	35.9187678	35.9184713
40	39.7988007	39.7987931	39.7987855	39.7987777	39.7987698	39.7987618	39.7987537	39.7987456	39.7987373	39.7987288	39.7987202	39.7987022	39.7986848	39.7986605	39.7986348	39.7986038	39.7985646	39.7985127	39.7984404	39.7983335	39.7981635

$\infty$   
 $N$

r = 2  
v = 0.3

$\alpha_z, 1/M$

$h, M$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	0.0142353	0.0066496	-0.0019320	-0.0051514	-0.0046041	-0.0034195	-0.0024518	-0.0017691	-0.0013001	-0.0009757	-0.0007473	-0.0004629	-0.0003046	-0.0002104	-0.0001511	-0.0001120	-0.0000852	-0.0000663	-0.0000526	-0.0000424	-0.0000347	-0.0000282
2	0.0281349	0.0082545	-0.0061842	-0.0145416	-0.0149603	-0.0117926	-0.0086639	-0.0063290	-0.0046887	-0.0035408	-0.0027265	-0.0017042	-0.0011301	-0.0007855	-0.0005672	-0.0004225	-0.0003229	-0.0002523	-0.0002007	-0.0001623	-0.0001331	-0.0001057
3	0.0305596	0.0090838	-0.0094460	-0.0203516	-0.0252025	-0.0228914	-0.0177408	-0.0131919	-0.0098333	-0.0074452	-0.0057422	-0.0035997	-0.0023945	-0.0016700	-0.0012098	-0.0009039	-0.0006929	-0.0005427	-0.0004329	-0.0003508	-0.0002882	-0.0002331
4	0.0284705	0.0106826	-0.0074110	-0.0223151	-0.0301809	-0.0327161	-0.0286925	-0.0222794	-0.0167925	-0.0127287	-0.0098031	-0.0061267	-0.0040704	-0.0028392	-0.0020587	-0.0015403	-0.0011825	-0.0009276	-0.0007411	-0.0006015	-0.0004949	-0.0004044
5	0.0254779	0.0116792	-0.0031304	-0.0183502	-0.0308883	-0.0369197	-0.0380594	-0.0329756	-0.0257519	-0.0196393	-0.0150871	-0.0093503	-0.0061757	-0.0042941	-0.0031092	-0.0023254	-0.0017856	-0.0014016	-0.0011207	-0.0009104	-0.0007498	-0.0006141
6	0.0226481	0.0119851	0.0004187	-0.0122574	-0.0256913	-0.0368067	-0.0417235	-0.0419922	-0.0362249	-0.0294610	-0.0219176	-0.0134267	-0.0087747	-0.0060603	-0.0043707	-0.0032615	-0.0025017	-0.0019628	-0.0015694	-0.0012752	-0.0010507	-0.0008807
7	0.0202117	0.0118547	0.0028102	-0.0071894	-0.0185213	-0.0306541	-0.0410829	-0.0452890	-0.0449867	-0.0387585	-0.0306202	-0.0186192	-0.0119859	-0.0081908	-0.0058674	-0.0043600	-0.0033356	-0.0026130	-0.0020874	-0.0016954	-0.0013967	-0.0011641
8	0.0181651	0.0114946	0.0043150	-0.0035698	-0.0125496	-0.0230241	-0.0346493	-0.0442978	-0.0480280	-0.0473343	-0.0407827	-0.0253011	-0.0159994	-0.0107727	-0.0076410	-0.0056415	-0.0042980	-0.0033577	-0.0026776	-0.0021724	-0.0017884	-0.0014944
9	0.0164504	0.0110292	0.0052281	-0.0010808	-0.0081824	-0.0164882	-0.0263943	-0.0375437	-0.0467948	-0.0501927	-0.0492202	-0.0338278	-0.0210998	-0.0139400	-0.0097554	-0.0071385	-0.0054060	-0.0042063	-0.0033452	-0.0027089	-0.0022273	-0.0018234
10	0.0150062	0.0105270	0.0057594	0.0006227	-0.0050764	-0.0116426	-0.0194880	-0.0290017	-0.0398181	-0.0487865	-0.0519439	-0.0438043	-0.0276739	-0.0178929	-0.0123057	-0.0088984	-0.0066849	-0.0051729	-0.0040983	-0.0033099	-0.0027163	-0.0022331
12	0.0127289	0.0095391	0.0061735	0.0026004	-0.0012675	-0.0055740	-0.0105331	-0.0164509	-0.0237332	-0.0327596	-0.0431547	-0.0545997	-0.0459456	-0.0294219	-0.0193361	-0.0135099	-0.0099127	-0.0075469	-0.0059113	-0.0047353	-0.0038632	-0.0031641
14	0.0110289	0.0086511	0.0061588	0.0035396	0.0007522	-0.0022279	-0.0056387	-0.0094937	-0.0140506	-0.0196124	-0.0265801	-0.0454789	-0.0565153	-0.0475394	-0.0307600	-0.0204692	-0.0144770	-0.0107443	-0.0082668	-0.0065383	-0.0052847	-0.0043244
