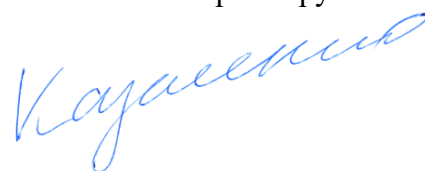


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

На правах рукописи



Казаченко Сергей Андреевич

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСТРОЙСТВА КОТЛОВАНОВ НА  
БЛИЗЛЕЖАЩИЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ КОММУНИКАЦИИ И  
ОКРУЖАЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ ДЛЯ УСЛОВИЙ ГОРОДА  
МОСКВЫ**

Специальность 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
профессор, доктор технических наук  
**Зерцалов Михаил Григорьевич**

Москва – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>6</b>
<b>ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>13</b>
1.1. Общие сведения. Причины развития дополнительных деформаций сооружений .....	13
1.2. Современное состояние вопроса. Анализ существующих методик расчета. ....	14
1.2.1. Экспериментально-аналитические методы.....	14
1.2.1. Расчетные методы .....	19
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАЗРАБОТКИ КОТЛОВАНА НА ОКРУЖАЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ В УСЛОВИЯХ «ПРОСТРАНСТВЕННОЙ» ЗАДАЧИ</b>	<b>23</b>
2.1. Исследование влияния разработки котлована на окружающий массив на основе совместного использования МКЭ и метода планирования эксперимента.....	23
2.2. Описание расчетной модели.....	24
2.3. Множественный регрессионный анализ .....	35
2.4. Проверка адекватности полученных уравнений .....	46
<b>ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РАЗРАБОТКИ КОТЛОВАНА НА ОКРУЖАЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ .....</b>	<b>48</b>

3.1. Постановка задачи .....	48
3.2. Напряжения в однородной полуплоскости от действия, приложенной внутри неё, сосредоточенной силы. ....	50
3.3. Определение перемещений во вмещающем котлован грунтового массиве в упругой постановке. ....	56
3.4. Учет ограждения котлована.....	59
<b>ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ МАССИВА ГРУНТА И ОКРУЖАЮЩЕЙ ЗАСТРОЙКИ.....</b>	<b>64</b>
4.1. Анализ распределения вертикальных перемещений земной поверхности.....	65
4.1.1. Анализ изменения вертикальных перемещений поверхности в пределах призмы обрушения в направлении перпендикулярном котловану ..	65
4.1.2. Анализ изменения вертикальных перемещений поверхности в пределах призмы обрушения в направлении вдоль котлована .....	74
4.2. Анализ вертикальных перемещений точек массива грунта в пределах призмы обрушения .....	81
4.2.1. Анализ вертикальных перемещений массива грунта по центру котлована .....	81
4.2.2. Анализ вертикальных перемещений массива грунта на углу котлована .....	84
4.3. Анализ дополнительных осадок существующего сооружения	87
4.4. Оценка влияния жесткости сооружения на его дополнительные деформации .....	88

<b>ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОГРАЖДЕНИЯ КОТЛОВАНА И МАССИВА ГРУНТА.....</b>	<b>93</b>
5.1. Анализ горизонтальных деформаций ограждения котлована в его центре .....	93
5.1.1. Анализ горизонтальных деформаций ограждения котлована в направлении вдоль котлована .....	103
5.2. Анализ горизонтальных перемещений точек массива грунта в пределах призмы обрушения .....	103
5.2.1. Анализ горизонтальных перемещений массива грунта по центру котлована .....	105
5.2.2. Анализ горизонтальных перемещений массива грунта на углу котлована .....	109
<b>ГЛАВА 6. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ТОЧЕК МАССИВА ГРУНТА. АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ... </b>	<b>113</b>
6.1. Уравнения регрессии .....	113
6.2. Проверка адекватности полученных уравнений регрессии .	116
6.3. Определение дополнительных осадок зданий окружающей застройки .....	120
6.4. Определение дополнительных деформаций инженерных коммуникаций .....	126
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>134</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>137</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>147</b>
Приложение А. Коэффициенты уравнений регрессии для вертикальных перемещений .....	147



Приложение Б. Коэффициенты уравнений регрессии для горизонтальных перемещений .....	164
Приложение В. Список публикаций автора по теме диссертационной работы .....	182

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Современная градостроительная политика, в особенности крупных городов, подразумевает активное использование подземного пространства, которое требует обязательной оценки влияния строительства подземных объектов на окружающую застройку и, расположенные в зоне влияния, инженерные коммуникации.

Широкое распространение при строительстве городских подземных сооружений гражданского и транспортного назначения в настоящее время получили открытый и полужакрытый способы возведения. Глубина таких выработок может достигать 30 м [5, 38], примером может послужить комплекс зданий «Москва-Сити», наибольшая глубина котлованов в котором была 26 метров [50]. Но чаще, в повседневной практике распространены котлованы меньшей глубины, вмещающие в себя 2-4 подземных этажа (6-12 м) [24].

При решении подобных задач интерес представляют не только усилия, возникающие в самом ограждении котлована, но и количественное изменение НДС породного массива. В современной инженерной практике для их решения широкое применение нашли численные методы, основанные на МКЭ, которые позволяют количественно оценить НДС грунта. При этом, в большинстве случаев, как правило, на предварительной стадии проектирования, задачи решаются в «плоской» постановке. «Пространственная» задача решается, обычно, в конечном варианте проекта, особенно, при наличии в окружающей застройке памятников архитектуры или ответственных подземных сооружений. При этом, часто, во внимание не принимается, что решение одной лишь плоской задачи порой приводит к неверной оценке дополнительных деформаций зданий на прилегающей территории. Следует отметить, что, решая задачу в «плоской» постановке, просто технически невозможно учесть совместную работу сложной конструктивной схемы строящегося здания и зданий окружающей застройки, а также влияние отрывки котлована на сооружения, расположенные в районе углов котлована (т.н.

«угловой эффект»). Кроме того, в условиях «плоской задачи» сложнее учитывать влияние отрывки котлована на расположенные рядом инженерные коммуникации [20, 30].

Таким образом, решение задачи количественной оценки изменения НДС системы «грунтовый массив-котлован-сооружение» в объемной постановке позволяет учесть «угловой эффект», оценить влияние жесткости сооружения, определить перемещения точек грунтового массива для оценки влияния на инженерные коммуникации, а также выявить допустимые горизонтальные смещения ограждения котлована. Вместе с тем, метод конечных элементов (МКЭ), отнимает при использовании много времени и требует квалифицированного персонала инженеров – расчётчиков. Следует также учитывать высокую стоимость, предлагаемых на рынке, реализующих МКЭ, программных комплексов. Всё сказанное, свидетельствует об *актуальности* развития и создания более простых и экономичных расчётных методов, позволяющих проектировщикам на предварительной стадии проектирования быстро и эффективно решать перечисленные выше задачи.

**Степень разработанности темы.** Изучением напряженно-деформированного состояния грунтового массива при разработке котлованов занимались многие отечественные ученые Абелев М.Ю., Готман Ю.А., Знаменский В.В., Ильичев В.А., Коновалов П.А., Конюхов Д.С., Маковский Л.В., Мангушев Р.А., Никифорова Н.С., Петрухин В.П., Разводовский Д.Е., Сапин Д.А., Семенюк-Ситников В.В., Симагин В.Г., Сливец К.В., Стаин А.В., Тер-Мартirosян З.Г., Улицкий В.М., Чунюк Д.Ю., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шулятьев О.А, и др. За рубежом этим вопросом занимались Burland J.B., Clough G.W., Chang C.S., Hsieh P.G., Mair R.J., O'Rourke T.D., Ou C.Y., Peck R.B., Zdravkovich L. и др. исследователи.

**Цель и задачи диссертационной работы.** Целью работы является разработка методов расчета, позволяющих на предварительной стадии

проектирования оперативно, без затраты больших средств, оценить влияние устройства котлована на окружающую застройку, с учетом жесткости зданий; на инженерные коммуникации, расположенные в окрестностях котлована; а также на ограждающие его борта. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выполнить анализ существующих методов по оценке влияния разработки котлованов на НДС массива и определения дополнительных перемещений зданий существующей застройки применительно к условиям города Москвы;
- используя решение задачи Мелана, разработать в условиях «плоской» задачи численно - аналитический метод оперативной оценки влияния разработки котлована на вмещающий его массив грунта с учетом жесткости ограждающей конструкции;
- определить независимые факторы, оказывающие наибольшее влияние на НДС массива и перемещения его точек и определить интервалы их варьирования;
- с учётом выбранных факторов провести численное моделирование на основе МКЭ влияние котлована на вмещающий его грунтовый массив и прилегающую застройку в условиях «пространственной» задачи с применением метода планирования эксперимента (МПЭ);
- на основании обработки результатов численного моделирования составить уравнения регрессии, определяющие связь осадок и перемещений грунтового массива и ограждающей конструкции котлована с независимыми факторами, оказывающими на них наибольшее влияние;
- исследовать влияние жесткости сооружений окружающей застройки на их дополнительную осадку;

- получить уравнения регрессии для определения дополнительных деформаций инженерных коммуникаций и разработать методику по их расчету.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в следующем:

На основании решения задачи Мелана разработан в условиях «плоской» задачи численно-аналитический метод определения осадок окружающего массива грунта в окрестностях котлована и горизонтальных перемещений ограждения с учетом его жесткости. В трехмерной постановке рассмотрены и решены практические задачи расчёта влияния сооружения котлована на окружающую застройку и прилегающие инженерные коммуникации. Получен способ на предварительной стадии проектирования, оперативной оценки влияния различных вариантов разработки котлована на окружающую застройку и инженерные коммуникации в условиях «плоской» и «пространственной» задачи. В условиях пространственной задачи исследовано влияние жесткости сооружения на его дополнительную осадку и даны конкретные рекомендации по учету данного фактора.

**Теоретическая и практическая значимость.** Решена задача по количественной оценке изменения НДС массива грунта с применением теории упругости (задача Мелана). Получены уравнения регрессии для определения осадок существующих зданий и горизонтального перемещения ограждения котлована, а также деформаций прилегающих инженерных коммуникаций. Разработаны блок-схемы для их использования. Дан анализ изменения НДС ограждения котлована по его длине и прилегающего грунтового массива в условиях пространственной работы. Даны рекомендации по назначению модуля деформации приведенного массива для учета жесткости зданий окружающей застройки.

**Методология и методы исследования.** Методика исследования при решении задач взаимодействия сооружений с грунтовым массивом основана на совместном использовании МКЭ и метода планирования эксперимента (МПЭ).

Эффективность такого подхода обеспечивается точностью решения задач механики сплошной среды получаемой при применении МКЭ, и возможностями МПЭ, позволяющего установить, используя матрицу планирования экспериментов, необходимое число численных экспериментов. Полученные на основе статистической обработки результатов численного моделирования уравнений регрессии, позволяют оперативно определить, как перемещения в, прилегающей к котловану, области грунтового массива, так и дополнительные осадки инженерных коммуникаций и зданий окружающей застройки.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задачи исследований; применении известного решения задачи Мелана и разработке на его основе численно – аналитического метода для определения дополнительных перемещений грунта в окрестностях котлована; построении численных моделей и отыскании зависимостей в виде уравнений регрессии, полученных на основе численного моделирования в пространственной постановке НДС, вмещающего котлован, массива, и факторного анализа результатов моделирования; создании, с использованием указанных зависимостей, расчётного метода статической работы размещённых в грунтовом массиве инженерных коммуникаций, а также анализе и обобщении полученных результатов и подготовке основных публикаций по теме диссертации.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

На защиту выносятся:

1. Численно – аналитический метод для определения в условиях «плоской» задачи вертикальных перемещений точек грунтового массива в окрестностях котлована, а также горизонтальных смещений ограждения с учетом его жесткости. Метод предназначен для экспресс - оценки вариантов разработки котлована на стадии предварительного проектирования.

2. Разработанные в условиях пространственной задачи, на основе

совместного использования МКЭ и МПЭ, уравнения регрессии с целью:

- определения осадок земной поверхности и зданий окружающей застройки на прилегающей к котловану территории;
- учета влияния жесткости здания на его осадку при разработке котлованов;
- определения горизонтальных перемещений верха ограждения;
- расчета влияния разработки котлована на прилегающие инженерные коммуникации;
- обоснования модели поведения грунта при решении задачи влияния разработки котлована на окружающую застройку.

**Степень достоверности результатов** обеспечивается применением известных принципов теории упругости; использованием сертифицированного вычислительного комплекса Z-Soil, выполняющего расчет методом конечных элементов; проведением поверочных теоретических и численных расчетов, с высокой сходимостью результатов данных расчетов с экспериментальными данными.

**Апробация работы.** Результаты исследований и основные научные положения диссертационной работы доложены на Международной научно-технической конференции «Строительство – формирование среды жизнедеятельности», (Москва, 2012 г.); международном научно-техническом форуме «Тенденции, проблемы и перспективы развития подземного строительства в России» (Санкт-Петербург, 2017 г.); XI Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского (Москва, 2021 г.), а также в 5 статьях, опубликованных в журналах, имеющих индексацию ВАК. Список опубликованных работ Казаченко С.А. приведен в Приложении В.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения с основными

выводами, списка литературы, включающего 85 наименований, в том числе 15 иностранных, и 3-х приложений. Общий объем работы 183 страницы машинописного текста, включающего 18 таблиц и 76 рисунков.

Работа выполнена под руководством профессора, доктора технических наук М.Г. Зерцалова на кафедре Механики грунтов и геотехники Национального Исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ). Основные результаты работы получены в период обучения в аспирантуре НИУ МГСУ в 2012-2016 годах.

Автор выражает искреннюю благодарность за неоценимую помощь в работе над диссертацией научному руководителю д.т.н., проф. Зерцалову Михаилу Григорьевичу.

Автор считает своим долгом выразить признательность всем членам кафедры Механики грунтов и геотехники НИУ МГСУ, возглавляемой к.т.н., доц. Д.Ю. Чунюком, за их помощь и благожелательное содействие при работе над данной диссертацией. Автор также искренне благодарит за данные ему советы и рекомендации профессоров кафедры, д.т.н., проф. З.Г. Тер-Мартirosяна и д.т.н., проф. Н.С. Никифорову.



## **ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1.1. Общие сведения. Причины развития дополнительных деформаций сооружений**

На данный момент, ведение строительных работ в черте города, а также и на вновь осваиваемых территориях, практически всегда сопряжено с проблемой взаимного влияния строящихся и существующих зданий, и сооружений. Принятая градостроительная политика на расширение сетей общественного транспорта, а также комплексное освоение подземного пространства (более плотная застройка, возрастающее количество многофункциональных сооружений с развитой подземной частью) влечет за собой массовую перекладку коммуникаций, а в силу уплотнения планировок застраиваемых территорий, еще и неодновременность производства работ. Все это приводит к развитию дополнительных деформаций основания фундаментов зданий, сооружений и инженерных коммуникаций окружающей застройки, что в свою очередь может приводить к снижению их долговечности и несущей способности [13, 16, 27, 28, 32, 33, 34, 38, 39 и др.].

Дополнительные деформации зданий, сооружений и подземных коммуникаций принято разделять на вертикальную (осадка) и горизонтальную составляющую. При этом, как известно, зачастую наибольшую опасность представляет неравномерность деформаций, нежели их величина [60, 65, 66, 68].

В последние 10-15 лет в инженерную практику прочно вошел термин «геотехнический мониторинг», под которым понимается комплекс работ по наблюдению за состоянием зданий и сооружений (как надземных, так и подземных), прогнозу возможных деформаций в ходе нового строительства, а также наблюдение за развитием этих деформаций на площадке в процессе строительства и в начальный период эксплуатации [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52].

Очевидно, что для предотвращения получения зданиями и сооружениями

недопустимых деформаций и сопутствующих им повреждений, особое внимание необходимо уделять геотехническому прогнозу (оценке) влияния нового строительства на существующие здания, сооружения и коммуникации [16, 17, 18, 19, 31, 40].

## 1.2. Современное состояние вопроса. Анализ существующих методик расчета.

Вопросу оценки влияния устройства котлованов на окружающую застройку посвящено большое количество работ как отечественных авторов: Власов А.Н., Готман Ю.А., Елгаев В.С., Зерцалов, М.Г., Знаменский В.В., Ильичев В.А., Колыбин И.В., Коновалов П.А., Конюхов Д.С., Маковский Л.В., Мангушев Р.А., Мозгачева О.А., Никифорова Н.С., Петрухин В.П., Разводовский Д.Е., Сапин Д.А., Семенюк-Ситников В.В., Симагин В.Г., Сливец К.В., Стаин А.В., Тер-Мартirosян З.Г., Улицкий В.М., Чунюк Д.Ю., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шулятьев О.А, и др., так и за рубежом Burland J.B., Clough G.W., Chang C.S., Hsieh P.G., Mair R.J., O'Rourke T.D., Ou C.Y., Peck R.B., Zdravkovich L и др.

### 1.2.1. Экспериментально-аналитические методы

На основании результата анализа наблюдений за дополнительными осадками сооружений, расположенных в зоне влияния работ по устройству котлованов Peck R.B. (1969) [82] разработан метод определения дополнительных деформаций в окрестностях котлованов с креплением в виде шпунтовых стен, выполненных по консольной схеме и с креплением из труб, в зависимости от типа грунта (рисунок 1.1).

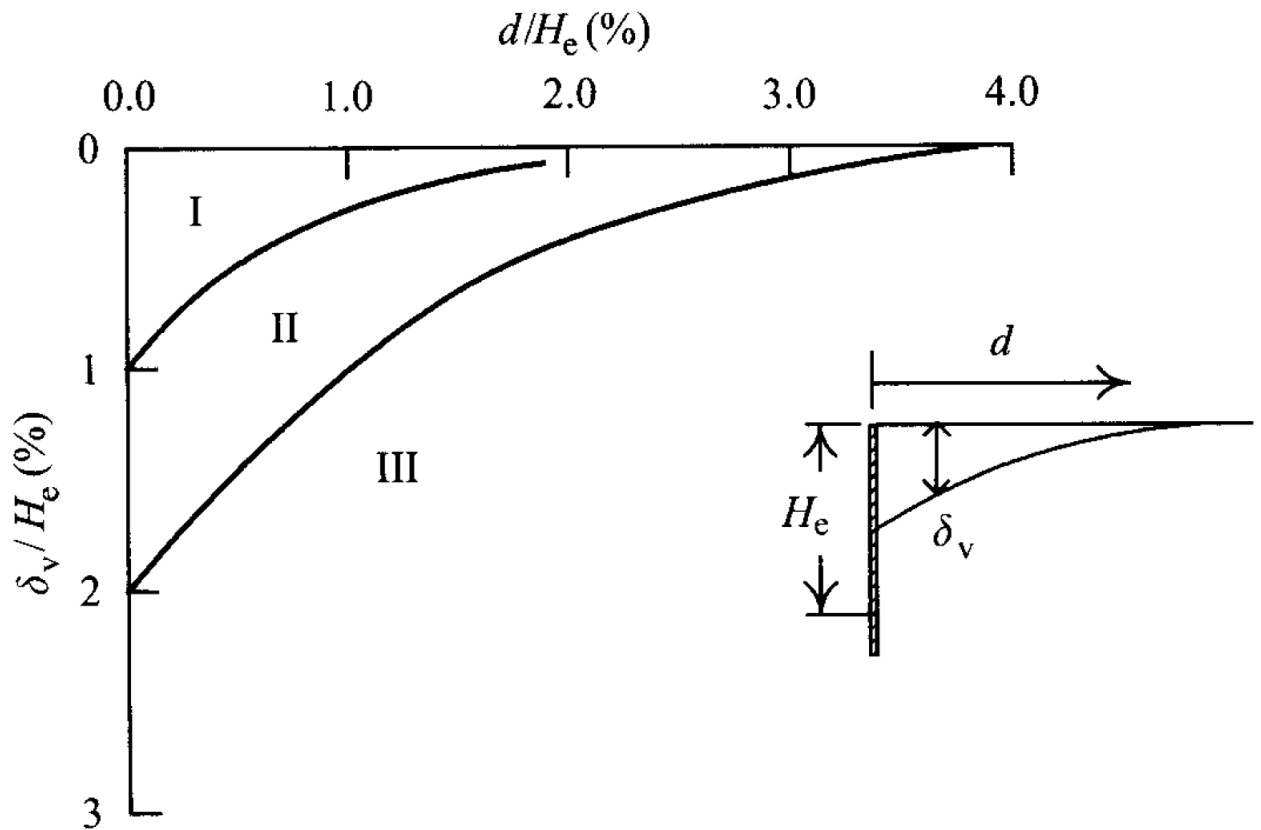


Рисунок 1.1. Метод Реск для определения дополнительных деформаций дневной поверхности в зоне влияния разработки котлованов: I зона – пески и глинистые грунты; II зона – слабые глинистые грунты, но  $N_b < N_{cb}$ ; III зона – слабые глинистые грунты и  $N_b > N_{cb}$  [89].

I категория: пески и глинистые грунты средней прочности.

II категория: слабые глинистые грунты незначительно распространенные в зоне заделки и ниже котлована, но  $N_b < N_{cb}$ .

III категория: слабые глинистые грунты имеющие значительное распространение в зоне заделки и  $N_b > N_{cb}$ .

Здесь  $N_b$  – показатель устойчивости грунтового массива, определяется как  $\gamma H_e/s_u$ ,  $\gamma$  – объемный вес грунта;  $H_e$  – глубина от поверхности земли до дна котлована;  $s_u$  – недренированная прочность грунта сдвигу.  $N_{cb}$  – критическое значение показателя устойчивости [64].

Sugimoto T. (1986) [84] разработан метод для определения дополнительных деформаций дневной поверхности, основанный на обработке результатов натуральных наблюдений при строительстве подземных сооружений для разных грунтовых условий (от песчаных до глинистых грунтов), и анализе факторов влияющих на их величину, которые затем были включены в формулы для определения коэффициента разработки (Excavation coefficient) (1.1) и коэффициента заделки (Embedment coefficient) (1.2):

$$\alpha_c = \frac{BH}{\beta_d D}, \quad (1.1)$$

$$\beta_d = \left( \frac{E_s}{EI} \right)^{1/4}, \quad (1.2)$$

Где В – ширина котлована; Н – расстояние от поверхности земли до дна котлована; D – глубина заделки ограждения;  $\beta_d$  – коэффициент заделки,  $E_s$  – модуль деформации грунта; EI – изгибная жесткость ограждения.

После вычисления приведенных коэффициентов следует воспользоваться предложенными диаграммами, для определения дополнительных деформаций.

В развитие этой работы Sugimoto T. и Sasaki S. (1987) на основании натуральных наблюдений и численных расчетов выполнили анализ связи горизонтальных смещений ограждения с максимальной осадкой [85]. В работе делается вывод, что максимальная осадка дневной поверхности будет равна от 0,5 до 1,0 величины максимального горизонтального смещения ограждения.

Bowles (1988) [71] разработан метод для определения дополнительных вертикальных перемещений дневной поверхности в окрестностях котлована, который заключается в следующей последовательности действий: определение горизонтальных смещений ограждения котлована любым из доступных способов;

расчет площади эпюры горизонтальных смещений  $a_d$ ; определение размера зоны влияния котлована  $D$  (рисунок 1.2):

$$D = (H_e + H_d) \tan \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (1.3)$$

Где  $H_e$  – глубина котлована,  $H_d = B$  если  $\phi = 0$  и  $H_d = 0.5B \cdot \tan(45 + \phi/2)$  если  $\phi > 0$ ;  $B$  – ширина котлована;  $\phi$  – угол внутреннего трения.

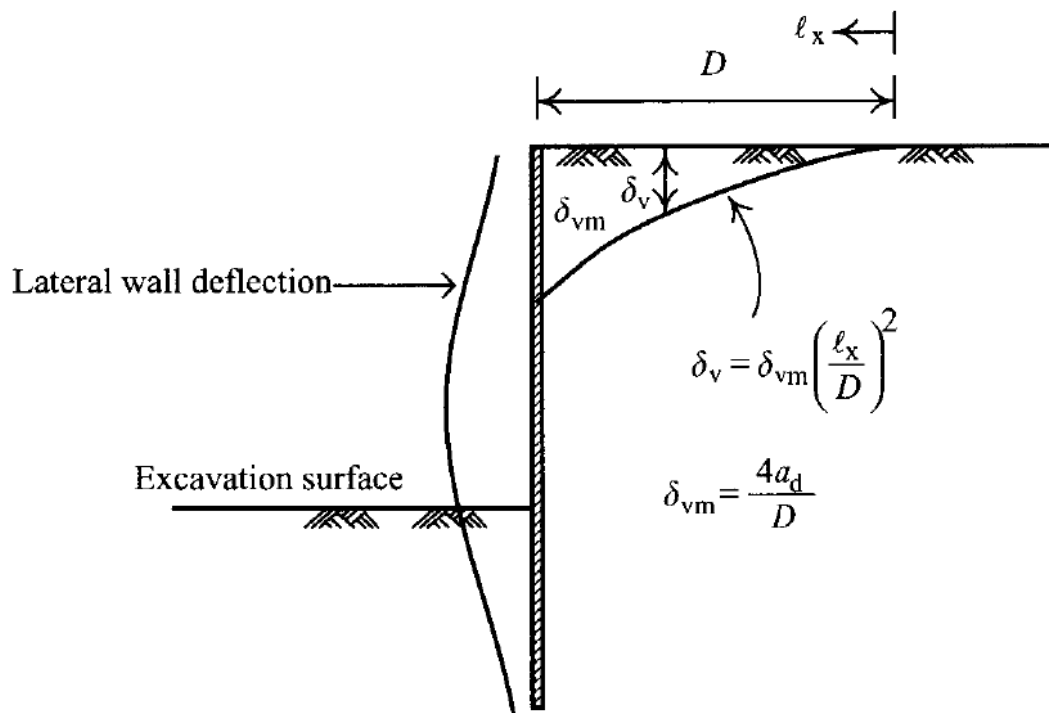


Рисунок 1.2. Метод Bowles для оценки величины осадки земной поверхности при разработке котлована [71]

В данном методе рассмотрены случаи с низкой жесткостью ограждающей конструкции и крепления, что приводит к тому, что максимальная величина осадки  $\delta_{vm}$  расположена в непосредственной близости от ограждения, для ее вычисления предложена формула:

$$\delta_{vm} = \frac{4a_d}{D} \quad (1.4)$$

Величина осадки на некотором удалении от котлована  $l_x$  определяется исходя из того, что форма мульды оседания имеет сводчатую форму, по формуле:

$$\delta_v = \delta_{vm} \left( \frac{l_x}{D} \right)^2 \quad (1.5)$$

Clough и O'Rourke (1990) [73] на основании натуральных наблюдений огибающие для различных форм осадок земной поверхности в зависимости от типов грунтов, слагающих массив.

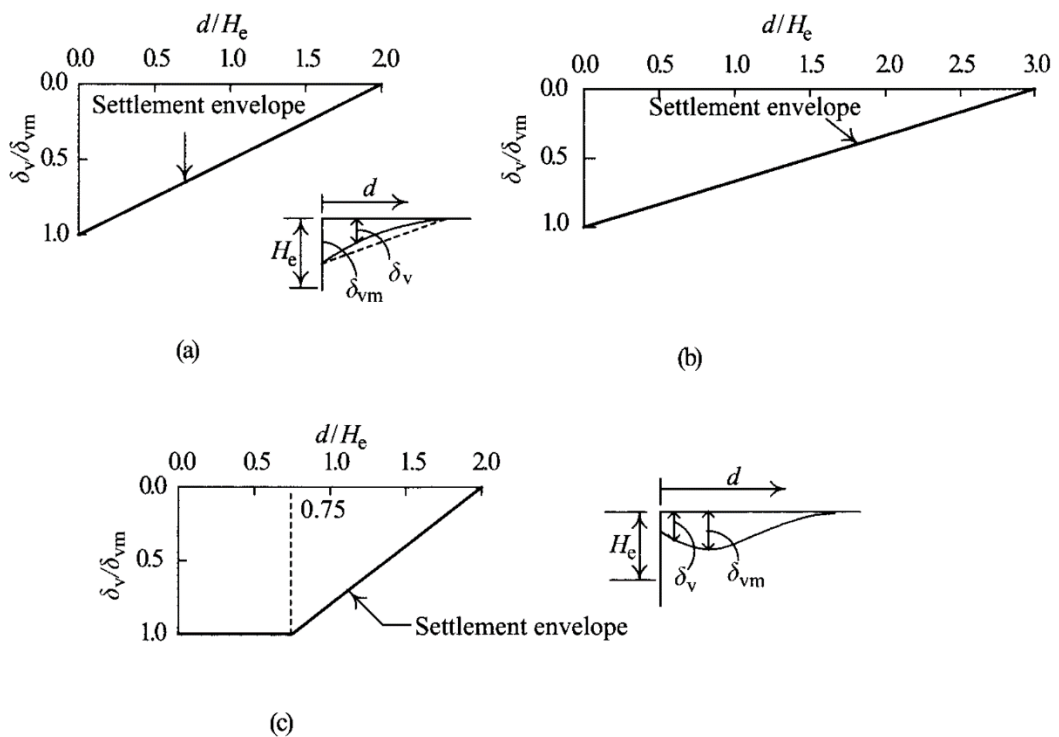


Рисунок 1.3. Метод Clough и O'Rourke для оценки величины осадки земной поверхности при разработке котлованов: а) в песках; б) в прочных и очень прочных глинах; с) в мягких и глинах средней прочности [73]

На представленных графиках (рисунок 1.3) видно, что форма огибающей мульды оседания дневной поверхности может быть треугольной либо трапециевидной, а ее радиус находится в диапазоне от 2 до 3 глубин котлована.

Ou и Hsieh (2000; 2005) [80, 81] разработали метод для прогноза осадки земной поверхности на основании изучения: типов осадки земной поверхности, зон влияния, расположения максимальной осадки и ее величины. Ими выделяется 2 формы оседания земной поверхности: в виде свода и парусная – рисунок 1.4. В своей работе они выделяют 2 зоны по мере удаления от ограждения котлована: основную (Primary Influence Zone - PIZ) и вторичную (Secondary Influence Zone – SIZ).

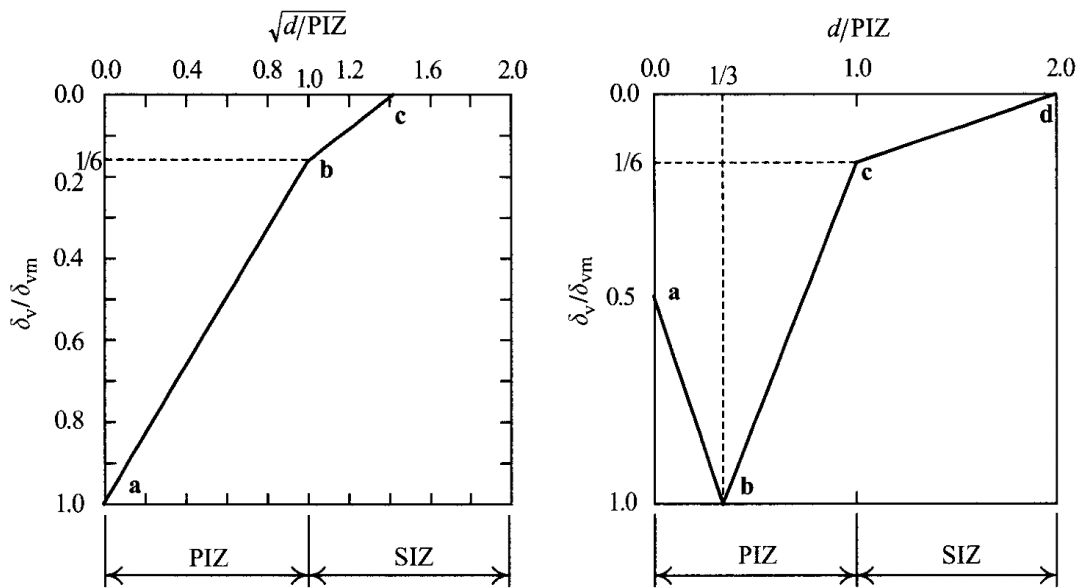


Рисунок 1.4. Метод Ou и Hsieh для оценки величины осадки земной поверхности при разных ее формах

Данный метод, так же как и метод Bowles подразумевает, что на начальном этапе будет определена величина горизонтального смещения ограждения по любой из методик, затем выявлен тип оседания земной поверхности и после этого определяется величина осадки земной поверхности.

### 1.2.1. Расчетные методы

В.В. Семенюк-Ситников (2005) [59] разработал инженерный метод расчета дополнительной осадки существующих зданий и сооружений на основании численного эксперимента с применением МКЭ [2, 7, 14, 67] и дальнейшим регрессионным анализом. В плоской постановке решалась задача оценки влияния

устройства котлована с ограждением по консольной схеме, при варьировании таких факторов как глубина котлована, толщина ограждающей конструкции, глубина заложения и расстояние до фундамента, нагрузка на фундамент. Грунтовые условия приняты 2 типов: заложение в песках и в суглинках с фиксированными значениями физико-механических свойств.

Н.С. Никифоровой (2008) [42] разработан метод расчёта осадок зданий окружающей застройки по их длине с учётом различных факторов, таких как: относительная удаленность зданий от котлована, ИГ условия, способ ограждения и крепления котлована, конструкция здания окружающей застройки. Здание при этом моделировалось в виде балки с изгибной жесткостью EI. Приводится решение для определения изгиба ограждающей конструкции, даны формулы для определения осадки и кривизны подошвы фундамента здания вблизи глубокого котлована, даны примеры аналитического и численного расчетов. Приводится сравнение прогнозируемых и замеренных величин дополнительных осадок, даются рекомендации по выбору ограждающей конструкции котлована и защитных мероприятий. Результаты данной работы легли в основу нормативной документации [61].

С.В. Степаненко (2015) [64] выполнена работа, в которой разработан метод расчета вертикальных и горизонтальных смещений ограждения котлована в виде «стены в грунте» толщиной от 800 до 1200 мм, приводится сравнение результатов натурного и численного экспериментов, а также анализ подъема дна котлована. В работе, среди прочего, сделан вывод о упругой работе массива при глубинах котлована до 7-8 метров, а также о необходимости выполнения подобных расчетов в «объемной» постановке.

В заключение необходимо отметить, что практически все рассмотренные исследования посвящены влиянию разработки котлована на окружающую застройку в условиях «плоской» задачи. В то же время основываясь на анализе большого количества имеющихся работ [41, 54, 70, 72, 79, 83 и др.], исследующих



данную проблему в пространственной постановке, а также выполненные соискателем предварительные расчеты, показывают, что неучет пространственной составляющей может существенно повлиять на результаты расчета в зависимости от сочетания различных факторов (таких как: глубина котлована, механические характеристики грунта, положение здания относительно котлована и др.).

Исходя из этого, все аспекты проблемы влияния котлована на окружающую застройку рассматриваются соискателем в данной работе в трехмерной постановке.

### **Выводы по главе 1**

1. Наиболее важными факторами, влияющими на деформации окружающего массива и существующих сооружений, являются: тип ограждения; тип крепления и его жесткость; глубина котлована; расстояние до рассматриваемой точки; тип грунта и его физико-механические характеристики.
2. В связи со сложным характером изменения НДС системы «грунтовый массив-подземное сооружение» в процессе строительства, а также благодаря развитию техники, численный метод решения является наиболее предпочтительным при решении задачи оценки влияния нового строительства на окружающую застройку.
3. Существующие методики решения, в-основном, выполнены в плоской постановке и разработаны достаточно подробно. Однако, они не позволяют смоделировать и объяснить процессы, связанные с формированием НДС грунтового массива на территории прилегающей к отрываемому котловану. Для решения указанных задач и разработки соответствующих методов решения необходимо проведение исследований в условиях пространственной задачи.
4. Оценке влияния «углового эффекта» посвящено ограниченное количество работ, выполненных для конкретных единичных условий. В то же время результаты численного моделирования в трёхмерной постановке показывают – НДС в районе угловых точек может существенно отличаться от распределения

напряжений и деформаций в центральной части котлована, что говорит о необходимости продолжения исследований в этом направлении.

## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАЗРАБОТКИ КОТЛОВАНА НА ОКРУЖАЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ В УСЛОВИЯХ «ПРОСТРАНСТВЕННОЙ» ЗАДАЧИ

2.1. Исследование влияния разработки котлована на окружающий массив на основе совместного использования МКЭ и метода планирования эксперимента.

Как отмечалось выше, все задачи, решаемые на стадии предварительного проектирования для выбора окончательного варианта, реализуются в условиях «плоской» задачи, часто, используя МКЭ. Такой подход отнимает много времени и средств, позволяя, при этом, оценить влияние разработки котлована на НДС грунтового массива только в областях близких к расчётной плоскости. Обычно, она проходит через центральную ось котлована. Вместе с тем, результаты мониторинга и численного моделирования показали, что НДС массива вдоль котлована и, особенно, в районе угловых точек, может существенно отличаться от НДС в области, прилегающей к его центру. В настоящее время указанную задачу в объёмной постановке можно решить, применяя программные комплексы на базе МКЭ, разработанные для решения задач в объёмной постановке.

Численное моделирование с использованием таких комплексов позволяет учитывать разнообразные факторы, такие как глубина котлована, прочностные и деформационные характеристики грунтов, расположение зданий и сооружений существующей застройки относительно строящегося сооружения во всех направлениях, а также их этажность и жесткость, конструктивные особенности ограждения котлована и многое другое. Выполненные расчёты позволяют анализировать изменение НДС системы на всех этапах строительства в любой точке расчетной области. Однако, сам по себе МКЭ при всей его универсальности решает одну конкретную задачу и не позволяет выполнить оценку изменения отдельных факторов, не производя дополнительные расчеты.

Для решения указанной проблемы в работе используется подход, впервые примененный Л.Н. Рассказовым при исследовании взаимодействия набросных

плотин со скальным массивом [55], основанный на совместном использовании МКЭ и метода планирования эксперимента (МПЭ). С помощью МПЭ создается матрица планирования эксперимента, что дает возможность определить оптимальное минимальное количество производимых расчетов (численных экспериментов) для выявления зависимости изменения (в виде уравнения регрессии) искомого значения (функции отклика) от изменения выбранных факторов в пределах интервала их варьирования, при этом, не вникая в суть процесса (принцип «черного ящика»). Полученные уравнения регрессии позволяют оперативно и с достаточной для предварительной стадии проектирования точностью получать и оценивать результаты расчётов рассматриваемых вариантов в трёхмерной постановке.

Проведение численных экспериментов, в соответствии с разработанной матрицей планирования, выполнялось с применением геотехнической программы «Z\_Soil» (Швейцария) [29], основанной на МКЭ.

## 2.2. Описание расчетной модели

При решении геотехнических задач необходима постановка цели исследования и определение исходных данных. Для решения задачи изменения НДС массива грунта при разработке котлована была создана расчетная схема, включающая в себя: сетку 8 угольных конечных элементов моделирующую изотропный массив грунта и существующее сооружение; элементы тонкой оболочки, моделирующие ограждение котлована в виде «стены в грунте» толщиной 600 мм; балочные элементы, моделирующие распорное крепление из труб Ø530x8 мм; контактный элемент, для моделирования взаимодействия ограждающей конструкции с грунтом; граничные условия.

Поведение грунтов описывается упруго-пластической моделью Мора – Кулона [6, 68]:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi + c \quad (2.1)$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение,  
 $\tau$  – касательное напряжение,  
 $c$  – удельное сцепление грунта,  
 $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта.

На данный момент указанная модель используется в большинстве геотехнических расчетов в инженерной практике благодаря тому, что набор свойств грунтов, заложенный в модель, определяется по результатам стандартных инженерно-геологических изысканий и не требует проведения дополнительных опытов. Модель Мора - Кулона представляет связь касательных напряжений от нормальных напряжений в виде линейной зависимости. Часто, её записывают через главные напряжения в виде:

$$\sigma_1 = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \cdot \sigma_3 + c \cdot \frac{2 \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2.2)$$

При этом известен и важный недостаток данной модели, который заключается в недоучете модуля деформации грунта при разгрузке ( $E_{ur}$ ) (рис. 2.1-2.2), который находится в диапазоне  $E_{ur} = 1,5 \dots 5 \cdot E$  (табл. 63 и 64 [53]) и может быть осредненно принят равным  $3 \cdot E$ . Данный недостаток модели при численном моделировании строительства котлованов может в значительной степени повлиять на результаты оценки влияния, а также на получаемые внутренние усилия в ограждении и креплении котлована.

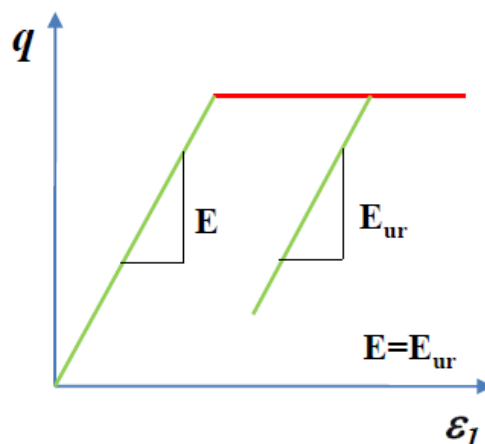


Рисунок 2.1. Упруго-пластическая модель поведения грунта в представлении через напряжения и деформации.