16	0.0097185	0.0078817	0.0059661	0.0039674	0.0018647	-0.0003777	-0.0028123	-0.0055135	-0.0085851	-0.0121744	-0.0164927	-0.0286160	-0.0471881	-0.0579606	-0.0487706	-0.0318161	-0.0213810	-0.0152692	-0.0114365	-0.0088749	-0.0070752	-0.0056444
18	0.0086807	0.0072209	0.0057047	0.0041308	0.0024885	0.0007580	-0.0010892	-0.0030929	-0.0053073	-0.0078066	-0.0106941	-0.0182821	-0.0301419	-0.0484967	-0.0590894	-0.0497497	-0.0328701	-0.0221299	-0.0159290	-0.0120206	-0.0093943	-0.0073444
20	0.0078399	0.0066528	0.0054239	0.0041532	0.0028350	0.0014580	0.0000055	-0.0015451	-0.0032240	-0.0050715	-0.0071417	-0.0122737	-0.0196474	-0.0313271	-0.0495302	-0.0599949	-0.0505468	-0.0333747	-0.0227555	-0.0164867	-0.0125197	-0.0096444
22	0.0071456	0.0061618	0.0051462	0.0040994	0.0030180	0.0018954	0.0007217	-0.0005171	-0.0018386	-0.0032664	-0.0048307	-0.0085431	-0.0134991	-0.0207224	-0.0322737	-0.0503869	-0.0607373	-0.0512080	-0.0399658	-0.0232857	-0.0169640	-0.0129244
24	0.0065630	0.0057348	0.0048817	0.0040046	0.0031016	0.0021685	0.0011992	0.0001850	-0.0008854	-0.0020261	-0.0032554	-0.0060801	-0.0096467	-0.0144764	-0.0215903	-0.0330469	-0.0510580	-0.0613570	-0.0517653	-0.0344687	-0.0237407	-0.0169640
26	0.0060674	0.0053607	0.0046343	0.0038889	0.0031235	0.0023356	0.0015210	0.0006741	-0.0002122	-0.0011473	-0.0021424	-0.0043746	-0.0070776	-0.0105373	-0.0152734	-0.0223054	-0.0336902	-0.0516383	-0.0618819	-0.0522414	-0.0349016	-0.0237407
28	0.0056409	0.0050309	0.0044050	0.0037638	0.0031069	0.0024326	0.0017380	0.0010196	0.0002724	-0.0005097	-0.0013342	-0.0031497	-0.0052794	-0.0078914	-0.0112706	-0.0159355	-0.0229046	-0.0342338	-0.0521325	-0.0623322	-0.0526528	-0.0349016
30	0.0052700	0.0047383	0.0041934	0.0036361	0.0030662	0.0024624	0.0018831	0.0012655	0.0006263	-0.0000385	-0.0007343	-0.0022447	-0.0039734	-0.0060252	-0.0085675	-0.0118846	-0.0164942	-0.0234139	-0.0346990	-0.0525563	-0.0627228	-0.0526528
32	0.0049446	0.0044770	0.0039985	0.0035097	0.0030106	0.0025003	0.0019776	0.0014408	0.0008874	0.0003145	-0.0002815	-0.0015608	-0.0029971	-0.0046586	-0.0066499	-0.0091378	-0.0124060	-0.0169717	-0.0238520	-0.0351016	-0.0529291	-0.0526528
34	0.0046568	0.0042425	0.0038189	0.0033868	0.0029460	0.0024962	0.0020363	0.0015652	0.0010811	0.0005819	0.0000650	-0.0010346	-0.0022503	-0.0036283	-0.0052370	-0.0071804	-0.0096250	-0.0128541	-0.0173845	-0.0242329	-0.0354535	-0.0526528
36	0.0044006	0.0040309	0.0036534	0.0032686	0.0028766	0.0024470	0.0020692	0.0016523	0.0012251	0.0007859	0.0003329	-0.0006238	-0.0016684	-0.0028333	-0.0041651	-0.0057315	-0.0076394	-0.0100461	-0.0132434	-0.0177449	-0.0245670	-0.0526528
38	0.0041709	0.0038390	0.0035005	0.0031557	0.0028048	0.0024475	0.0020834	0.0017118	0.0013318	0.0009422	0.0005417	-0.0002992	-0.0012081	-0.0022083	-0.0033324	-0.0046267	-0.0061588	-0.0080324	-0.0104134	-0.0135846	-0.0180622	-0.0526528
40	0.0039640	0.0036644	0.0033591	0.0030484	0.0027324	0.0024111	0.0020840	0.0017507	0.0014104	0.0010623	0.0007054	-0.0000403	-0.0008394	-0.0017092	-0.0026733	-0.0037641	-0.0050277	-0.0065317	-0.0083794	-0.0107367	-0.0138861	-0.0526528

h, M











r = 2.2 M  
v = 0.3

$\alpha_z, 1/M$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
0	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
1	0.0112722	0.0061816	-0.004004	-0.0037289	-0.0038105	-0.0022414	-0.0016541	-0.0012341	-0.0009359	-0.0007223	-0.0004520	-0.0002993	-0.0002075	-0.0001494	-0.0001110	-0.0000846	-0.0000659	-0.0000524	-0.0000422	-0.0000346	-0.0000270
2	0.0242215	0.0088730	-0.0029533	-0.0106903	-0.0122980	-0.0103440	-0.0059117	-0.0044483	-0.0033967	-0.0026360	-0.0016645	-0.0011105	-0.0007751	-0.0005612	-0.0004188	-0.0003206	-0.0002507	-0.0001997	-0.0001516	-0.00010326	-0.0000637
3	0.0278201	0.0096564	-0.0058084	-0.0153983	-0.0204007	-0.0196930	-0.0159782	-0.0122365	-0.0092949	-0.0071265	-0.0055446	-0.0035144	-0.0023529	-0.0016478	-0.0011970	-0.0008962	-0.0006880	-0.0005394	-0.0004307	-0.0003492	-0.0002871
4	0.0267666	0.0108353	-0.0049804	-0.0175807	-0.0245831	-0.0275264	-0.0252530	-0.0203620	-0.0157347	-0.0121205	-0.0094357	-0.0059738	-0.0039974	-0.0028007	-0.0020368	-0.0015271	-0.0011741	-0.0009221	-0.0007374	-0.0005989	-0.0004930
5	0.0244097	0.0116201	-0.0018837	-0.0152346	-0.0257254	-0.0310486	-0.0326910	-0.0294161	-0.0237520	-0.0185233	-0.0144372	-0.0090951	-0.0060584	-0.0042336	-0.0030752	-0.0023050	-0.0017728	-0.0013932	-0.0011150	-0.0009064	-0.0007469
6	0.0219530	0.0118590	0.0010168	-0.0105750	-0.0222878	-0.0314508	-0.0357206	-0.0365319	-0.0326001	-0.0264136	-0.0207667	-0.0130087	-0.0085926	-0.0059696	-0.0043208	-0.0032321	-0.0024834	-0.0019508	-0.0015613	-0.0012696	-0.0010466
7	0.0197405	0.0117210	0.0030936	-0.0063060	-0.0166415	-0.0273126	-0.0356292	-0.0392156	-0.0394748	-0.0350954	-0.0285439	-0.0179259	-0.0117048	-0.0080572	-0.0057963	-0.0043189	-0.0033103	-0.0025966	-0.0020765	-0.0016878	-0.0013913
8	0.0178336	0.0113734	0.0044464	-0.0030940	-0.0115276	-0.0210439	-0.0310344	-0.0387897	-0.0419138	-0.0417914	-0.0370956	-0.0241135	-0.0155588	-0.0105760	-0.0075404	-0.0055850	-0.0042638	-0.0033359	-0.0026631	-0.0021624	-0.0017813
9	0.0162095	0.0109250	0.0052845	-0.0008159	-0.0076071	-0.0153920	-0.0243582	-0.0338864	-0.0412542	-0.0440533	-0.0436575	-0.0317205	-0.0203868	-0.0136459	-0.0096130	-0.0070612	-0.0053605	-0.0041777	-0.0033264	-0.0026961	-0.0022183
10	0.0148262	0.0104393	0.0057782	0.0007743	-0.0047386	-0.0110115	-0.0183488	-0.0269324	-0.0361348	-0.0432254	-0.0457882	-0.0400911	-0.0264692	-0.0174407	-0.0121010	-0.0087922	-0.0066243	-0.0051358	-0.0040742	-0.0032937	-0.0027050
12	0.0126213	0.0094776	0.0061639	0.0026518	-0.0011380	-0.0053350	-0.0101263	-0.0157651	-0.0222504	-0.0306554	-0.0394432	-0.0484252	-0.0422196	-0.0282082	-0.0188775	-0.0133005	-0.0098031	-0.0074837	-0.0058721	-0.0047098	-0.0038458
14	0.0109598	0.0086074	0.0061432	0.0035558	0.0008067	-0.0021690	-0.0054664	-0.0092196	-0.0136150	-0.0189029	-0.0253778	-0.0417537	-0.0503311	-0.0438064	-0.0295412	-0.0200068	-0.0142647	-0.0106324	-0.0082017	-0.0064977	-0.0052580
16	0.0096716	0.0078499	0.0059507	0.0039702	0.0018886	-0.0003282	-0.0027300	-0.0053862	-0.0083931	-0.0118838	-0.0160432	-0.0274036	-0.0434555	-0.0517710	-0.0450335	-0.0305941	-0.0209161	-0.0150549	-0.0113230	-0.0088086	-0.0070337
18	0.0086475	0.0071972	0.0056912	0.0041285	0.0024987	0.0007829	-0.0010465	-0.0030274	-0.0052111	-0.0076675	-0.0104919	-0.0178250	-0.0289238	-0.0447598	-0.0528964	-0.0460100	-0.0314461	-0.0216634	-0.0157135	-0.0119062	-0.0093272
20	0.0078155	0.0066347	0.0054125	0.0041490	0.0028388	0.0014708	0.0000289	-0.0015088	-0.0031713	-0.0049973	-0.0070380	-0.0120658	-0.0191859	-0.0301056	-0.0457907	-0.0537999	-0.0468053	-0.0321493	-0.0222879	-0.0162703	-0.0124045
22	0.0071271	0.0061477	0.0051367	0.0040947	0.0030186	0.0019019	0.0007349	-0.0004960	-0.0018079	-0.0032236	-0.0047724	-0.0084349	-0.0132877	-0.0202581	-0.0310500	-0.0466256	-0.0545408	-0.0474654	-0.0327395	-0.0228173	-0.0167469
24	0.0065487	0.0057236	0.0048737	0.0040000	0.0031007	0.0021716	0.0012068	0.0001977	-0.0008666	-0.0020001	-0.0032203	-0.0060182	-0.0095357	-0.0142627	-0.0211243	-0.0318217	-0.0473155	-0.0551595	-0.0480219	-0.0332416	-0.0232718
26	0.0060562	0.0053517	0.0046276	0.0038847	0.0031219	0.0023368	0.0015253	0.0006819	-0.0002004	-0.0011308	-0.0021203	-0.0043368	-0.0070135	-0.0104245	-0.0150583	-0.0218381	-0.0324640	-0.0478950	-0.0556837	-0.0484974	-0.0336740
28	0.0056319	0.0050236	0.0043994	0.0037600	0.0031050	0.0024327	0.0017404	0.0010244	0.0002800	-0.0004989	-0.0013197	-0.0031254	-0.0052398	-0.0078258	-0.0111566	-0.0157194	-0.0224364	-0.0330068	-0.0483885	-0.0561335	-0.0489083
30	0.0052627	0.0047322	0.0041886	0.0036327	0.0030642	0.0024620	0.0018943	0.0012685	0.0006313	-0.0000313	-0.0007245	-0.0022284	-0.0039476	-0.0059843	-0.0085009	-0.0117697	-0.0162773	-0.0229451	-0.0334715	-0.0488139	-0.0565237
32	0.0049385	0.0044719	0.0039944	0.0035067	0.0030086	0.0024995	0.0019781	0.0014426	0.0008907	0.0003194	-0.0000247	-0.0015496	-0.0029796	-0.0046317	-0.0066081	-0.0090704	-0.0122905	-0.0167542	-0.0233827	-0.0338738	-0.0491843
34	0.0046518	0.0042382	0.0038154	0.0033841	0.0029442	0.0024952	0.0020364	0.0015662	0.0010832	0.0005852	0.0000697	-0.0010267	-0.0022380	-0.0036099	-0.0052094	-0.0071380	-0.0095571	-0.0127381	-0.0171666	-0.0237632	-0.0342254
36	0.0043963	0.0040272	0.0036503	0.0032662	0.0028749	0.0024760	0.0020690	0.0016529	0.0012265	0.0007882	0.0003362	-0.0006181	-0.0016596	-0.0028203	-0.0041460	-0.0057033	-0.0075935	-0.0099777	-0.0131270	-0.0175267	-0.0240970
38	0.0041673	0.0038359	0.0034979	0.0031536	0.0028032	0.0024465	0.0020830	0.0017120	0.0013327	0.0009438	0.0005441	-0.0002951	-0.0012017	-0.0021989	-0.0033189	-0.0046072	-0.0061302	-0.0079891	-0.0103448	-0.0134680	-0.0178438
40	0.0039609	0.0036617	0.0033568	0.0030465	0.0027310	0.0024101	0.0020835	0.0017506	0.0014109	0.0010634	0.0007071	-0.0000372	-0.0008346	-0.0017023	-0.0026634	-0.0037502	-0.0050079	-0.0065028	-0.0083359	-0.0106678	-0.0137692