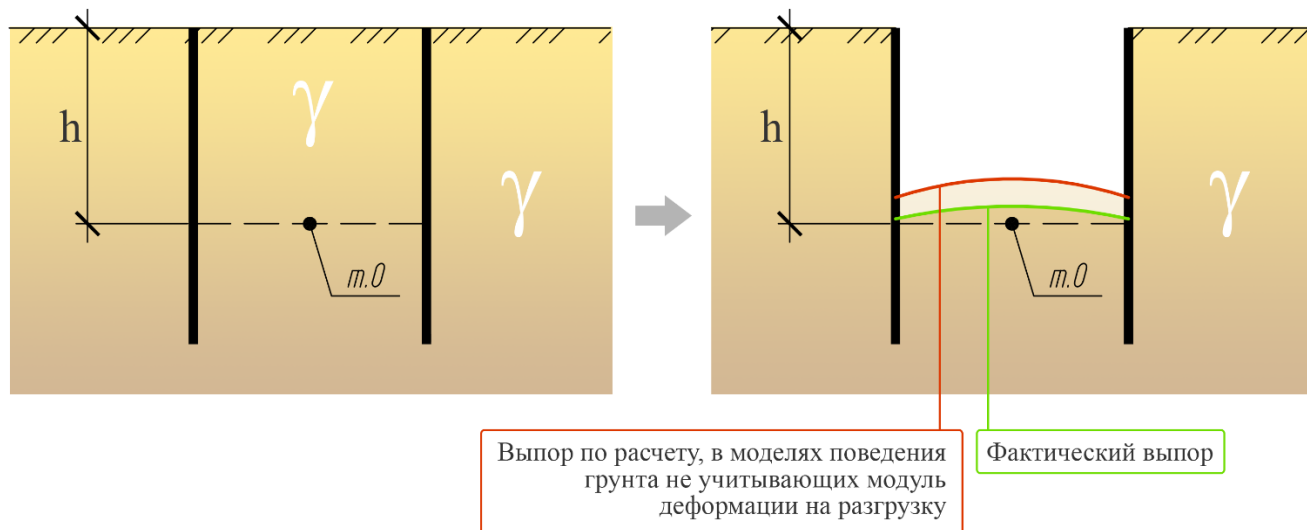


Рисунок 2.2. Выпор дна котлована при его разгрузке (разработке грунта)

Возможен переход на более совершенные модели учитывающие различные стадии нагрузки и разгрузки грунта, например, модель грунта с увеличивающейся жесткостью, в отечественной литературе и публикациях чаще всего именуемой «моделью упрочняющегося грунта» (Hardening Soil) [35, 36]. Однако, по сложившейся практике в г. Москве, требуемые дополнительные изыскания проводятся для подземных сооружений с глубиной заложения от 15 м и не проводятся на начальном этапе проектирования для массового строительства.

Для минимизации описанного выше недостатка, в случае, когда не представляется возможным определить механические характеристики для усовершенствованных нелинейных моделей поведения грунта (например, модель Hardening Soil), могут быть приняты следующие допущения:

- I. Увеличение модуля деформации ниже дна котлована, т.е. в зоне разгрузки. Данный прием не может быть использован при расчетах по 1-му предельному состоянию (ULS), так как изменяется статическая схема работы ограждения котлована;
- II. Уменьшение удельного веса изымаемого грунта пропорционально отношению модулей деформации при нагрузке и разгрузке, а также увеличение начального коэффициента бокового давления для уравновешивания действующих горизонтальных напряжений.

Допущение I применялось различными исследователями [69, 75], однако в рамках данного допущения высказываются различные подходы к определению размеров зон, в которых происходит разгрузка и, соответственно, должен применяться модуль, характеризующий ветвь разгрузки. В связи с этим, в данной работе принято допущение II. Такой подход позволяет получить значение выпора грунта (см. рис. 2.3), соответствующего фактическому выпору [78].



Рисунок 2.3. График зависимости деформаций от напряжений при экскавации грунта (разгрузке основания), в том числе для расчета со снижением удельного веса изымаемого грунта (синий график)

Зависимость между вертикальными и горизонтальными напряжениями определяется по следующей формуле:

$$\sigma_h = \sigma_v K_0 = \gamma h K_0, \text{ где}$$

- $\sigma_h$  — действующее горизонтальное напряжение;  
 $\sigma_v$  — действующее вертикальное напряжение;  
 $\gamma$  — удельный вес грунта;  
 $h$  — глубина котлована;  
 $K_0$  — коэффициент бокового давления.

Таким образом, при снижении действующих вертикальных напряжений внутри котлована снижаются и горизонтальные напряжения, действующие на ограждение изнутри, от поверхности до дна котлована, что может влиять на результаты на первых стадиях расчета до момента полной разработки. Для минимизации данного эффекта изымаемому грунту присваивается увеличенный начальный коэффициент бокового давления, тем самым уравнивая эпюры горизонтального давления (см. рис. 2.3).

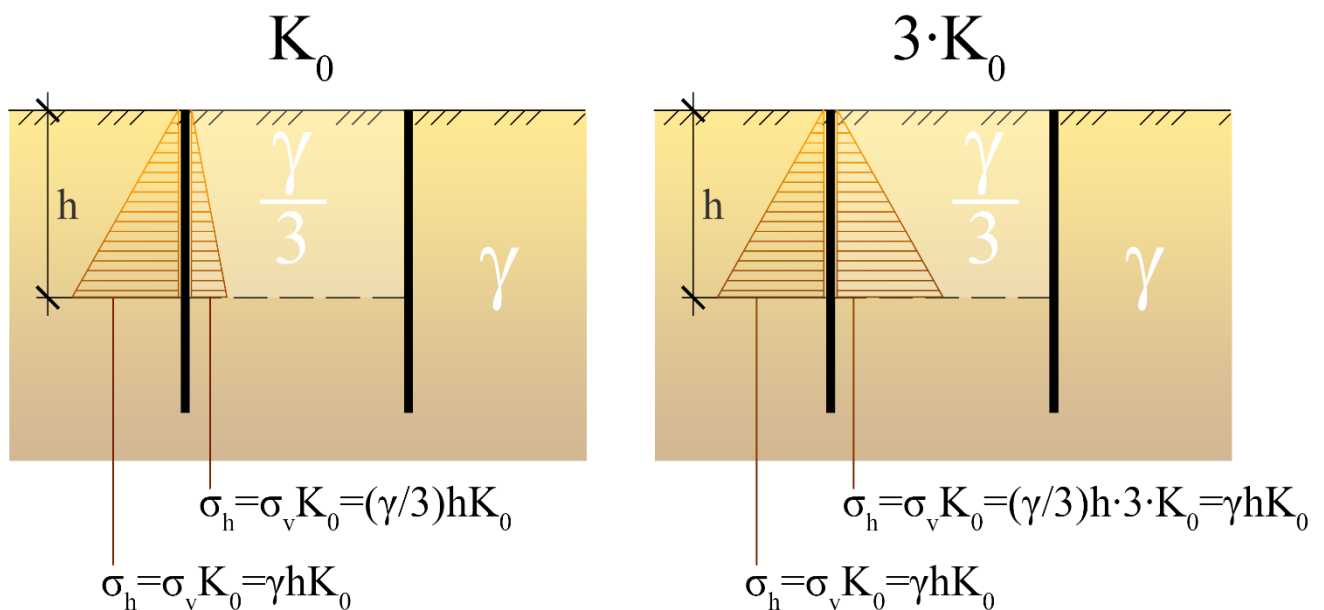


Рисунок 2.4. Эпюры горизонтальных напряжений при фактическом (слева) начальном коэффициенте давления и увеличенном (справа) для изымаемого грунта

В процессе расчетов были рассмотрены следующие типы грунтов: глины, суглинки, супеси и пески. Массив грунта при этом принят однородным и изотропным. Определение прочностных характеристик грунтов ( $c$  и  $\varphi$ ) выполняется по назначенному модулю деформации грунта в соответствии с



формулами, полученным в диссертационной работе В.В. Речицкого [56]. Используемые в дальнейшем прочностные и деформационные характеристики грунтов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Физико-механические свойства грунтов, принятые в расчетах

	Глина			Суглинок			Супесь			Песок		
Модуль деформации $E$ , МПа	10	17,5	25	10	17,5	25	10	17,5	25	10	17,5	25
Угол внутреннего трения $\varphi$ , °	11	17	20	18	22	25	22	26	28	23	28	32
Удельное сцепление $C$ , кПа	33	47	68	18	26	34	11	15	17	2	2	2
Плотность грунта $\rho$ , кН/м <sup>3</sup>	19											
Коэфф. Пуассона $\nu$	0,42			0,35			0,3			0,3		

Размеры расчетной области назначаются таким образом, чтобы на их границах механические процессы практически затухали, а грунт находился в природном напряженном состоянии. Критерием затухания влияния устройства котлована на НДС массива грунта является осадка поверхности величиной 1 мм. Как показано в работе Н.С. Никифоровой [42], такая граница может быть назначена в зависимости от вида ограждения и крепления котлована с помощью коэффициента, учитывающего глубину котлована. Для принятых в расчетах конструкций величину зоны влияния в плане рекомендуется принимать в виде 3 глубин котлована. Расчетная область в соответствии с [42, 61, 62] принята следующих размеров в плане: ширина области (вдоль стенки) –  $3b$  (где  $b$  – ширина здания); удаление от котлована –  $2L$  (либо  $2L + 3H_k$ ), где:

$L$  – длина сооружения;

$H_k$  – глубина котлована.

Определение нижней границы расчётной области является более сложной задачей. С одной стороны, чрезмерное увеличение зоны ниже дна котлована приводит к увеличению выпора его дна в силу указанного выше недостатка упруго-пластической модели. С другой, чрезмерное ее ограничение приводит к невозможности развития процесса деформирования ограждения и массива грунта за ним (т.н. «глубинный сдвиг»), что является следствием закрепления ограждения котлована граничными условиями. Таким образом, глубина расчетной области принята как  $2 \cdot H_{ст}$  (где  $H_{ст}$  – высота ограждения).

Решение тестовых задач подтвердило корректность назначенных размеров расчетной области, влияние разработки котлована затухает не доходя до границ расчетной схемы, а величина подъема дна котлована находится в пределах до 10 см, что корреспондирует с данными натуральных наблюдений, опубликованных в открытых источниках [78].

«Получившие широкое распространение программно-вычислительные комплексы, основанные на МКЭ, применяемые для геотехнических расчетов (Z-Soil, Plaxis, Midas GTS и др.), в силу своей специализации имеют ряд ограничений, которые усложняют детальное воссоздание конструктивных особенностей рассматриваемых сооружений, что приводит к значительному увеличению времени создания расчетных схем.

Для ускорения процесса моделирования разработаны различные подходы к упрощению реальной конструкции сооружений и заменой ее различными расчетными схемами. Как правило, при решении задач в плоской постановке одной из таких расчетных схем является представление здания эквивалентной балкой с приведенной изгибной жесткостью ( $EI$ ), что нашло отражение в ряде работ [43, 8, 74]. Приведенная изгибная жесткость конструкции в этом случае вычисляется с учетом совместной работы стен, фундаментов и цокольных частей здания, перекрытий, перемычек, монолитных поясов, а также рабочей продольной арматуры, если таковые элементы имеются.» [21]. Значения приведены на рисунке 2.5.

Этажность здания	Изгибная жесткость EI, [кНм <sup>2</sup> /м]	Нормальная жесткость EA, [кН/м]
Фундаментная плита	6,47*10 <sup>3</sup>	3,45*10 <sup>6</sup>
1-этажное здание	2,00*10 <sup>7</sup>	6,9*10 <sup>6</sup>
3-этажное здание	6,00*10 <sup>8</sup>	1,38*10 <sup>7</sup>
5-этажное здание	6,98*10 <sup>8</sup>	2,07*10 <sup>7</sup>
10-этажное здание	4,39*10 <sup>9</sup>	3,8*10 <sup>7</sup>

Рисунок 2.5. Значения изгибной и нормальной жесткости для кирпичного здания в зависимости от этажности [74]

При таком подходе приведенная изгибная жесткость здания вычисляется по формуле Дионисьева-Македонского [8]:

$$E_{np}I_{np} = E_cI_{np} + \sum E_nA_{np}y^2, \text{ где} \quad (2.3)$$

$E_cI_{np}$  - изгибная жесткость для одной стены;

$E_nA_{np}$  - нормальная жесткость перекрытия;

$y$  – расстояние от центра тяжести стены подвала до центра тяжести рассматриваемого перекрытия.

В процессе разработки котлована, дополнительные осадки здания окружающей застройки затухают по мере удаления от границ ограждения, поэтому необходимо обратить внимание на характер деформаций сооружения, находящегося в зоне влияния строительства. Для таких сооружений характерен выгиб конструкции (см. рис. 2.6), что приводит к ситуации, при которой большая часть здания (начиная от первого после цокольного этажа) начинает работать на растяжение, таким образом жесткость коробки снижается (см. рис. 2.7) [8] за счет образования и раскрытия трещин [21].

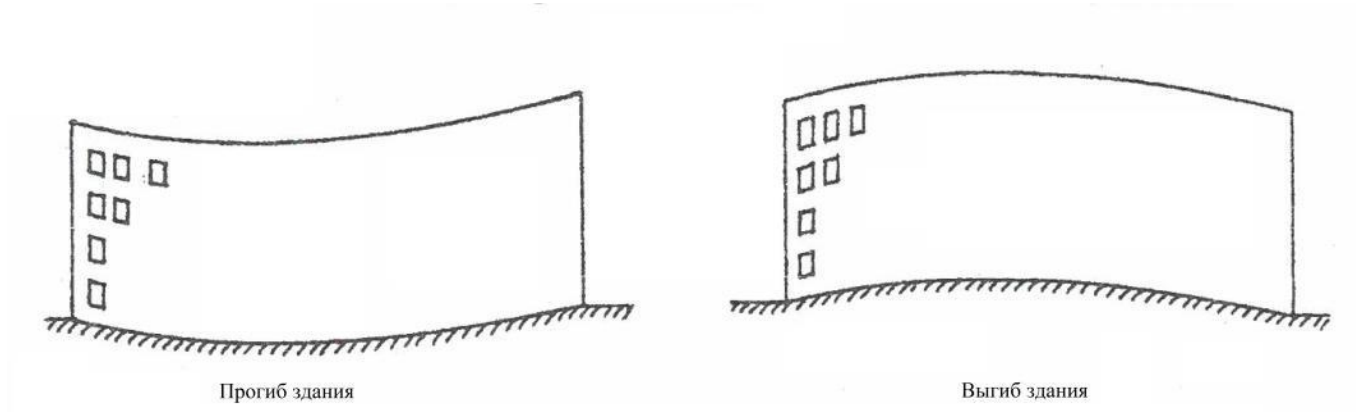


Рисунок 2.6. Характер деформации сооружения при закрытой проходке (слева) и при открытом способе (справа).

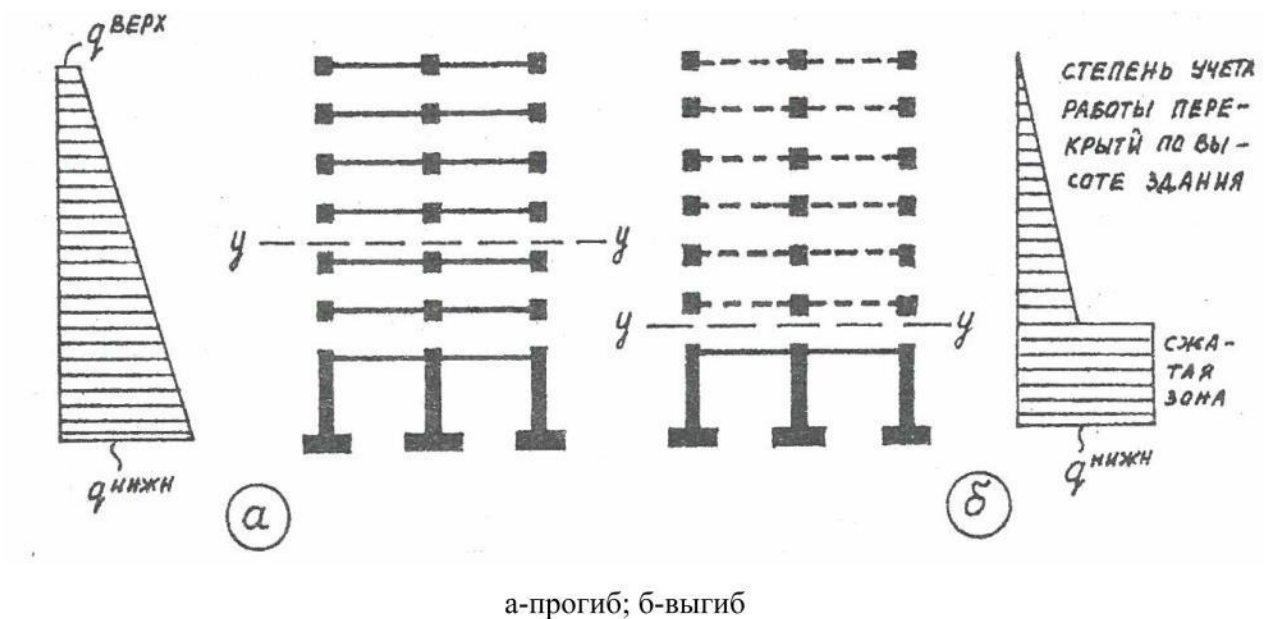


Рисунок 2.7. Степень учета жесткости сооружения при его прогибе (слева) и выгибе (справа) [8]

Однако, в ряде случаев в зависимости от видов конечных элементов, реализованных в программном комплексе, либо при решении задач в трехмерной постановке, представление здания в виде балки является невозможным. Для решения этой задачи, предполагается представлять здание эквивалентным сечением, характеризующимся приведенным модулем деформации ( $E_{пр}$ ) и занимающим пространство от подошвы фундамента до отметки дневной поверхности грунта по глубине (принято заглубление фундамента 3 м от поверхности земли) и размеры сооружения в плане [21].

Приведенный модуль деформации  $E_{пр}$ , подсчитанный в соответствии с

приведенной изгибной жесткостью и прочностными характеристиками материалов стен, при разных подходах к вычислению имел значения от 93 до 132 МПа. В задаче принято значение  $E_{пр}=100$  МПа [20]. Размеры сооружения назначались минимально возможными на основании анализа реально существующих зданий и приняты в виде прямоугольника размером 12х20 м.

Ограждение котлована моделируется оболочками, физико-механические свойства которых приведены в таблице 2.2. Здание моделируется в виде упругого изотропного сплошного массива. Размеры котлована в плане назначены таким образом, чтобы была возможность оценить влияние расположения сооружения относительно его угла (см. рис. 2.4). Соотношение длины и ширины котлована в задаче принято равным 3.

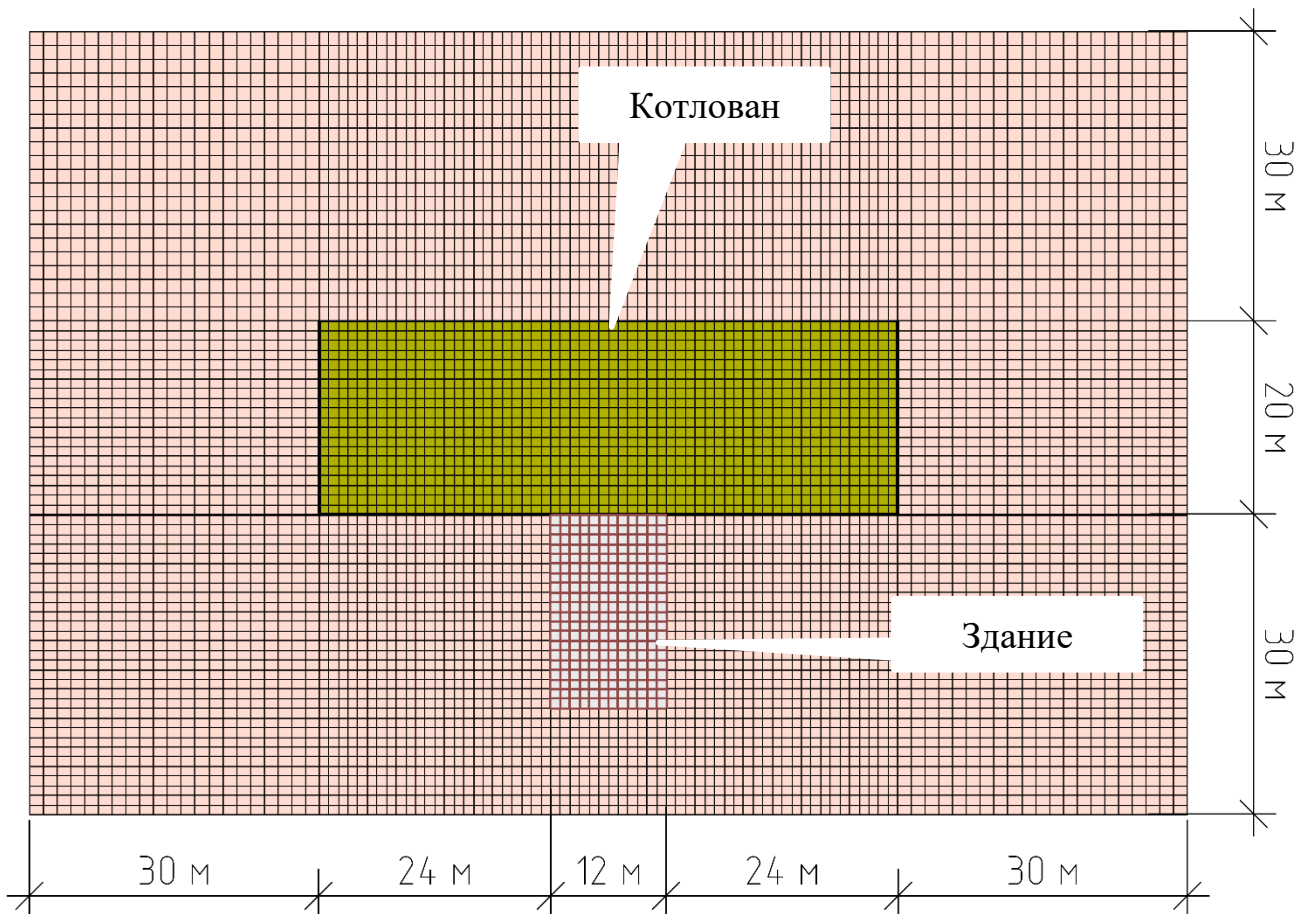


Рисунок 2.8. Габаритные размеры расчетной области в плане (для котлована глубиной 6м).

Таблица 2.2. Свойства материала ограждения котлована.

Символ	Название	Значение	Размерность
$\gamma$	Удельный вес материала	25	кН/м <sup>3</sup>
E	Модуль деформации	30 000 000	кН/м <sup>2</sup>
$\nu$	Коэффициент Пуассона	0,24	-
th	толщина оболочки	0,6	м

Для учета возможности сдвига и отлипания грунта на контакте с ограждением котлована использовался «контактный элемент – «интерфейс» (см. рис. 2.9). Контактные элементы размещаются с наружной стороны ограждения и с двух сторон в зоне заделки ограждения. Прочностные характеристики контактного элемента назначены в соответствии с требованиями нормативной документации [67].

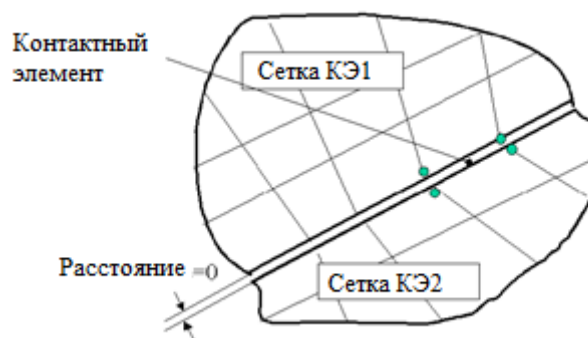


Рисунок 2.9. Контактный элемент в КЭ-модели.

Таблица 2.3. Прочностные характеристики контактного элемента

Символ	Название	Значение	Размерность
с	Сцепление	0	кН/м <sup>2</sup>
φ	Угол внутреннего трения	φ <sub>гр</sub> *0,5	град.

Граничные условия задаются автоматически стандартным для геотехнических программ способом — для боковых границ модели запрещены горизонтальные перемещения, для нижней границы запрещены горизонтальные и вертикальные перемещения. В качестве нагрузок в модели учитывался собственный вес грунта и всех конструкций ограждения и крепления котлована в соответствии с назначенными сечениями, а также давление  $P$ , равному 50 кН/м<sup>2</sup>, что соответствует нагрузке от сооружения высотой от 3 до 5 этажей.

Численный расчет конечно-элементной модели ведется поэтапно. Первый этап включает расчет начального напряженно-деформированного состояния от собственного веса грунтового массива и приложенных внешних сил, с последующим «сбросом» полученных в результате расчета деформаций. Дальнейшие этапы расчета выполняются в соответствии с технологической последовательностью работ, при этом полученные результаты изменения НДС массива «накапливаются» и используются для расчета каждого последующего этапа.

### 2.3. Множественный регрессионный анализ

Одной из задач, поставленных в данной работе, является определение и изучение факторов, оказывающие наибольшее влияние на НДС массива грунта и перемещения его точек, горизонтальные смещения ограждения и дополнительные осадки сооружений окружающей застройки. При этом необходимо не только установить степень влияния факторов на изменение НДС массива грунта при различных их значениях, но и получить уравнения, позволяющие определить вертикальные и горизонтальные перемещения точек массива, отклонение

ограждения котлована, осадку существующего здания.

Выполнение поставленных задач возможно с помощью метода планирования эксперимента - процедуры выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для получения математической модели процесса. Составление программы проведения опытов (матрицы планирования) на основе метода планирования эксперимента обеспечивает выполнение оптимального, то есть минимально необходимого, количества экспериментов, позволяет определить последовательность их проведения, необходимую для дальнейшей статистической обработки [1].

Выполненная серия экспериментов, в последующем, позволяет путем регрессионного анализа получить выражение для искомой величины (функции отклика), которое представляется отрезком ряда Тейлора в виде полинома, в который раскладывается искомая функция:

$$y(x_1, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n b_i \cdot x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot x_i^2 + \dots \quad (2.4)$$

где  $b_0$  — свободный член;

$b_i$  — коэффициент при свободном факторе;

$b_{ij}$  — коэффициент парного линейного взаимодействия;

$b_{ii}$  — коэффициент квадратичного взаимодействия.

Фактическая форма функции отклика заранее неизвестна, однако для практического применения допустимо получить приближенное решение, с заданной долей вероятности приближающееся к искомой функции. Подбор приближенной функции выполняется последовательно, на начальном этапе принимают линейный характер взаимодействия, затем, после оценки адекватности полученного решения, принимается решение о прекращении дальнейших экспериментов, либо об использовании функции более высокого порядка (квадратичной, кубической и т.д.).



Таким образом, в начале планирования эксперимента осуществляется выбор искомой функции отклика с определением основных независимых факторов, влияющих на нее, и пределов их варьирования. При выборе факторов необходимо иметь в виду, что большое их количество приводит к использованию функций высокого порядка, что влечет за собой значительное увеличение количества проводимых экспериментов и сроков их обработки. В ходе первичной обработки результатов факторы, наименьшим образом влияющие на функцию отклика, должны быть отсеяны.

Анализ выполненных ранее работ позволил установить важнейшие факторы, на основании которых и будет проводиться исследование, а именно:

**Фактор №1 (X1):** Глубина котлована –  $H, м$ ;

**Фактор №2 (X2):** Модуль деформации грунта –  $E, МПа$ ;

**Фактор №3 (X3):** удаление сооружения от бровки котлована –  $L, м$ ;

**Фактор №4 (X4):** положение сооружения относительно центра котлована –  $B$ ;

**Фактор №5 (X5):** нагрузка от сооружения –  $P, кН/м^2$ ;

Факторы должны быть управляемыми, совместимыми, и независимыми, т. е. в ходе эксперимента всегда должна быть возможность выдерживать заданные значения. Факторы, определенные выше удовлетворяют перечисленным требованиям.

Факторы имеют интервалы варьирования, ограниченные верхним и нижним уровнями, также выделяется нулевой уровень, расположенный в середине диапазона. Одним из важнейших правил метода планирования эксперимента является запрет экстраполяции за пределы назначенных интервалов. Выбор интервалов варьирования факторов является не менее важной задачей, чем само их определение по той причине, что чрезмерное их увеличение может привести к необходимости перехода от линейных к квадратичным и более сложным

зависимостям, что не всегда реализуемо на практике.

Интервал варьирования фактора №1 «глубина котлована» был принят от 6 до 12 м, что согласно анализу [23, 24, 25, 26] составляет порядка 70% всех проектируемых котлованов в г. Москва и корреспондирует с ранее применяемыми геотехническими категориями сложности строительства. При этом в соблюдение общих принципов выбора интервалов варьирования данный фактор был разделен на 2 области: от 6 до 9 метров с 1 рядом распорных конструкций и от 9 до 12 м уже с 2 рядами.

Интервал варьирования фактора №2 «модуль деформации грунта» был принят от 10 до 25 МПа, что является наиболее характерными значениями для грунтов, залегающих на глубинах до 12 м от поверхности грунта. Более высокие значения модуля деформации грунта в г. Москва встречаются на значительных глубинах, а более низкие приведут к применению свайных фундаментов у зданий окружающей застройки, что повлечет введение нового фактора в расчет.

1. Интервал варьирования фактора №3 «удаление сооружения от бровки котлована» изначально принимался от 0 до  $3 \cdot H_k$ . Однако анализ выполненных ранее работ [41, 43, 44, 81], а также тестовых задач показал, что характер изменения осадок с удалением от котлована является нелинейным, в следствие чего данный фактор был разделен на 2 зоны:

1 зона – от бровки котлована до призмы обрушения, определяемой как:  $H_k \cdot \operatorname{tg}(45 - \varphi/2) \cdot 1,1 \dots 1,2$

2 зона – от границы призмы обрушения до 18 м.

Интервал варьирования фактора №4 «положение сооружения относительно центра котлована» принят в относительных значениях: 0 – здание по центру котлована, 1 – здание находится на углу котлована.

Интервал варьирования фактора №5 «нагрузка от сооружения» принимался в диапазоне от 30 до 90  $\text{кН/м}^2$ , что согласно нормативной документации соответствует этажности зданий от 3 до 9, как наиболее часто встречающимся в

условиях сложившейся городской застройки исторической части города.

Для уменьшения количества производимых расчетов были выполнены предварительные численные эксперименты для глинистых грунтов, в которых были рассмотрены 4 из вышеназванных фактора, расположение сооружения всегда принималось по центру котлована. На основании регрессионного анализа были получены следующие уравнения регрессии для осадки сооружения ( $Y$ ) и отклонения верха стенки ( $X$ ). Фактор нагрузки от сооружения принят как  $X_4$  [20].

При глубине котлована от 6 до 9 м и нахождении здания в пределах призмы обрушения:

$$Y = 14,6 + 11,24 \cdot X_1 - 14,81 \cdot X_2 - 17,08 \cdot X_3 + 1,26 \cdot X_4 - 0,05 \cdot X_1^2 + 7,20 \cdot X_2^2 + 6,95 \cdot X_3^2 - 0,1 \cdot X_4^2 - 7,01 \cdot X_1 X_2 - 5,04 \cdot X_1 X_3 - 1,35 \cdot X_1 X_4 + 8,63 \cdot X_2 X_3 + 1,31 \cdot X_2 X_4 - 0,84 \cdot X_3 X_4 \quad (2.5)$$

$$X = 4,35 + 2,22 \cdot X_1 - 7,18 \cdot X_2 - 5,28 \cdot X_3 + 0,88 \cdot X_4 + 0,59 \cdot X_1^2 + 3,39 \cdot X_2^2 + 3,24 \cdot X_3^2 + 0,14 \cdot X_4^2 - 2,48 \cdot X_1 X_2 - 2,35 \cdot X_1 X_3 - 0,15 \cdot X_1 X_4 + 2,49 \cdot X_2 X_3 + 0,01 \cdot X_2 X_4 - 0,84 \cdot X_3 X_4 \quad (2.6)$$

При глубине котлована от 6 до 9 м и нахождении здания на участке от границы призмы обрушения до 18 м:

$$Y = 7,04 + 4,14 \cdot X_1 - 3,68 \cdot X_2 - 4,38 \cdot X_3 + 0,21 \cdot X_4 - 2,45 \cdot X_1 X_2 - 2,53 \cdot X_1 X_3 + 0,16 \cdot X_1 X_4 + 2,71 \cdot X_2 X_3 - 0,13 \cdot X_2 X_4 - 0,2 \cdot X_3 X_4 \quad (2.7)$$

$$X = 6,53 - 0,33 \cdot X_1 - 4,63 \cdot X_2 + 0,11 \cdot X_3 + 0,04 \cdot X_4 - 0,93 \cdot X_1 X_2 - 0,46 \cdot X_1 X_3 + 0,04 \cdot X_1 X_4 - 0,01 \cdot X_2 X_3 - 0,04 \cdot X_2 X_4 - 0,05 \cdot X_3 X_4 \quad (2.8)$$

При глубине котлована от 9 до 12 м и нахождении здания в пределах призмы обрушения:

$$Y = 21,43 + 6,86 \cdot X_1 - 17,21 \cdot X_2 - 23,12 \cdot X_3 + 4,45 \cdot X_4 - 1,74 \cdot X_1^2 + 8,16 \cdot X_2^2 + 10,11 \cdot X_3^2 + 0,86 \cdot X_4^2 - 2,28 \cdot X_1 X_2 - 1,77 \cdot X_1 X_3 + 0,88 \cdot X_1 X_4 + 8,66 \cdot X_2 X_3 - 1,42 \cdot X_2 X_4 - 4,36 \cdot X_3 X_4 \quad (2.9)$$

$$X = 7,91 + 2,72 \cdot X_1 - 10,33 \cdot X_2 - 6,74 \cdot X_3 + 2,32 \cdot X_4 - 0,44 \cdot X_1^2 + 4,36 \cdot X_2^2 + 4,56 \cdot X_3^2 + 0,31 \cdot X_4^2 - 1,49 \cdot X_1 X_2 - 0,93 \cdot X_1 X_3 + 0,49 \cdot X_1 X_4 + 2,74 \cdot X_2 X_3 - 0,9 \cdot X_2 X_4 - 2,16 \cdot X_3 X_4 \quad (2.10)$$

При глубине котлована от 9 до 12 м и нахождении здания на участке от

границы призмы обрушения до 18 м:

$$Y = 11,41 + 4,06 \cdot X_1 - 6,02 \cdot X_2 - 4,47 \cdot X_3 + 0,26 \cdot X_4 - 2,17 \cdot X_1 X_2 - 1,07 \cdot X_1 X_3 + 0,13 \cdot X_1 X_4 + 2,66 \cdot X_2 X_3 - 0,17 \cdot X_2 X_4 - 0,19 \cdot X_3 X_4 \quad (2.11)$$

$$X = 9,75 + 1,39 \cdot X_1 - 7,63 \cdot X_2 - 0,35 \cdot X_3 + 0,25 \cdot X_4 - 0,96 \cdot X_1 X_2 - 0,41 \cdot X_1 X_3 + 0,04 \cdot X_1 X_4 + 0,13 \cdot X_2 X_3 - 0,23 \cdot X_2 X_4 - 0,05 \cdot X_3 X_4 \quad (2.12)$$

В качестве примера использования уравнения представлен график изменения дополнительной осадки здания при его удалении от котлована при варьировании расчетных факторов (см. рис. 2.10.)

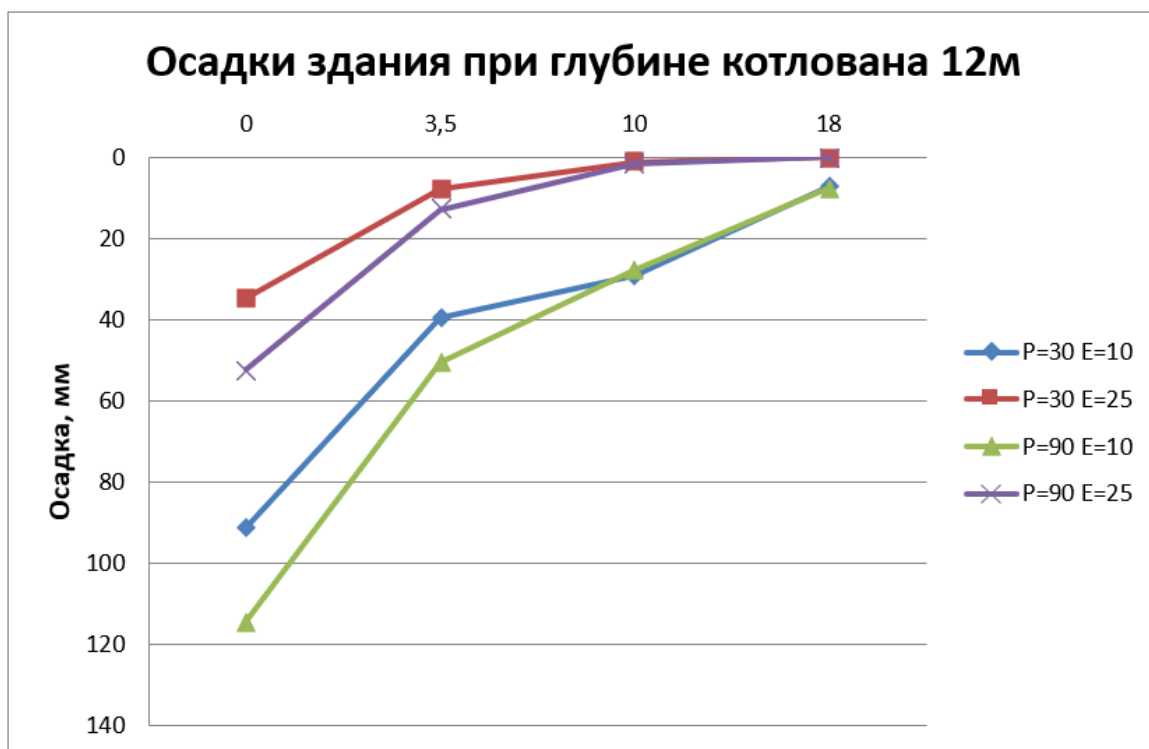


Рисунок 2.10. Графики осадки здания (по оси Y) для различных уровней варьирования рассматриваемых факторов в зависимости от удаления от котлована (по оси X)

Из представленных уравнений видно, что коэффициент при факторе  $X_4$ , в основном, на порядок отличается от коэффициентов при других факторах и имеет значение менее 1, что говорит о малом влиянии данного фактора на функцию отклика. Исключение составляет случай при расположении сооружения на бровке котлована. На основании полученных результатов было принято решение исключить фактор №5 «нагрузка от сооружения» из рассмотрения. Принятые

интервалы варьирования факторов приведены в табл. 2.4-2.7. Табл. 2.4 и 2.5 относятся к зоне 1 (в пределах призмы обрушения). Табл. 2.6 и 2.7 – к зоне 2 (при расположении здания от границы призмы обрушения до границ предварительной зоны влияния).

Таблица 2.4. Значения факторов (входных параметров).

Наименование	Факторы			
	X <sub>1</sub> , [м]	X <sub>2</sub> , [МПа]	X <sub>3</sub> , [м]	X <sub>4</sub> , []
Основной уровень (0)	7,5	17,5	12,5	0.5
Интервал варьирования	1,5	7,5	5,5	0.5
Верхний уровень (+)	9	25	7	1
Нижний уровень (-)	6	10	0	0

Таблица 2.5. Значения факторов (входных параметров).

Наименование	Факторы			
	X <sub>1</sub> , [м]	X <sub>2</sub> , [МПа]	X <sub>3</sub> , [м]	X <sub>4</sub> , []
Основной уровень (0)	10,5	17,5	12,5	0.5
Интервал варьирования	1,5	7,5	5,5	0.5
Верхний уровень (+)	12	25	10	1
Нижний уровень (-)	9	10	0	0

Таблица 2.6. Значения факторов (входных параметров).

Наименование	Факторы			
	X <sub>1</sub> , [м]	X <sub>2</sub> , [МПа]	X <sub>3</sub> , [м]	X <sub>4</sub> , []
Основной уровень (0)	7,5	17,5	12,5	0.5
Интервал варьирования	1,5	7,5	5,5	0.5
Верхний уровень (+)	9	25	18	1
Нижний уровень (-)	6	10	7	0

Таблица 2.7. Значения факторов (входных параметров).

Наименование	Факторы			
	X <sub>1</sub> , [М]	X <sub>2</sub> , [МПа]	X <sub>3</sub> , [М]	X <sub>4</sub> , []
Основной уровень (0)	10,5	17,5	14,0	0.5
Интервал варьирования	1,5	7,5	4,0	0.5
Верхний уровень (+)	12	25	18	1
Нижний уровень (-)	9	10	10	0

Обработка результатов эксперимента выполняется на безразмерных координатах, которые определяются по уравнению 2.13 в общем виде:

$$X_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (2.13)$$

где  $X_i$  – значения факторов на (верхнем или нижнем уровнях)

$X_{i0}$  – нулевой (средний) уровень значения

$\Delta X_i$  – интервал варьирования.

Как было сказано ранее, изменения деформаций с удалением от котлована носит нелинейный характер, поэтому было принято решение разделить расчетную область: для точек в пределах призмы обрушения применить полный факторный эксперимент с получением квадратичной зависимости (2.14); для точек за пределами призмы обрушения - линейной зависимости (2.15):

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_1^2 + b_6 X_2^2 + b_7 X_3^2 + b_8 X_4^2 + b_9 X_1 X_2 + b_{10} X_1 X_3 + b_{11} X_1 X_4 + b_{12} X_2 X_3 + b_{13} X_2 X_4 + b_{14} X_3 X_4 \quad (2.14)$$

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_1 X_2 + b_6 X_1 X_3 + b_7 X_1 X_4 + b_8 X_2 X_3 + b_9 X_2 X_4 + b_{10} X_3 X_4 \quad (2.15)$$

Для рассматриваемого варианта зависимостей применяют полный

факторный эксперимент, планирование которого производят на двух уровнях: верхнем (+1) и нижнем (-1). Число опытов  $N$  зависит от числа факторов  $k$  и равно:

$$N = 2^k \quad (2.16)$$

При этом для получения квадратичной зависимости в план вводятся дополнительные точки со средним (нулевым) значением фактора. Матрица планирования для квадратичной зависимости представлена в таблице 2.4, для линейной – в таблице 2.5.

Таблица 2.4. Матрица полного факторного эксперимента  $2^4$  для получения квадратичной зависимости.

№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Y
1	-	-	-	-	Y <sub>1</sub>
2	+	-	-	-	Y <sub>2</sub>
3	-	+	-	-	Y <sub>3</sub>
4	+	+	-	-	Y <sub>4</sub>
5	-	-	+	-	Y <sub>5</sub>
6	+	-	+	-	Y <sub>6</sub>
7	-	+	+	-	Y <sub>7</sub>
8	+	+	+	-	Y <sub>8</sub>
9	-	-	-	+	Y <sub>9</sub>
10	+	-	-	+	Y <sub>10</sub>
11	-	+	-	+	Y <sub>11</sub>
12	+	+	-	+	Y <sub>12</sub>
13	-	-	+	+	Y <sub>13</sub>
14	+	-	+	+	Y <sub>14</sub>
15	-	+	+	+	Y <sub>15</sub>
16	+	+	+	+	Y <sub>16</sub>
17	-	0	0	0	Y <sub>17</sub>
18	+	0	0	0	Y <sub>18</sub>
19	0	-	0	0	Y <sub>19</sub>
20	0	+	0	0	Y <sub>20</sub>
21	0	0	-	0	Y <sub>21</sub>
22	0	0	+	0	Y <sub>22</sub>
23	0	0	0	-	Y <sub>23</sub>
24	0	0	0	+	Y <sub>24</sub>

Таблица 2.5. Матрица полного факторного эксперимента  $2^4$  для получения линейной зависимости.

№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Y
1	-	-	-	-	Y <sub>1</sub>
2	+	-	-	-	Y <sub>2</sub>
3	-	+	-	-	Y <sub>3</sub>
4	+	+	-	-	Y <sub>4</sub>
5	-	-	+	-	Y <sub>5</sub>
6	+	-	+	-	Y <sub>6</sub>
7	-	+	+	-	Y <sub>7</sub>
8	+	+	+	-	Y <sub>8</sub>
9	-	-	-	+	Y <sub>9</sub>
10	+	-	-	+	Y <sub>10</sub>
11	-	+	-	+	Y <sub>11</sub>
12	+	+	-	+	Y <sub>12</sub>
13	-	-	+	+	Y <sub>13</sub>
14	+	-	+	+	Y <sub>14</sub>
15	-	+	+	+	Y <sub>15</sub>
16	+	+	+	+	Y <sub>16</sub>

После проведения экспериментов в соответствии с матрицей планирования, выполняется определение значения коэффициентов, входящих в уравнение регрессии.

При линейной зависимости свободный член уравнения  $b_0$  вычисляют по формуле:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \quad (2.17)$$

Коэффициенты при линейных членах вычисляют по формуле:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} y_i \quad (2.18)$$

Коэффициенты при парных взаимодействиях факторов вычисляют по



формуле:

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i x_j)_i y_i \quad (2.19)$$

При использовании квадратичной зависимости свободный член уравнения  $b_0$  вычисляют по формуле:

$$b_0 = T_1 \sum_1^N y_u - T_2 \sum_1^N \left( \sum_1^N X_{iu}^2 y_u \right) \quad (2.20)$$

Коэффициенты при линейных членах вычисляют по формуле:

$$b_i = T_3 \sum_1^N x_{iu} y_u \quad (2.21)$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие квадратичные эффекты, вычисляют по формуле:

$$b_{ii} = T_4 \sum_1^N x_{iu}^2 y_u + T_5 \sum_1^N \left( \sum_1^N x_{iu}^2 y_u \right) - T_2 \sum_1^N y_u \quad (2.22)$$

Коэффициенты при парных взаимодействиях факторов вычисляют по формуле:

$$b_{ij} = T_6 \sum_{i=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u \quad (2.22)$$

где  $i, j$  - номера факторов;  $u$  - номер точки в плане;  $y_u$  - значение отклика (выходного параметра) в  $u$ -м опыте;  $x_{ij}, x_{lj}$  - кодированные значения ( $\pm 1$ ) факторов  $i$  и в  $j$ -м опыте.

Значения коэффициентов  $T_1 \dots T_6$  для четырехфакторного эксперимента равны:  $T_1=0,2292$ ;  $T_2=0,0625$ ;  $T_3=0,0556$ ;  $T_4=0,5$ ;  $T_5=-0,1042$ ;  $T_6=0,0625$ .

Завершающим этапом является регрессионный анализ и проверка адекватности полученных уравнений, которые дают возможность оценить корректность назначения формы искомой функции отклика и размеров факторного пространства (т.е. интервалы варьирования факторов).

#### 2.4. Проверка адекватности полученных уравнений

При применении численного эксперимента отсутствует повторяемость опытов при одинаковых значениях факторов, что приводит к невозможности применения классического регрессионного анализа к обработке результатов и проверке адекватности полученных зависимостей. Для оценки степени расхождения прогнозируемых по полученным уравнениям и экспериментальных значений выполняется дополнительный эксперимент, проводимый в центре факторного плана, то есть при всех значениях факторов на среднем (нулевом) уровне. В дальнейших главах работы анализ адекватности полученных уравнений будет выполняться по описанному принципу и с дополнительным сравнением значений, полученных в ходе численного эксперимента, по полученным уравнениям и натурным наблюдениям.

В случае если наблюдается значительное расхождение в полученных значениях, принимается решение о корректировке интервалов варьирования факторов либо о переходе к зависимостям более высокого порядка.

Выбранный метод исследования, основанный на совместном использовании метода конечных элементов и метода планирования эксперимента, позволяет получать уравнения, описывающие изменение искомой величины (функции отклика) с учетом всех необходимых факторов, при этом проводя минимально необходимое количество экспериментов (численных расчетов).

## Выводы по главе 2

1. Обоснована методика проведения исследований, основанная на совместном использовании МКЭ и метода планирования эксперимента, поскольку указанная комбинация методов позволяет решать поставленные задачи в условиях объемной постановки.
2. На основе анализа литературных источников и предварительных расчетов определены независимые факторы, оказывающие наибольшее влияние на перемещение точек грунтового массива на прилегающей к котловану территории.
3. С использованием метода планирования эксперимента построена матрица, определяющая оптимальное количество численных расчетов значений перемещений точек, прилегающего к котловану, массива грунта с указанием конкретных величин факторов в каждом расчете.
4. На основе результатов расчетов с использованием множественного регрессионного анализа получены уравнения регрессии, позволяющие определить наиболее адекватные значения вертикальных и горизонтальных перемещений точек грунтового массива при любом сочетании выбранных независимых величин факторов в пределах их варьирования.
5. Предложен метод получения адекватного решения задачи по изменению НДС массива грунта при разработке котлована с использованием упруго-пластической модели грунта, основанный на ограничении расчетной области и снижении удельного веса изымаемого грунта.

### ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РАЗРАБОТКИ КОТЛОВАНА НА ОКРУЖАЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ

Сооружение котлованов в условиях плотной застройки на предварительной стадии проектирования требует выполнения расчётов влияния разработки котлована на прилегающие к нему здания и сооружения. В свою очередь это требует анализа напряжённо – деформированного состояния (НДС) грунтового массива, выполняемого в настоящее время с применением численного моделирования на основе метода конечных элементов (МКЭ), реализуемого в различных программных комплексах (Z\_Soil, Plaxis, Midas и др). Возможности этих комплексов дают возможность всесторонне учесть факторы, влияющие на окружающую застройку. Однако, использование численных методов весьма трудоёмкий процесс, отнимающий много времени и требующий квалифицированных исполнителей. Принимая то во внимание, актуальной задачей остаётся развитие инженерных методов, позволяющих оперативно и с необходимой точностью выполнять расчёты на стадии начального вариантного проектирования.

Третья глава диссертационной работы посвящена рассмотрению численно-аналитического метода, позволяющему в условиях плоской задачи анализировать изменение напряжённо-деформированного состояния грунтового массива, прилегающего к котловану, при его разработке. Метод основан на решении задачи Мелана [76] о приложенной внутри полуплоскости сосредоточенной силе [3].

#### 3.1. Постановка задачи

Рассмотрим бесконечную упругую полуплоскость, моделирующую массив грунта, в котором устроен котлован прямоугольного очертания с закреплёнными бортами. После отрывки котлована на ограждающую конструкцию котлована действуют нагрузка от активного давления грунта, гидростатическое давление грунтовой воды (если имеется) и пассивное давление (отпор грунта) на участке

заделки ограждающей конструкции в грунт (Рис. 3.1).

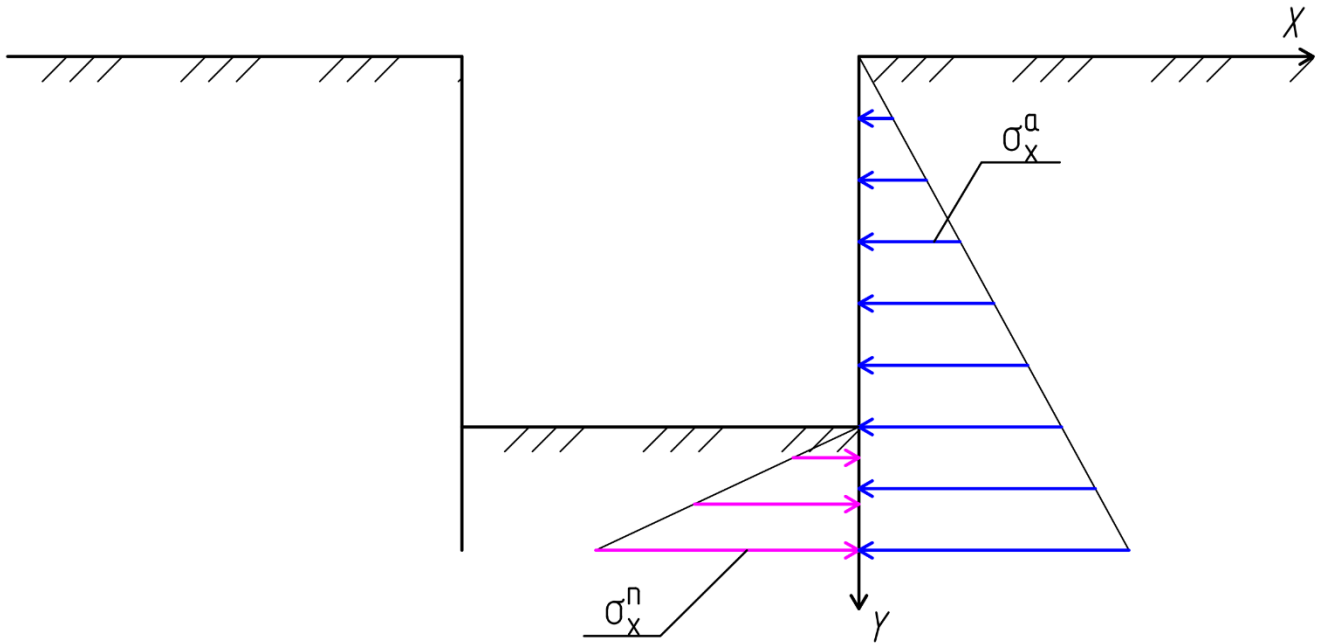


Рисунок 3.1. – Распределение напряжений вдоль ограждения котлована после его разработки

Строгого решения подобной задачи в настоящее время не имеется. С рядом допущений она рассматривалась в работах [4, 9, 10, 11, 12], однако, в практических целях полученные решения не могли быть использованы, поскольку не учитывали все особенности взаимодействия ограждающей конструкции с грунтовым массивом.

В то же время, подходы к решению рассматриваемой задачи, использованные в [4, 10], частично были применены в [58] при разработке метода определения технологических осадок зданий прилегающей застройки при отрывке траншеи для сооружения «стены в грунте». При этом, использовалось решение в трёхмерной постановке, предложенное Миндлиным и обобщающее решения Черрути и Мелана, полученные в условиях двумерной задачи. Для удовлетворения граничных условий, принятых в задаче Миндлина, в [58] устройство траншеи в массиве грунта учитывается, приложенной к её контуру, распределённой нагрузкой от гидростатического давления, заполняющего траншею бентонитового раствора. Правомерность такого подхода была обоснована в работе [11].

Подход, аналогичный подходу в работе [58], использовался в

рассматриваемых исследованиях. Вмещающая котлован расчётная область с, приложенными по контуру котлована, нагрузками показана на рис. 3.2. Как уже указывалось, для определения НДС массива в плоскости центрального сечения котлована нормальной его длинной стороне использовалось решение задачи Мелана [76].

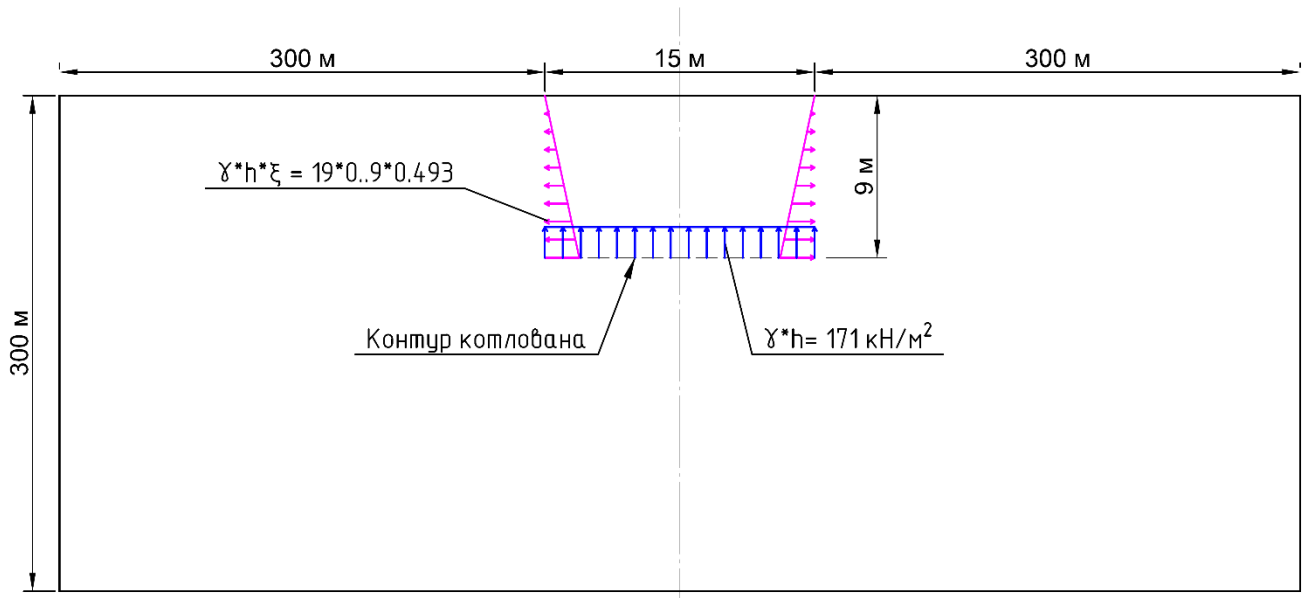


Рисунок 3.2. – Схема расчетной области с приложенными вдоль контура котлована нагрузками

### 3.2. Напряжения в однородной полуплоскости от действия, приложенной внутри неё, сосредоточенной силы.

С использованием решения Мелана определяются напряжения в точках полуплоскости от приложенной внутри полуплоскости сосредоточенной силы. Напряжения от распределённых по площадям нагрузок рассчитываются путём интегрирования значений напряжений от сосредоточенной силы в пределах конкретно рассматриваемой площади.

#### а) Напряжения от действия вертикальной силы.

Для вычисления напряжений от действия, приложенной на глубине  $s$  вертикальной силы, в решении Мелана используется функция напряжений, удовлетворяющая граничным условиям ( $\sigma_x = 0; \tau_{xy} = 0$ ):

$$\varphi = \frac{P}{\pi} \left[ \frac{1}{2} y (\theta_1 + \theta_2) - \frac{m-1}{4m} (y-s) \ln \frac{r_1}{r_2} - \frac{m+1}{2m} \cdot \frac{dy(y+s)}{r_2^2} \right], \quad (3.1)$$

где,  $m = 1/\nu$ ,  $\theta_1$  – угол между прямой, соединяющей точку приложения силы  $P$  с точкой  $(x, y)$ , в которой определяются напряжения, и осью  $x$  (вертикальной);  $\theta_2$  – такой же угол, но для зеркально отображённой точки приложения силы  $P$  с координатами  $(-d, 0)$ ;  $r_1$  и  $r_2$  – расстояния между точкой  $(x, y)$  и соответствующими точками  $(d, 0)$  и  $(-d, 0)$  согласно рис. 3.3;  $m = 1/\nu$ , где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

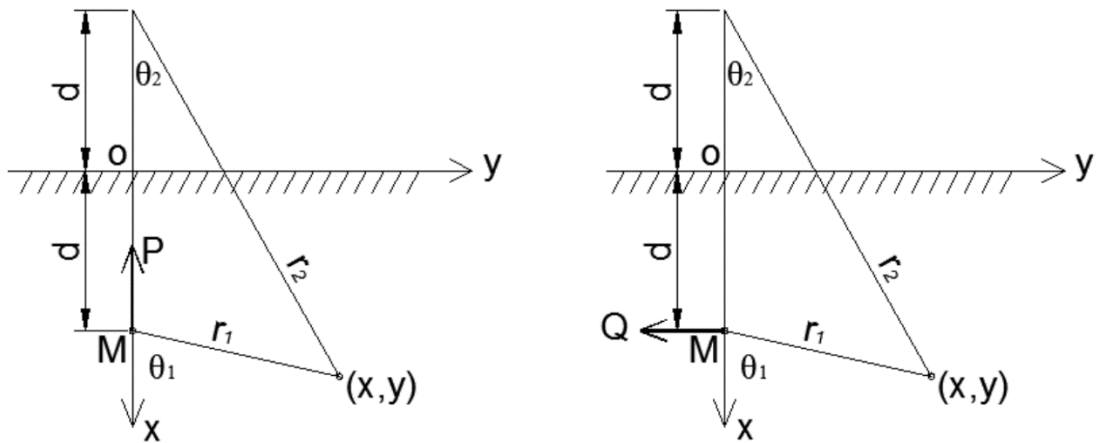


Рисунок 3.3. – Схема к уравнению 3.1

Аналогично, для приложенной в той же точке горизонтальной силы  $Q$ , функция напряжений имеет вид:

$$\varphi = \frac{Q}{\pi} \left[ -\frac{1}{2} (y-s) (\theta_1 + \theta_2) - \frac{m-1}{4m} \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{m+1}{2m} \cdot \frac{dxy}{r_2^2} \right] \quad (3.2)$$

Представленные через функцию напряжений компоненты напряжений, записываются в виде:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}. \quad (3.3)$$

После дифференцирования формулы для определения напряжений на глубине  $s$  от действия вертикальной сосредоточенной силы  $P$  примут вид:

$$\begin{aligned}
\sigma_x(x, y, s) &= -\frac{P}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[ \frac{x^2(y-s)}{[x^2+(y-s)^2]^2} + \frac{(x^2+2s^2)(y+s)-2sx^2}{[x^2+(y+s)^2]^2} + \frac{8syx^2(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^3} \right] + \right. \\
&\quad \left. + \frac{m-1}{4m} \left[ -\frac{y-s}{x^2+(y-s)^2} + \frac{y+3s}{x^2+(y+s)^2} + \frac{4yx^2}{[x^2+(y+s)^2]^2} \right] \right\}; \\
\sigma_y(x, y, s) &= -\frac{P}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[ \frac{(y-s)^3}{[x^2+(y-s)^2]^2} + \frac{(y+s)^3+2sy(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^2} - \frac{8syx^2(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^3} \right] + \right. \\
&\quad \left. + \frac{m-1}{4m} \left[ \frac{y-s}{x^2+(y-s)^2} + \frac{3y+s}{x^2+(y+s)^2} - \frac{4yx^2}{[x^2+(y+s)^2]^2} \right] \right\}; \\
\tau_{xy}(x, y, s) &= -\frac{Px}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[ \frac{(y-s)^2}{[x^2+(y-s)^2]^2} + \frac{y^2-2sy-s^2}{[x^2+(y+s)^2]^2} + \frac{8sy(y+s)^2}{[x^2+(y+s)^2]^3} \right] + \right. \\
&\quad \left. + \frac{m-1}{4m} \left[ \frac{1}{x^2+(y-s)^2} - \frac{1}{x^2+(y+s)^2} + \frac{4y(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^2} \right] \right\}. \tag{3.4}
\end{aligned}$$

Аналогичные выражения получим и от действия на той же глубине  $s$  горизонтальной сосредоточенной силы  $Q$ :

$$\begin{aligned}
\sigma_x(x, y, s) &= -\frac{Qx}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[ \frac{x^2}{[x^2+(y-s)^2]^2} + \frac{x^2+8sy+6s^2}{[x^2+(y+s)^2]^2} + \frac{8sy(y+s)^2}{[x^2+(y+s)^2]^3} \right] + \right. \\
&\quad \left. + \frac{m-1}{4m} \left[ \frac{1}{x^2+(y-s)^2} + \frac{3}{x^2+(y+s)^2} - \frac{4y(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^2} \right] \right\}; \\
\sigma_y(x, y, s) &= -\frac{Qx}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[ \frac{(y-s)^2}{[x^2+(y-s)^2]^2} - \frac{s^2-y^2+6sy}{[x^2+(y+s)^2]^2} - \frac{8syx^2}{[x^2+(y+s)^2]^3} \right] - \right. \\
&\quad \left. - \frac{m-1}{4m} \left[ \frac{1}{x^2+(y-s)^2} - \frac{1}{x^2+(y+s)^2} - \frac{4y(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^2} \right] \right\}; \\
\tau_{xy}(x, y, s) &= -\frac{Q}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[ \frac{(y-s)x^2}{[x^2+(y-s)^2]^2} + \frac{(x^2+2sy)(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^2} - \frac{8sy(y+s)x^2}{[x^2+(y+s)^2]^3} \right] + \right. \\
&\quad \left. + \frac{m-1}{4m} \left[ \frac{y-s}{x^2+(y-s)^2} + \frac{3y+s}{x^2+(y+s)^2} - \frac{4y(y+s)^2}{[x^2+(y+s)^2]^2} \right] \right\}. \tag{3.5}
\end{aligned}$$



Сосредоточенные вертикальная и горизонтальная силы рассчитываются по формулам:

$$P = \gamma \cdot s \quad \text{и} \quad Q = \xi \cdot \gamma \cdot s, \quad (3.6)$$

где

$\gamma$  – удельный вес грунта

$s$  – глубина рассматриваемой площадки

$\xi$  – коэффициент бокового давления =  $\frac{\nu}{1 - \nu}$

$\nu$  – коэффициент Пуассона

Для определения НДС, сформировавшегося в массиве грунта после отрывки котлована (рис. 3.2), распределённую вертикальную нагрузку от веса изымаемого грунта необходимо проинтегрировать выражение (3.4) по ширине дна котлована ( $dx$ ):

$$\int_{-b}^b \sigma_x(x, y, s) dx. \quad (3.7)$$

Точно так же, для определения значений распределённой горизонтальной нагрузки, приложенной к бортам котлована, требуется проинтегрировать выражение (3.5) по высоте борта котлована ( $ds$ ):

$$\int_0^h \sigma_x(x, y, s) ds \quad (3.8)$$

Наиболее рационально использовать для решения подобных выражений различные программные продукты, например, Mathcad и др. Для проверки правомерности применения решения задачи Мелана к расчету полуплоскости с выемкой были выполнены сравнительные расчеты с использованием МКЭ. Размеры расчетной области приняты с учетом выполнения граничных условий на контуре фрагмента (рис. 3.4). В расчётах значения удельного веса грунта и коэффициент Пуассона принимались соответственно равными:  $\gamma=19 \text{ кН/м}^3$  и  $\nu=0,3$ .

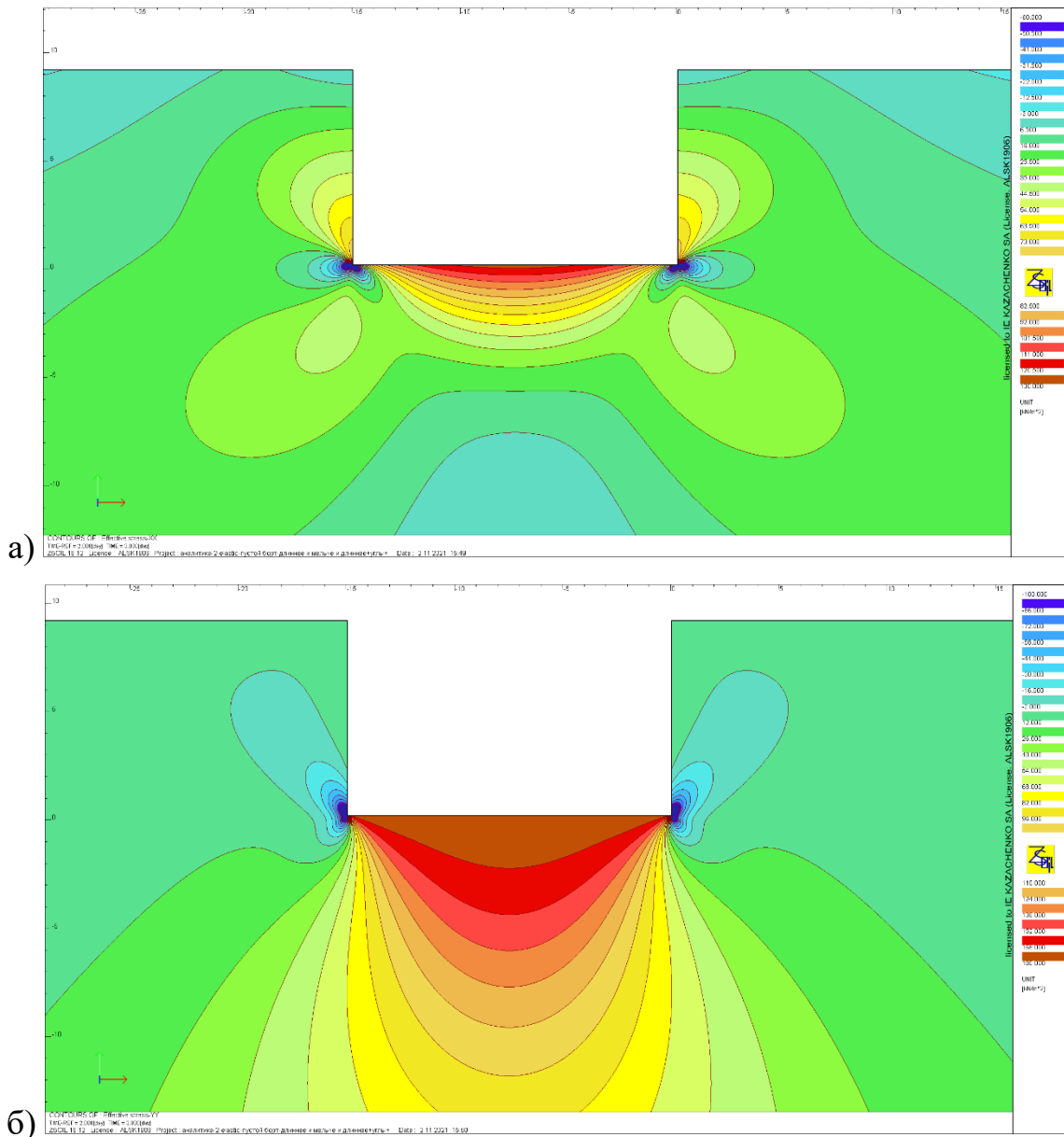


Рисунок 3.4. – Изополя дополнительных а) горизонтальных и б) вертикальных напряжений в весоной полуплоскости от устройства выемки, полученные с использованием МКЭ

Результаты сравнительных расчётов в виде эпюр дополнительных вертикальных и горизонтальных напряжений приведены на рисунке 3.5 (на расстоянии 0,5 м от борта котлована) и на рисунке 3.6 (на расстоянии 5 м от борта котлована, соответствующем расстоянию до расчётной границы призмы обрушения).

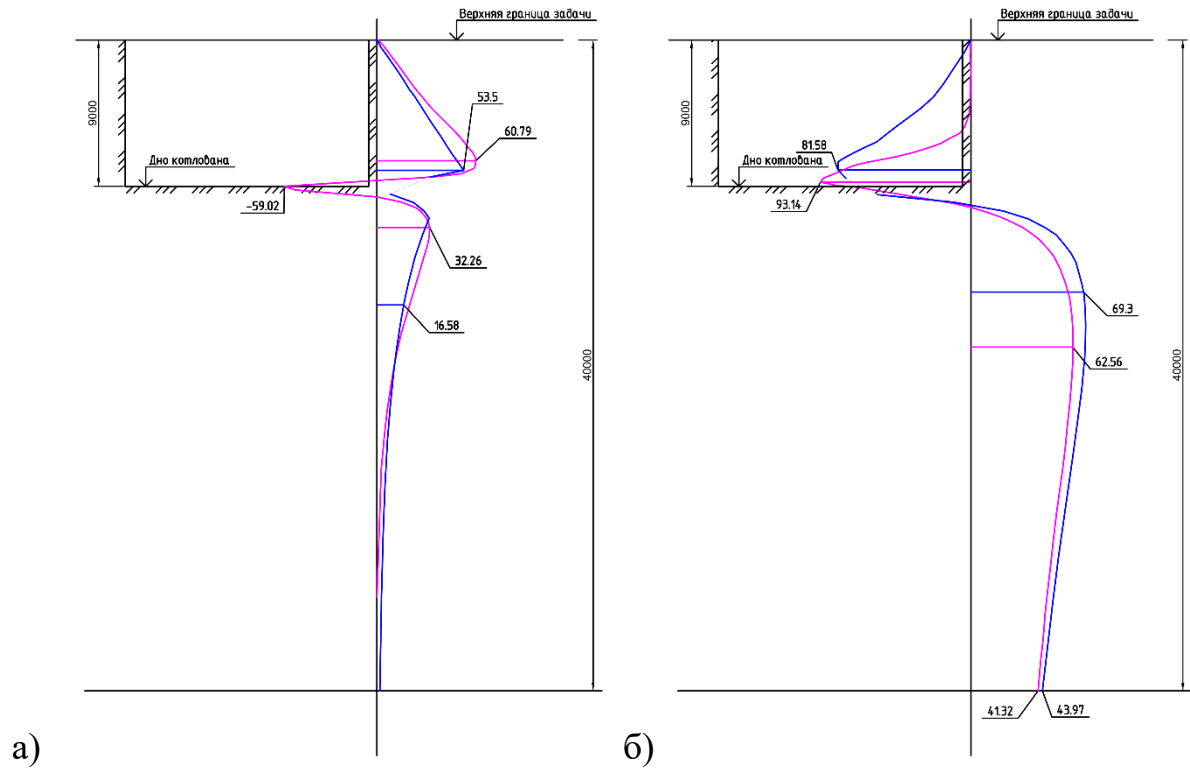


Рисунок 3.5. – Эпюры, построенные на удалении 0,5м от борта котлована по результатам сравнительных расчётов а) дополнительные горизонтальные и б) дополнительные вертикальные напряжения. Розовый цвет - результаты, полученные по МКЭ, синий – аналитическим методом

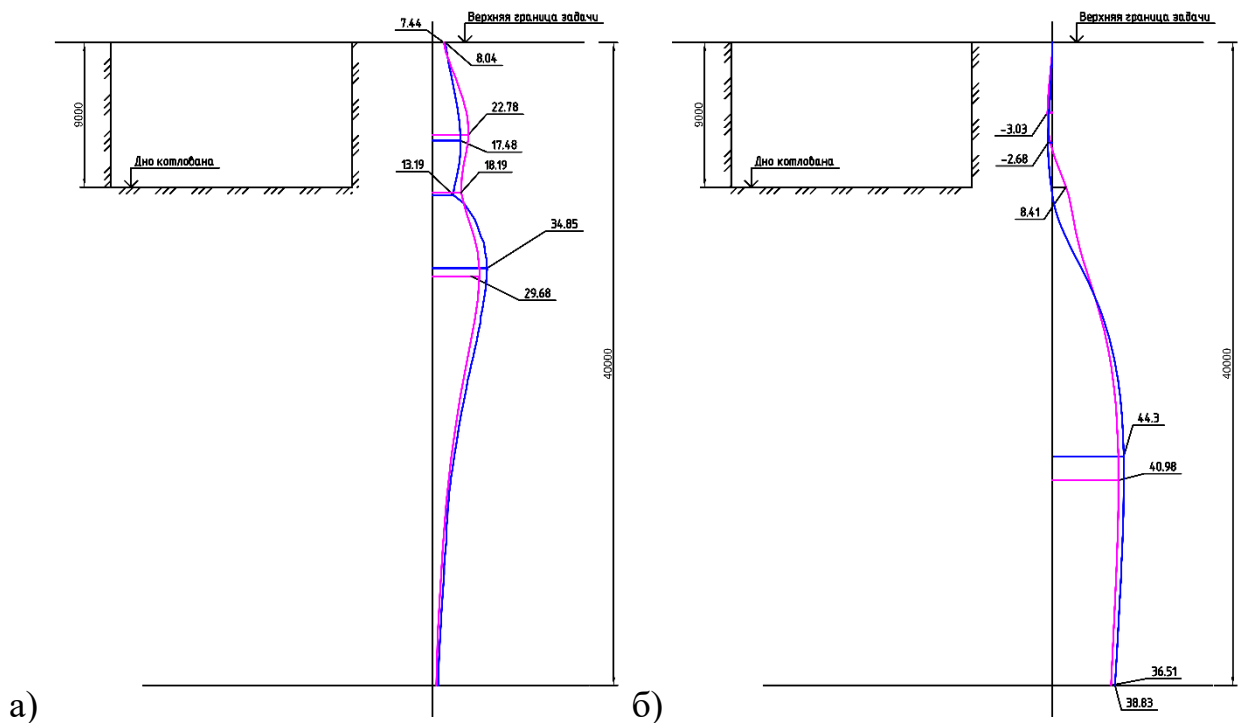


Рисунок 3.6. – Эпюры дополнительных горизонтальных (а) и вертикальных (б) напряжений в полуплоскости от устройства выемки на удалении 5 м. Розовым цветом представлены результаты, полученные по МКЭ, синим – аналитическим методом

Сравнение значений напряжений, посчитанных с помощью аналитического решения и численных расчётов, показывает, что их расхождение не превышает 15% и находится в пределах инженерной точности расчётов. Указанное расхождение наблюдалось в расчётном сечении, отстоящем на 0,5м от борта котлована, при отдалении от него расхождение результатов аналитического и численного решений уменьшалось (рисунки 3.5 и 3.6). Из анализа полученных результатов следует также, что отмеченное расхождение в результатах аналитического и численного решений обусловлено несколькими причинами. К ним относятся: наличие сингулярной точки в углу котлована, размеры конечных элементов в конечно – элементной сетке, и расстояния до границ расчетного фрагмента, особенно до его нижней границы. Однако, этот вопрос требует отдельного изучения.

### 3.3. Определение перемещений во вмещающем котлован грунтовым массиве в упругой постановке.

Ранее, во второй главе, указывалось, что при определении в условиях упругой задачи дополнительных перемещений точек, вмещающего котлован, массива грунта получаются, не соответствующие действительности, результаты – нереально высокие деформации подъёма дна котлована и прилегающей к нему дневной поверхности. То же можно сказать и о горизонтальных перемещениях бортов котлована.

Чтобы устранить эти расхождения в практических расчётах при проектировании используют следующие приёмы: ограничивают расстояние до нижней границы расчётного фрагмента до размеров сжимающей толщи грунта [63], либо назначают значение модуля деформации грунта, соответствующее ветви разгрузки [69]. Очень эффективным при инженерных расчётах показал себя способ, при котором применяется снижение удельного веса разработанного грунта [15, 36]. Расчётная область в рассматриваемом примере показана на рисунке 3.7.

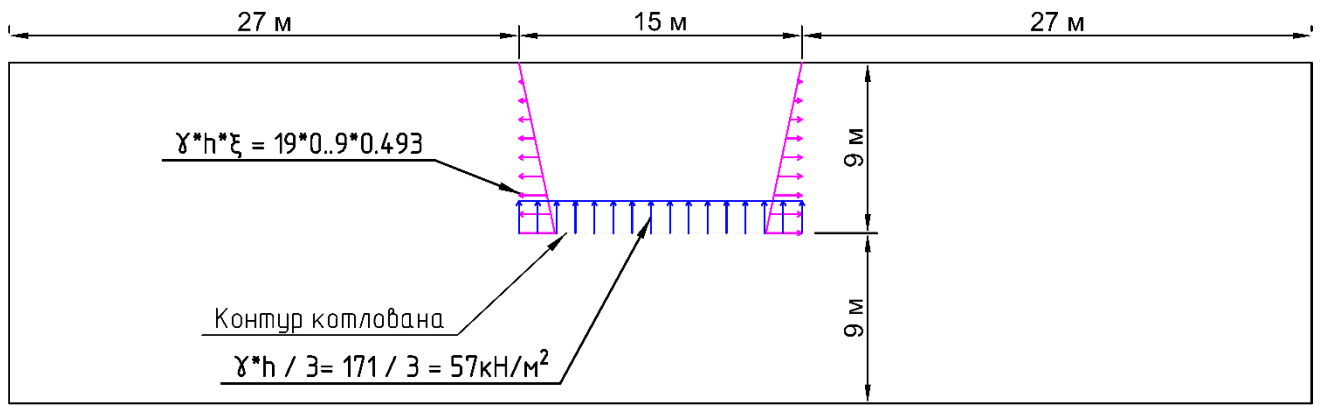


Рисунок 3.7. – Расчетная область с приложением нагрузок к границам предполагаемой выемки

В соответствии с принятой схемой по предлагаемому выше методу рассчитываются величины дополнительных горизонтальных и вертикальных напряжений. При этом использовались корректировка размеров расчётной области, а также снижение значений удельного веса грунта. Полученные результаты сопоставлялись с результатами расчёта с использованием МКЭ. На рисунке 3,8 представлены эпюры горизонтальных и вертикальных напряжений для сечений, отстоящих от борта котлована соответственно на 0,5 м и 5,0 м.

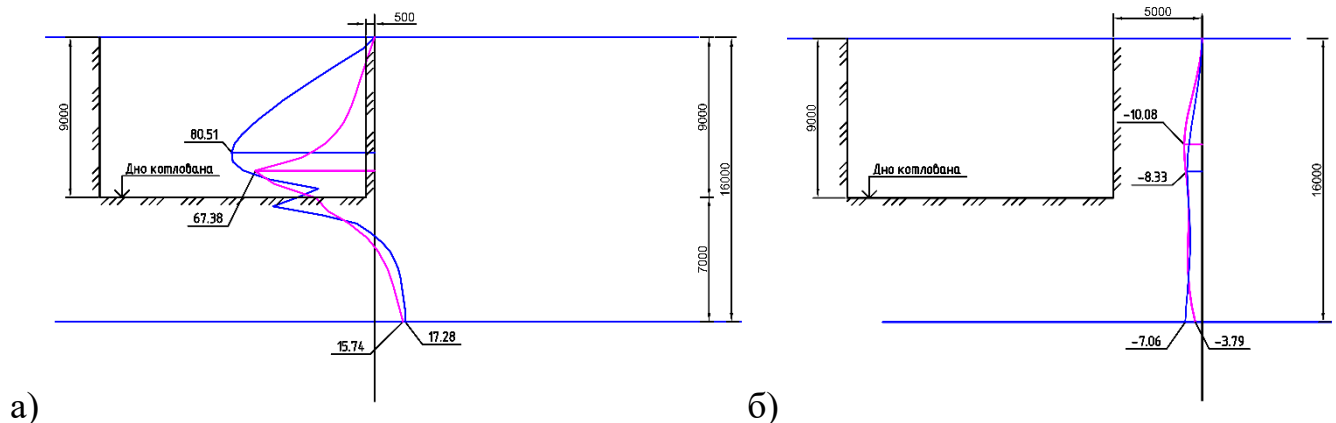


Рисунок 3.8. – Эпюры дополнительных вертикальных напряжений в полуплоскости от устройства выемки на удалении 0,5 м (а) и 5,0 м (б). Розовым цветом представлены результаты, полученные по МКЭ, синим – аналитическим методом

Сопоставление результатов аналитического решения и численного моделирования показало, что также, как и в предыдущем расчёте, их расхождение не превысило 20%. Это позволило перейти к расчёту дополнительных осадок

массива грунта, сформировавшихся в процессе разработки котлована. Расчёты выполнялись методом послойного суммирования для сечений, отстоящих от его боковой границы на 0,5м и на 5,0м. Осадки определялись, используя, полученные расчётом, значения вертикальных напряжений (рисунок 3.8). Значения суммарных осадок, вычисленные на основе аналитического решения, соответственно составили: в сечении на расстоянии 0,5м – 14,1мм и на расстоянии 5,0м – 6,2мм. Значения суммарных осадок, вычисленных в тех сечениях с использованием МКЭ, составляли соответственно 16мм и 7,0мм. Эпюры осадок приведены на рисунке 3,9.