z z

r = 2.2 M  
v = 0.3

		$h, M$																																						
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30																		
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000																		
1	0.0445803	0.0390138	0.0344594	0.0296754	0.0260154	0.0222994	0.0237061	0.0202632	0.0199162	0.0195764	0.0195340	0.0195049	0.0194844	0.0194694	0.0194583	0.0194498	0.0194432	0.0194388	0.0194342	0.0194294	0.0194254	0.0194212																		
2	0.1054208	0.0971230	0.0929875	0.0908934	0.0874833	0.0840031	0.0822969	0.0800435	0.0794432	0.0790263	0.0785104	0.0781515	0.0777788	0.077523	0.077323	0.077171	0.077031	0.076899	0.076775	0.076658	0.076546	0.076438																		
3	0.1994021	0.1928911	0.1877819	0.1865317	0.1861304	0.1836242	0.1810195	0.1779366	0.1771159	0.1765518	0.1758613	0.1752489	0.1748872	0.1748511	0.1748240	0.1748032	0.1747911	0.1747791	0.1747671	0.1747551	0.1747431	0.1747311																		
4	0.3323413	0.3280922	0.3238061	0.3206295	0.3206072	0.3209365	0.3188623	0.3148185	0.3136871	0.3129269	0.3120254	0.3112563	0.3108722	0.3108123	0.3107348	0.3107092	0.3106836	0.3106580	0.3106324	0.3106068	0.3105812	0.3105556																		
5	0.5049725	0.5022616	0.4993115	0.4962008	0.4938341	0.4943358	0.4950009	0.4938388	0.4893351	0.4882669	0.4870532	0.4864363	0.4858682	0.4855567	0.4854660	0.4854360	0.4854060	0.4853760	0.4853460	0.4853160	0.4852860	0.4852560																		
6	0.7170983	0.7153246	0.7133602	0.7111233	0.7085404	0.7065594	0.7072907	0.7063863	0.7042636	0.7027178	0.7010031	0.6994868	0.6993034	0.6991223	0.6990630	0.6990185	0.6989843	0.6989501	0.6989159	0.6988817	0.6988475	0.6988133																		
7	0.9684882	0.9672853	0.9659523	0.9644310	0.9625426	0.9602153	0.9583978	0.9562106	0.9538391	0.9519395	0.9514437	0.9513550	0.9512663	0.9511776	0.9510889	0.9510002	0.9509115	0.9508228	0.9507341	0.9506454	0.9505567	0.9504680																		
8	1.2589855	1.2581406	1.2572078	1.2561586	1.2548722	1.2531645	1.2509726	1.2502136	1.2511999	1.2495707	1.2460458	1.2444127	1.2436463	1.2428328	1.2426481	1.2425915	1.2425485	1.2425055	1.2424625	1.2424195	1.2423765	1.2423335																		
9	1.5884926	1.5878800	1.5872069	1.5864616	1.5855744	1.5844177	1.5828108	1.5790392	1.5800426	1.5810643	1.5774434	1.5738270	1.5739272	1.5733870	1.5726777	1.5726136	1.5725565	1.5724994	1.5724423	1.5723852	1.5723281	1.5722710																		
10	1.9560485	1.9564920	1.9559927	1.9554470	1.9548158	1.9540232	1.9529424	1.9493284	1.9477084	1.9487412	1.9482028	1.9447429	1.9431513	1.9424117	1.9416360	1.9414608	1.9412856	1.9411104	1.9409352	1.9407600	1.9405848	1.9404096																		
12	2.8105660	2.8102946	2.8099999	2.8096838	2.8093335	2.8089227	2.8084061	2.8077082	2.8067045	2.8052201	2.8032037	2.8026909	2.8022020	2.7987755	2.7972067	2.7964830	2.7961013	2.7957196	2.7953379	2.7949562	2.7945745	2.7941928																		
14	3.8196617	3.8194882	3.8193010	3.8191024	3.8188880	3.8186479	3.8183652	3.8179432	3.8168886	3.8159195	3.8147171	3.8134717	3.8121829	3.8108503	3.8094828	3.8080803	3.8066528	3.8052003	3.8037228	3.8022203	3.8006928	3.7991403																		
16	4.9841538	4.9840366	4.9839107	4.9837781	4.9836373	4.9834841	4.9833115	4.9828583	4.9825337	4.9820905	4.9805030	4.9778844	4.9770832	4.9766281	4.9761730	4.9757179	4.9752628	4.9748077	4.9743526	4.9738975	4.9734424	4.9729873																		
18	6.3040008	6.3039181	6.3038296	6.3037368	6.3036393	6.3035352	6.3034213	6.3032928	6.3031422	6.3029588	6.3027256	6.3019856	6.3004194	6.2970157	6.2965729	6.2961301	6.2956873	6.2952445	6.2948017	6.2943589	6.2939161	6.2934733																		
20	7.7791800	7.7791195	7.7790551	7.7789877	7.7789174	7.7788432	7.7787637	7.7785779	7.7784631	7.7783249	7.7779290	7.7772053	7.7756518	7.7722579	7.7718229	7.7713879	7.7709529	7.7705179	7.7700829	7.7696479	7.7692129	7.7687779																		
22	9.4096782	9.4096326	9.4095843	9.4095339	9.4094815	9.4094267	9.4093687	9.4092978	9.4091605	9.4090711	9.4088838	9.4084505	9.4077368	9.4061912	9.4028038	9.4023740	9.4019443	9.4015146	9.4010849	9.4006552	9.4002255	9.4000000																		
24	11.1954871	11.1954520	11.1954148	11.1953761	11.1953360	11.1952944	11.1952508	11.1952044	11.1951545	11.1950995	11.1950378	11.1948830	11.1946555	11.1942802	11.1935730	11.1920328	11.1886497	11.1882234	11.1877971	11.1873708	11.1869445	11.1865182																		
26	13.1366016	13.1365739	13.1365448	13.1365145	13.1364831	13.1364507	13.1364170	13.1363815	13.1363438	13.1363031	13.1362583	13.1362108	13.1361608	13.1357627	13.1354427	13.1347100	13.1331794	13.1297933	13.1293672	13.1289411	13.1285150	13.1280889																		
28	15.2330182	15.2329960	15.2329727	15.2329486	15.2329236	15.2328979	15.2328712	15.2328435	15.2328142	15.2327830	15.2327493	15.2327146	15.2326790	15.2326423	15.2326046	15.2325669	15.2325292	15.2324915	15.2324538	15.2324161	15.2323784	15.2323407																		
30	17.4847345	17.4847165	17.4846976	17.4846781	17.4846579	17.4846371	17.4846157	17.4845935	17.4845703	17.4845458	17.4845197	17.4844930	17.4844653	17.4844376	17.4844099	17.4843822	17.4843545	17.4843268	17.4842991	17.4842714	17.4842437	17.4842160																		
32	19.8917490	19.8917342	19.8917186	19.8917025	19.8916860	19.8916690	19.8916515	19.8916334	19.8916147	19.8915951	19.8915743	19.8915523	19.8915293	19.8914996	19.8914633	19.8914133	19.8913600	19.8913037	19.8912444	19.8911821	19.8911178	19.8910515																		
34	22.4540604	22.4540480	22.4540351	22.4540217	22.4540080	22.4539939	22.4539794	22.4539645	22.4539491	22.4539331	22.4539164	22.4538979	22.4538794	22.4538609	22.4538424	22.4538239	22.4538054	22.4537869	22.4537684	22.4537499	22.4537314	22.4537129																		
36	25.1716678	25.1716573	25.1716465	25.1716352	25.1716237	25.1716119	25.1715998	25.1715874	25.1715746	25.1715613	25.1715476	25.1715339	25.1715198	25.1715057	25.1714916	25.1714775	25.1714634	25.1714493	25.1714352	25.1714211	25.1714070	25.1713929																		
38	28.0445705	28.0445617	28.0445525	28.0445429	28.0445332	28.0445232	28.0445129	28.0445025	28.0444917	28.0444806	28.0444691	28.0444576	28.0444461	28.0444346	28.0444231	28.0444116	28.0444001	28.0443886	28.0443771	28.0443656	28.0443541	28.0443426																		
40	31.0727682	31.0727606	31.0727527	31.0727446	31.0727362	31.0727277	31.0727189	31.0727100	31.0727009	31.0726915	31.0726818	31.0726723	31.0726628	31.0726533	31.0726438	31.0726343	31.0726248	31.0726153	31.0726058	31.0725963	31.0725868	31.0725773																		

z N

$r = 2.2$   $M$   
 $v = 0.35$

$\alpha_z, 1/M$	$h, M$																															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30											
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
1	0.011272	0.006449	-0.002569	-0.003810	-0.003954	-0.003145	-0.002344	-0.001738	-0.001294	-0.000920	-0.000753	-0.000478	-0.000315	-0.000218	-0.000157	-0.000116	-0.000089	-0.000069	-0.000055	-0.000044	-0.000036	-0.000030	-0.000025	-0.000020	-0.000016	-0.000012	-0.000009	-0.000006	-0.000004	-0.000003	-0.000002	-0.000001
2	0.024221	0.009016	-0.002768	-0.010853	-0.012706	-0.010762	-0.008247	-0.006183	-0.004657	-0.003563	-0.002764	-0.001747	-0.001162	-0.000814	-0.000589	-0.000442	-0.000337	-0.000263	-0.000210	-0.000169	-0.000139	-0.000118	-0.000098	-0.000080	-0.000064	-0.000050	-0.000038	-0.000028	-0.000020	-0.000014	-0.000010	-0.000007
3	0.027820	0.009579	-0.005969	-0.015602	-0.020920	-0.020403	-0.016638	-0.012769	-0.009721	-0.007463	-0.005804	-0.003685	-0.002469	-0.001730	-0.001257	-0.000941	-0.000728	-0.000569	-0.000452	-0.000367	-0.000301	-0.000248	-0.000206	-0.000172	-0.000145	-0.000122	-0.000102	-0.000085	-0.000071	-0.000059	-0.000049	-0.000041
4	0.026766	0.010691	-0.005388	-0.018102	-0.025114	-0.028325	-0.026198	-0.021201	-0.016429	-0.012674	-0.009876	-0.006266	-0.004192	-0.002938	-0.002138	-0.001603	-0.001232	-0.000968	-0.000747	-0.000629	-0.000518	-0.000418	-0.000328	-0.000248	-0.000179	-0.000125	-0.000084	-0.000057	-0.000042	-0.000031	-0.000023	-0.000017
5	0.024409	0.011489	-0.002302	-0.015942	-0.026524	-0.031822	-0.033693	-0.030524	-0.024745	-0.019340	-0.015094	-0.009524	-0.006349	-0.004400	-0.003226	-0.002419	-0.001861	-0.001463	-0.001171	-0.000952	-0.000787	-0.000659	-0.000551	-0.000458	-0.000378	-0.000308	-0.000249	-0.000201	-0.000162	-0.000131	-0.000106	-0.000084
6	0.021953	0.011756	0.000669	-0.011235	-0.023225	-0.032451	-0.036673	-0.037689	-0.033842	-0.027520	-0.021681	-0.013610	-0.009003	-0.006257	-0.004531	-0.003390	-0.002601	-0.002047	-0.001632	-0.001332	-0.001092	-0.000922	-0.000777	-0.000648	-0.000534	-0.000434	-0.000347	-0.000272	-0.000214	-0.000165	-0.000124	-0.000090
7	0.019740	0.011624	0.002821	-0.006846	-0.017486	-0.028428	-0.036782	-0.040302	-0.040750	-0.036447	-0.029740	-0.018737	-0.012250	-0.008441	-0.006075	-0.004529	-0.003477	-0.002747	-0.002179	-0.001771	-0.001468	-0.001219	-0.000991	-0.000794	-0.000629	-0.000494	-0.000387	-0.000298	-0.000224	-0.000165	-0.000116	-0.000074
8	0.017836	0.011314	0.004236	-0.003520	-0.012224	-0.022037	-0.032276	-0.040068	-0.043165	-0.043167	-0.038523	-0.025172	-0.016274	-0.011073	-0.007906	-0.005854	-0.004471	-0.003493	-0.002794	-0.002269	-0.001869	-0.001506	-0.001186	-0.000917	-0.000694	-0.000524	-0.000396	-0.000299	-0.000225	-0.000166	-0.000117	-0.000075
9	0.016205	0.010878	0.005121	-0.001150	-0.008160	-0.016209	-0.025464	-0.035231	-0.042623	-0.045329	-0.045102	-0.033058	-0.021304	-0.014279	-0.010067	-0.007399	-0.005619	-0.004389	-0.003489	-0.002827	-0.002327	-0.001922	-0.001557	-0.001237	-0.000961	-0.000729	-0.000544	-0.000408	-0.000302	-0.000228	-0.000169	-0.000119
10	0.014826	0.010403	0.005649	0.000509	-0.005179	-0.011688	-0.019263	-0.028120	-0.037567	-0.044669	-0.047132	-0.041642	-0.027628	-0.018238	-0.012667	-0.009209	-0.006947	-0.005388	-0.004272	-0.003456	-0.002837	-0.002327	-0.001922	-0.001557	-0.001237	-0.000961	-0.000729	-0.000544	-0.000408	-0.000302	-0.000228	-0.000169
12	0.012623	0.009458	0.006081	0.002480	-0.001428	-0.005764	-0.010728	-0.016576	-0.023609	-0.031985	-0.040994	-0.049737	-0.043858	-0.029440	-0.019737	-0.013919	-0.010263	-0.007840	-0.006153	-0.004937	-0.004032	-0.003326	-0.002721	-0.002216	-0.001801	-0.001476	-0.001201	-0.000966	-0.000761	-0.000586	-0.000441	-0.000326
14	0.010958	0.008592	0.006087	0.003439	0.000617	-0.002460	-0.005874	-0.009766	-0.014330	-0.019820	-0.026536	-0.034392	-0.051854	-0.045509	-0.030829	-0.020914	-0.014924	-0.011131	-0.008590	-0.006807	-0.005510	-0.004546	-0.003788	-0.003122	-0.002517	-0.001962	-0.001457	-0.000992	-0.000577	-0.000381	-0.000275	-0.000199