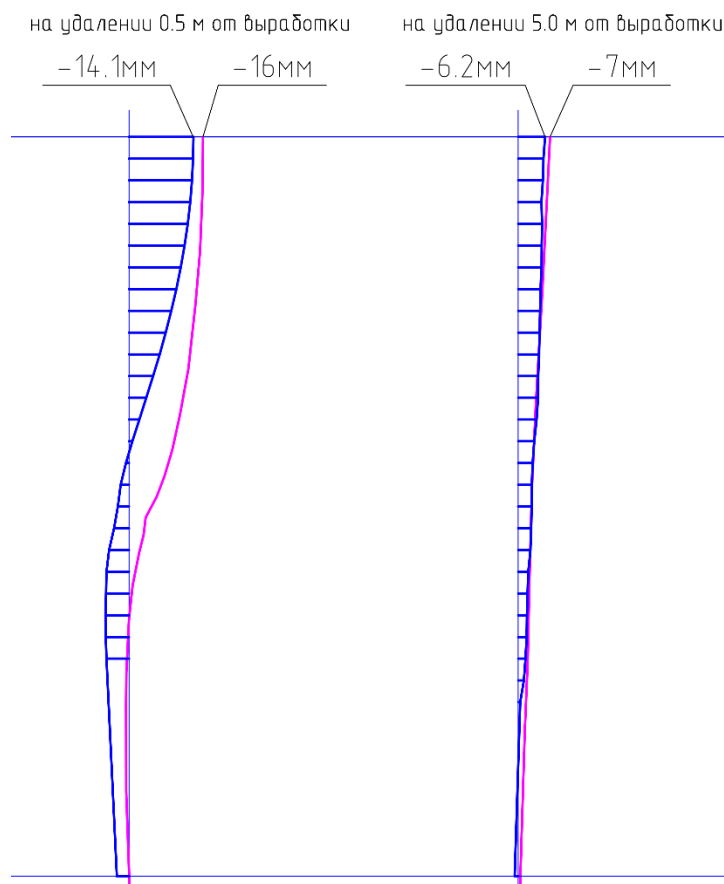


Рисунок 3.9. – Эпюры дополнительных вертикальных деформаций в полуплоскости от устройства выемки на удалении 0,5 м и 5,0 м. Розовым цветом представлены результаты, полученные по МКЭ, синим – аналитическим методом

Расхождение результатов, полученных на основании аналитического решения и путём численного моделирования показали расхождение не более 13,0%, что свидетельствует о возможности применения предлагаемого расчётного метода на стадии предварительного проектирования.

### 3.4. Учет ограждения котлована

Для учета работы ограждения котлована и определения зависимости между горизонтальными смещениями стенки котлована и дополнительными осадками грунтового массива в соответствии с методом планирования эксперимента была выполнена серия экспериментов с варьированием выбранных независимых параметров: модуля деформации грунта (от 10 до 25 МПа); глубины котлована (от 3 до 7 м) и жесткости ограждения. Ограждение котлована принято консольным, в связи с этим его заглубление ниже дна назначено как 1 глубина котлована. В качестве результата расчетов были получены величины перемещений ограждения и массива грунта, которые позволяют определить необходимую жесткость ограждения и предельно допустимые значения его горизонтальных смещений исходя из допустимых осадок зданий и сооружений окружающей застройки.

Серия экспериментов проводилась по следующей матрице планирования эксперимента:

Таблица 3.1. Матрица полного факторного эксперимента  $2^3$  для получения линейной зависимости.

№ опыта	$X_1, E$ [МПа]	$X_2, H$ [м]	$X_3, EI$ [кН*м <sup>2</sup> ]
1	+	+	+
2	+	-	+
3	-	+	+
4	-	-	+
5	+	+	-
6	+	-	-
7	-	+	-
8	-	-	-

Принятые интервалы варьирования факторов приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Значения факторов (входных параметров).

Наименование	Факторы		
	$X_1, E$ [МПа]	$X_2, H$ [м]	$X_3, EI$ [кН*м <sup>2</sup> ]
Основной уровень (0)	17,5	5	316 588
Интервал варьирования	7,5	2	268 412
Верхний уровень (+)	25	7	585 000
Нижний уровень (-)	10	3	48 176

Проведенная серия экспериментов и анализ полученных результатов позволили выявить следующие закономерности.

На основании выполненного факторного анализа также получено уравнение регрессии для подбора необходимой жесткости ограждения из условия обеспечения сохранности сооружений окружающей застройки, т.е. недопущения чрезмерных дополнительных осадок сооружений и соответствующих им горизонтальных смещений стенки котлована. Методика получения уравнения регрессии описана ранее в Главе 2.

После обработки вычислены коэффициенты уравнения регрессии для нахождения величины горизонтального смещения стенки при разных значениях факторов. Значения и интервалы варьирования факторов приведены в таблице 3.2:

$$Y = 27,75 - 21,75 \cdot X_1 + 15,75 \cdot X_2 + 7,0 \cdot X_3 - 13,25 \cdot X_1 X_2 - 7,5 \cdot X_1 X_3 + 6,0 \cdot X_2 X_3 \quad (3.8)$$

Основным критерием подбора ограждения с расчетной точки зрения является величина предельно допустимых осадок зданий и сооружений окружающей застройки. В случае расположения зданий в пределах призмы обрушения грунта при недостаточной жесткости ограждения, их осадки будут близки или превысят допустимые значения. При этом, в массиве будут развиваться зоны предельного состояния, как в зоне заделки, так и в части выше уровня дна котлована.

Если же жесткость ограждения достаточна, тогда зоны предельного



состояния в массиве не развиваются или незначительны по распространению (см. рис. 3.10), и, следовательно, для определения значений дополнительных деформаций могут быть использованы известные решения теории упругости в соответствии с методикой, представленной в данной главе. Важно отметить, что используя такой подход, нет необходимости вводить в решение само ограждение котлована. Сравнение результатов расчета в упругой и упруго-пластической постановке, полученных с помощью МКЭ, а также в упругой постановке на основании задачи Мелана приведены в таблице 3.3.

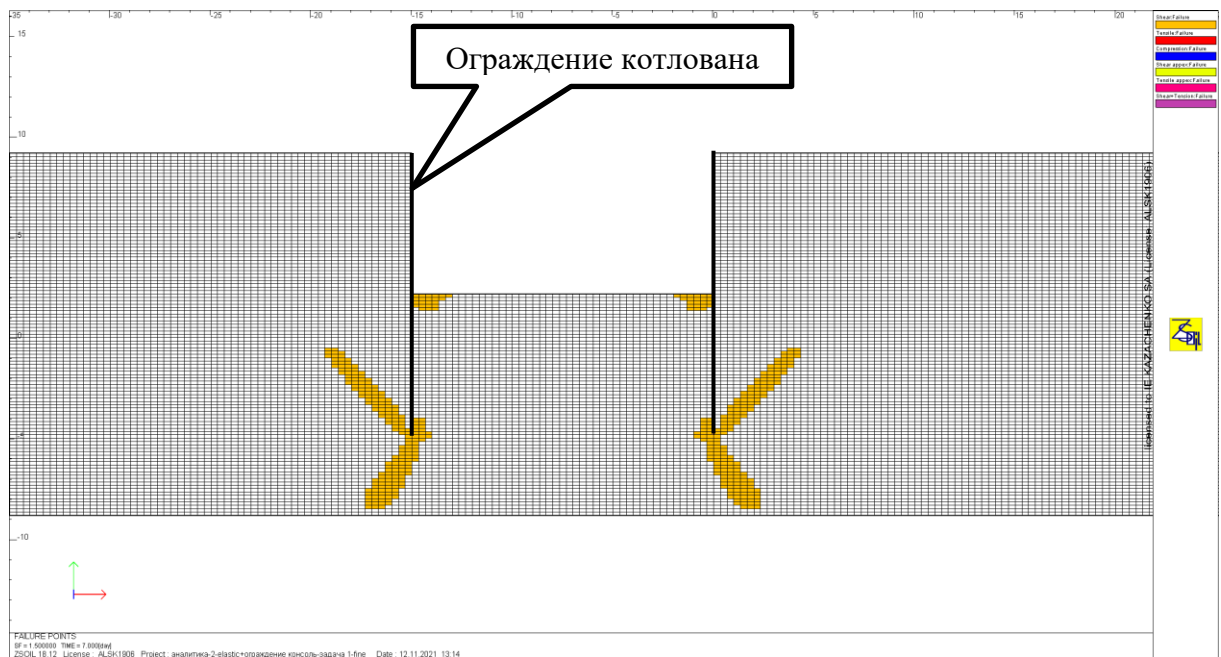


Рисунок 3.10. – Распределение зон предельного состояния (оранжевым) в массиве грунта в окрестностях выработки и конструкции ограждения

Таблица 3.3. Результаты проведенного эксперимента

№ опыта	$U_x$	$U_y - 0,5\text{м}$	$U_y - 5,0\text{м}$	$U_x$ упругая постановка	$U_y - 0,5\text{м}$ упругая постановка	$U_y - 5,0\text{м}$ упругая постановка
1	18	9	4	13	9	3
2	4	1	0	3	1	0
3	52	29	14	33	22	6
4	9	3	1	7	3	0

Также была установлена зависимость (рис. 3.11) между горизонтальными смещениями ограждения верха ограждения котлована (по оси X) и дополнительными вертикальными осадками (по оси Y) массива на удалении 0,5 м

и 5,0 м от бровки котлована. Полученная на основании аналитического решения зависимость хорошо описывается линейной функцией (квадратичное отклонение  $R^2 > 0,99$ ) и может быть использована для определения величины предельного горизонтального отклонения ограждения для мониторинга.

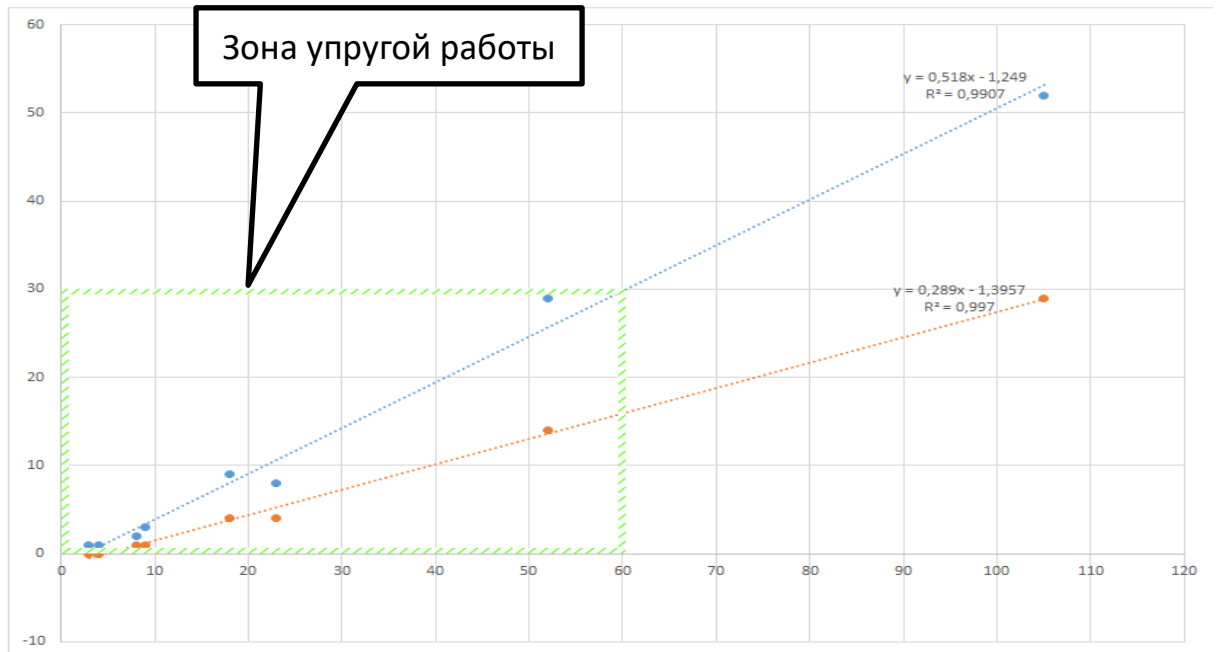


Рисунок 3.11. – Определение зависимости между дополнительными вертикальными осадками (по вертикальной оси) массива и горизонтальным смещением (по горизонтальной оси) ограждения на удалении 0,5 м (синим) и 5,0 м (оранжевым) от бровки котлована

Таким образом, предлагается следующий алгоритм получения решения. По графику и зависимостям, приведенным на рисунке 3.11 определяется горизонтальное смещение ограждения, соответствующее допустимой дополнительной осадке сооружения, а затем по уравнению 3.8 перебором определяется необходимая жесткость ограждения [15, 22].

### Выводы по главе 3

1. На основании известной задачи Мелана в рамках теории упругости в «плоской» постановке получено решение для определения напряжённо – деформированного состояния, формирующегося во вмещающем массиве грунта при отрывке котлована. Результаты аналитического решения сопоставлялись с

результатами расчётов, выполненных с использованием метода конечных элементов, и показали сходимость в пределах 5 – 20%, что хорошо согласуется с принятой инженерной точностью расчётов.

2. Предложен график зависимости, позволяющий установить связь между величиной горизонтальных смещений верха ограждающей конструкции и дополнительных вертикальных деформации земной поверхности возле ограждения котлована и на границе призмы обрушения.
3. С использованием указанного выше решения задачи Мелана предложен численно – аналитический метод оценки влияния устройства котлованов на окружающую городскую застройку с учётом жёсткости ограждения. Алгоритм подбора жёсткости базируется на результатах численного моделирования и метода планирования экспериментов. Такой подход позволяет оперативно оценить влияние котлована на НДС грунтового массива и выбрать приемлемый вариант ограждающей конструкции. Метод, как альтернативный, может быть использован на предварительной стадии проектировании устройства котлованов.

## ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ МАССИВА ГРУНТА И ОКРУЖАЮЩЕЙ ЗАСТРОЙКИ

Для анализа изменения деформированного состояния массива грунта при сооружении котлована, в соответствии с планом эксперимента и методикой, приведенными во 2 главе, проводилась серия расчетов для рассматриваемых четырёх видов грунта.

В ходе проведения начальных экспериментов факторная область представляла собой единый массив на всем интервале варьирования определенных факторов. Однако в ходе анализа полученных первичных результатов была выявлена крайне низкая сходимость результатов эксперимента и данных, полученных по уравнениям. В подобных случаях рекомендуется либо увеличение степени полинома и переход на более сложные зависимости, либо уменьшение интервала варьирования фактора.

Было принято решение разделить интервал варьирования фактора «L - удаление сооружения» на 2 части: расположение здания до границы призмы обрушения грунта (определяемой как  $H \cdot \text{tg}(45 - \phi/2)$ ) – участок 1, и после нее – участок 2. В пределах призмы обрушения зависимость изменения функции отклика от определенных факторов принималась квадратичной, а за ее границами – линейной. Данное разделение на 2 области, а также определение характера изменения функции подтверждается опытами, проведенными ранее [59, 80], результатами наблюдений, а также результатами настоящих экспериментов.

В качестве результата проведенных экспериментов рассматриваются следующие **функции отклика** ( $Y_n$ ): горизонтальные и вертикальные перемещения точек массива грунта в пределах призмы обрушения – всего 9 шт. (см. рис. 4.1.), горизонтальные смещения верха ограждения котлована, вертикальные перемещения фундамента здания. Для этих функций отклика на основании регрессионного анализа получены уравнения, для определения значений в интервалах варьирования выбранных факторов. Значения коэффициентов уравнений приведены в табличной форме в приложении А.

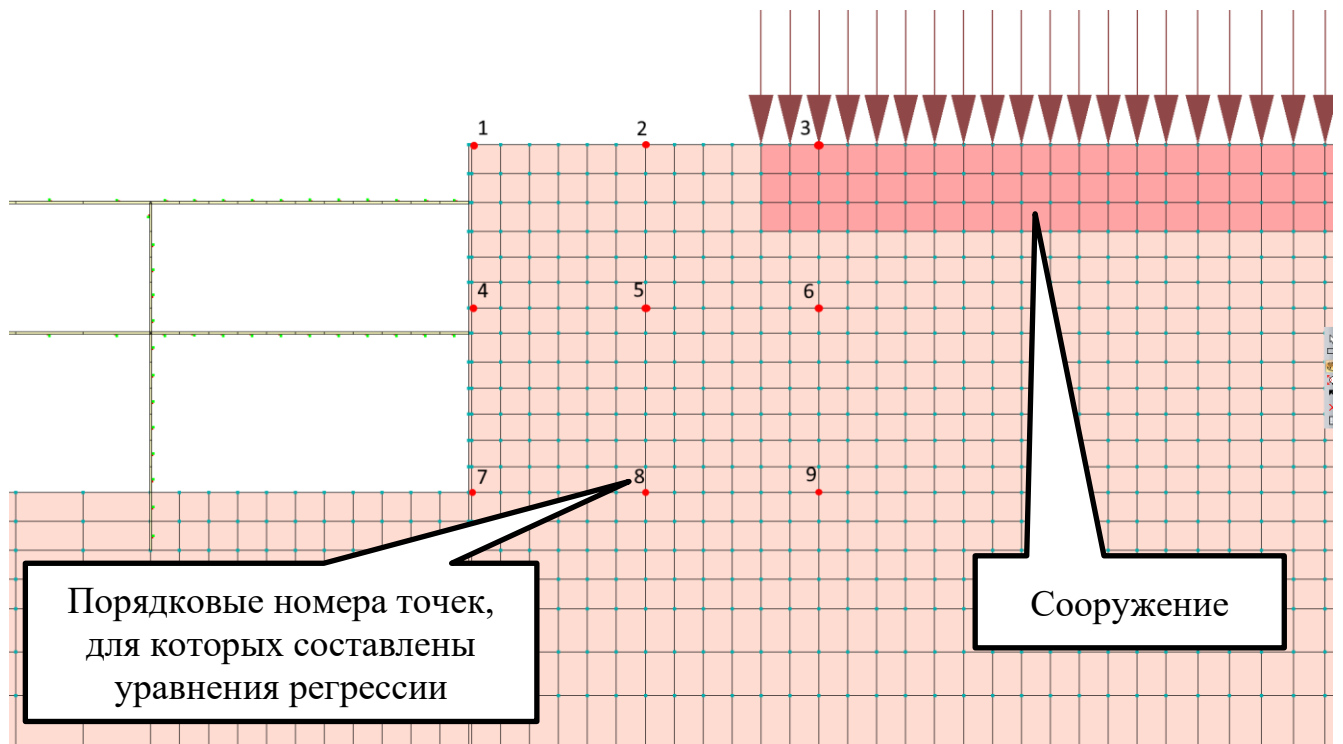


Рисунок 4.1. – Точки массива грунта, для которых выполняется анализ данных и построение уравнений регрессии

#### 4.1. Анализ распределения вертикальных перемещений земной поверхности

##### 4.1.1. Анализ изменения вертикальных перемещений поверхности в пределах призмы обрушения в направлении перпендикулярном котловану

Как показали проведенные расчеты, распределение осадок точек поверхности массива грунта носит нелинейный характер как в направлении перпендикулярном ограждению котлована, так и вдоль него. При расположении сооружения в пределах границы призмы обрушения характер данного распределения меняется, а при расположении здания за призмой обрушения влияние от его веса снижается, особенно это заметно для крайней границы варьирования удаления, принятой на 18 м от котлована, что позволяет данные результаты использовать в случае необходимости определения перемещений в призме обрушения при отсутствии сооружений. Такой подход может применяться для определения перемещений подземных сооружений и коммуникаций.

Анализ полученных результатов показывает изменение значений перемещений точек 1-3 (см. рис. 4.1) поверхности массива грунта по направлению I-I (см. рис.4.2) при нахождении сооружения в пределах призмы обрушения по

центру котлована глубиной 6-9 м с одним рядом распорок в диапазоне: от 3 до 104 мм для **глин**; от 3,5 до 58,7 мм для **суглинков**; от 3,3 до 52,9 мм для **супесей**; от 3,8 до 56 мм для **песков**.

При нахождении сооружения в пределах призмы обрушения на углу котлована глубиной 6-9 м с одним рядом распорок, осадки по направлению II-II (см. рис.4.2) изменяются в диапазоне: от 1,2 до 29,5 мм для **глин**; от 1,4 до 23,9 мм для **суглинков**; от 1 до 22,8 мм для **супесей**; от 1,4 до 23,6 мм для **песков**.

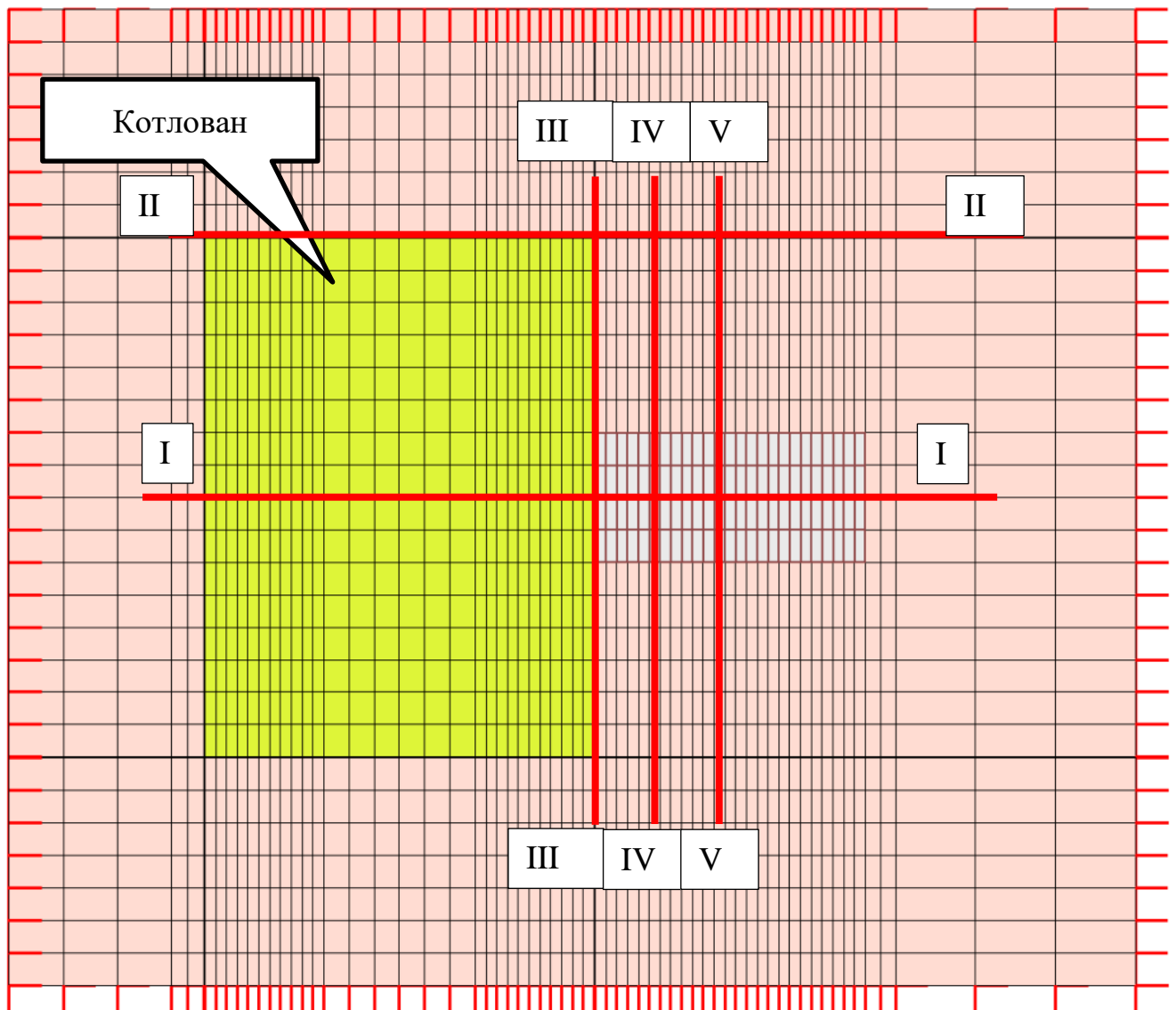


Рисунок 4.2. – Направления, в которых производится анализ перемещений для всех сочетаний факторов, типов грунтов и рассматриваемых функций отклика

Для более наглядного анализа характера распределения осадок поверхности в точках 1-3 был построен ряд графиков. Для створа I-I графики приведены на рисунках 4.3-4.4, для створа II-II – на рисунках 4.6-4.7.

На рисунке 4.3 представлены графики вертикальных перемещений точек поверхности грунта в пределах призмы обрушения для котлована глубиной 6 м в разных типах грунтов и в зависимости от модуля деформации. На рисунке 4.3а) представлены графики при расположении здания на бровке котлована; на рисунке 4.3б) – при расположении здания на границе призмы обрушения; на рисунке в) - при расположении здания за пределами предварительно назначенной зоны влияния (ЗНк).

Аналогично, на рисунке 4.4 приведены соответствующие графики изменения осадок земной поверхности для котлована глубиной 9м с одним ярусом распорного крепления.

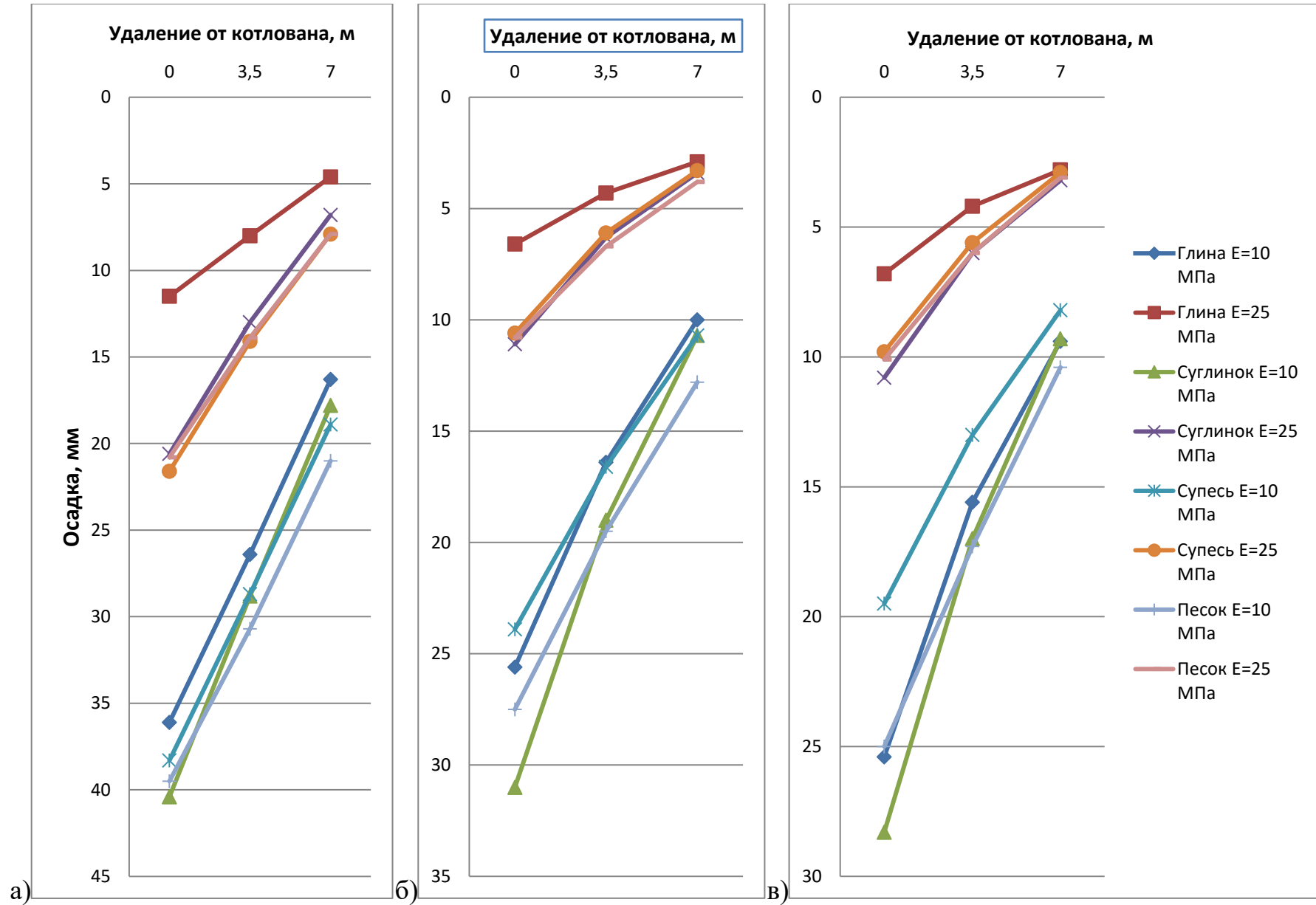


Рисунок 4.3. – Графики вертикальных перемещений поверхности земли у котлована глубиной 6м



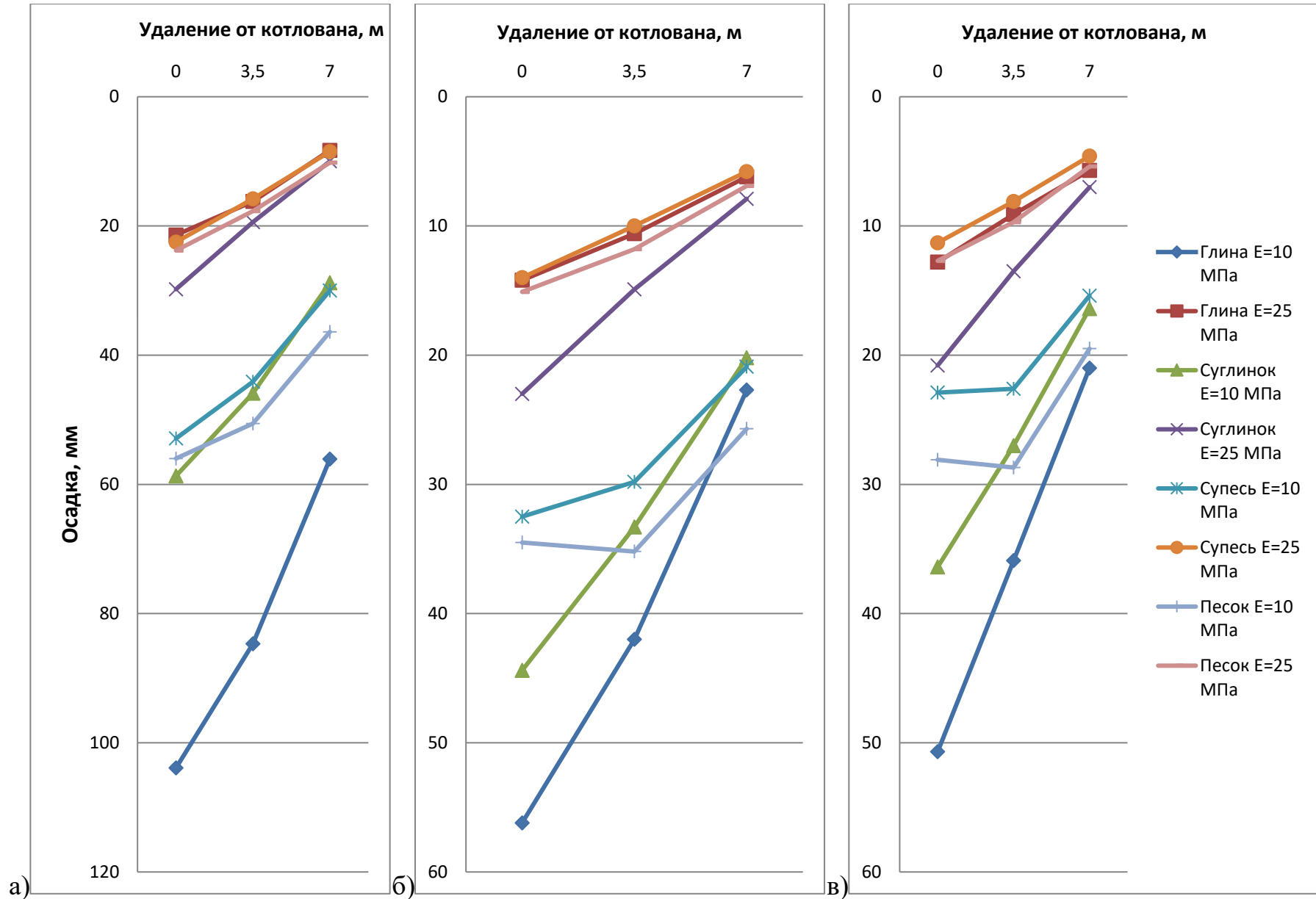


Рисунок 4.4. – Графики вертикальных перемещений поверхности земли у котлована глубиной 9м

При расположении здания по центру котлована анализ полученных результатов показывает уменьшение влияния нагрузки от сооружения при его удалении от котлована. Различия в вертикальных перемещениях для ситуации с положением здания на бровке и при свободной поверхности грунта составляют от 25 до 100%, что характерно для всех рассмотренных котлованов независимо от их глубины. Характер распределения осадок в пределах призмы обрушения соблюдается как при наличии сооружения, так и без него, и является близким к параболе.

Ниже на рисунке 4.5 в качестве примера приведен результат расчета в виде изополей распределения вертикальных перемещений точек массива грунта для центрального сечения котлована.

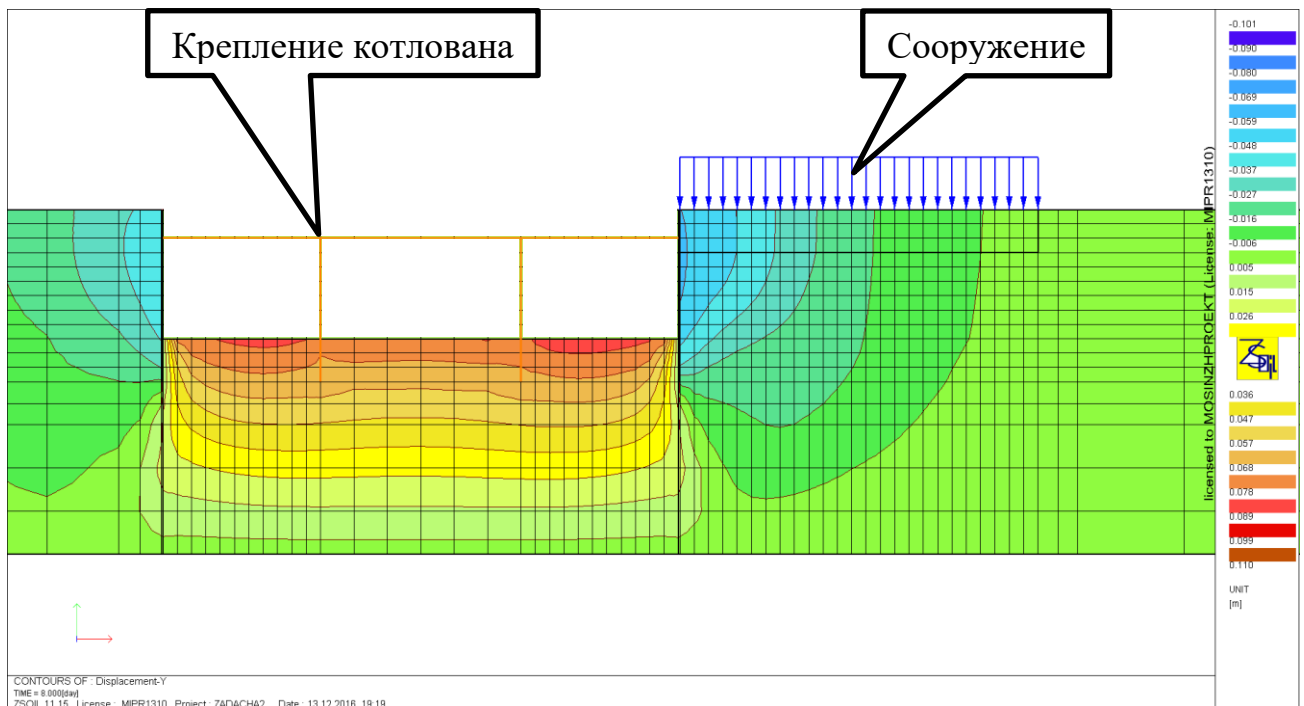


Рисунок 4.5. – Изополя вертикальных перемещений для котлована глубиной 9м в суглинках при расположении сооружения на бровке по сечению I-I

На рисунке 4.6 представлены графики вертикальных перемещений точек поверхности грунта в пределах призмы обрушения для котлована глубиной 6 м в разных типах грунтов и в зависимости от модуля деформации при расположении здания на углу котлована. На рисунке 4.6а) представлены графики при расположении здания на бровке котлована; на рисунке 4.6б) – при расположении здания на границе призмы обрушения; на рисунке в) - при расположении здания за пределами предварительно назначенной зоны влияния (ЗНк).

Аналогично, на рисунке 4.7 приведены соответствующие графики изменения осадок земной поверхности для котлована глубиной 9м с одним ярусом распорного крепления.

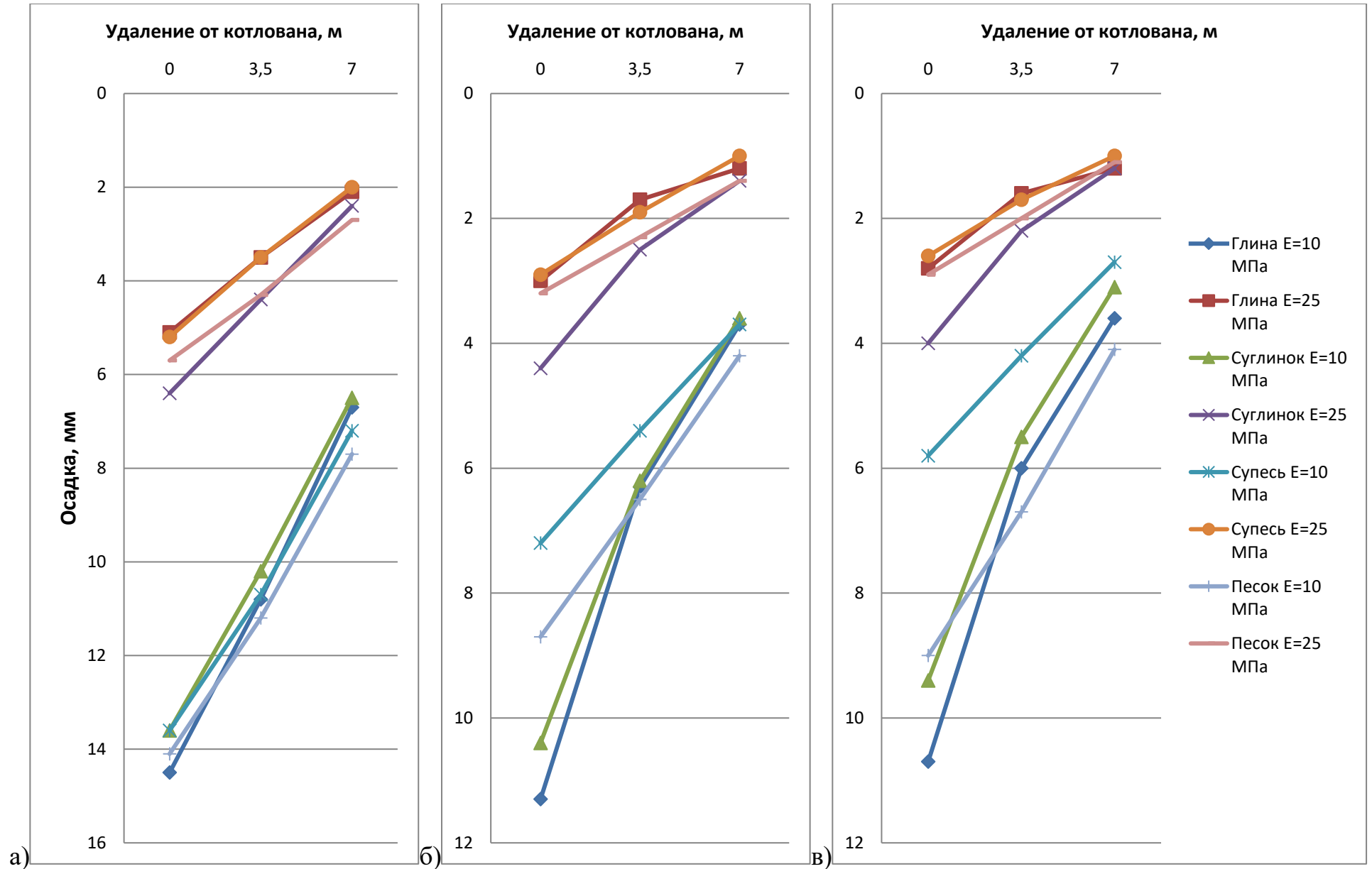


Рисунок 4.6. – График вертикальных перемещений поверхности земли у котлована глубиной 6м

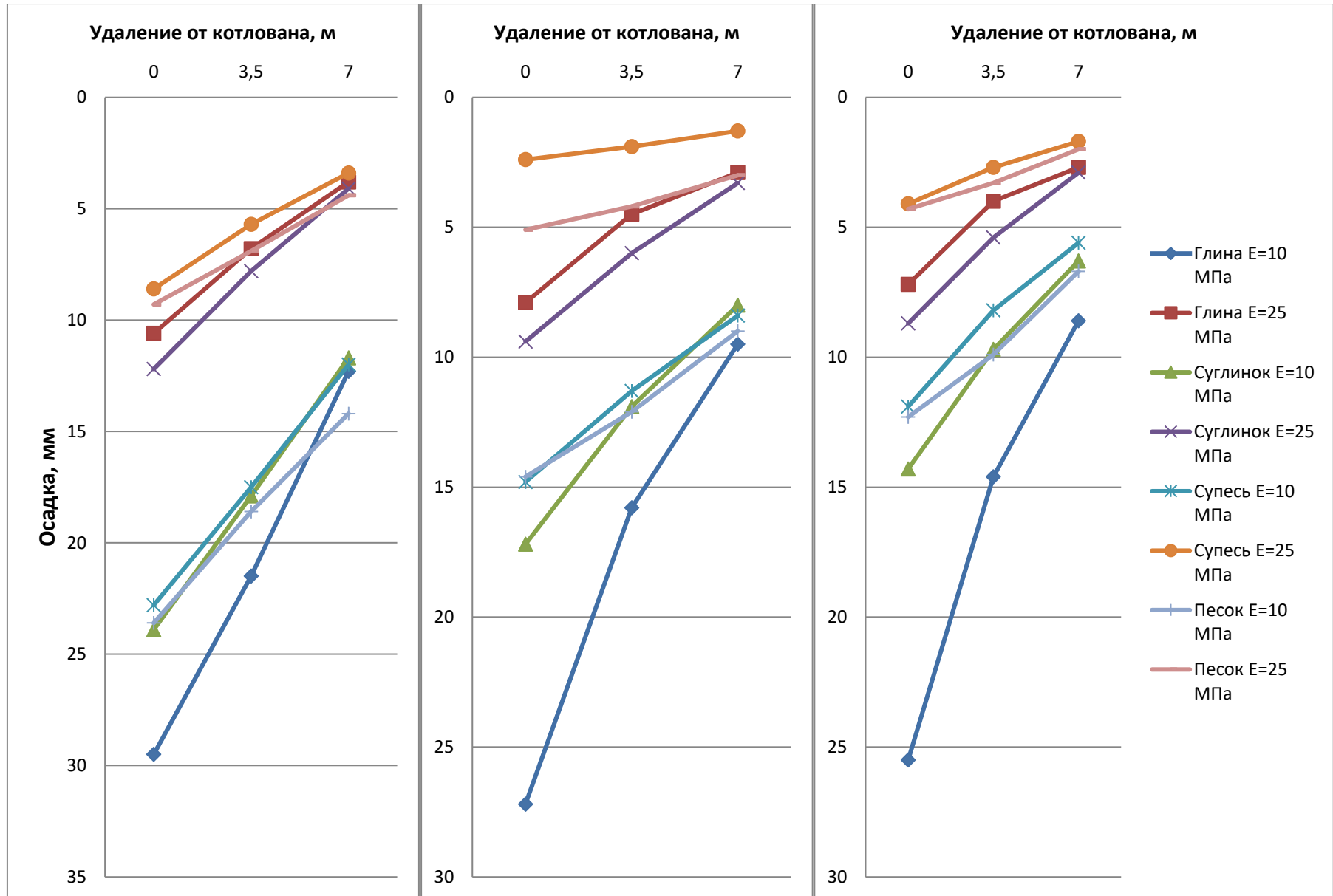


Рисунок 4.7. – График вертикальных перемещений поверхности земли у котлована глубиной 9м

На представленных графиках видно, что при сохранении общей тенденции к нелинейному изменению перемещений в пределах призмы обрушения, в зависимости от рассматриваемой глубины меняется удаление точки перехода к линейной зависимости. При этом, чем ближе к углу котлована, тем сильнее это изменение, что говорит об уменьшении призмы обрушения при отдалении от центра котлована.

Также необходимо заметить, что варьирование остальных факторов влияет на величину самой осадки количественно, но не качественно.

Как отмечалось ранее, расположение сооружения в призме обрушения оказывает существенное влияние на величину дополнительных осадок поверхности, в среднем они выше на 25-30%, чем при свободной поверхности.

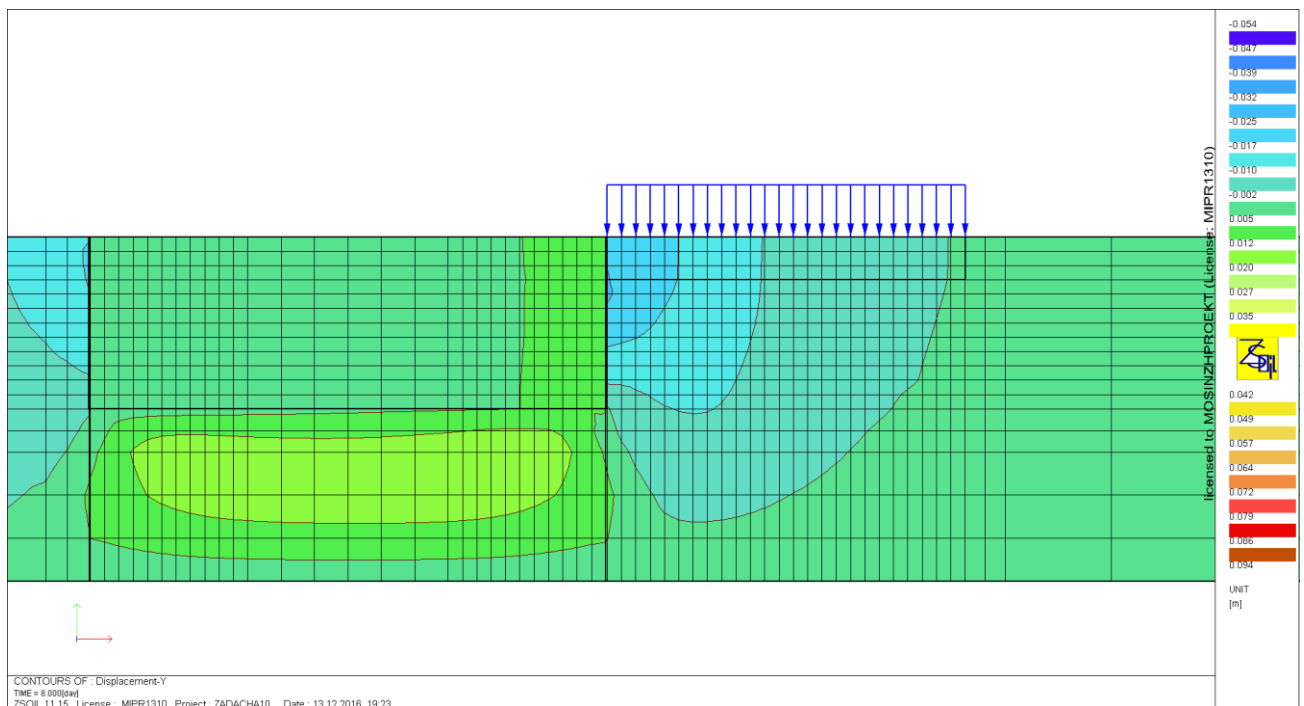


Рисунок 4.8. – Изополя вертикальных перемещений для котлована глубиной 9м в суглинках при расположении сооружения на бровке по сечению II-II

#### 4.1.2. Анализ изменения вертикальных перемещений поверхности в пределах призмы обрушения в направлении вдоль котлована

Анализ осадок дневной поверхности, проведенный в предыдущем параграфе и выполненный для 2 сечений (по центру котлована и на его углу) представляющих собой крайние точки факторного плана, показал существенные различия в

перемещениях сходных точек, в отдельных случаях до 2-3 раз. Это говорит о необходимости более подробного исследования «углового эффекта» и определения границ уменьшения осадок при удалении расчетного сечения от центра котлована.

Для этого в ходе планирования эксперимента была принята квадратичная зависимость изменения исследуемых параметров, что вводит в план промежуточные точки варьирования факторов. Расположение сооружения принято дополнительно на  $\frac{1}{4}$  пролета котлована (см. рис. 4.9).

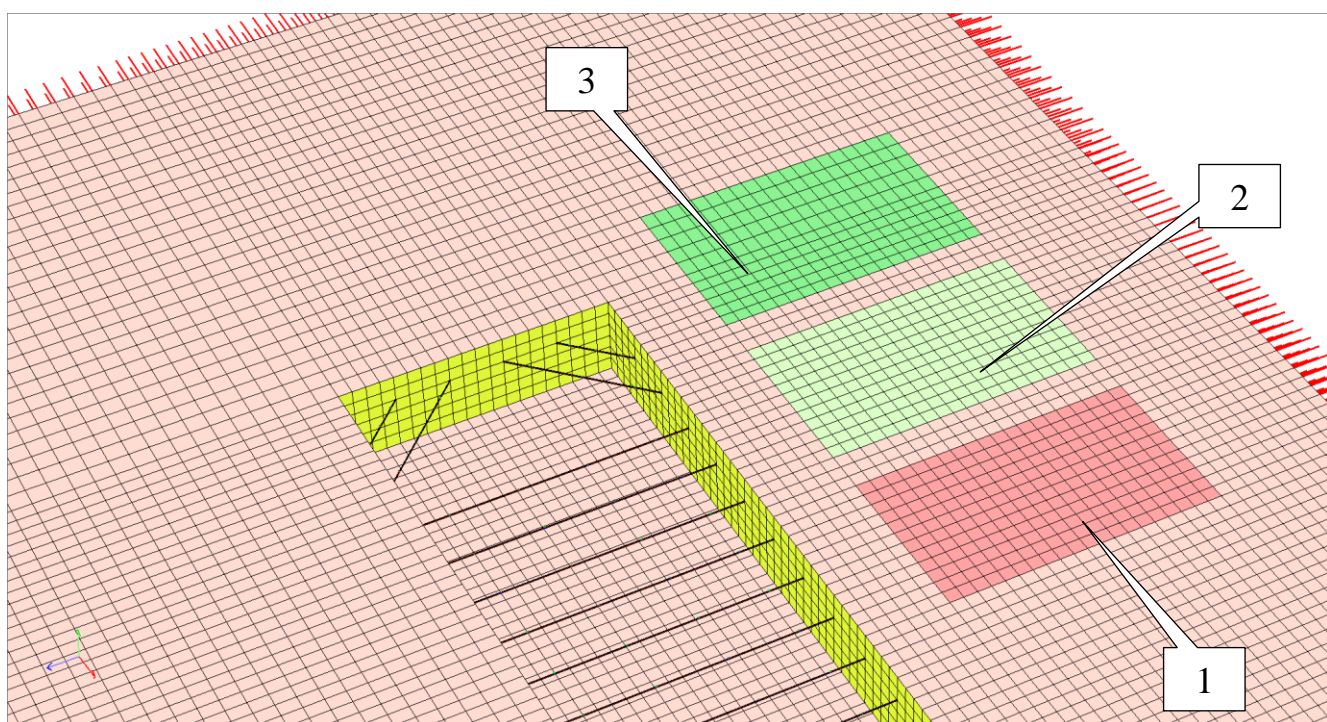


Рисунок 4.9. – Расположения здания в середине котлована (1), в промежуточной точке на  $\frac{1}{4}$  пролета (2) и на углу котлована (3)

Распределение осадок дневной поверхности в направлении вдоль котлована рассматривалось по 3 сечениям III-III, IV-IV и V-V (см. рис. 4.2). Сечения расположены следующим образом: III – на бровке котлована, IV – в середине призмы обрушения; V - на границе призмы обрушения. При этом были введены дополнительные точки для оценки перемещений, в зависимости от ширины котлована (см. рис. 4.10).

Наибольшие перемещения находятся в центре котлована (удаление  $0,5B$  от угла котлована, где  $B$  – ширина котлована), при этом по мере приближения к его углу значения осадок сначала изменяются незначительно, порядка 10-15%

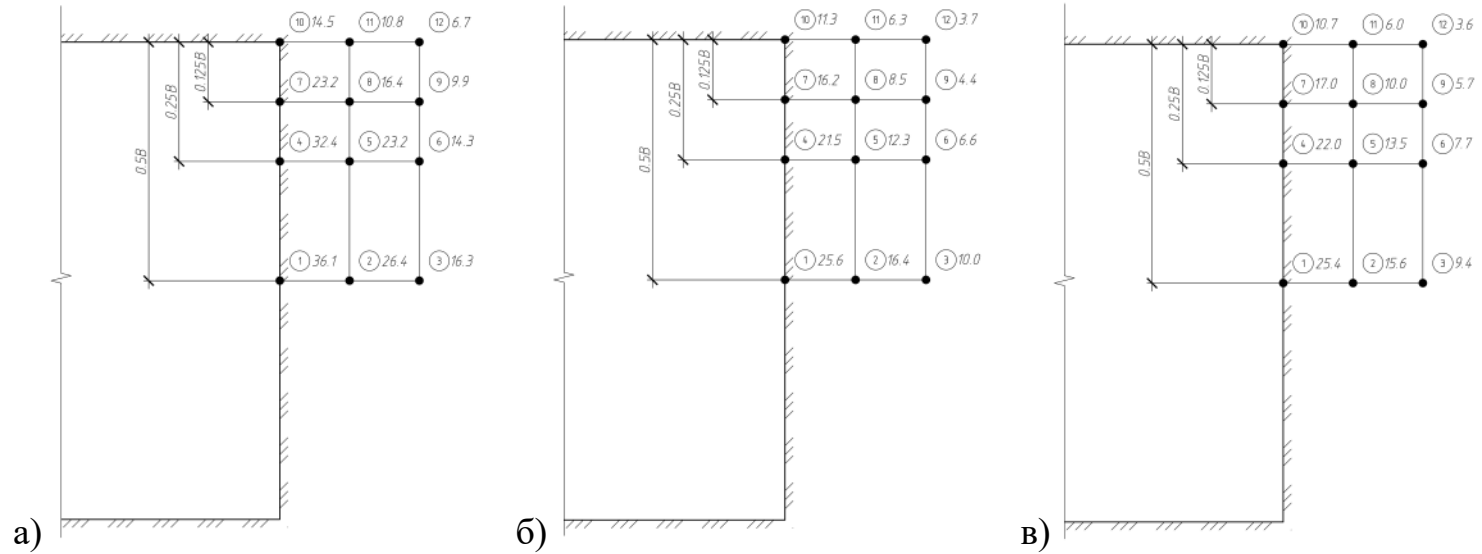
(удаление  $0,25B$ ), а затем затухание осадок происходит более стремительно в среднем на 30-45% (удаление  $0,125B$ ).

Отдельно необходимо отметить, что в массиве, сложенном глинистыми грунтами скорость затухания осадок ниже по сечению III-III, то есть на бровке котлована, в песчаных же грунтах затухание осадок по сечениям вдоль котлована распределяется равномерно вне зависимости от удаления от котлована в поперечном направлении. Характер распределения в суглинках и супеси является промежуточным, распределение в суглинках ближе к глинам, в супесях – к пескам.

Ниже на рисунках 4.11-4.16 приведены изополя вертикальных перемещений поверхности массива в зависимости от положения сооружения и типа грунта.



## ДЛЯ ГЛИН



## ДЛЯ ПЕСКОВ

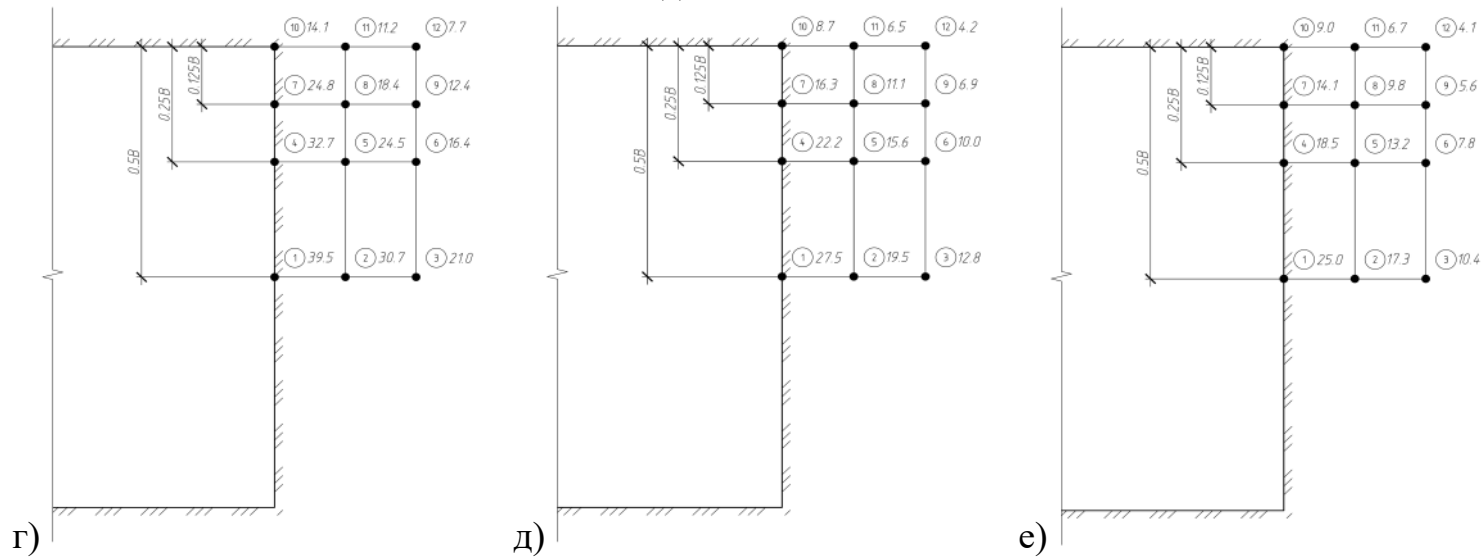


Рисунок 4.10. – Распределение вертикальных перемещений поверхности по мере приближения к углу котлована глубиной  $b_m$ : а, г – здание на бровке; б, д – здание на границе призмы; в, е – свободная поверхность

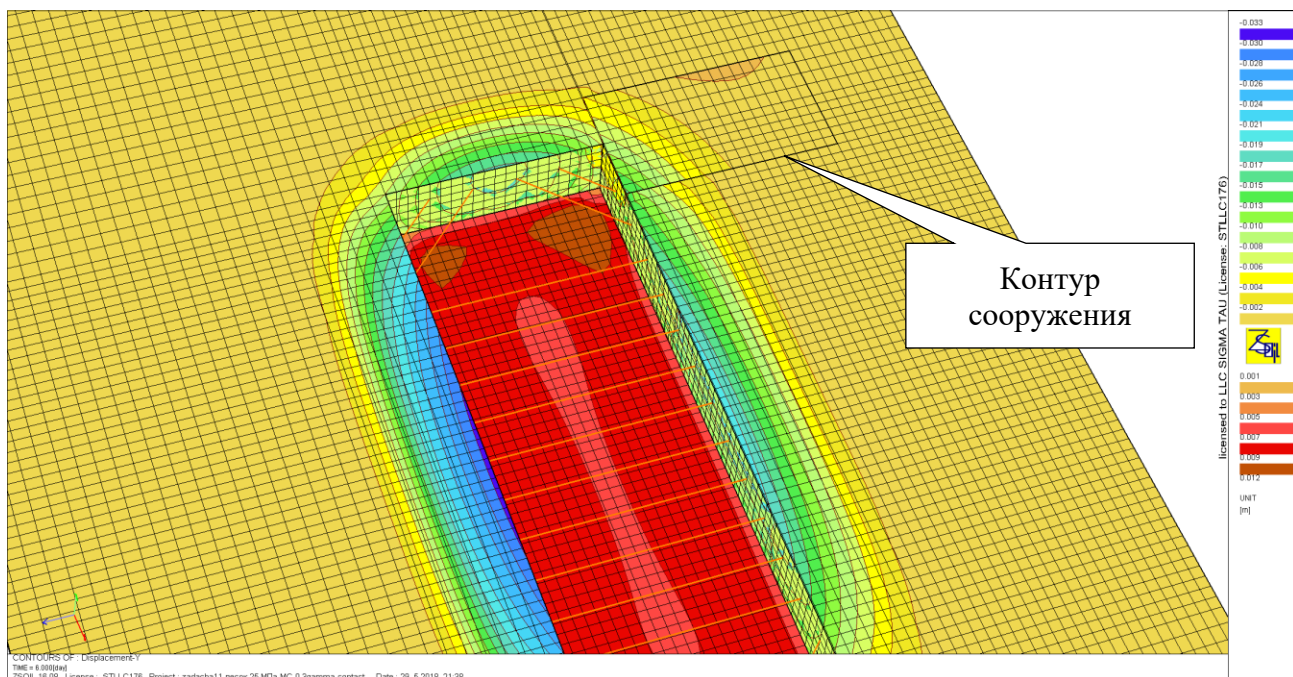


Рисунок 4.11. – Изополя вертикальных перемещений для котлована глубиной 6м в песках при расположении сооружения на бровке на углу котлована

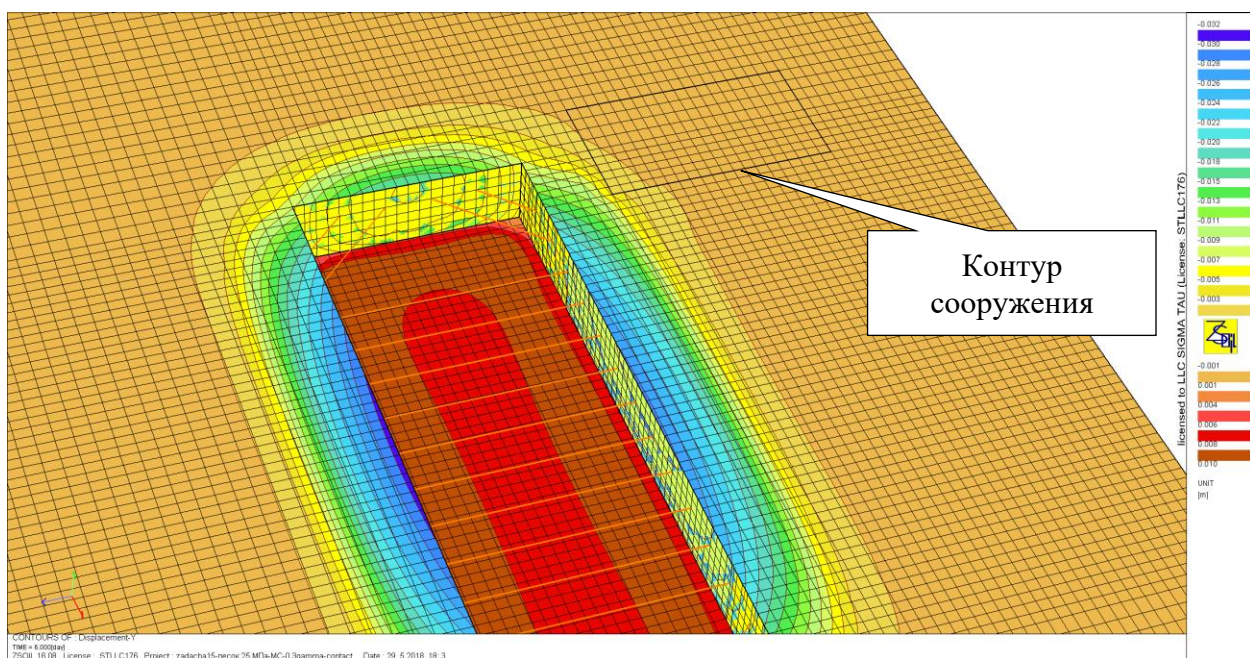


Рисунок 4.12. – Изополя вертикальных перемещений для котлована глубиной 6м в песках при расположении сооружения на границе призмы обрушения на углу котлована



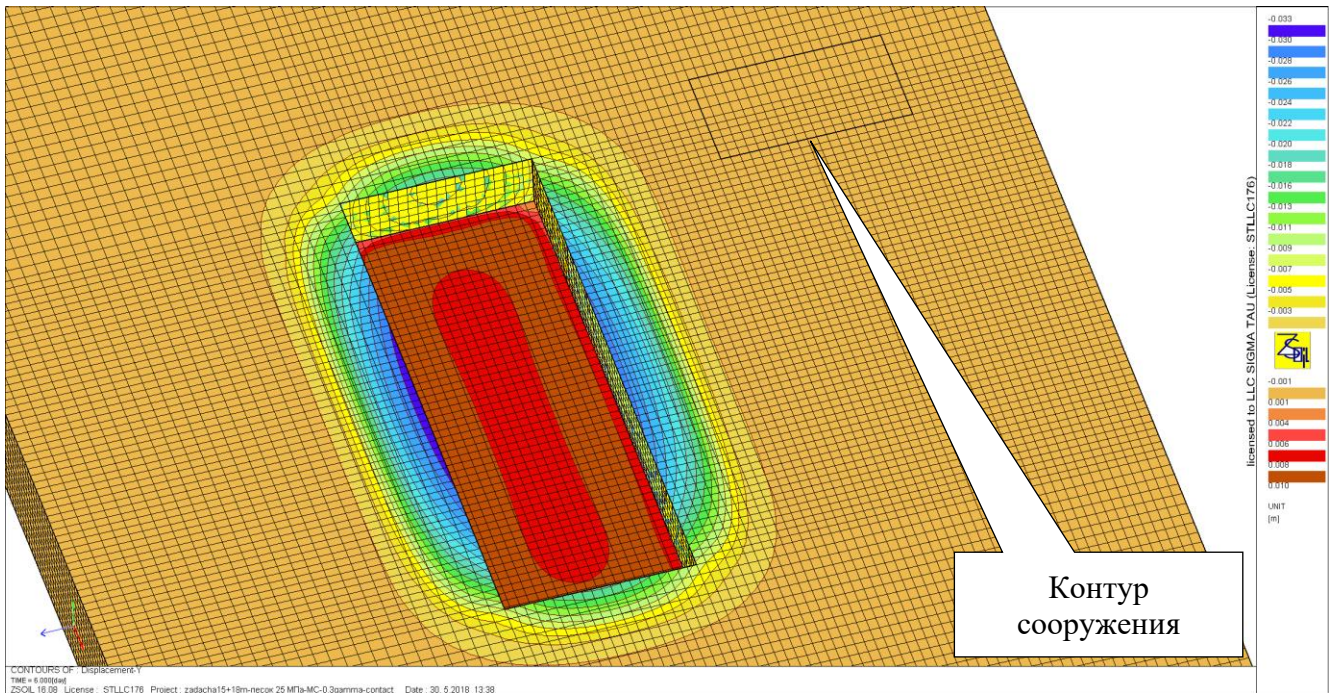


Рисунок 4.13. – Изополя вертикальных перемещений для котлована глубиной 6м в песках при расположении сооружения за границей призмы обрушения на углу котлована

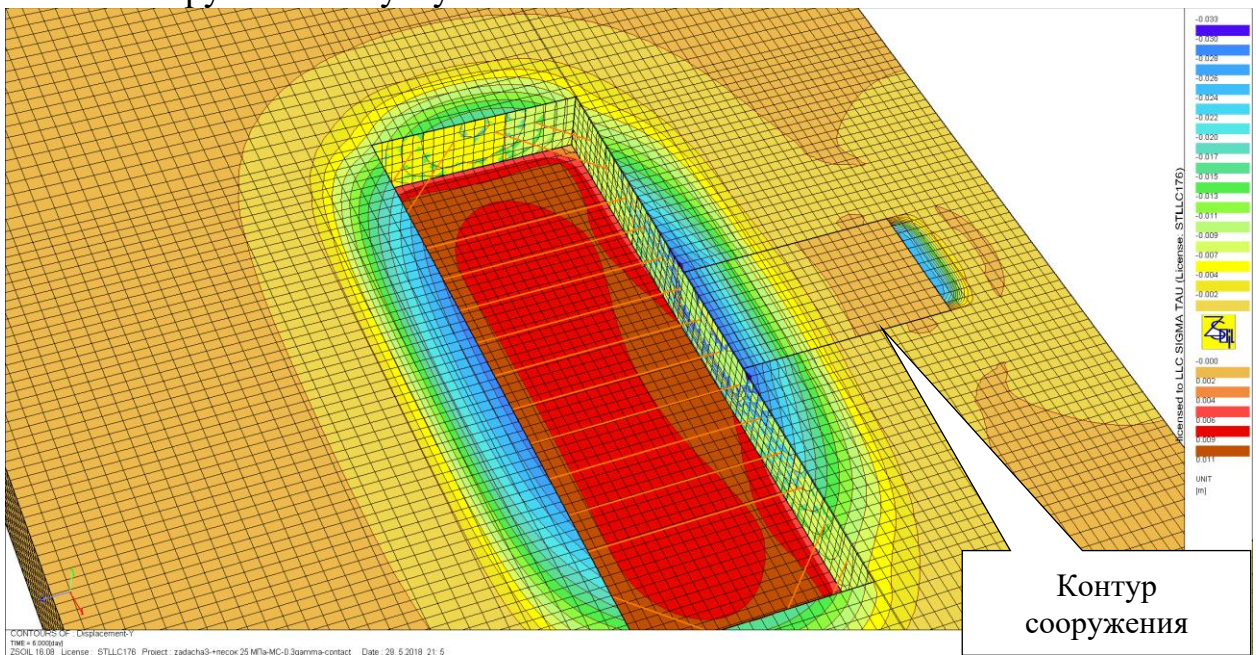


Рисунок 4.14. – Изополя вертикальных перемещений для котлована глубиной 6м в песках при расположении сооружения на бровке по центру котлована



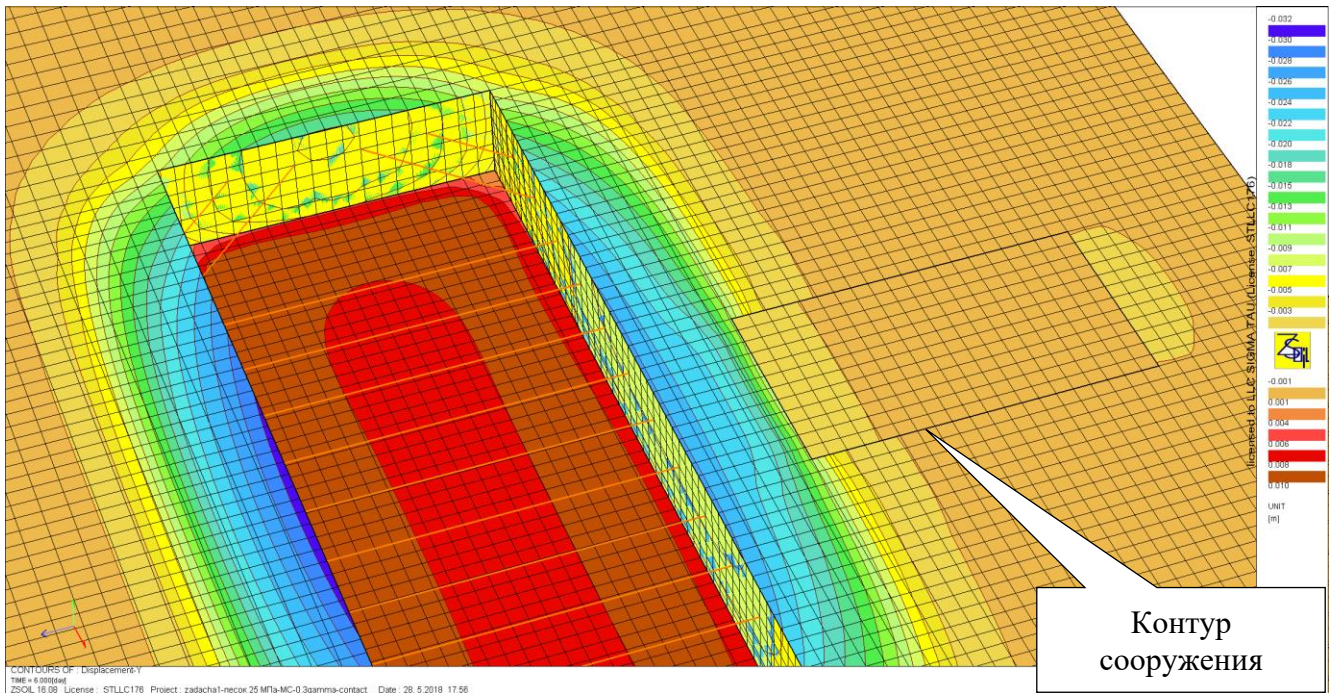


Рисунок 4.15. – Изополя вертикальных перемещений для котлована глубиной 6м в песках при расположении сооружения на границе призмы обрушения по центру котлована

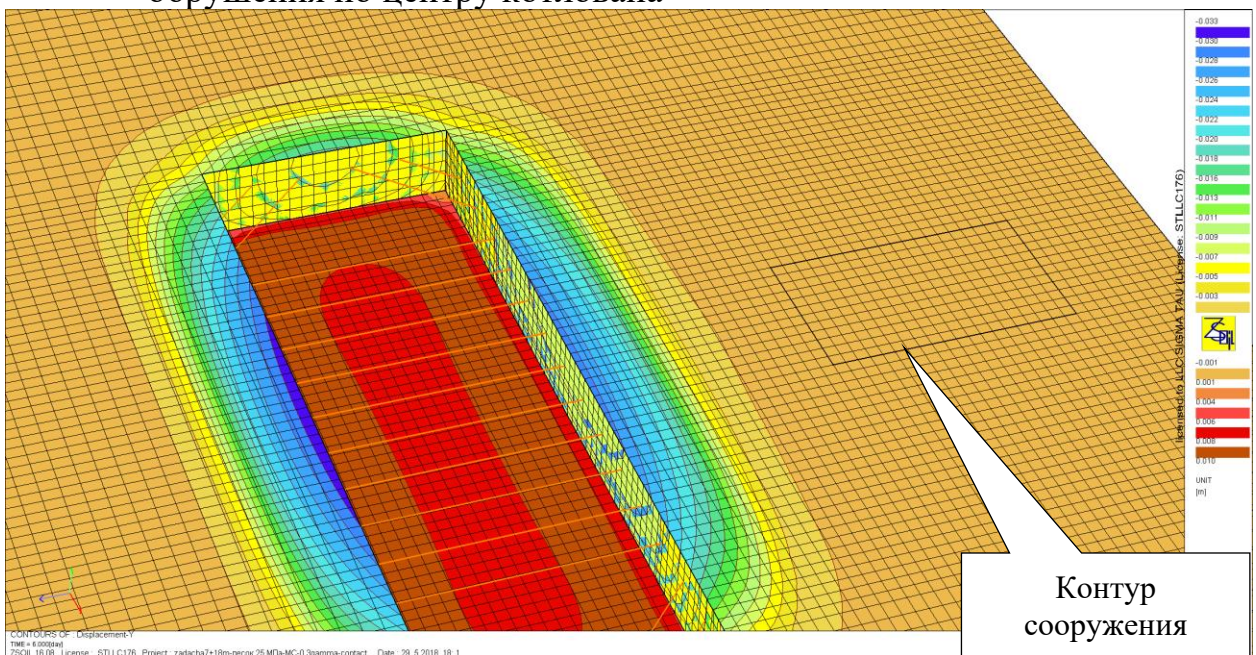


Рисунок 4.16. – Изополя вертикальных перемещений для котлована глубиной 6м в песках при расположении сооружения за границей призмы обрушения по центру котлована

## 4.2. Анализ вертикальных перемещений точек массива грунта в пределах призмы обрушения

Выполненный в предыдущем разделе анализ вертикальных перемещений поверхности массива грунта показал сложный характер их изменения и распределения, в особенности в связи с развитием «углового эффекта». Данный раздел посвящен анализу изменения вертикальных перемещений точек массива внутри призмы обрушения, что представляет особенный интерес при наличии подземных коммуникаций, залегающих в грунте на разных глубинах. Распределение горизонтальных перемещений точек массива грунта в направлении вдоль котлована рассматривалось по сечениям I-I и II-II (см. рис. 4.2), то есть по центру котлована и на его углу, по аналогии с параграфом 4.1.1.

### 4.2.1. Анализ вертикальных перемещений массива грунта по центру котлована

Проведенная серия расчетов показала следующее. Изменение величины вертикальных перемещений в глубине массива с удалением от котлована происходит нелинейно. Вне зависимости от расположения сооружения и типа грунтов, вертикальные перемещения в уровне середины котлована изменяются сначала на величину 25-35% (при переходе от точки 4 к точке 5), а затем более значительно, на величину порядка 60-70% (при переходе от точки 5 к точке 6). В уровне дна котлована наоборот, при переходе от точки 7 к точке 8 происходит большее изменение вертикальных перемещений (также 60-70%), а затем интенсивность изменения падает, что в целом позволяет обозначить границу призмы обрушения грунта, имеющую нелинейную форму.

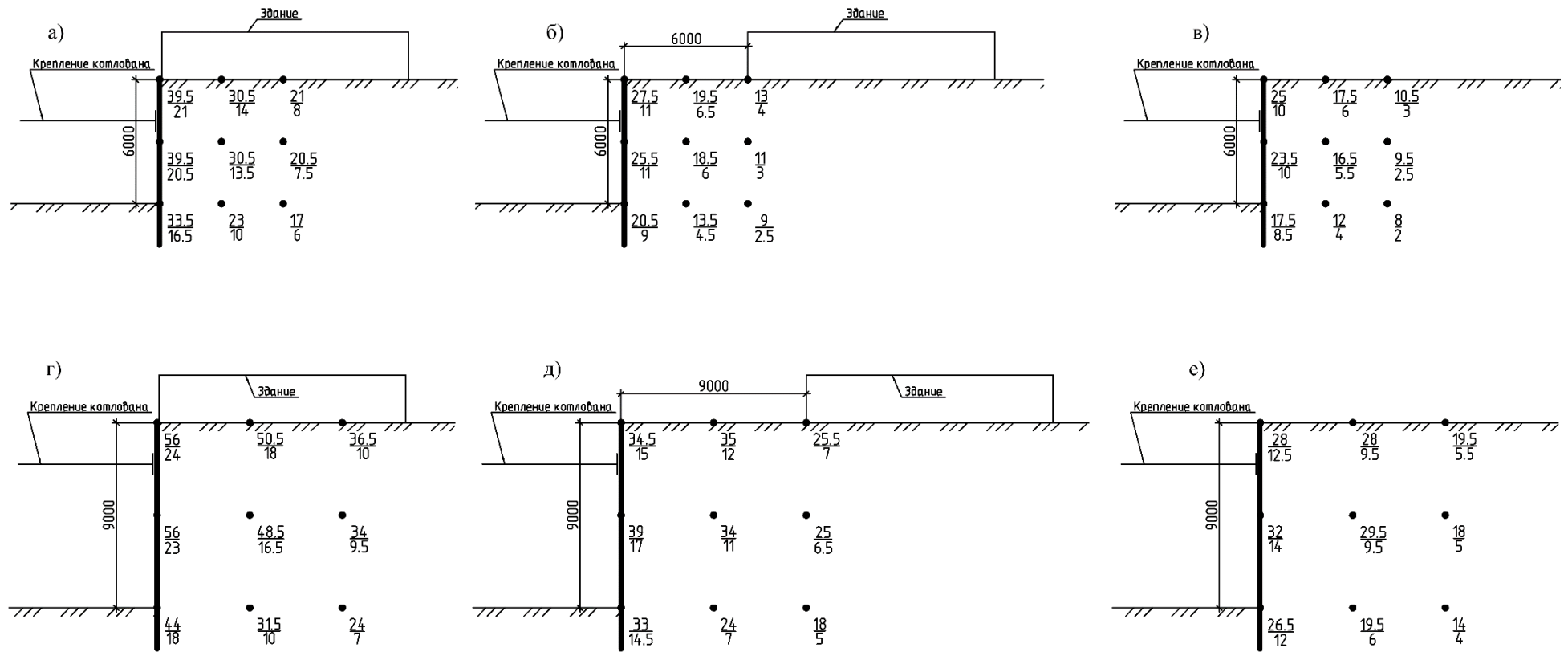


Рисунок 4.17. – Величины вертикальных перемещений точек массива грунта для котлованов глубиной 6 и 9 м, сооружаемых в песках. В числителе для  $E=10$  МПа, в знаменателе – для  $E=25$  МПа. а) и г) – при расположении здания на бровке; б) и д) – при расположении здания на границе призмы обрушения; в) и е) – при свободной поверхности.