16	0.009676	0.007892	0.005911	0.003879	0.001750	-0.000534	-0.003017	-0.005770	-0.008907	-0.012575	-0.016840	-0.028662	-0.045158	-0.053351	-0.046786	-0.031926	-0.021863	-0.015749	-0.011852	-0.009242	-0.007360	-0.005916	-0.004878	-0.004032	-0.003326	-0.002721	-0.002216	-0.001801	-0.001476	-0.001201	-0.000966	-0.000761
18	0.008647	0.007189	0.005662	0.004068	0.002397	0.000631	-0.001257	-0.003307	-0.005573	-0.008121	-0.011057	-0.018684	-0.030214	-0.046512	-0.054521	-0.047803	-0.032814	-0.022641	-0.016436	-0.012469	-0.009765	-0.007617	-0.006032	-0.004937	-0.004032	-0.003326	-0.002721	-0.002216	-0.001801	-0.001476	-0.001201	-0.000966
20	0.007815	0.006628	0.005391	0.004108	0.002762	0.001356	-0.000129	-0.001719	-0.003440	-0.005335	-0.007454	-0.012884	-0.020094	-0.031438	-0.047583	-0.055461	-0.048630	-0.033546	-0.023297	-0.017017	-0.012980	-0.009988	-0.007919	-0.006344	-0.005208	-0.004313	-0.003517	-0.002822	-0.002217	-0.001712	-0.001207	-0.000702
22	0.007121	0.006143	0.005120	0.004058	0.002956	0.001813	0.000612	-0.000658	-0.002014	-0.003482	-0.005089	-0.008897	-0.013948	-0.021205	-0.032479	-0.048451	-0.056234	-0.049317	-0.034169	-0.023844	-0.017514	-0.013493	-0.010466	-0.008449	-0.006888	-0.005644	-0.004617	-0.003722	-0.002927	-0.002232	-0.001537	-0.000842
24	0.006548	0.005720	0.004869	0.003976	0.003054	0.002109	0.001108	0.000096	-0.001030	-0.002203	-0.003468	-0.006374	-0.010034	-0.014957	-0.022102	-0.033218	-0.049167	-0.056874	-0.049896	-0.034688	-0.024317	-0.018248	-0.014271	-0.011245	-0.009244	-0.007499	-0.006032	-0.004937	-0.004032	-0.003326	-0.002721	-0.002216
26	0.006052	0.005349	0.004617	0.003867	0.003084	0.002287	0.001474	0.000579	-0.000331	-0.001293	-0.002318	-0.004618	-0.007402	-0.010953	-0.015781	-0.022842	-0.033885	-0.049769	-0.057419	-0.050391	-0.043139	-0.036988	-0.031821	-0.027615	-0.024244	-0.021499	-0.019244	-0.017299	-0.015544	-0.013989	-0.012634	-0.011479
28	0.005631	0.005021	0.004391	0.003742	0.003074	0.002387	0.001676	0.000940	0.000173	-0.000631	-0.001486	-0.003352	-0.005500	-0.008241	-0.011713	-0.016466	-0.023463	-0.034489	-0.050282	-0.057887	-0.050818	-0.044671	-0.039504	-0.035299	-0.031944	-0.029199	-0.026944	-0.025199	-0.023744	-0.022589	-0.021634	-0.020879
30	0.005267	0.004730	0.004181	0.003618	0.003039	0.002442	0.001831	0.001190	0.000542	-0.000149	-0.000857	-0.002452	-0.004202	-0.006316	-0.008993	-0.012346	-0.017047	-0.023991	-0.034931	-0.050724	-0.058293	-0.051182	-0.046035	-0.041828	-0.038473	-0.035728	-0.033473	-0.031628	-0.030173	-0.029018	-0.028163	-0.027508
32	0.004938	0.004470	0.003987	0.003494	0.002987	0.002480	0.001931	0.001384	0.000816	0.000227	-0.000387	-0.001705	-0.003186	-0.004909	-0.006963	-0.009528	-0.012883	-0.017539	-0.024452	-0.035349	-0.051193	-0.058681	-0.051574	-0.046427	-0.042120	-0.039375	-0.037120	-0.035275	-0.033820	-0.032765	-0.031910	-0.031255
34	0.004651	0.004236	0.003810	0.003378	0.002926	0.002468	0.001992	0.001517	0.001026	0.000507	-0.000024	-0.001157	-0.002414	-0.003838	-0.005502	-0.007510	-0.010032	-0.013349	-0.017967	-0.024840	-0.035714	-0.051566	-0.059059	-0.051952	-0.046805	-0.042500	-0.039755	-0.037900	-0.036445	-0.035290	-0.034435	-0.033780
36	0.004396	0.004026	0.003646	0.003254	0.002858	0.002453	0.002037	0.001610	0.001173	0.000720	0.000252	-0.000729	-0.001805	-0.003032	-0.004391	-0.006012	-0.007981	-0.010467	-0.013751	-0.018340	-0.025185	-0.036059	-0.051912	-0.059405	-0.052300	-0.047145	-0.043890	-0.041145	-0.038900	-0.037445	-0.036290	-0.035435
38	0.004167	0.003850	0.003494	0.003146	0.002790	0.002427	0.002057	0.001679	0.001287	0.000869	0.000472	-0.000091	-0.001323	-0.002636	-0.003527	-0.004867	-0.006453	-0.008391	-0.010847	-0.014054	-0.018669	-0.025512	-0.036465	-0.052318	-0.059911	-0.052806	-0.047651	-0.044406	-0.042151	-0.040700	-0.039545	-0.038690
40	0.003969	0.003669	0.003358	0.003040	0.002719	0.002392	0.002059	0.001719	0.001371	0.001014	0.000647	-0.000120	-0.001442	-0.002844	-0.003833	-0.005272	-0.007047	-0.009291	-0.012046	-0.015251	-0.019866	-0.026711	-0.037664	-0.053517	-0.061010	-0.053905	-0.048750	-0.045505	-0.043250	-0.042095	-0.041240	-0.040385

$M, N$



$r = 2.7$   $M$

$v = 0.2$

$\alpha_z, 1/M$

	$h, M$																															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30											
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	0.0066679	0.0043917	0.0011028	0.00019723	-0.0021090	-0.0016117	-0.0012626	-0.0009805	-0.0007649	-0.0005875	-0.00046026	-0.0003875	-0.0003269	-0.0001830	-0.0001328	-0.0000992	-0.0000759	-0.0000593	-0.0000472	-0.0000382	-0.0000313	-0.0000263	-0.0000210	-0.0000162	-0.0000115	-0.0000072	-0.0000034	-0.0000000	-0.0000000	-0.0000000	-0.0000000	
2	0.0167818	0.0083649	0.0010654	-0.0006979	-0.0004865	-0.0003634	-0.0002502	-0.0001438	-0.00007838	-0.000022053	-0.000014308	-0.000009705	-0.000006846	-0.000004994	-0.000002259	-0.000001803	-0.000001462	-0.000001201	-0.000000982	-0.000000762	-0.000000582	-0.000000442	-0.000000326	-0.000000234	-0.000000161	-0.000000109	-0.000000072	-0.000000046	-0.000000027	-0.000000016	-0.000000009	
3	0.0217862	0.0099546	-0.0001495	-0.00071973	-0.0115213	-0.0112674	-0.0092431	-0.0073545	-0.0058213	-0.0046324	-0.0030222	-0.0020582	-0.0014572	-0.0008215	-0.0004864	-0.0002892	-0.0001851	-0.0001154	-0.0000782	-0.0000542	-0.0000382	-0.0000263	-0.0000182	-0.0000129	-0.0000092	-0.0000064	-0.0000042	-0.0000027	-0.0000016	-0.0000009	-0.0000005	
4	0.0226561	0.0109020	-0.0002026	-0.0088833	-0.0143521	-0.0172692	-0.0149630	-0.0122342	-0.0097972	-0.0078347	-0.0051273	-0.0034957	-0.0024777	-0.0018158	-0.0013686	-0.0010564	-0.0008321	-0.0006669	-0.0005426	-0.0004473	-0.0003669	-0.0002988	-0.0002459	-0.0001985	-0.0001534	-0.0001131	-0.0000782	-0.0000526	-0.0000354	-0.0000234	-0.0000151	
5	0.0216849	0.0114383	0.0011442	-0.0083525	-0.0155426	-0.0197543	-0.0207647	-0.0179086	-0.0146764	-0.0118388	-0.0077687	-0.0052886	-0.0037436	-0.0027418	-0.0020667	-0.0015959	-0.0012579	-0.0010090	-0.0008217	-0.0006780	-0.0005621	-0.0004634	-0.0003792	-0.0003054	-0.0002416	-0.0001882	-0.0001396	-0.0000952	-0.0000582	-0.0000336	-0.0000216	
6	0.0201160	0.0115782	0.0027777	-0.0060876	-0.0143188	-0.0204515	-0.0238033	-0.0235673	-0.0202646	-0.0166713	-0.0110156	-0.0074737	-0.0052709	-0.0038506	-0.0028981	-0.0022362	-0.0017621	-0.0014135	-0.0011514	-0.0009056	-0.0007292	-0.0005862	-0.0004662	-0.0003652	-0.0002842	-0.0002182	-0.0001632	-0.0001142	-0.0000742	-0.0000442	-0.0000272	
7	0.0184659	0.0114291	0.0041128	-0.0035146	-0.0113485	-0.0187121	-0.0241299	-0.0268977	-0.0276318	-0.021733	-0.0149655	-0.0101190	-0.0070951	-0.0051595	-0.0038710	-0.0029808	-0.0023459	-0.0018805	-0.0014514	-0.0010641	-0.0007473	-0.0005426	-0.0004173	-0.0003182	-0.0002392	-0.0001732	-0.0001212	-0.0000812	-0.0000512	-0.0000312	-0.0000192	
8	0.0169222	0.0111058	0.0050488	-0.0013304	-0.0081289	-0.0152567	-0.0220298	-0.0269575	-0.0293192	-0.0275997	-0.0196883	-0.0133225	-0.0092728	-0.0066986	-0.0050013	-0.0038383	-0.0034123	-0.0029123	-0.0024123	-0.0019625	-0.0015191	-0.0011191	-0.0007962	-0.0005426	-0.0003982	-0.0002792	-0.0001882	-0.0001292	-0.0000892	-0.0000592	-0.0000392	
9	0.0155395	0.0106921	0.0056500	0.0003367	-0.0053775	-0.0116015	-0.0182416	-0.0246037	-0.0291858	-0.0312568	-0.0314088	-0.0250515	-0.0172009	-0.0085130	-0.0063136	-0.0048221	-0.0037735	-0.0030131	-0.0024473	-0.0019625	-0.0015191	-0.0011191	-0.0007962	-0.0005426	-0.0003982	-0.0002792	-0.0001882	-0.0001292	-0.0000892	-0.0000592	-0.0000392	
10	0.0143213	0.0102408	0.0060053	0.0015551	-0.0032224	-0.0094672	-0.0142871	-0.0205817	-0.0266495	-0.0309809	-0.0328381	-0.0303261	-0.0218360	-0.0150404	-0.0106662	-0.0078432	-0.0059522	-0.0046363	-0.0036898	-0.0029898	-0.0024596	-0.0019625	-0.0015191	-0.0011191	-0.0007962	-0.0005426	-0.0003982	-0.0002792	-0.0001882	-0.0001292	-0.0000892	
12	0.0123159	0.0093358	0.0062565	0.0030467	-0.0003588	-0.0040552	-0.0081650	-0.0128263	-0.0181393	-0.0239951	-0.0296831	-0.0352567	-0.0322789	-0.0234318	-0.0163592	-0.0117673	-0.0087713	-0.0067412	-0.0053124	-0.0042734	-0.0034968	-0.0028496	-0.0022998	-0.0018496	-0.0014496	-0.0010496	-0.0006496	-0.0004496	-0.0002996	-0.0001996	-0.0001296	
14	0.0107622	0.0085052	0.0061822	0.0037774	0.0012552	-0.0014380	-0.0043757	-0.0076541	-0.0113933	-0.0157271	-0.0207514	-0.0318156	-0.0370146	-0.0337418	-0.0246602	-0.0173995	-0.0126554	-0.0095349	-0.0074023	-0.0058883	-0.0047779	-0.0038825	-0.0030961	-0.0024473	-0.0019073	-0.0014073	-0.0009073	-0.0005073	-0.0003073	-0.0002073		