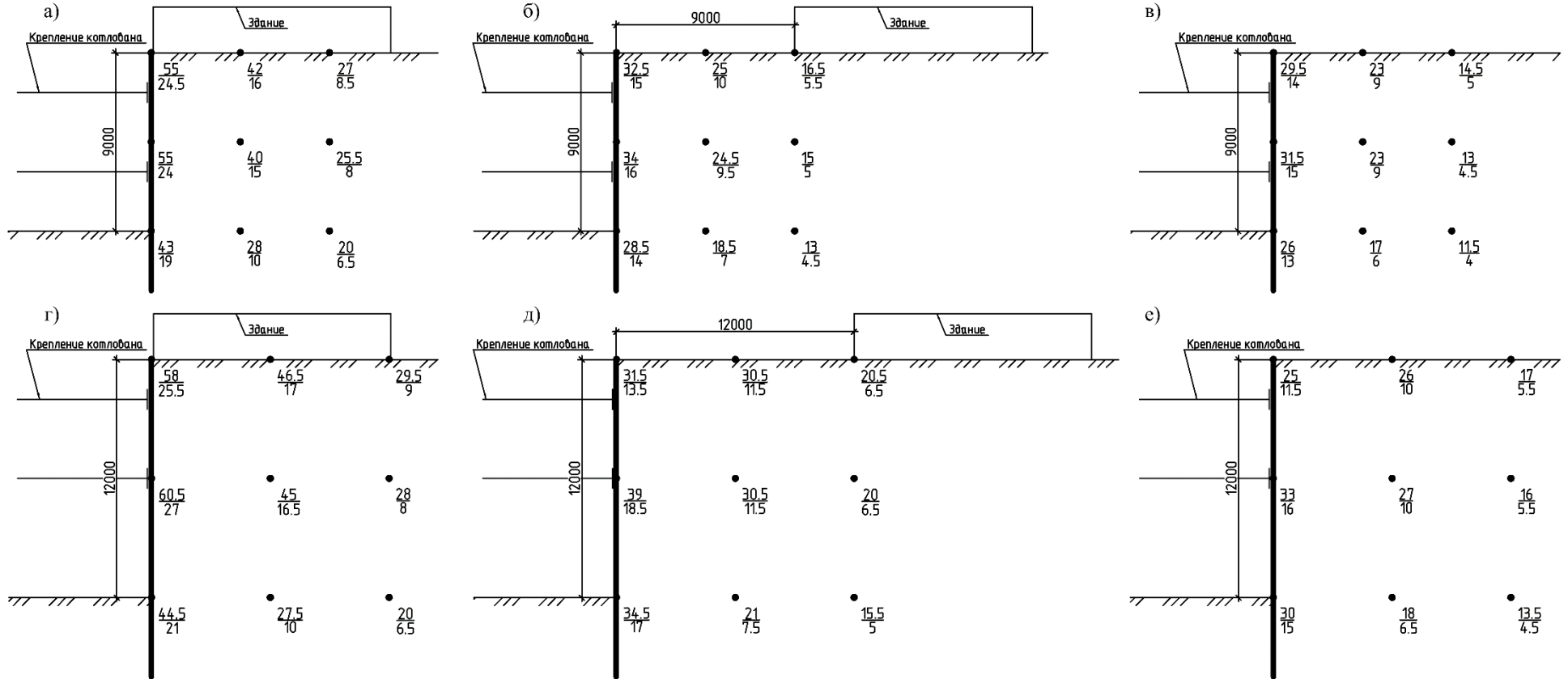


Рисунок 4.18. – Величины вертикальных перемещений точек массива грунта для котлованов глубиной 9 и 12 м, сооружаемых в песках. В числителе для  $E=10$  МПа, в знаменателе – для  $E=25$  МПа. а) и г) – при расположении здания на бровке; б) и д) – при расположении здания на границе призмы обрушения; в) и е) – при свободной поверхности.

#### 4.2.2. Анализ вертикальных перемещений массива грунта на углу котлована

Дальнейший анализ вертикальных перемещений точек массива грунта в сечении на углу котлована показал значительное уменьшение их интенсивности (в среднем, в три раза) в сравнении с сечением по центру котлована. Также изменился и характер распределения перемещений при изменении глубины рассматриваемой точки и ее удалении от котлована, став линейным. Данная тенденция наблюдается во всех сериях задач, вне зависимости от расположения сооружения, глубины котлована и количества ярусов распорок. Также необходимо отметить, что при увеличении модуля деформации грунта, величина вертикальных перемещений уменьшается таким образом, что можно говорить о выходе этих точек из зоны интенсивных деформаций, а также из зоны влияния вообще, если рассматривать перемещения с точки зрения влияния на инженерные коммуникации.

В целом, анализ вертикальных перемещений показал о существенном влиянии «углового эффекта» на величину и характер их изменения, что говорит о необходимости более детального его изучения, в зависимости от факторов, не рассматриваемых в данном исследовании. Такими факторами могут быть, например, соотношение длины и ширины котлована, тип ограждения, тип крепления и др.

Ниже, на рисунках 4.19-4.20 показаны величины вертикальных перемещений точек массива у котлована, сооружаемого в песках, для диапазона глубин 6-9 м и 9-12 м, соответственно. Следует отметить, что при достаточной жесткости крепления, или высоком модуле деформации грунта, величина перемещений на углу котлована в глинах и песках одинаковая, однако в остальных случаях, величины перемещений в глинах, в целом, выше.

Значения перемещений точек массива, при сооружении котлованов в супесях и суглинках, носят промежуточный характер, при сохранении общих тенденций к их изменению.



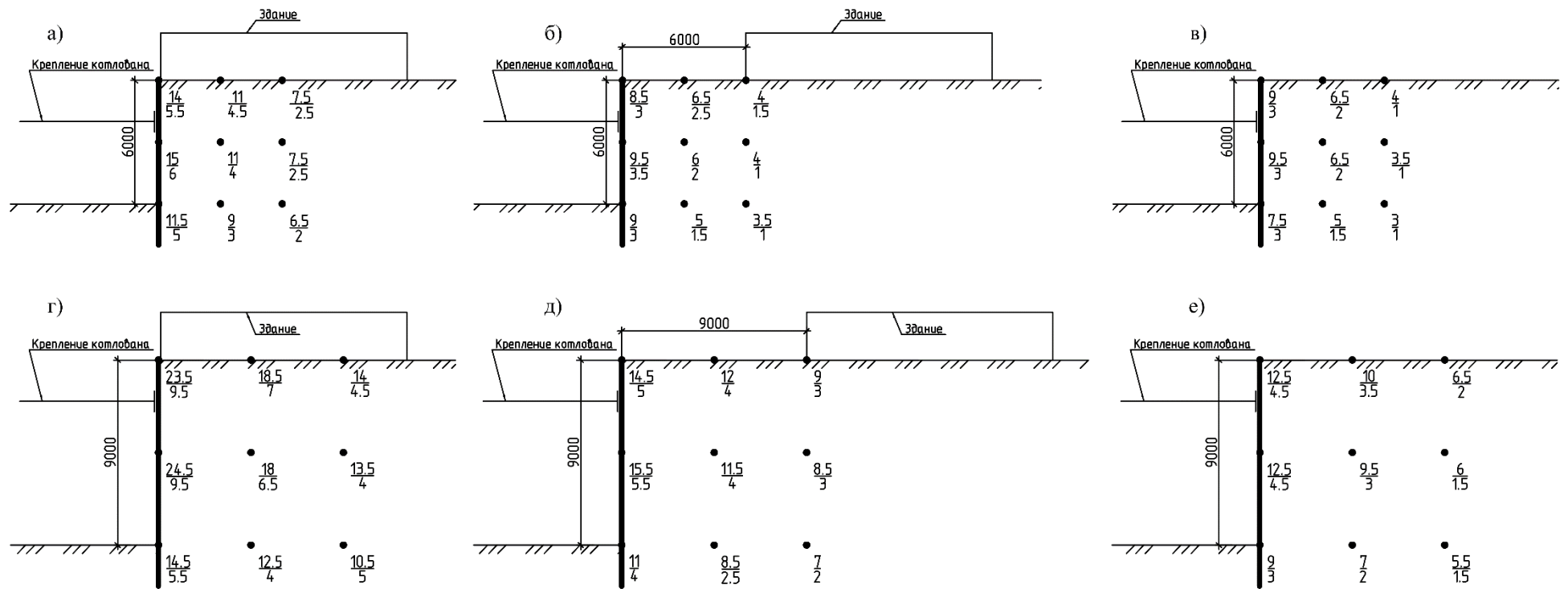


Рисунок 4.19. – Величины вертикальных перемещений точек массива грунта для котлованов глубиной 6 и 9 м, сооружаемых в песках. В числителе для  $E=10$  МПа, в знаменателе – для  $E=25$  МПа. а) и г) – при расположении здания на бровке; б) и д) – при расположении здания на границе призмы обрушения; в) и е) – при свободной поверхности.

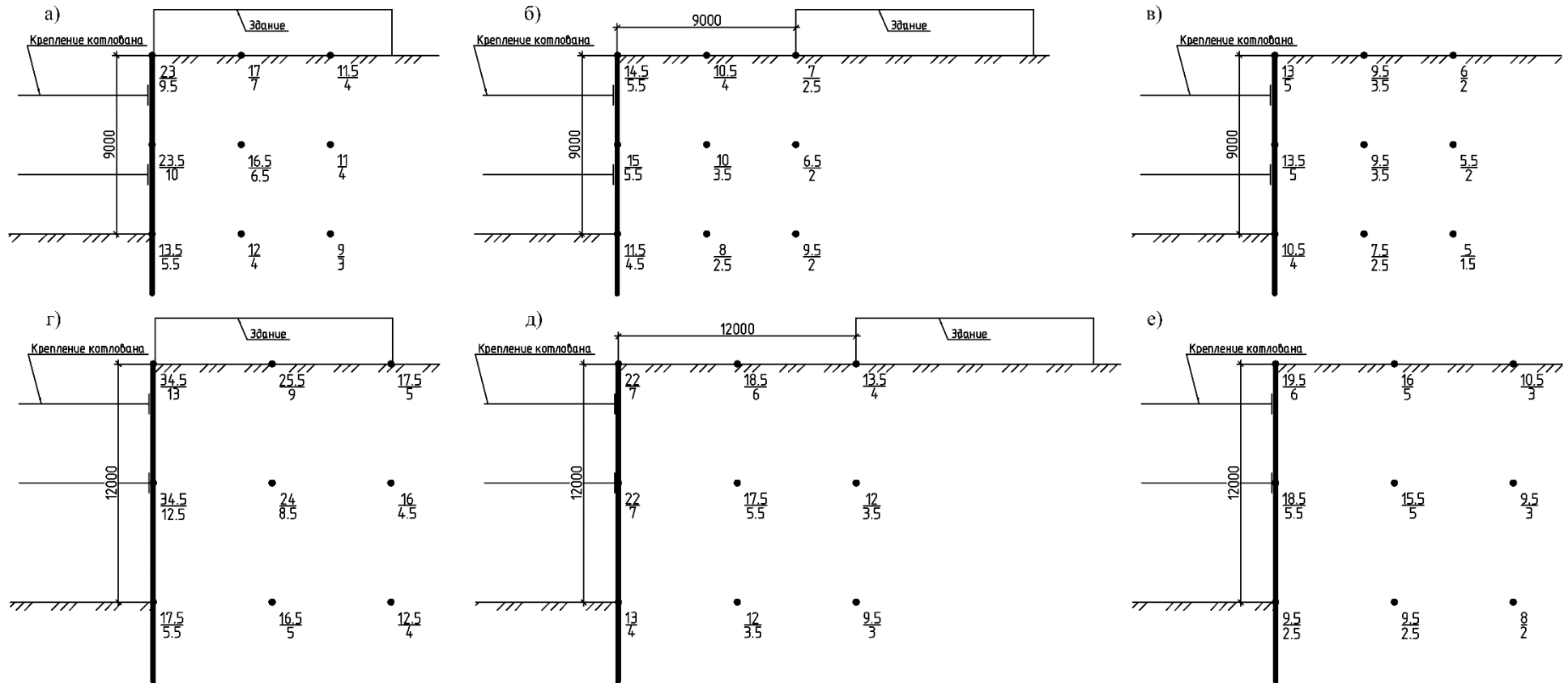


Рисунок 4.20. – Величины вертикальных перемещений точек массива грунта для котлованов глубиной 9 и 12 м, сооружаемых в песках. В числителе для  $E=10$  МПа, в знаменателе – для  $E=25$  МПа. а) и г) – при расположении здания на бровке; б) и д) – при расположении здания на границе призмы обрушения; в) и е) – при свободной поверхности.

#### 4.3. Анализ дополнительных осадок существующего сооружения

Существующие сооружения, расположенные в призме обрушения имеют деформации, сходные по характеру с описанными ранее деформациями земной поверхности. При этом существенным является фактор расположения сооружения относительно угловой части котлована. Как было показано в параграфе 3.2.2, при переходе от сечения  $0,25B$  к  $0,125B$  и далее к угловой зоне котлована, происходит наиболее интенсивное затухание осадок, что в случае с расположением сооружения в данной зоне приводит к существенной относительной разности осадок, и деформации сооружения в 2 плоскостях, происходит эффект закручивания. На рисунке 4.21 показаны максимальные осадки сооружения при его расположении по центру и в угловой зоне, а также относительные разности осадок.

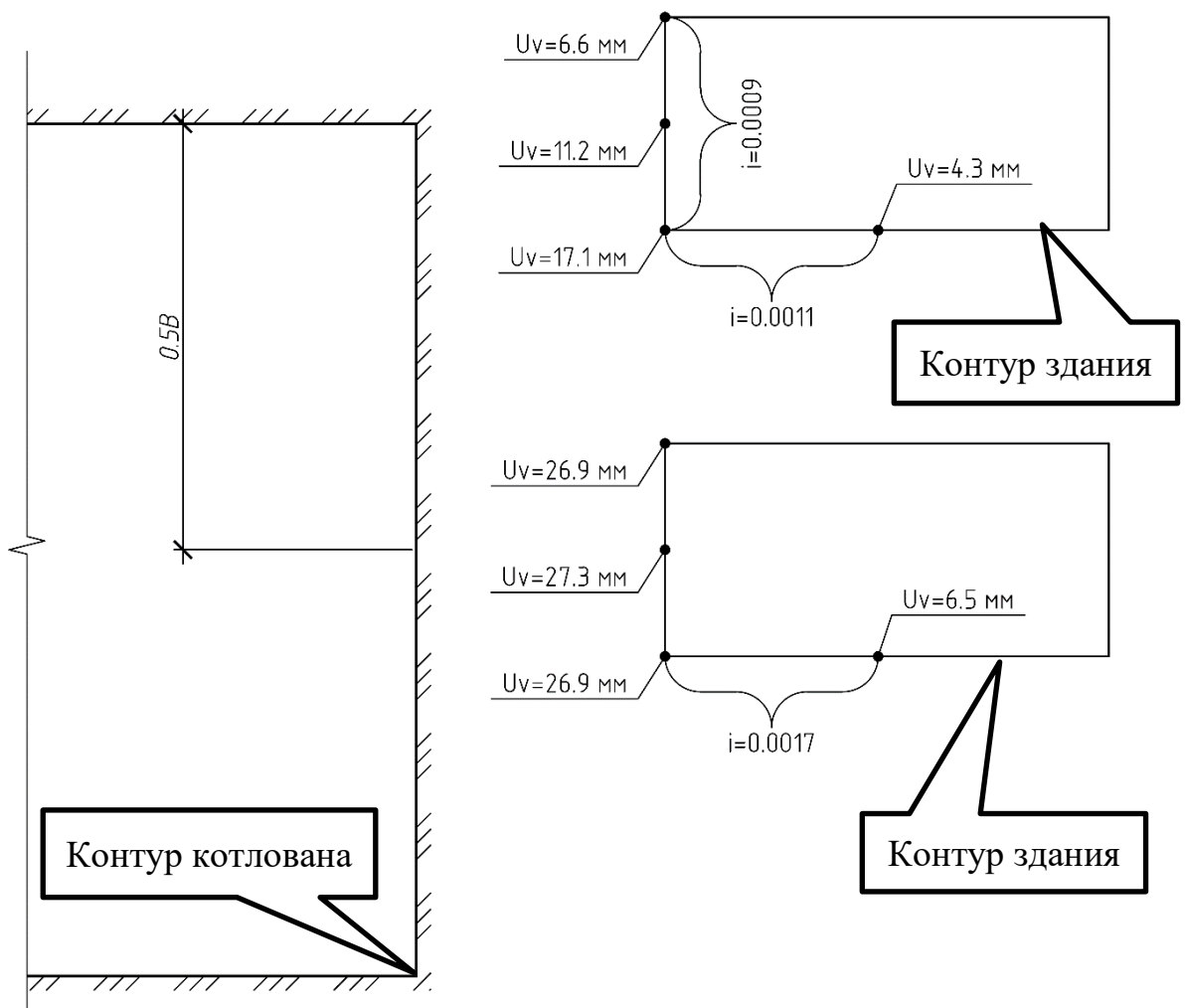


Рисунок 4.21. – Дополнительные осадки и относительные разности осадок здания при его расположении по центру и в углу котлована

На представленном рисунке видно, что несмотря на более «благоприятные» с точки зрения максимальных дополнительных осадок расположение здания на углу котлована возможно развитие чрезмерных (в зависимости от категории технического состояния здания) относительных разностей осадок.

Полученные в ходе обработки проведенных экспериментов уравнения позволяют оценить дополнительные осадки здания путем варьирования факторов и размещением сооружения в необходимых точках массива. Коэффициенты полученных уравнений приведены в табличной форме в Приложении А.

#### 4.4. Оценка влияния жесткости сооружения на его дополнительные деформации

Приведенная в параграфе 2.2 методика подсчета приведенного модуля деформации массива, которым моделируется сооружение, может быть использована и для других типов сооружений, однако при этом используются более сложные методики вычисления изгибной жесткости здания как балки ( $EI$ ).

Для панельных сооружений воспользуемся п.п. 7.38-7.41 [57]. Жесткость каркасного сооружения можно подсчитать по методике Мейергофа [77].

Полученные приведенные модули деформации, а также осадки и относительные разности осадок сооружений, подсчитанных в идентичных условиях приведены в таблице 4.1. По полученным данным можно видеть относительно небольшое изменение величины максимальной осадки, однако наблюдается существенное различие в относительных разностях осадок (до 2 раз). Можно сделать следующий вывод: при прогнозировании осадок близких к предельным для рассматриваемого типа сооружения, необходимо детально моделировать конструктивную схему сооружения с учетом характеристик материалов и распределением нагрузок, в остальных случаях допускается моделировать сооружение в виде приведенного массива [21].

Таблица 4.1. Значения приведенного модуля деформации и результаты расчетов [21]

Тип сооружения	Приведенный модуль деформации, МПа	Максимальная осадка, мм
Каркасное, на отдельных фундаментах	10	28,4
Кирпичные несущие стены на ленточном фундаменте	100	27,3
Панельное здание на ленточном фундаменте	2500	25,0
Монолитное здание с несущими стенами на ленточном фундаменте	6500	24,3

В подтверждение применимости данной методики были выполнены тестовые сравнительные задачи в плоской постановке с моделированием здания в виде приведенного массива и с фактическим расположением конструкций. Изополя дополнительных осадок приведены на рисунках 4.22-4.25.

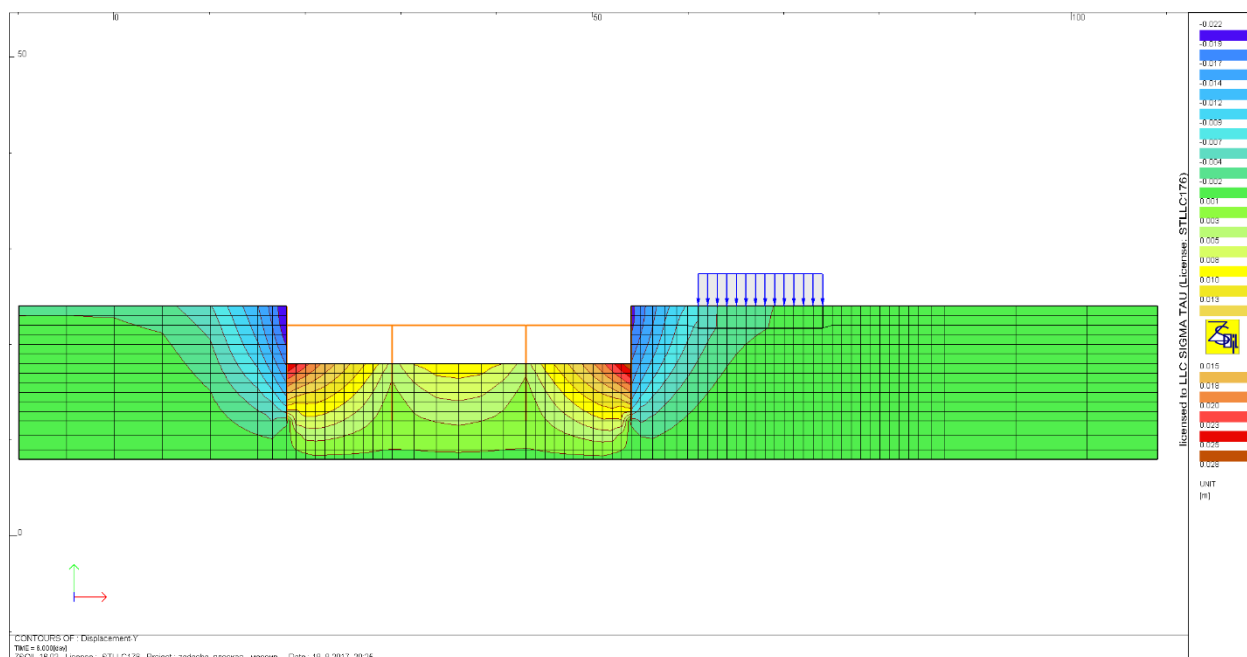


Рисунок 4.22. – Изополя вертикальных перемещений в массиве грунта для котлована глубиной 6 м в песке с модулем деформации  $E=17,5$  МПа при моделировании здания в виде приведенного массива

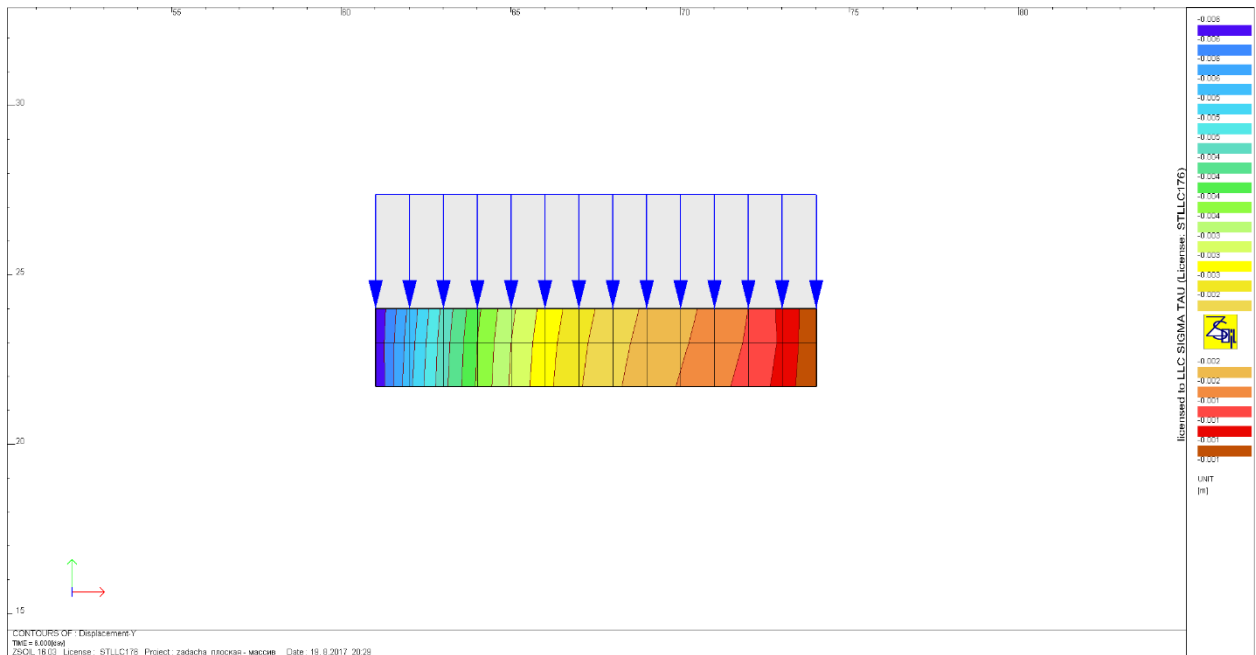


Рисунок 4.23. – Изополя распределения вертикальных перемещений по зданию для котлована глубиной 6 м в песке с модулем деформации  $E=17,5\text{Мпа}$  при моделировании здания в виде приведенного массива

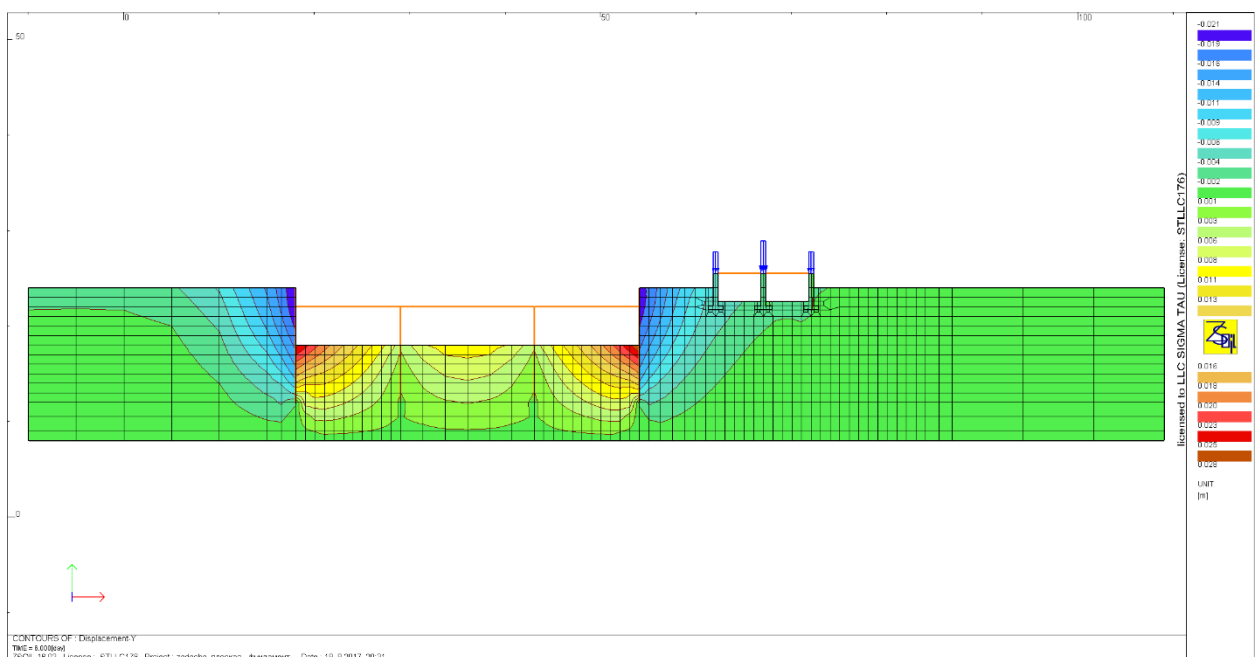


Рисунок 4.24. – Изополя вертикальных перемещений в массиве грунта для котлована глубиной 6 м в песке с модулем деформации  $E=17,5\text{Мпа}$  при моделировании здания в соответствии с фактическим положением конструкций

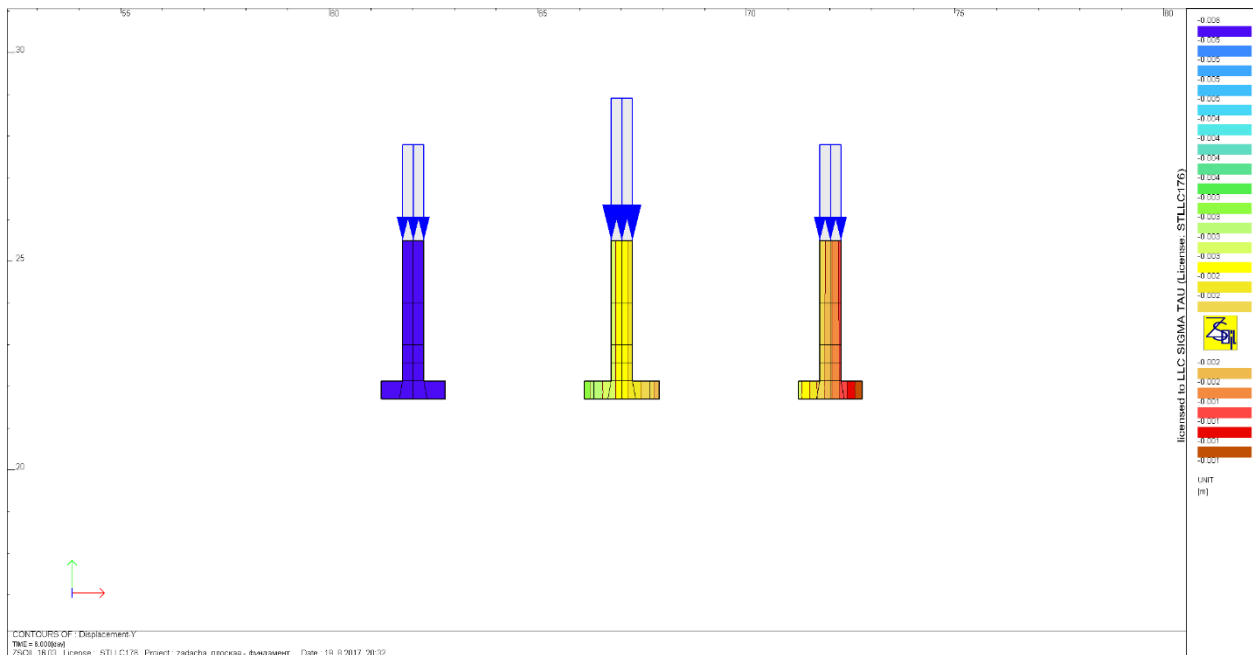


Рисунок 4.25. – Изополя распределения вертикальных перемещений по зданию для котлована глубиной 6 м в песке с модулем деформации  $E=17,5\text{Мпа}$  при моделировании здания в соответствии с фактическим положением конструкций

#### Выводы по главе 4

1. Анализ выполненных расчетов в пространственной постановке показал, что в расчетном центральном сечении, по ширине котлована, в пределах призмы обрушения при удалении от стены котлована характер изменения перемещений – нелинейный, а за границей призмы обрушения изменения перемещений характеризуются линейной зависимостью. Вместе с тем, по мере приближения расчетных сечений к углу котлована размер зоны нелинейного изменения перемещений изменяется. При этом, указанная тенденция, по мере приближения к угловой точке, усиливается, что говорит об уменьшении размеров призмы обрушения при удалении от центра котлована.
2. Выполнено исследование влияния «углового эффекта» на дополнительные осадки поверхности земли и сооружений окружающей застройки. Определены сечения по ширине котлована, в которых исследуемые деформации изменяются наиболее интенсивно.

3. Показано, что предлагаемая методика моделирования здания в виде эквивалентного объема с приведенной изгибной жесткостью с использованием упруго-пластической модели Мора-Кулона дает удовлетворительные результаты и на предварительной стадии проектирования ее можно рекомендовать к использованию, как менее трудоемкую.
  
4. При приближении дополнительных осадок к предельным, а также в массивах, сложенных сильносжимаемыми грунтами, необходимо выполнение анализа НДС системы с учетом фактического расположения конструкций, так как в таком случае возможно появление и развитие зон предельного равновесия под подошвой фундаментов.



## ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОГРАЖДЕНИЯ КОТЛОВАНА И МАССИВА ГРУНТА

Горизонтальные деформации ограждения котлована являются объектом мониторинга по всей его глубине, в связи с этим оценивались перемещения массива грунта в точках 1, 4 и 7 (см. рис. 4.1), которые соответствуют перемещениям ограждения в его верхней точке, в середине пролета по глубине и уровне дна котлована. На характер и величину деформаций ограждения в большой степени влияет тип и жесткость крепления, в связи с этим анализ влияния принятых в задаче факторов производился отдельно для каждой серии задач. Также отдельно рассматриваются деформации центральной части ограждения котлована и влияние «углового эффекта», который, как было показано ранее, оказывает значительное влияние на результаты.

### 5.1. Анализ горизонтальных деформаций ограждения котлована в его центре

При нахождении сооружения на бровке по центру котлована глубиной 6 м с одним рядом распорок горизонтальные деформации ограждения изменяются в диапазоне: от 2,7 до 17,6 мм для **глин**; от 3,2 до 18,3 мм для **суглинков**; от 3,4 до 16,8 мм для **супесей**; от 4,6 до 20,2 мм для **песков**. Ниже показаны эпюры перемещений для всех типов грунтов с варьированием модуля деформации (см. рис. 5.1).

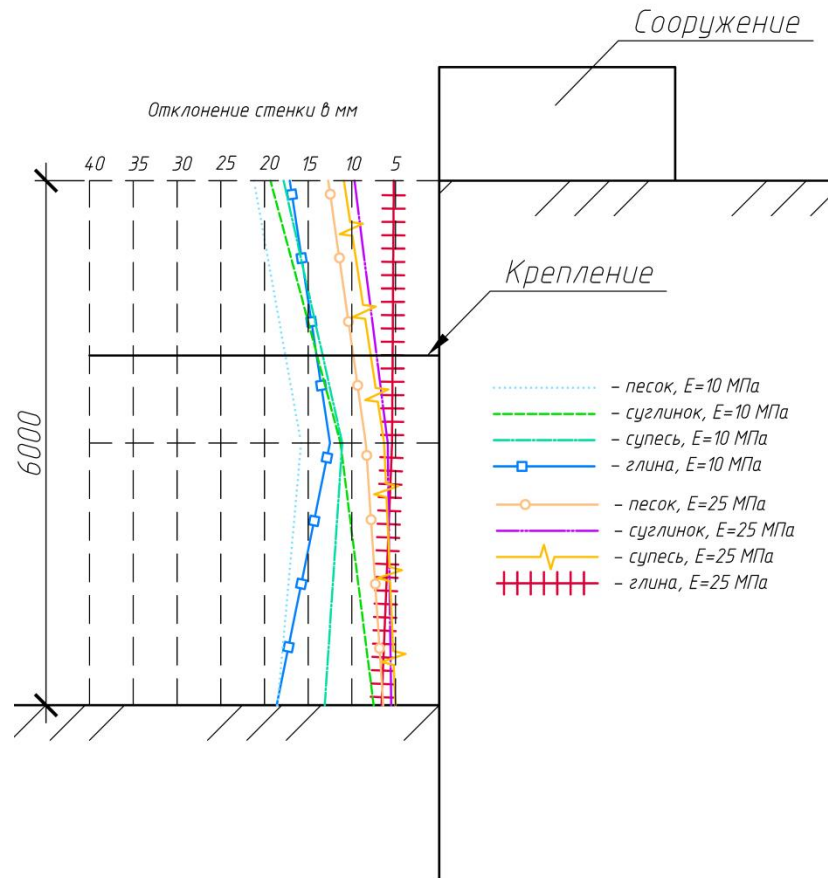


Рисунок 5.1. – Эпюры горизонтальных перемещений ограждения котлована глубиной 6м при расположении сооружения на бровке

Как видно на представленных графиках, деформации верха ограждения котлована при расположении сооружения на его бровке либо максимальны в случае грунтов с высокими физико-механическими характеристиками, либо соответствующую деформациям в уровне дна котлована, в случае с менее прочными грунтами.

При нахождении сооружения на границе призмы обрушения по центру котлована глубиной 6 м с одним рядом распорок горизонтальные деформации ограждения изменяются в диапазоне: от 2,7 до 17 мм для **глин**; от 3,2 до 12,6 мм для **суглинков**; от 3,4 до 11,3 мм для **супесей**; от 4,6 до 15,9 мм для **песков**. Ниже показаны эпюры перемещений для всех типов грунтов с варьированием модуля деформации (см. рис. 5.2).

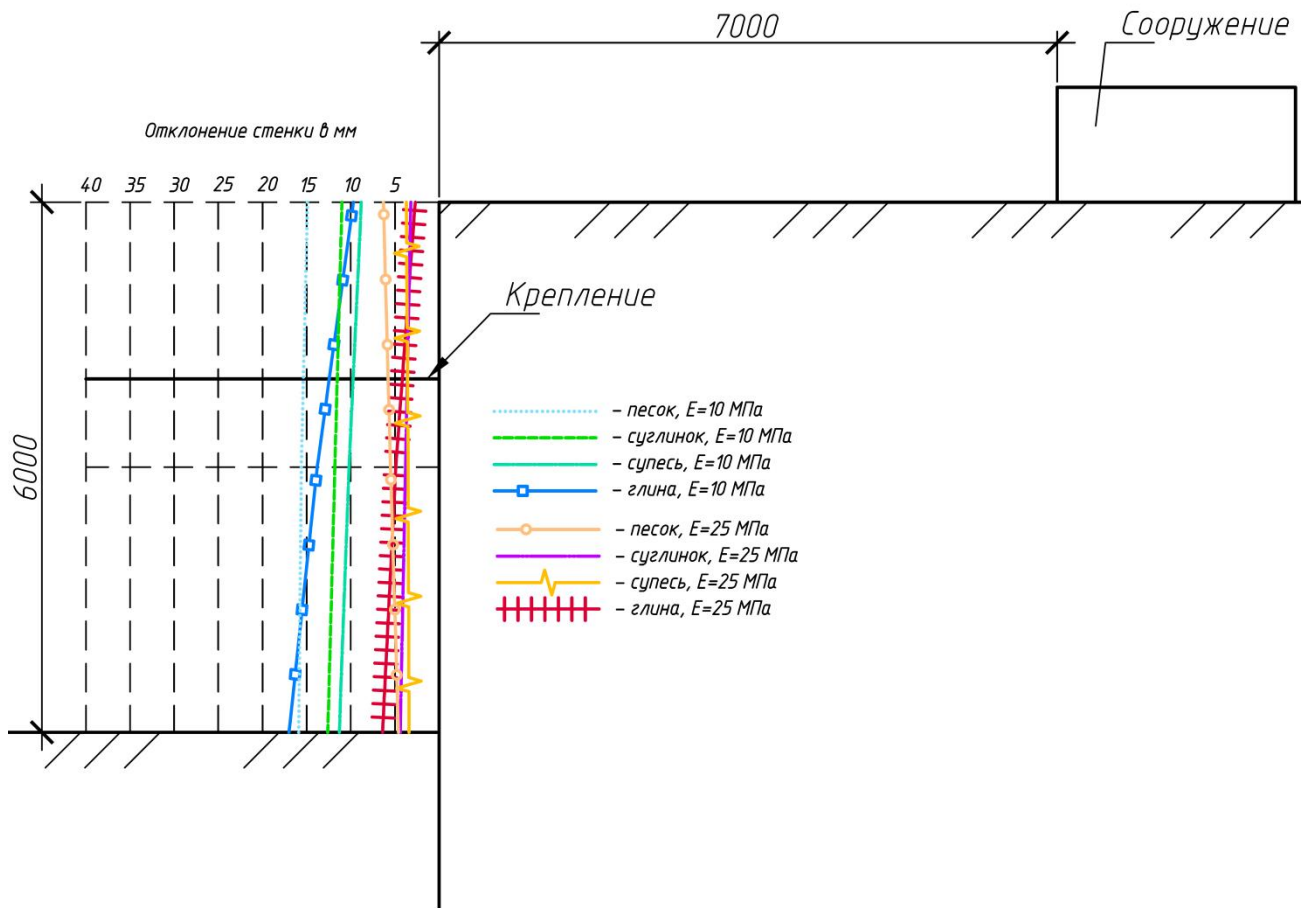


Рисунок 5.2. – Эпюры горизонтальных перемещений ограждения котлована глубиной 6м при расположении сооружения на границе призмы обрушения

На представленных графиках видно, что деформации верха ограждения котлована при расположении сооружения на границе призмы обрушения распределяются равномерно, достигая максимальных значений в уровне дна котлована, вне зависимости от типов грунтов и их физико-механических характеристик.

При нахождении сооружения на бровке по центру котлована глубиной 9 м с одним рядом распорок горизонтальные деформации ограждения изменяются в диапазоне: от 6,3 до 43 мм для **глин**; от 13 до 35,1 мм для **суглинков**; от 10,1 до 32,2 мм для **супесей**; от 12,4 до 44,4 мм для **песков**. Ниже показаны эпюры перемещений для всех типов грунтов с варьированием модуля деформации (см. рис. 5.3).