16	0.0095369	0.0077747	0.0059667	0.0041048	0.0021693	0.0001298	-0.0020555	-0.0044424	-0.0071036	-0.0101337	-0.0136503	-0.0226309	-0.0333924	-0.0383474	-0.0348766	-0.0256333	-0.0182395	-0.0133850	-0.0101723	-0.0079621	-0.0063825	-0.0052971	-0.0044017	-0.0036063	-0.0028109	-0.0020155	-0.0014155	-0.0008155	-0.0004155	-0.0002155		
18	0.0085517	0.0071406	0.0056966	0.0042155	0.0026858	0.0010899	-0.0005969	-0.0024067	-0.0043818	-0.0065772	-0.0090646	-0.0153109	-0.0240451	-0.0346038	-0.0393914	-0.0357817	-0.0264223	-0.0189310	-0.0139940	-0.0107113	-0.0084412	-0.0071406	-0.0059460	-0.0048516	-0.0038572	-0.0028628	-0.0019684	-0.0012740	-0.0006796	-0.0002796		
20	0.0077451	0.0065913	0.0054130	0.0042081	0.0029697	0.0016871	0.0003454	-0.0010749	-0.0025988	-0.0042587	-0.0060960	-0.0105371	-0.0165812	-0.0251462	-0.0355629	-0.0402309	-0.0365200	-0.0270746	-0.0195097	-0.0145097	-0.0111725	-0.0084412	-0.0062968	-0.0051024	-0.0039080	-0.0028136	-0.0018192	-0.0009248	-0.0003254	-0.0001254		
22	0.0070739	0.0061138	0.0051350	0.0041364	0.0031138	0.0020605	0.0009671	-0.0001787	-0.0013923	-0.0026934	-0.0041068	-0.0074074	-0.0116812	-0.0175832	-0.0260271	-0.0363407	-0.0409203	-0.0371335	-0.0276225	-0.0200010	-0.0149516	-0.0109516	-0.0078016	-0.0056516	-0.0044016	-0.0032516	-0.0021016	-0.0012516	-0.0005016	-0.0001016		
24	0.0065075	0.0056966	0.0048710	0.0040304	0.0031720	0.0022915	0.0013827	0.0004378	-0.0005533	-0.0016031	-0.0027269	-0.0052799	-0.0084410	-0.0125946	-0.0183930	-0.0267476	-0.0369838	-0.0414964	-0.0376512	-0.0280892	-0.0204230	-0.0144230	-0.0094230	-0.0054230	-0.0032730	-0.0021230	-0.0012730	-0.0005230	-0.0001230	-0.0000230	-0.0000230	
26	0.0060236	0.0053299	0.0046246	0.0039074	0.0031768	0.0024297	0.0016621	0.0008686	0.0000426	-0.0008240	-0.0017414	-0.0037810	-0.0062167	-0.0092756	-0.0133401	-0.0190608	-0.0273475	-0.0375244	-0.0419849	-0.0380938	-0.0284914	-0.0204914	-0.0144914	-0.0094914	-0.0054914	-0.0033414	-0.0021914	-0.0012414	-0.0004914	-0.0000914	-0.0000414	
28	0.0056057	0.0050057	0.0043963	0.0037775	0.0031481	0.0025063	0.0018490	0.0011728	0.0004730	-0.0002559	-0.0010208	-0.0026927	-0.0046330	-0.0069811	-0.0099630	-0.0139597	-0.0196207	-0.0278547	-0.0379850	-0.0424042	-0.0384765	-0.0284765	-0.0204765	-0.0144765	-0.0094765	-0.0054765	-0.0033265	-0.0021765	-0.0012265	-0.0004765	-0.0000765	
30	0.0052414	0.0047174	0.0041857	0.0036464	0.0030987	0.0025413	0.0019721	0.0013885	0.0007875	0.0001650	-0.0004836	-0.0018828	-0.0034700	-0.0053349	-0.0076162	-0.0105386	-0.0144826	-0.0200967	-0.0282891	-0.0383822	-0.0427682	-0.0387282	-0.0287282	-0.0207282	-0.0147282	-0.0097282	-0.0057282	-0.0035782	-0.0024282	-0.0014782	-0.0007282	
32	0.0049209	0.0044595	0.0039917	0.0035176	0.0030367	0.0025480	0.0020501	0.0015413	0.0010190	0.0004806	-0.0000772	-0.0012678	-0.0025943	-0.0041163	-0.0059228	-0.0081518	-0.0110276	-0.0149297	-0.0205064	-0.0286652	-0.0387282	-0.0428940	-0.0389940	-0.0289940	-0.0209940	-0.0149940	-0.0099940	-0.0059940	-0.0038440	-0.0026940	-0.0017440	
34	0.0046371	0.0042277	0.0038129	0.0033929	0.0029673	0.0025554	0.0020962	0.0016484	0.0011901	0.0007195	0.0002341	-0.0007932	-0.0019211	-0.0031908	-0.0046616	-0.0064220	-0.0086695	-0.0114478	-0.0153163	-0.0208627	-0.0289940	-0.0428940	-0.0470600	-0.0428940	-0.0328940	-0.0228940	-0.0148940	-0.0088940	-0.0053300	-0.0032800	-0.0021300	
36	0.0043839	0.0040183	0.0036480	0.0032734	0.0028941	0.0025097	0.0021193	0.0017220	0.0013165	0.0009014	0.0004747	-0.0004220	-0.0013948	-0.0024730	-0.0036976	-0.0051275	-0.0068509	-0.0090049	-0.0118129	-0.0156558	-0.0211752	-0.0289940	-0.0428940	-0.0470600	-0.0428940	-0.0328940	-0.0228940	-0.0148940	-0.0088940	-0.0053300	-0.0032800	
38	0.0041568	0.0038282	0.0034958	0.0031596	0.0028194	0.0024750	0.0021258	0.0017709	0.0014094	0.0010402	0.0006619	-0.0001284	-0.0009775	-0.0019607	-0.0029450	-0.0041332	-0.0055300	-0.0072233	-0.0093498	-0.0121328	-0.0159510	-0.0214515	-0.0289940	-0.0428940	-0.0470600	-0.0428940	-0.0328940	-0.0228940	-0.0148940	-0.0088940	-0.0053300	
40																																





