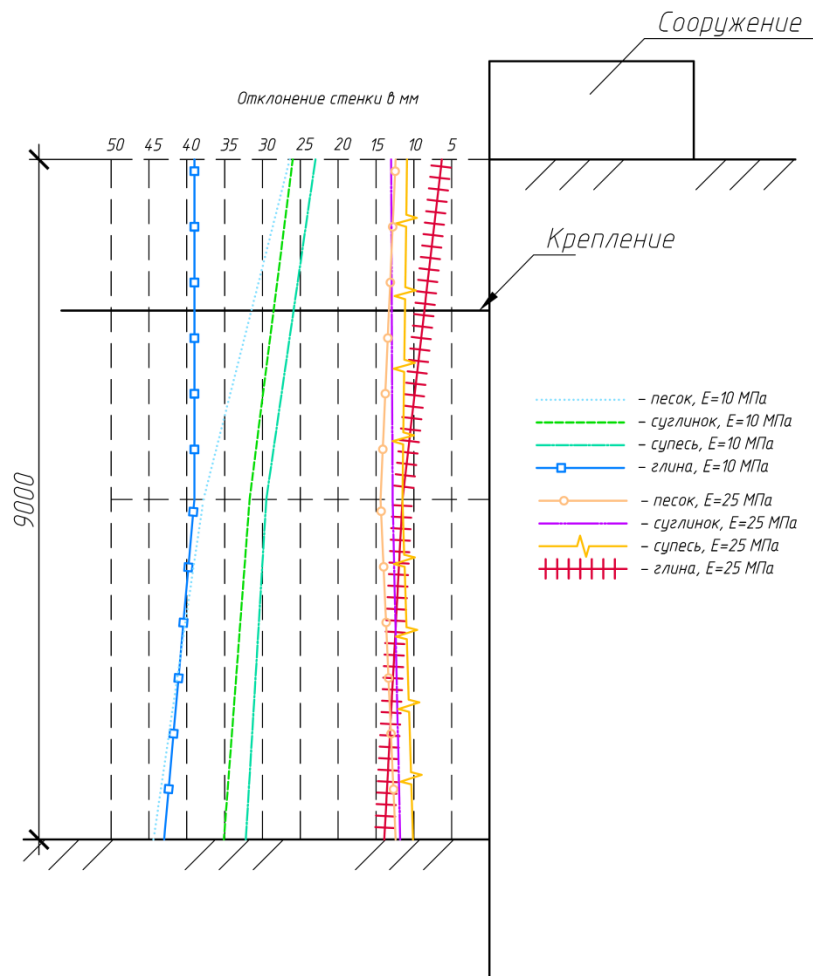


Рисунок 5.3. – Эпюры горизонтальных перемещений ограждения котлована глубиной 9м при расположении сооружения на бровке

Как видно на представленных графиках, для опытов с высокими показателями физико-механических характеристик грунтов происходит равномерное смещение ограждения в сторону котлована, а для опытов с низкими характеристиками нарастание деформаций происходит по мере приближения к дну котлована. Причем нарастание происходит на значительную величину до 20 мм, что составляет порядка 50-75%.

При нахождении сооружения на границе призмы обрушения по центру котлована глубиной 9 м с одним рядом распорок горизонтальные деформации ограждения изменяются в диапазоне: от 1 до 41 мм для **глин**; от 6,3 до 33,2 мм для **суглинков**; от 4,1 до 30,4 мм для **супесей**; от 5,4 до 40,8 мм для **песков**. Ниже показаны эпюры перемещений для всех типов грунтов с варьированием модуля деформации (см. рис. 5.4).

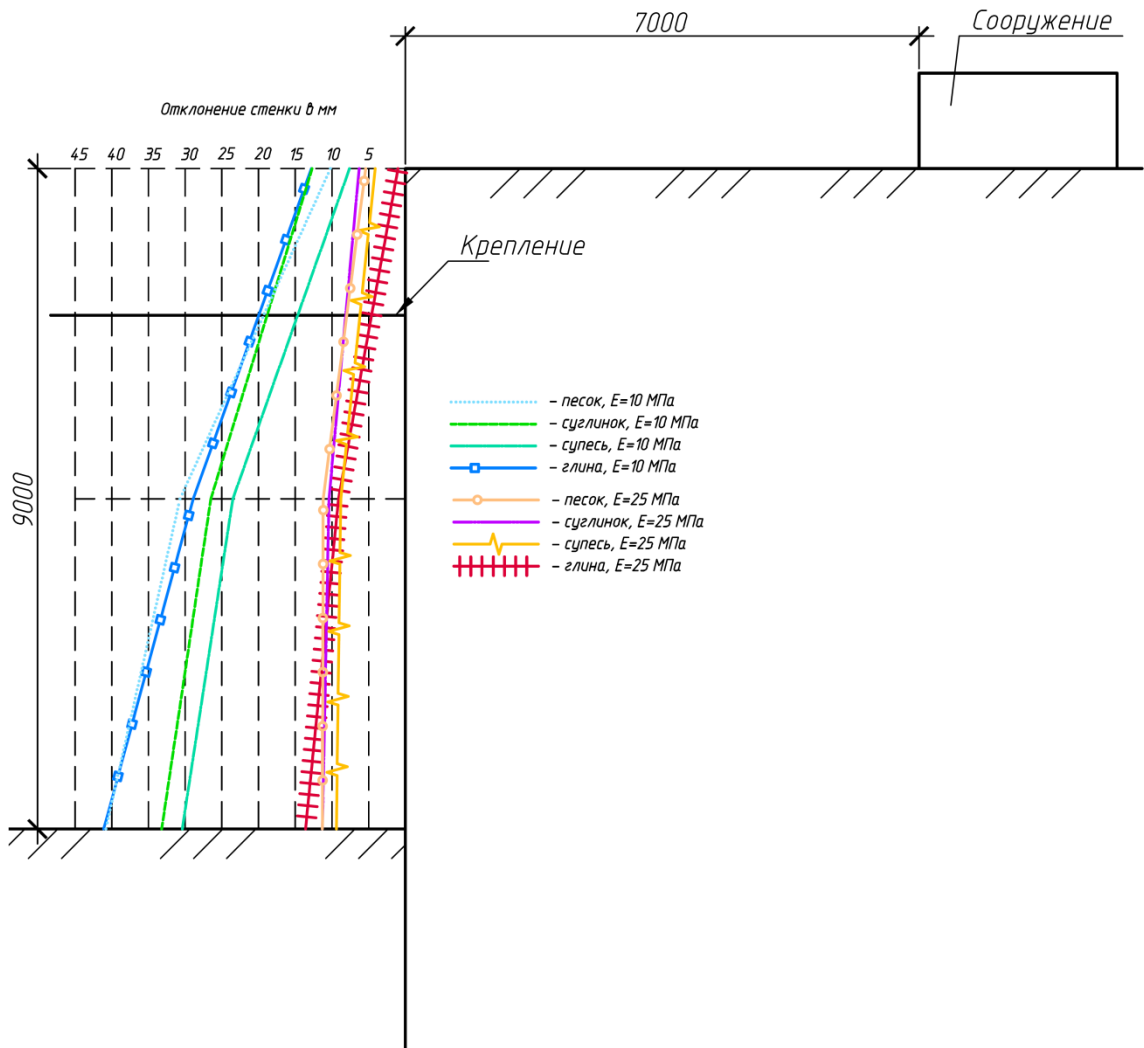


Рисунок 5.4. – Эпюры горизонтальных перемещений ограждения котлована глубиной 9м при расположении сооружения на бровке

На представленных графиках видна значительная разница в горизонтальных деформациях в уровне верха ограждения и в уровне дна котлована для опытов с более слабыми грунтами, что говорит о недостаточной жесткости (количество уровней) крепления котлована, что может привести к перерасходу армирования ограждающей конструкции. В целом, для последних двух случаев с котлованом глубиной 9м и одним рядом распорок наблюдается чрезмерное нарастание деформаций окружающего массива, что говорит о невозможности применения таких схем крепления при наличии сооружений в пределах призмы обрушения.

Далее будет произведен анализ горизонтальных деформаций ограждений при введении дополнительного ряда распорных конструкций. При нахождении сооружения на бровке по центру котлована глубиной 9 м с двумя рядами распорок

горизонтальные деформации ограждения изменяются в диапазоне: от 6,6 до 32,7 мм для **глин**; от 9,2 до 26,4 мм для **суглинков**; от 7 до 23,3 мм для **супесей**; от 8,6 до 27,1 мм для **песков**. Ниже показаны эпюры перемещений для всех типов грунтов с варьированием модуля деформации (см. рис. 5.5).

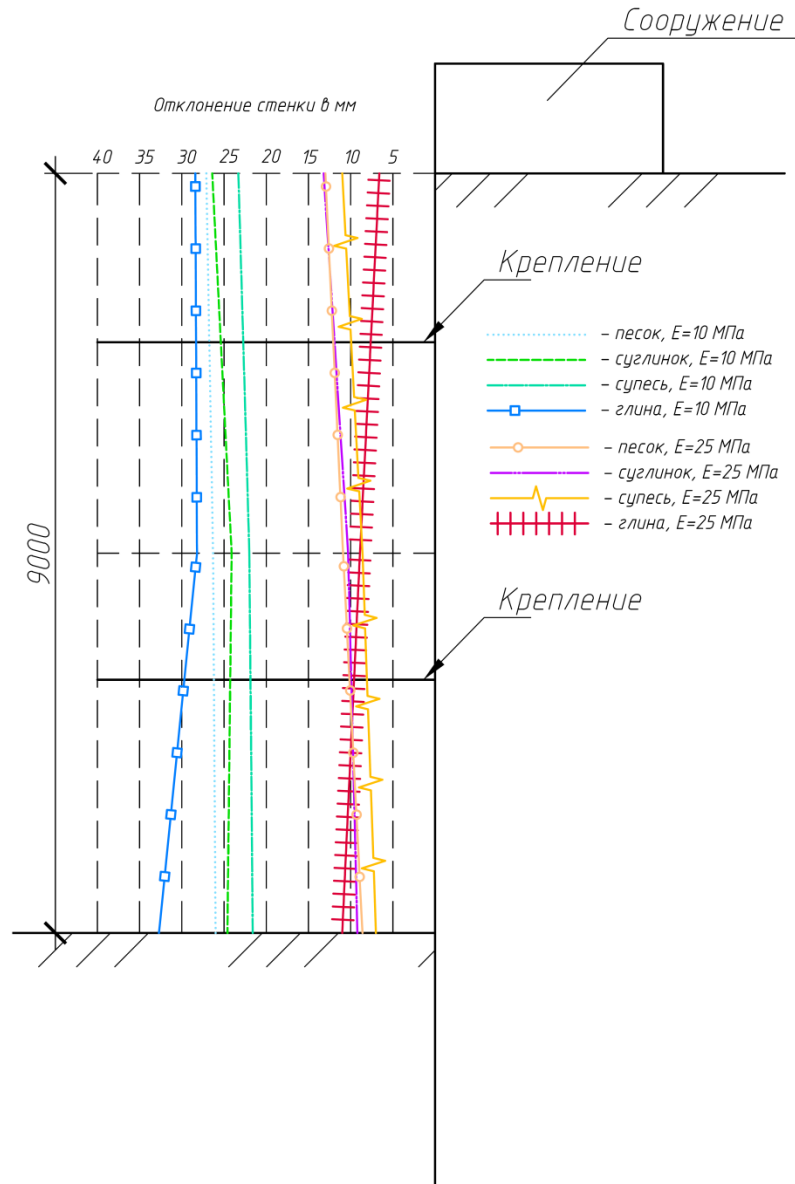


Рисунок 5.5. – Эпюры горизонтальных перемещений ограждения котлована глубиной 9м при расположении сооружения на бровке

На представленных графиках видно, что введение дополнительного яруса крепления положительно сказывается на характере работы конструкции, распределение перемещений более равномерно. Для глинистых грунтов наблюдается увеличение смещения ограждения в уровне дна котлована, для всех остальных грунтов вне зависимости от их физико-механических характеристик

смещения практически одинаковы по глубине ограждения.

При нахождении сооружения на границе призмы обрушения по центру котлована глубиной 9 м с двумя рядами распорок горизонтальные деформации ограждения изменяются в диапазоне: от 7,1 до 30,3 мм для **глин**; от 6,6 до 22,4 мм для **суглинков**; от 4,2 до 19,2 мм для **супесей**; от 6 до 22,4 мм для **песков**. Ниже показаны эпюры перемещений для всех типов грунтов с варьированием модуля деформации (см. рис. 5.6).

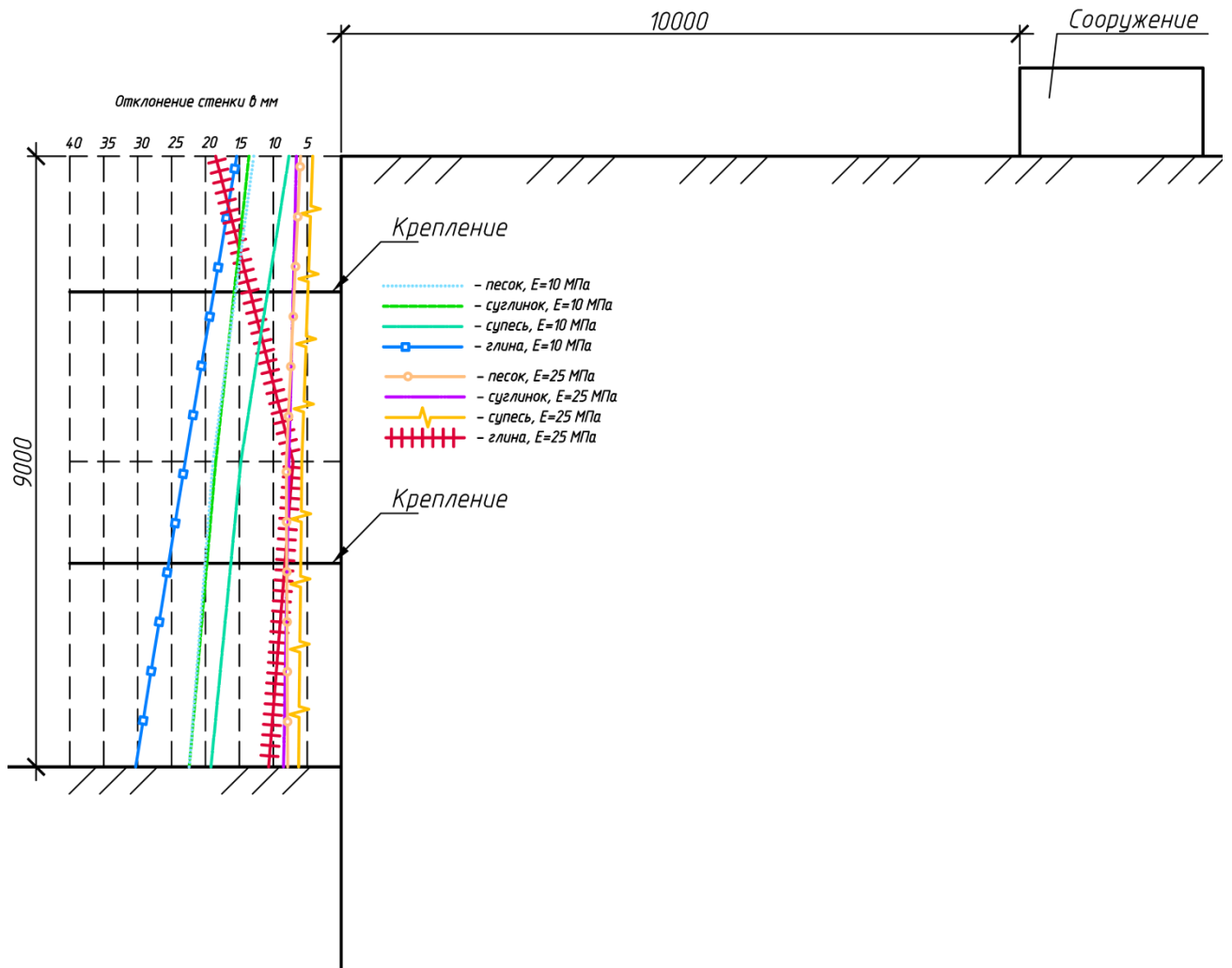


Рисунок 5.6. – Эпюры горизонтальных перемещений ограждения котлована глубиной 9м при расположении сооружения на границе призмы обрушения

Характер распределения горизонтальных деформаций в данном случае похож с бм котлованом, наблюдается нарастание значений перемещений по мере приближения к дну котлована, которое происходит за счет сдвига и поворота

защемленной части ограждения котлована, усугубленных наличием дополнительного давления от сооружения, расположенного на бровке котлована.

При нахождении сооружения на бровке по центру котлована глубиной 12 м с двумя рядами распорок горизонтальные деформации ограждения изменяются в диапазоне: от 9,4 до 58,5 мм для **глин**; от 14,1 до 45,4 мм для **суглинков**; от 11,4 до 37,6 мм для **супесей**; от 14,3 до 45,2 мм для **песков**. Ниже показаны эпюры перемещений для всех типов грунтов с варьированием модуля деформации (см. рис. 5.7).

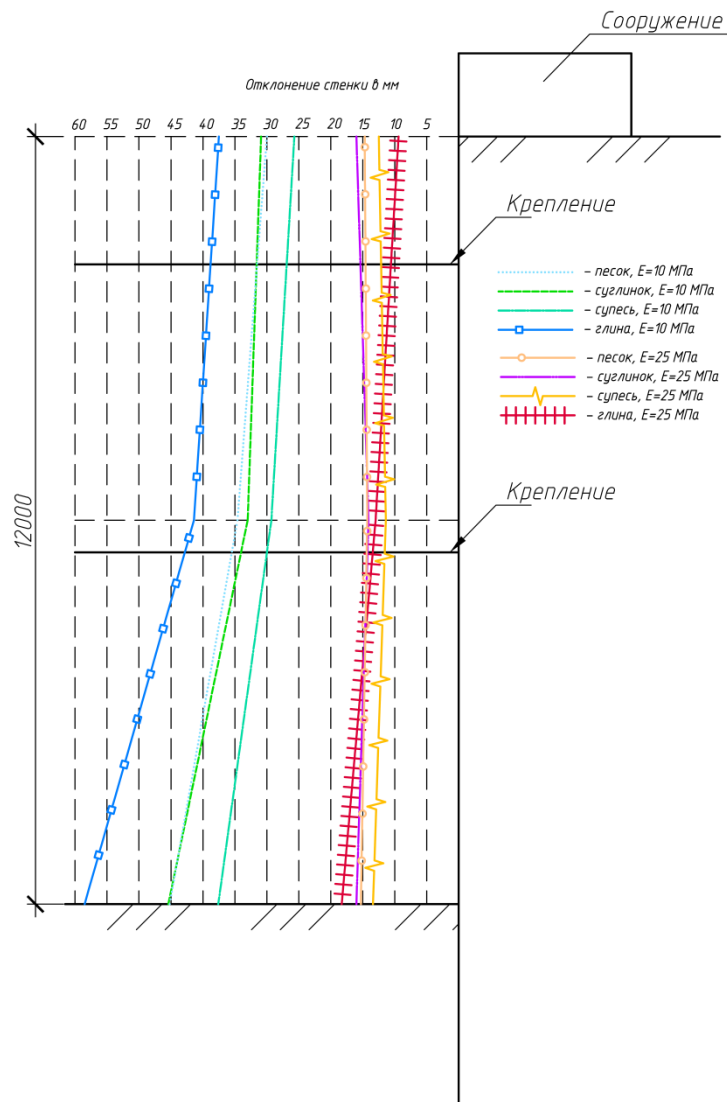


Рисунок 5.7. – Эпюры горизонтальных перемещений ограждения котлована глубиной 12м при расположении сооружения на бровке

На данной серии графиков наблюдается нарастание горизонтальных перемещений ограждения в нижней части, после места установки второго яруса



крепления наиболее характерное для грунтов с более низкими физико-механическими характеристиками, что может говорить либо о недостаточной жесткости крепления, либо о малой величине заделки ограждения ниже дна котлована.

При нахождении сооружения на границе призмы обрушения по центру котлована глубиной 12 м с двумя рядами распорок горизонтальные деформации ограждения изменяются в диапазоне: от 11 до 56 мм для **глин**; от 7,9 до 42,9 мм для **суглинков**; от 4,3 до 35,3 мм для **супесей**; от 6,2 до 42 мм для **песков**. Ниже показаны эпюры перемещений для всех типов грунтов с варьированием модуля деформации (см. рис. 5.8).

Наибольшая величина перемещений на представленных графиках наблюдается в уровне дна котлована, значения при этом идентичны случаю с расположением сооружения на бровке.

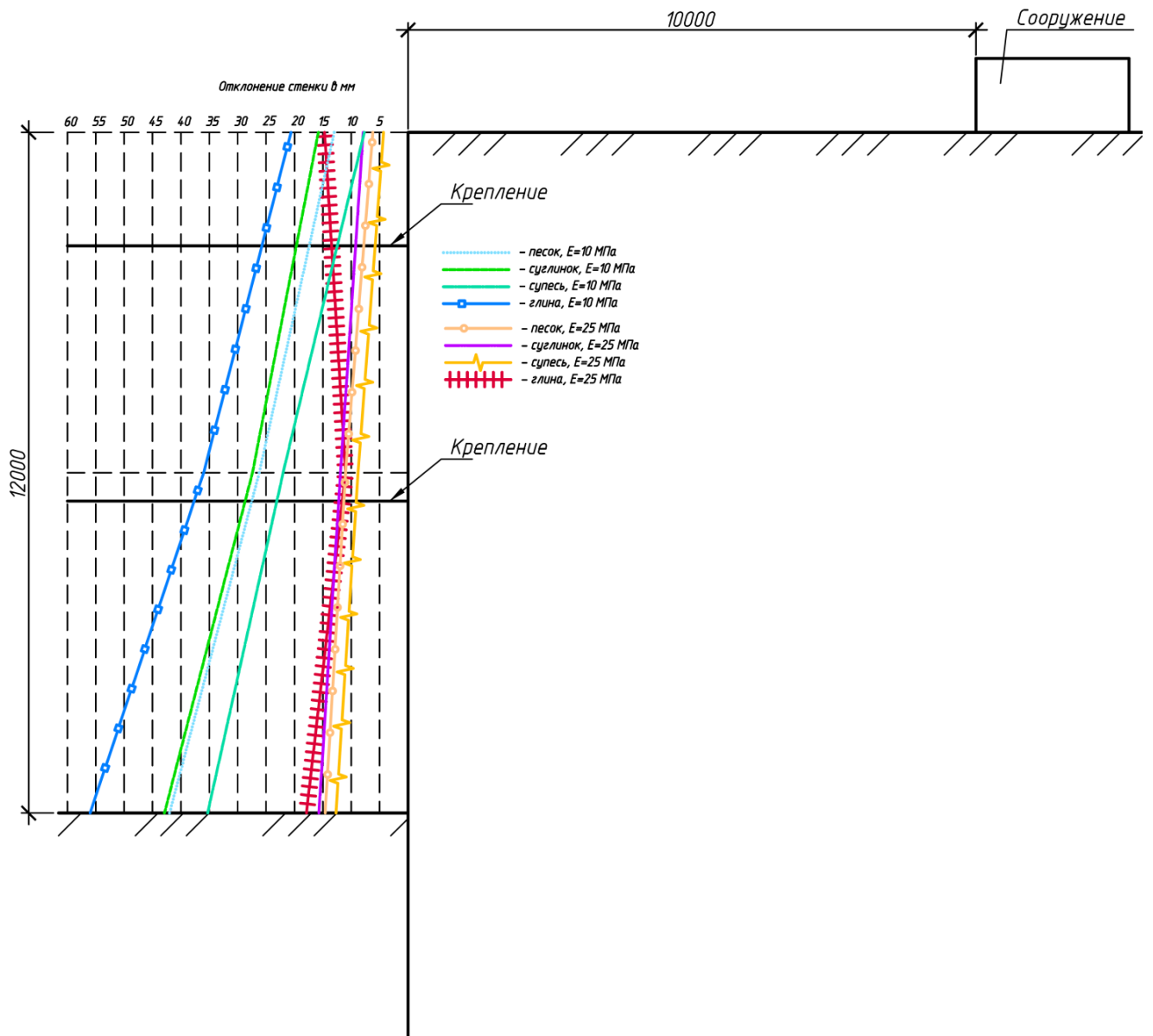


Рисунок 5.8. – Эпюры горизонтальных перемещений ограждения котлована глубиной 12м при расположении сооружения на бровке

Характер показанных выше эпюр говорит о большом расхождении в значениях горизонтальных смещений ограждения котлована в зависимости от варьирования рассматриваемых в работе факторов. Для определения искомой функции отклика в точках 1, 4 и 7 при промежуточных значениях факторов на основании регрессионного анализа были получены уравнения для каждого из 4 типов грунтов в виде квадратичного полинома. Значения коэффициентов уравнения приведены в табличной форме в Приложении А.

### 5.1.1. Анализ горизонтальных деформаций ограждения котлована в направлении вдоль котлована

Распределение горизонтальных деформаций ограждения в направлении вдоль котлована рассматривалось по 3 сечениям III-III, IV-IV и V-V (см. рис. 4.2), по аналогии с параграфом 4.1.2.

Наибольшие перемещения находятся в центре котлована (удаление  $0,5B$  от угла котлована, где  $B$  – ширина котлована), при этом по мере приближения сечения к его углу значения деформаций изменяются по-разному для верхней точки и точки уровне дна котлована. Горизонтальные смещения верха ограждения значительно затухают уже на удалении  $0,25B$ , значения изменяются до 2-3 раз, а затем затухание осадок происходит заметно меньше. Если рассматривать горизонтальные смещения ограждения в уровне дна котлована, то значения изменяются равномерно, с шагом около 20-30% (удаление  $0,25B$  и  $0,125B$ ), а при переходе от удаленности  $0,125B$  к угловой точке значения падают в 2 и более раз.

Данная тенденция наблюдается для всех типов грунтов и при разных положениях здания и глубинах котлована.

Ниже на рисунке 5.9 приведены значения горизонтальных перемещений ограждения по глубине в обозначенных сечениях.

### 5.2. Анализ горизонтальных перемещений точек массива грунта в пределах призмы обрушения

Наблюдение за горизонтальными перемещениями точек массива грунта по глубине, в соответствии с требованиями нормативной документации [61], выполняется «по специальному заданию» при сооружении котлованов глубиной более 15м. Однако, в условиях плотной городской застройки, массив грунта может содержать большое количество инженерных коммуникаций, для оценки влияния на которые необходимо знать как вертикальную, так и горизонтальную компоненту их дополнительных перемещений.

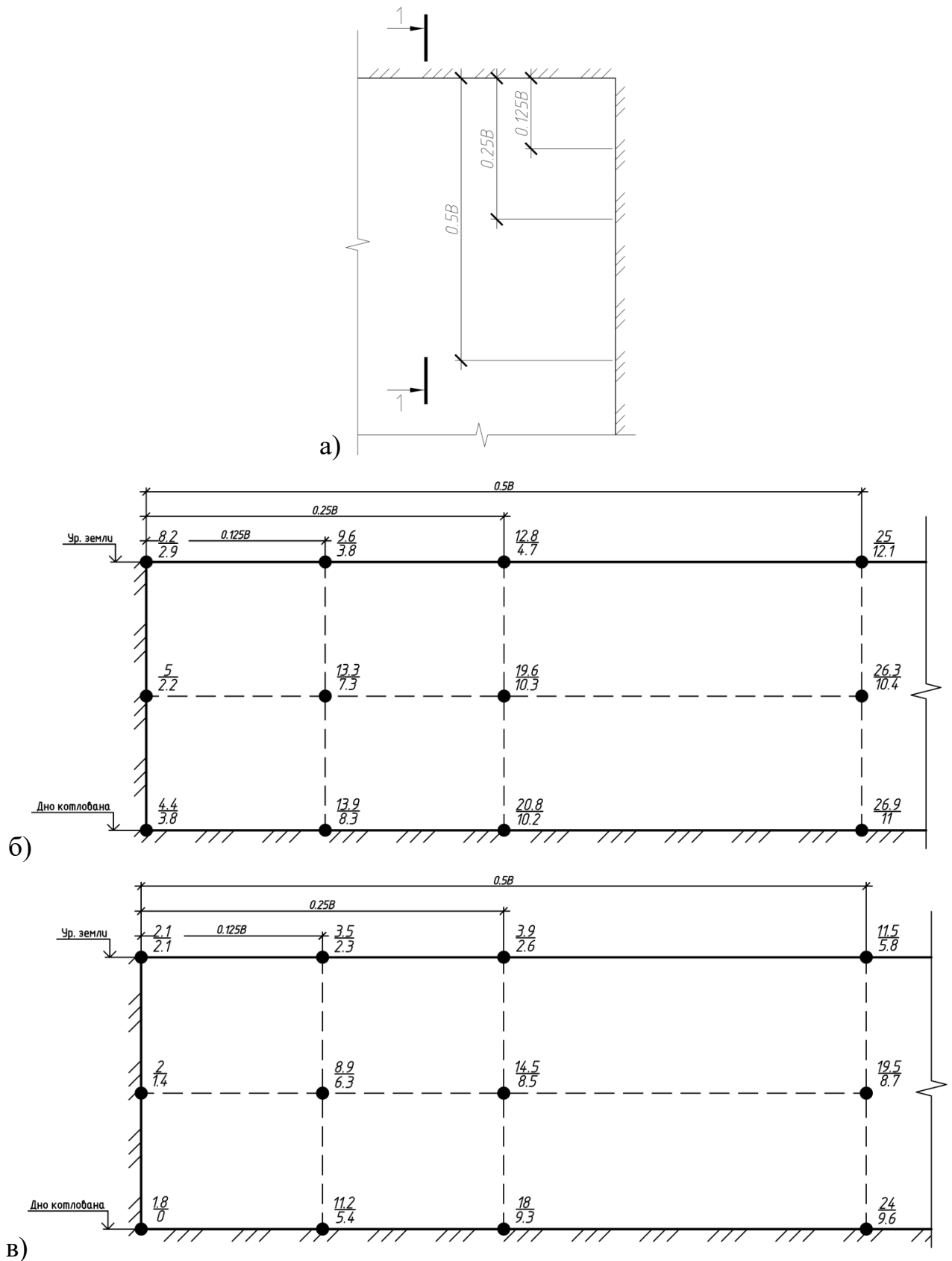


Рисунок 5.9. – План котлована в угловой части (а) и значения горизонтальных смещений в точках 1, 4 и 7 на разном удалении от угла для котлована глубиной 9 м в песчаных грунтах при здании на бровке (б) и на границе призмы обрушения (в). В числителе при модуле деформации грунта = 10 МПа, в знаменателе при 25 МПа

Распределение горизонтальных перемещений точек массива грунта в направлении вдоль котлована рассматривалось по сечениям I-I и II-II (см. рис. 4.2), то есть по центру котлована и на его углу, по аналогии с параграфом 4.1.2.

#### 5.2.1. Анализ горизонтальных перемещений массива грунта по центру котлована

Выполненные в соответствии с составленным планом эксперимента численные расчеты для песчаных грунтов показали следующее. Горизонтальные перемещения точек поверхности в пределах призмы обрушения практически идентичны, за исключением зоны возле верха ограждения котлована (точка 1, рис. 4.1), в которой перемещения ниже, что объясняется влиянием изгиба ограждения котлована и расположением распорной системы.

В уровне половины глубины котлована наблюдается нарастание горизонтальных перемещений в зоне возле ограждения (точка 4), а затем происходит их затухание по мере удаления (точки 5 и 6). При этом, если сооружение расположено на бровке котлована, то характер затухания носит нелинейный характер, в случае расположения здания на границе призмы обрушения или за ее пределами – перемещения затухают линейно.

В уровне дна котлована в зоне возле ограждения наблюдаются наибольшие перемещения, однако и их затухание с удалением происходит наиболее интенсивно (до 4 раз). Расположение сооружения на бровке также оказывает влияние на интенсивность изменения перемещений, наибольшие изменения отмечаются от точки 7 к точке 8. При расположении здания за призмой обрушения, затухание перемещений носит характер близкий к линейному.

Анализ результатов расчетов для случая устройства котлована в глинах показывает схожий характер деформаций и их изменение по мере удаления от ограждения и по глубине. Однако, отмечается, что количественно значения горизонтальных перемещений для глин выше. Наиболее значительно это проявляется для случаев с глубиной котлована 9 м с одним ярусом распорок и для котлована глубиной 12 м.

Также, для всех типов грунтов, отмечается значительное влияние изменения модуля деформации грунта, которое вследствие принятой методики ведет к изменению также и прочностных характеристик. Так, для точек поверхности разница значений перемещений от изменения  $E$  находится в диапазоне 2-3 раз, для точек в уровне дна котлована – до 4 раз.

Значения горизонтальных перемещений точек массива грунта в пределах призмы обрушения для котлованов глубиной 6-9 м с одним ярусом распорок при разном расположении здания и при варьировании модуля деформации грунта для **песков** изменяются в диапазоне от 2,0 до 45,5 мм; для **глин** в диапазоне от 3,0 до 43,0 мм.

Значения горизонтальных перемещений точек массива грунта в пределах призмы обрушения для котлованов глубиной 9-12 м с двумя ярусами распорок при разном расположении здания и при варьировании модуля деформации грунта **песков** изменяются в диапазоне от 3,0 до 45,0 мм; для **глин** в диапазоне от 3,5 до 58,5 мм.

Ниже на рисунках 5.10-5.11 показаны значения горизонтальных перемещений точек массива грунта в пределах призмы обрушения для котлованов глубиной 9-12 м с двумя ярусами распорок при разном расположении здания и при варьировании модуля деформации грунта для песков и глин, соответственно.

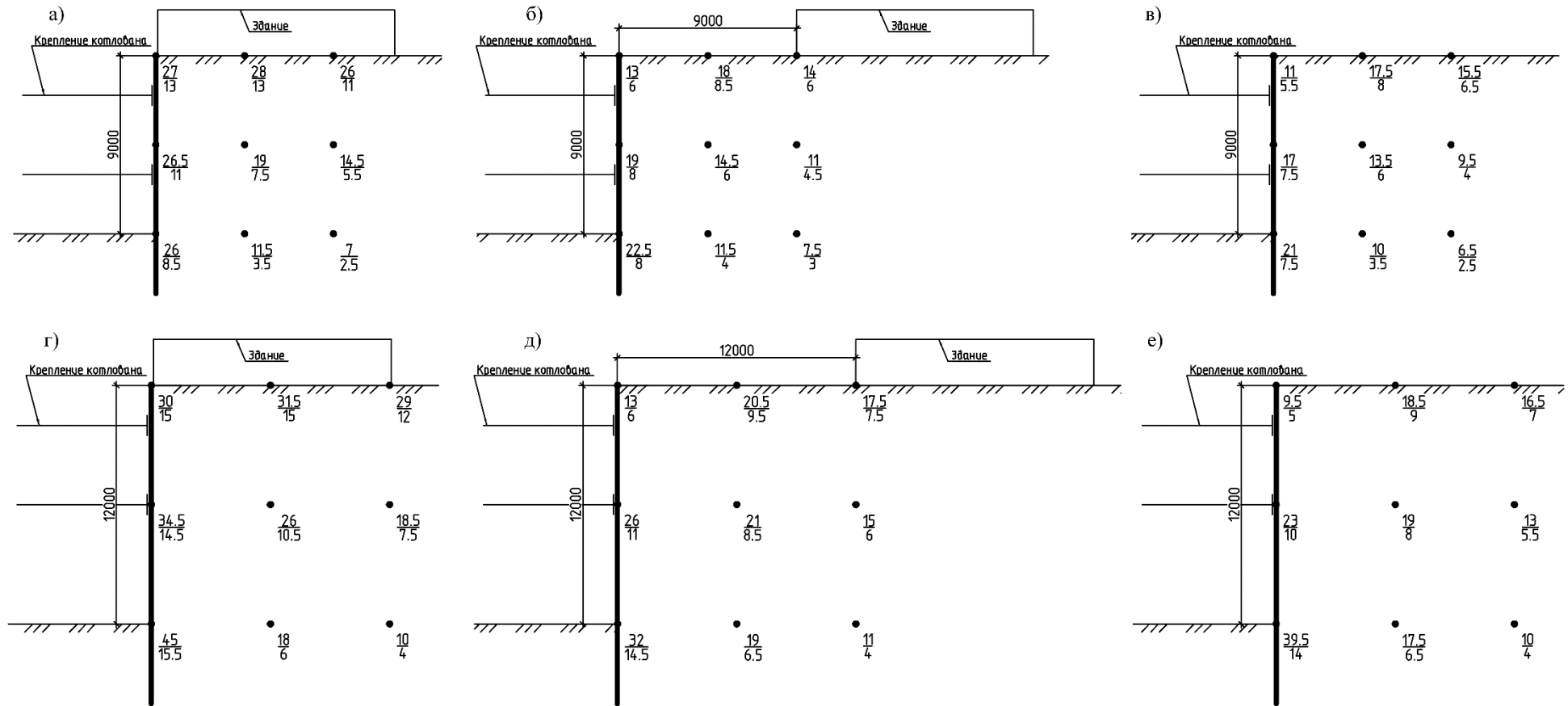


Рисунок 5.10. – Величины горизонтальных перемещений точек массива грунта для котлованов глубиной 9 и 12 м, сооружаемых в песках. В числителе для  $E=10$  МПа, в знаменателе – для  $E=25$  МПа. а) и г) – при расположении здания на бровке; б) и д) – при расположении здания на границе призмы обрушения; в) и е) – при свободной поверхности.

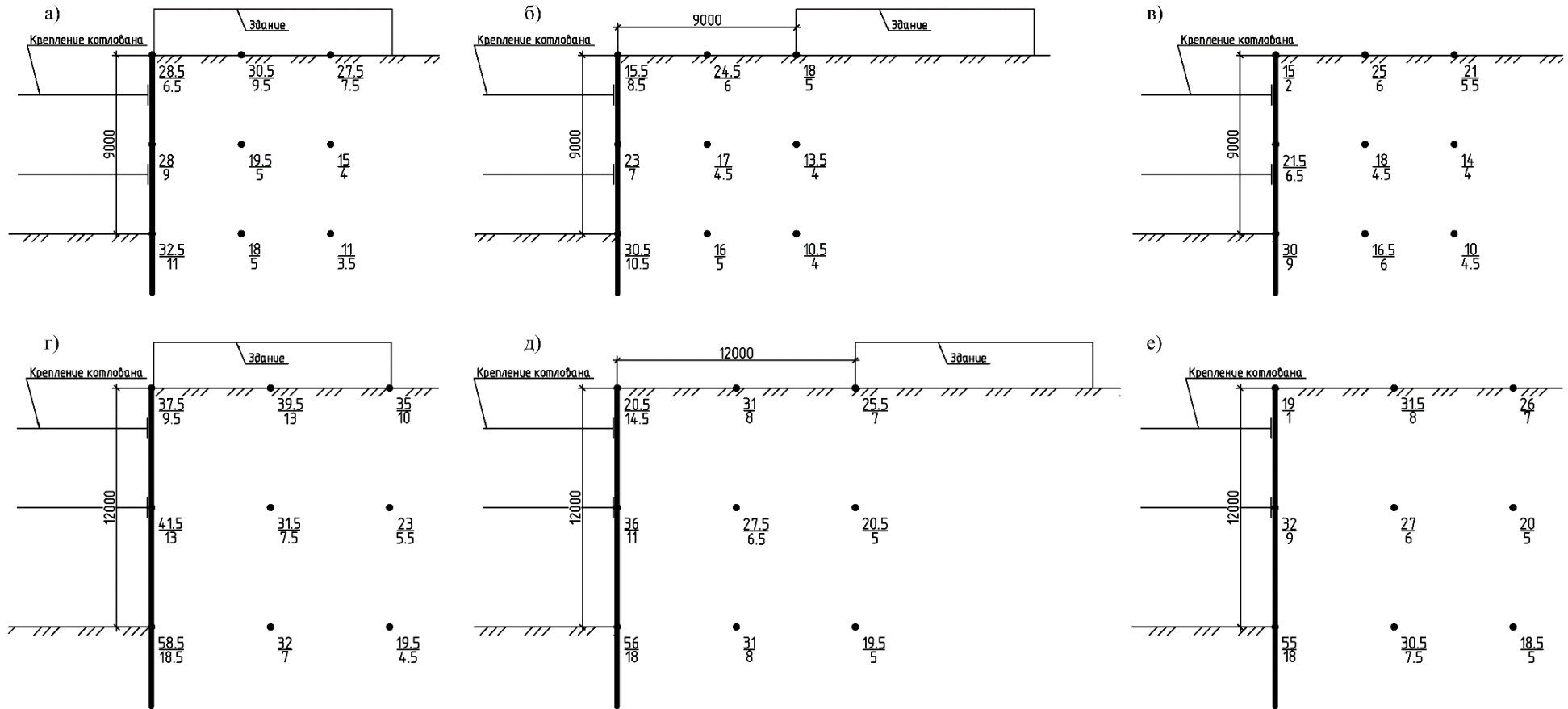


Рисунок 5.11. – Величины горизонтальных перемещений точек массива грунта для котлованов глубиной 9 и 12 м, сооружаемых в глинах. В числителе для  $E=10$  МПа, в знаменателе – для  $E=25$  МПа. а) и г) – при расположении здания на бровке; б) и д) – при расположении здания на границе призмы обрушения; в) и е) – при свободной поверхности.



### 5.2.2. Анализ горизонтальных перемещений массива грунта на углу котлована

Анализ величин горизонтальных перемещений точек массива грунта при удалении сечения от центра котлована к его углу показал значительное их изменение (от 2 до 5 раз, в зависимости от модуля деформации грунта и глубины котлована). При этом, для случаев с большей жесткостью ограждения и крепления (котлован глубиной 6м, либо 2 яруса распорной системы при верхней границе варьирования модуля деформации), деформации практически полностью затухают. Отдельно стоит отметить случай с глубиной котлована 12 м, в этой ситуации горизонтальные перемещения поверхности имеют значительную величину, до 20 мм, что говорит о необходимости анализа перемещений в угловых зонах для котлованов, относящихся к 3 геотехнической категории.

Значения горизонтальных перемещений точек массива грунта на углу для котлованов глубиной 6-9 метров с одним ярусом распорной системы в **песках** находятся в диапазоне от 0 до 10 мм, в **глинах** – от 0 до 11 мм.

Значения горизонтальных перемещений для котлованов глубиной 9-12 м с двумя ярусами распорной системы в **песках** находятся в диапазоне от 0 до 14 мм, в **глинах** – от 1 до 22 мм.

Далее, на рисунках 5.12-5.13 приведены значения перемещений для котлованов глубиной 9-12 м с двумя ярусами распорной системы в песках и глинах соответственно.

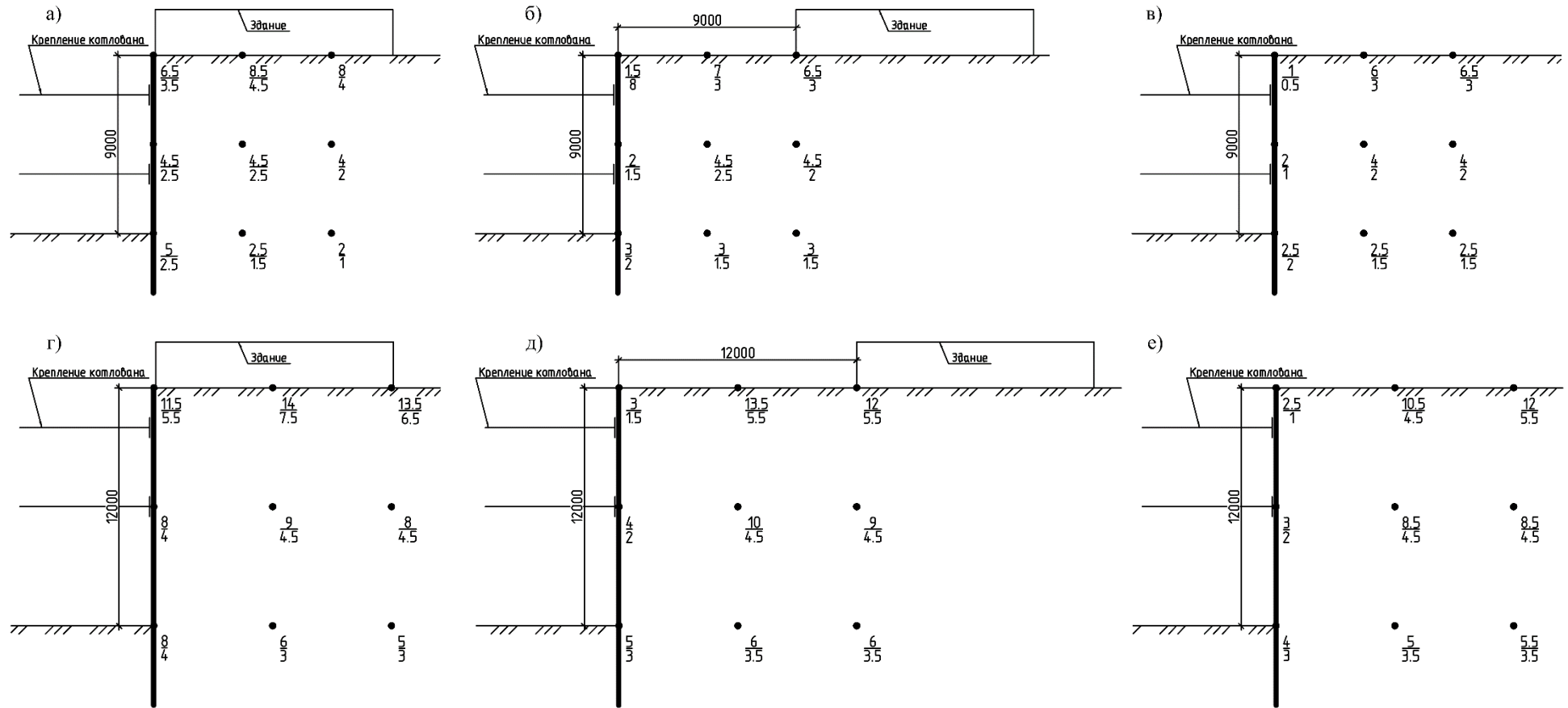


Рисунок 5.12. – Величины горизонтальных перемещений точек массива грунта для котлованов глубиной 9 и 12 м, сооружаемых в песках. В числителе для  $E=10$  МПа, в знаменателе – для  $E=25$  МПа. а) и г) – при расположении здания на бровке; б) и д) – при расположении здания на границе призмы обрушения; в) и е) – при свободной поверхности.

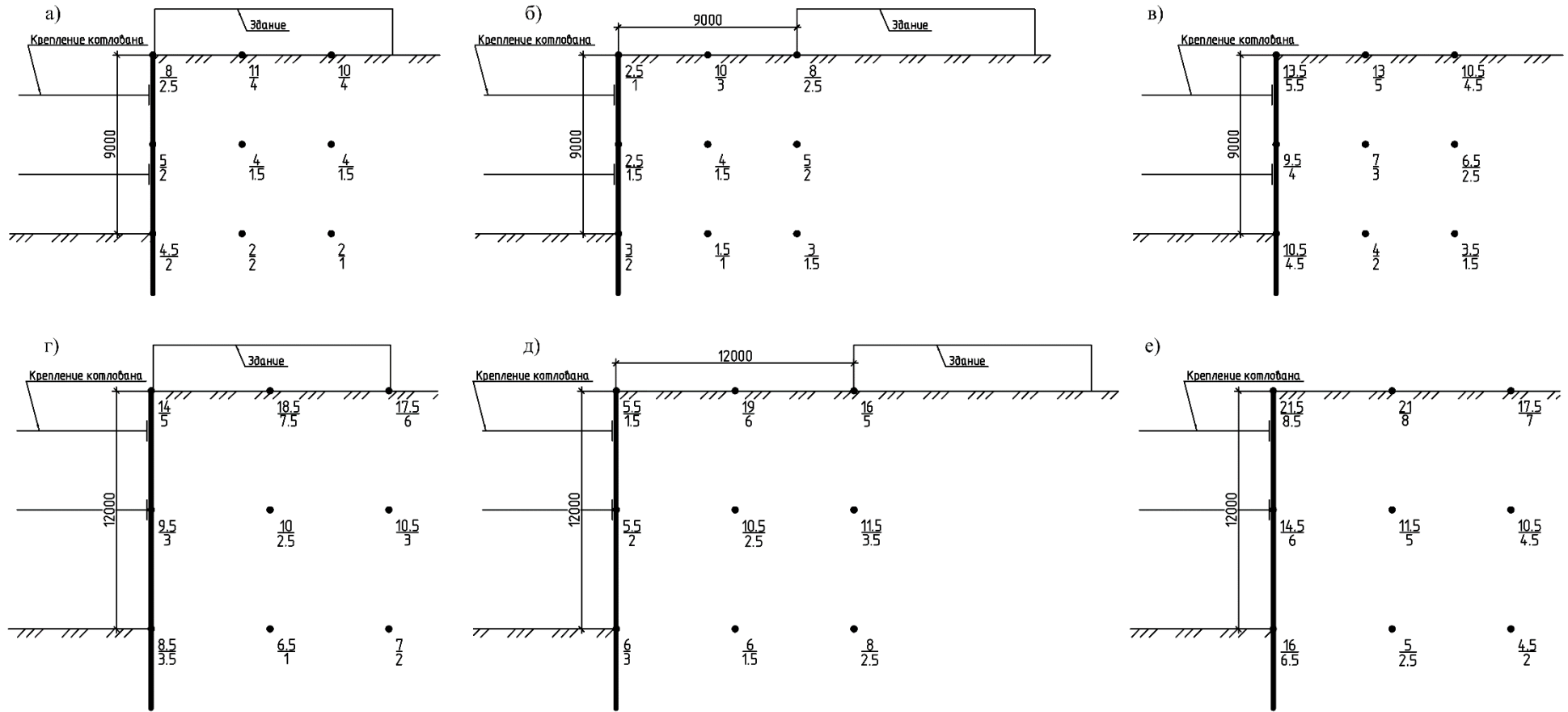


Рисунок 5.13. – Величины горизонтальных перемещений точек массива грунта для котлованов глубиной 9 и 12 м, сооружаемых в глинах. В числителе для  $E=10$  МПа, в знаменателе – для  $E=25$  МПа. а) и г) – при расположении здания на бровке; б) и д) – при расположении здания на границе призмы обрушения; в) и е) – при свободной поверхности.

## Выводы по главе 5

1. Аналогично исследованиям четвертой главы рассмотрено влияние «углового эффекта» на дополнительные горизонтальные деформации ограждения котлована и массива грунта за его пределами. Выявлены схожие тенденции о переходе от нелинейного характера изменения перемещений по длине и глубине котлована к линейному.
2. Исследовано влияние положения здания (в пределах призмы обрушения и на ее границах) на характер деформирования ограждения при недостаточной жесткости крепления. Установлено, что расположение здания на границе призмы обрушения приводит к значительному «выпору» ограждения в зоне заделки в сравнении с его верхней точкой, что следует учитывать при проектировании.
3. Анализ, выполненный в четвертой и пятой главах показывает, что габаритные размеры призмы обрушения грунта значительно уменьшаются при развитии «углового эффекта», а также она приобретает сложную ломаную форму, что может негативно сказываться на работе существующих подземных инженерных коммуникаций. Данный эффект требует дополнительного исследования.

## ГЛАВА 6. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ТОЧЕК МАССИВА ГРУНТА. АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

### 6.1. Уравнения регрессии

На основании проведенной серии численных экспериментов в соответствии с методикой, приведенной во 2 главе получены коэффициенты уравнений регрессии для определения горизонтальных и вертикальных перемещений точек массива грунта в пределах призмы обрушения. Так, например, для определения вертикальных перемещений точки 5 (см. рисунок 4.1) при нахождении задачи в диапазоне интервалов варьирования факторов, приведенных в таблице 6.1 уравнение имеет вид:

$$Y = 11,95 + 7,24X_1 - 10,29X_2 - 4,66X_3 - 7,98X_4 - 0,67X_1^2 + 5,58X_2^2 + 2,43X_3^2 - 2,52X_4^2 - 5,15X_1X_2 - 2,14X_1X_3 - 4,64X_1X_4 + 3,26X_2X_3 + 5,71X_2X_4 + 2,98X_3X_4 \quad (6.1)$$

Далее необходимо выполнить переход от безразмерных к натуральным значениям варьируемых факторов по следующим формулам:

$$X_1 = \frac{H-7,5}{1,5}; X_2 = \frac{E-17,5}{7,5}; X_3 = \frac{L-3,5}{3,5}; X_4 = \frac{B-0,5}{0,5} \quad (6.2)$$

Таблица 6.1. Значения факторов (входных параметров).

Наименование	Факторы			
	$X_1, [м]$	$X_2, [МПа]$	$X_3, [м]$	$X_4, [ ]$
Основной уровень (0)	7,5	17,5	3,5	0,5
Интервал варьирования	1,5	7,5	3,5	0,5
Верхний уровень (+)	9	25	7	1
Нижний уровень (-)	6	10	0	0

Окончательно уравнение принимает вид:

$$\begin{aligned}
 Y = & 11,95 + 7,24 \left( \frac{H-7,5}{1,5} \right) - 10,29 \left( \frac{E-17,5}{7,5} \right) - 4,66 \left( \frac{L-3,5}{3,5} \right) - 7,98 \left( \frac{B-0,5}{0,5} \right) - \\
 & - 0,67 \left( \frac{H-7,5}{1,5} \right)^2 + 5,58 \left( \frac{E-17,5}{7,5} \right)^2 + 2,43 \left( \frac{L-3,5}{3,5} \right)^2 - 2,52 \left( \frac{B-0,5}{0,5} \right)^2 - \\
 & - 5,15 \left( \frac{H-7,5}{1,5} \right) \left( \frac{E-17,5}{7,5} \right) - 2,14 \left( \frac{H-7,5}{1,5} \right) \left( \frac{L-3,5}{3,5} \right) - \\
 & - 4,64 \left( \frac{H-7,5}{1,5} \right) \left( \frac{B-0,5}{0,5} \right) + 3,26 \left( \frac{E-17,5}{7,5} \right) \left( \frac{L-3,5}{3,5} \right) + \\
 & + 5,71 \left( \frac{E-17,5}{7,5} \right) \left( \frac{B-0,5}{0,5} \right) + 2,98 \left( \frac{L-3,5}{3,5} \right) \left( \frac{B-0,5}{0,5} \right)
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Аналогичным образом для определения горизонтальных перемещений точки 5 получим следующее уравнение:

$$\begin{aligned}
 X = & 6,05 + 2,87 \left( \frac{H-7,5}{1,5} \right) - 3,68 \left( \frac{E-17,5}{7,5} \right) - 0,25 \left( \frac{L-3,5}{3,5} \right) - 4,23 \left( \frac{B-0,5}{0,5} \right) + \\
 & + 0,54 \left( \frac{H-7,5}{1,5} \right)^2 + 1,89 \left( \frac{E-17,5}{7,5} \right)^2 - 0,26 \left( \frac{L-3,5}{3,5} \right)^2 - 1,41 \left( \frac{B-0,5}{0,5} \right)^2 - \\
 & - 1,86 \left( \frac{H-7,5}{1,5} \right) \left( \frac{E-17,5}{7,5} \right) - 0,42 \left( \frac{H-7,5}{1,5} \right) \left( \frac{L-3,5}{3,5} \right) - \\
 & - 1,81 \left( \frac{H-7,5}{1,5} \right) \left( \frac{B-0,5}{0,5} \right) + 0,31 \left( \frac{E-17,5}{7,5} \right) \left( \frac{L-3,5}{3,5} \right) + \\
 & + 2,54 \left( \frac{E-17,5}{7,5} \right) \left( \frac{B-0,5}{0,5} \right) + 0,46 \left( \frac{L-3,5}{3,5} \right) \left( \frac{B-0,5}{0,5} \right)
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

При нахождении значений факторов в пределах варьирования приведенных в таблице 5.2 переход от безразмерных к натуральным значениям варьируемых факторов по следующим формулам:

$$X_1 = \frac{H-10,5}{1,5}; X_2 = \frac{E-17,5}{7,5}; X_3 = \frac{L-5}{5}; X_4 = \frac{B-0,5}{0,5} \tag{6.5}$$

Таблица 6.2. Значения факторов (входных параметров).

Наименование	Факторы			
	X <sub>1</sub> , [М]	X <sub>2</sub> , [МПа]	X <sub>3</sub> , [М]	X <sub>4</sub> , []
Основной уровень (0)	10,5	17,5	5	0.5
Интервал варьирования	1,5	7,5	5	0.5
Верхний уровень (+)	12	25	10	1
Нижний уровень (-)	9	10	0	0

При нахождении значений факторов в пределах варьирования приведенных в таблице 5.3 переход от безразмерных к натуральным значениям варьируемых факторов по следующим формулам:

$$X_1 = \frac{H-7,5}{1,5}; X_2 = \frac{E-17,5}{7,5}; X_3 = \frac{L-12,5}{5,5}; X_4 = \frac{B-0,5}{0,5} \quad (6.6)$$

Таблица 6.3. Значения факторов (входных параметров).

Наименование	Факторы			
	X <sub>1</sub> , [М]	X <sub>2</sub> , [МПа]	X <sub>3</sub> , [М]	X <sub>4</sub> , []
Основной уровень (0)	7,5	17,5	12,5	0.5
Интервал варьирования	1,5	7,5	5,5	0.5
Верхний уровень (+)	9	25	18	1
Нижний уровень (-)	6	10	7	0

При нахождении значений факторов в пределах варьирования приведенных в таблице 5.4 переход от безразмерных к натуральным значениям варьируемых факторов по следующим формулам:

$$X_1 = \frac{H-10,5}{1,5}; X_2 = \frac{E-17,5}{7,5}; X_3 = \frac{L-14}{4}; X_4 = \frac{B-0,5}{0,5} \quad (6.7)$$

Таблица 6.4. Значения факторов (входных параметров).

Наименование	Факторы			
	$X_1, [м]$	$X_2, [МПа]$	$X_3, [м]$	$X_4, [ ]$
Основной уровень (0)	10,5	17,5	14	0.5
Интервал варьирования	1,5	7,5	4	0.5
Верхний уровень (+)	12	25	18	1
Нижний уровень (-)	9	10	10	0

## 6.2. Проверка адекватности полученных уравнений регрессии

Для проверки соответствия полученных уравнений регрессии опытным данным выполним определение искомой функции отклика с применением полученных уравнений в нулевых и крайних точках факторного плана. Значения будут определяться для экспериментов 17 – 24 (матрица планирования эксперимента на рис. 2.4) при расположении здания в пределах призмы обрушения и для экспериментов 1, 8, 9 и 16 (матрица планирования эксперимента на рис. 2.5) вне ее, грунт - песок. За функцию отклика примем величину дополнительных осадок точек 1, 3, 7 и 9 (см. рисунок 4.1) массива, расположенных в пределах призмы обрушения. Для каждой точки выявлена величина расхождения в процентах, а также в абсолютных величинах. Результаты представлены ниже в таблицах 6.5-6.8.



Таблица 6.5. Проверка сходимости результатов (по таблице 6.1).

Номер эксперимента по матрице планирования	Номер точки массива по рисунку 4.1	Результаты по эксперименту	Результат по уравнению	Расхождение в %	Расхождение в мм
17	1	15,5	14,5	7,2	1,0
	3	6,6	6,3	4,1	0,3
	7	13,1	13,3	1,9	0,2
	9	5,0	4,7	6,6	0,3
18	1	19,7	20,7	5,0	1,0
	3	12,1	12,3	1,9	0,2
	7	18,3	18,0	1,6	0,3
	9	7,9	8,2	3,6	0,3
19	1	31,2	33,1	6,0	1,9
	3	18,5	18,5	0,0	0,0
	7	27,8	29,7	6,9	1,9
	9	13,4	13,5	1,1	0,1
20	1	19,9	18	10,8	1,9
	3	7,2	7,2	0,0	0,0
	7	19,5	17,5	11,2	2,0
	9	5,6	5,4	3,1	0,2
21	1	26	25,2	3,2	0,8
	3	11,8	11,9	0,7	0,1
	7	20,6	20,0	2,8	0,6
	9	8,8	8,9	1,3	0,1
22	1	15,1	15,8	4,9	0,7
	3	7,3	7,2	1,6	0,1
	7	13,8	14,3	3,7	0,5
	9	5,6	5,5	2,6	0,1
23	1	21,0	23,0	9,3	2,0
	3	11,0	12,5	13,5	1,5
	7	18,7	20,1	7,2	1,4
	9	8,2	9,1	10,8	0,9
24	1	7,5	5,5	36,9	2,0
	3	4,6	3,1	49,1	1,5
	7	6,0	4,6	30,5	1,4
	9	3,6	2,7	33,8	0,9

Таблица 6.6. Проверка сходимости результатов (по табл. 6.2).

Номер эксперимента по матрице планирования	Номер точки массива по рисунку 4.1	Результаты по эксперименту	Результат по уравнению	Расхождение в %	Расхождение в мм
17	1	18,8	17,1	9,6	1,7
	3	8,0	7,6	4,7	0,4
	7	17,4	17,4	0,0	0,0
	9	6,1	5,9	2,8	0,2
18	1	18,4	20	8,6	1,6
	3	10,1	10,4	3,2	0,3
	7	19,6	19,5	0,5	0,1
	9	7,3	7,4	1,9	0,1
19	1	31,6	31,7	0,3	0,1
	3	19,2	18,8	2,1	0,4
	7	31,0	29,8	4,2	1,2
	9	13,6	13,4	1,5	0,2
20	1	12,2	12,0	1,4	0,2
	3	6,2	6,5	5,6	0,3
	7	13,9	15,1	8,5	1,2
	9	4,4	4,6	3,8	0,2
21	1	29,1	28,1	3,7	1,0
	3	12,9	12,8	1,0	0,1
	7	22,0	21,6	2,1	0,4
	9	9,0	9,0	0,0	0,0
22	1	14,1	15,1	6,9	1,0
	3	8,2	8,3	1,0	0,1
	7	15,7	16,1	2,5	0,4
	9	6,2	6,1	1,1	0,1
23	1	21,1	23,5	11,3	2,4
	3	12,3	13,2	7,2	0,9
	7	21,8	23,1	6,1	1,3
	9	8,7	9,3	6,8	0,6
24	1	10,7	8,2	29,8	2,5
	3	7,0	6,1	15,3	0,9
	7	6,6	5,2	26,3	1,4
	9	4,7	4,1	15,2	0,6

Таблица 6.7. Проверка сходимости результатов (по табл. 6.3).

Номер эксперимента по матрице планирования	Номер точки массива по рисунку 4.1	Результаты по эксперименту	Результат по уравнению	Расхождение в %	Расхождение в мм
1	1	27,5	27,5	0,0	0,0
	3	12,8	13,7	6,9	0,9
	7	20,4	21,3	4,3	0,9
	9	9,2	9,8	6,2	0,6
8	1	12,7	17,3	36,4	4,6
	3	5,4	8,3	54,0	2,9
	7	12,1	14,0	15,3	1,9
	9	4,0	5,8	45,2	1,8
9	1	8,7	14,5	66,6	5,8
	3	4,2	6,7	58,8	2,5
	7	8,8	9,8	11,4	1,0
	9	3,5	4,9	39,5	1,4
16	1	4,3	4,4	1,3	0,1
	3	2,0	1,3	53,1	0,7
	7	3,1	2,5	24,3	0,6
	9	1,4	0,9	52,4	0,5

Таблица 6.8. Проверка сходимости результатов (по табл. 6.4).

Номер эксперимента по матрице планирования	Номер точки массива по рисунку 4.1	Результаты по эксперименту	Результат по уравнению	Расхождение в %	Расхождение в мм
1	1	27,5	27,5	0,0	0,0
	3	12,8	13,7	6,9	0,9
	7	20,4	21,3	4,3	0,9
	9	9,2	9,8	6,2	0,6
8	1	12,7	17,3	36,4	4,6
	3	5,4	8,3	54,1	2,9
	7	12,1	14,0	15,3	1,9
	9	4,0	5,8	45,2	1,8
9	1	8,7	14,5	66,6	5,8
	3	4,2	6,7	58,8	2,5
	7	8,8	9,8	11,4	1,0
	9	3,5	4,9	39,5	1,4
16	1	4,3	4,4	1,3	0,1
	3	2,0	1,3	53,1	0,7
	7	3,1	2,5	24,3	0,6
	9	1,4	0,9	52,4	0,5

Полученные результаты показали достаточную для инженерных расчетов, выполняемых на предварительном этапе точность в пределах 15%. В отдельных точках, где величина расхождения в процентах является чрезмерно большой, величина абсолютных значений отличается незначительно (в пределах 5 мм), что и обуславливает сильное расхождение в процентном отношении. Также необходимо отметить, что в большинстве рассмотренных случаев значения дополнительных деформаций, вычисленных по полученным уравнениям регрессии, превышают значения численных экспериментов, что допустимо, поскольку повышает коэффициент запаса при анализе влияния разработки котлована на окружающую застройку.

### 6.3. Определение дополнительных осадок зданий окружающей застройки

Для оценки применимости предлагаемой методики было выполнено моделирование разработки котлована глубиной 15,8 м, сооружаемого в сложных

геологических условиях в городе Москве и сравнение полученных результатов с результатами мониторинга [35, 37].

Ограждение котлована выполнялось из бурящихся свай диаметром 830 мм с креплением из труб, упирающихся в пояса из пакетов двутавров. Ограждение заглублено в слой глин, т.е. котлован является совершенным.

В зоне влияния строительства располагалось 7-этажное здание по адресу: г.Москва, ул. Руставели д.19 с подвалом и 1-2-этажной пристройкой. Конструктивная схема здания – неполный каркас; категория состояния здания – II (удовлетворительное); предельно допустимые осадки – 20 мм. Здание было смоделировано в виде приведенного массива с модулем деформации 200 МПа.

Так как здание находится на углу котлована, было построено 2 расчетные модели, в плоской и объемной постановках, для дополнительной оценки «углового эффекта». Результаты численных расчетов приведены на рисунках 6.1-6.3, сравнение с результатами мониторинга – в таблице 6.9.

Таблица 6.9. Результаты численных расчетов и сравнение их с результатами мониторинга

Адрес	Осадка, мм				
	Предельно допустимая	Расчетная			Замеренная
		Плоская задача	Пространственная задача	По уравнениям	
Ул. Руставели, д. 19	20	43	13	10,6	12,5

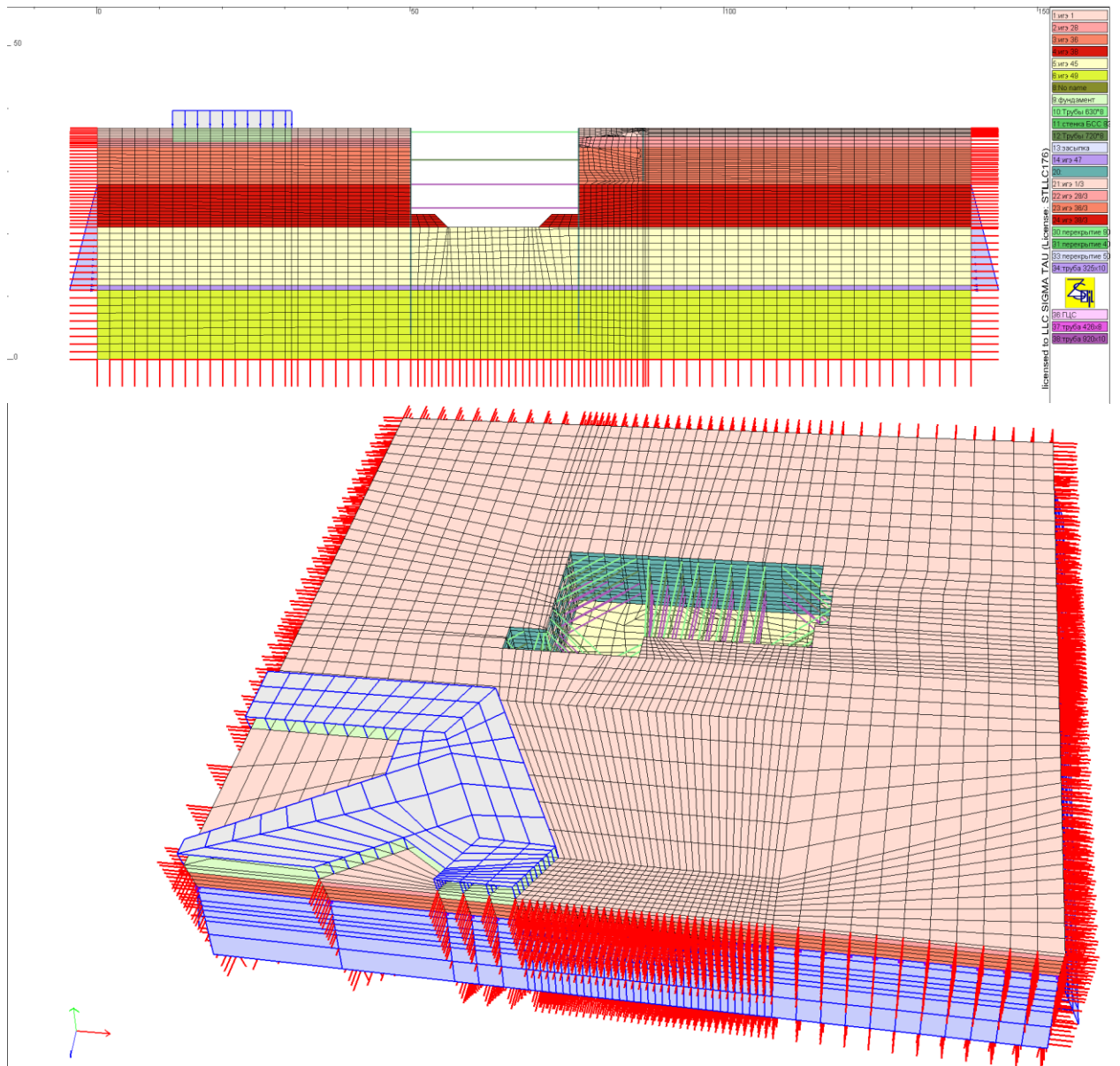


Рисунок 6.1. – Расчетные схемы в плоской (сверху) и объемной (снизу) постановках

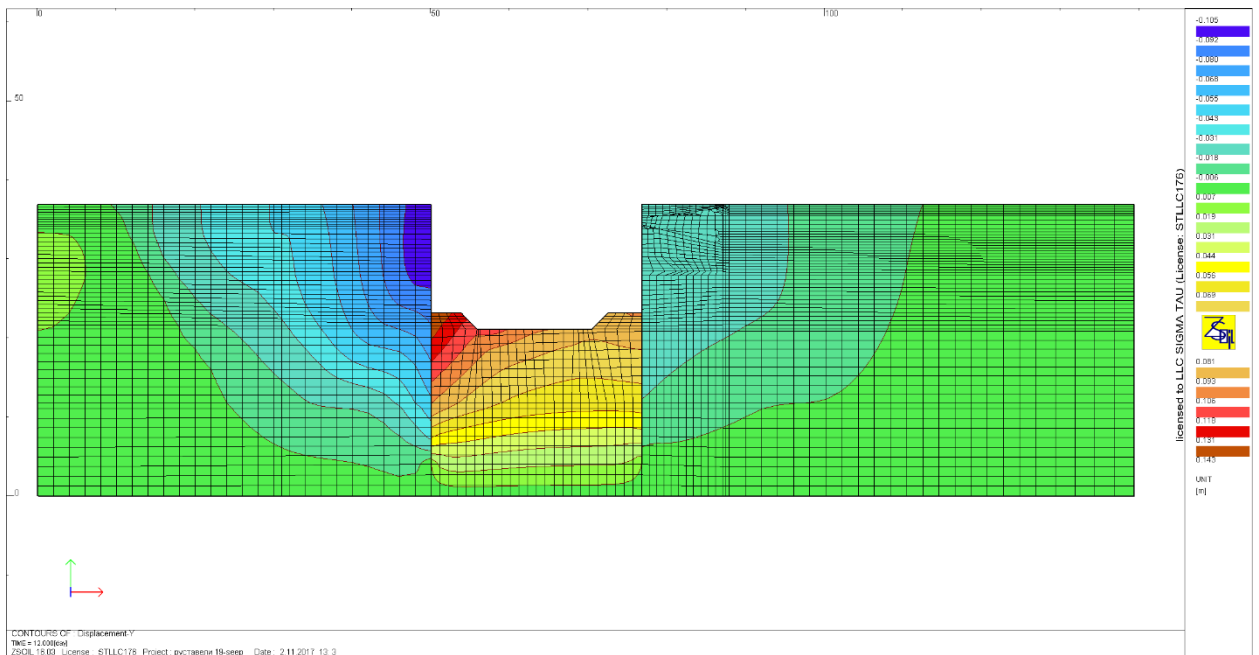


Рисунок 6.2. – Изополя вертикальных перемещений в массиве грунта при моделировании в плоской постановке

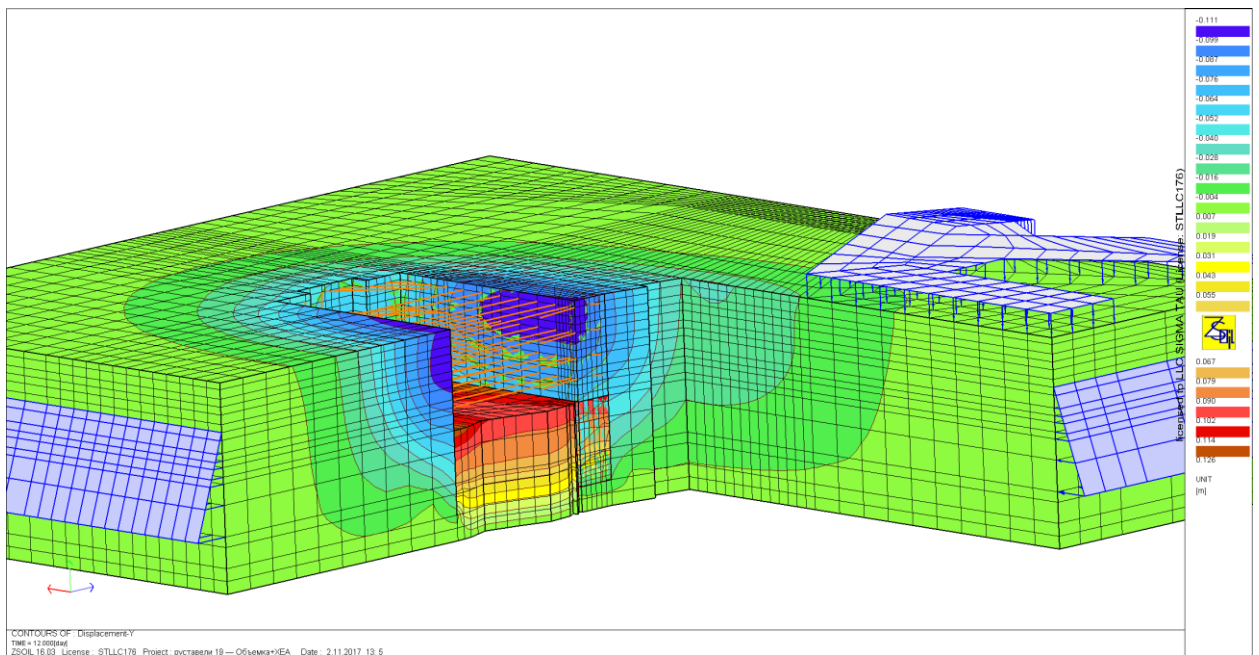


Рисунок 6.3. – Изополя вертикальных перемещений в массиве грунта при моделировании в объемной постановке

По полученным результатам видна удовлетворительная, для стадии предпроектной проработки, точность определения дополнительных деформаций существующего здания. Отдельно необходимо отметить, что осадки определялись для крайних точек факторного плана, то есть для глубины котлована равной 12 м, что обусловлено ограничением метода планирования эксперимента, запрещающим экстраполяцию за пределы интервалов варьирования факторов.

Для определения дополнительных осадок зданий окружающей застройки предлагается использовать блок-схему, приведенную на рисунке 6.5, для отыскания необходимых коэффициентов уравнения регрессии (по таблицам в Приложениях) с дальнейшим вычислением искомой величины посредством программы Excel по формулам 6.8-6.12 полученных на основе выражений 6.2, 6.5...6.7. Коэффициенты уравнения регрессии определяются по блок-схемам и вводятся в ячейки В2-В16. Значения факторов в натуральном виде вводятся в ячейках Е2-Е5, далее в ячейках Н2-Н5 они переводятся в кодированные значения по формулам 6.8-6.11, в ячейках I2-I5 кодированные значения возводятся в квадрат. Функция отклика определяется в ячейке L2 по формуле 6.12.

$$=(E2-7,5)/1,5 \quad (6.8)$$

$$=(E3-17,5)/7,5 \quad (6.9)$$

$$=(E4-3,5)/3,5 \quad (6.10)$$

$$=(E5-0,5)/0,5 \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} &=B2+B3*N2+B4*N3+B5*N4+B6*N5+B7*I2+B8*I3+B9*I4+B10*I5+ \\ &+B11*N2*N3+B12*N2*N4+B13*N2*N5+B14*N3*N4+ \\ &+B15*N3*N5+B16*N4*N5 \end{aligned} \quad (6.12)$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	коэфф. уравнения			значение фактора			кодированное значение	'2			функция по уравнению	
2	b0=	12,39		X1=	7		X1=	-0,333	0,111		Y1=	30,1
3	b1=	8,25		X2=	10		X2=	-1,000	1,000			
4	b2=	-10,58		X3=	4		X3=	0,143	0,020			
5	b3=	-11,03		X4=	0		X4=	-1,000	1,000			
6	b4=	-8,12										
7	b5=	-0,37										
8	b6=	5,23										
9	b7=	4,33										
10	b8=	-2,82										
11	b9=	-5,43										
12	b10=	-4,02										
13	b11=	-4,53										
14	b12=	6,28										
15	b13=	5,74										
16	b14=	5,51										

Рисунок 6.4. – Порядок представления исходных данных



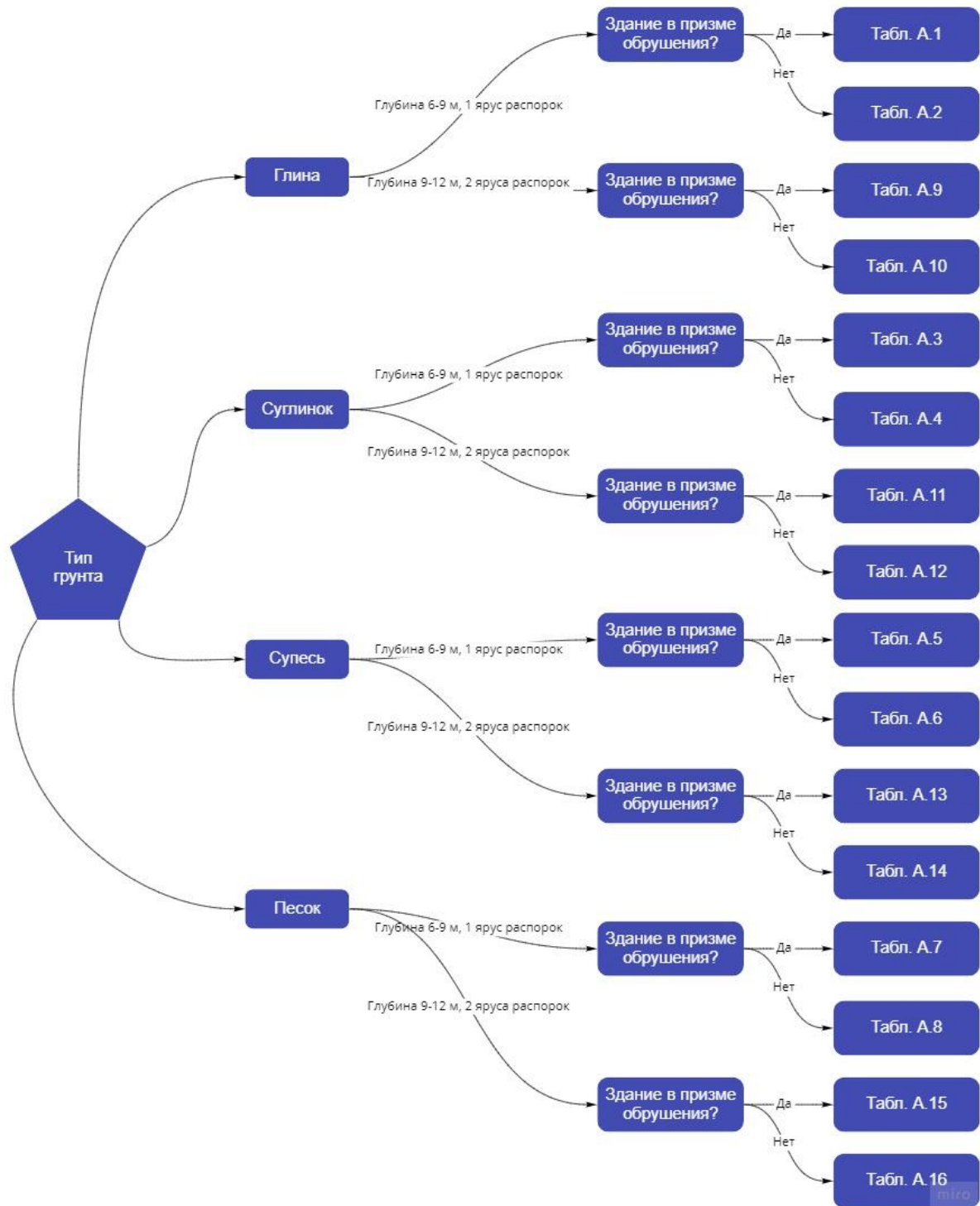


Рисунок 6.5. – Блок-схема для нахождения коэффициентов регрессии для определения дополнительных осадок зданий окружающей застройки

Аналогично, с использованием блок-схемы на рисунке 6.6, возможно определить значения коэффициентов уравнения регрессии для вычисления дополнительных горизонтальных смещений верха ограждения котлована в зависимости от варьирования выбранных факторов.

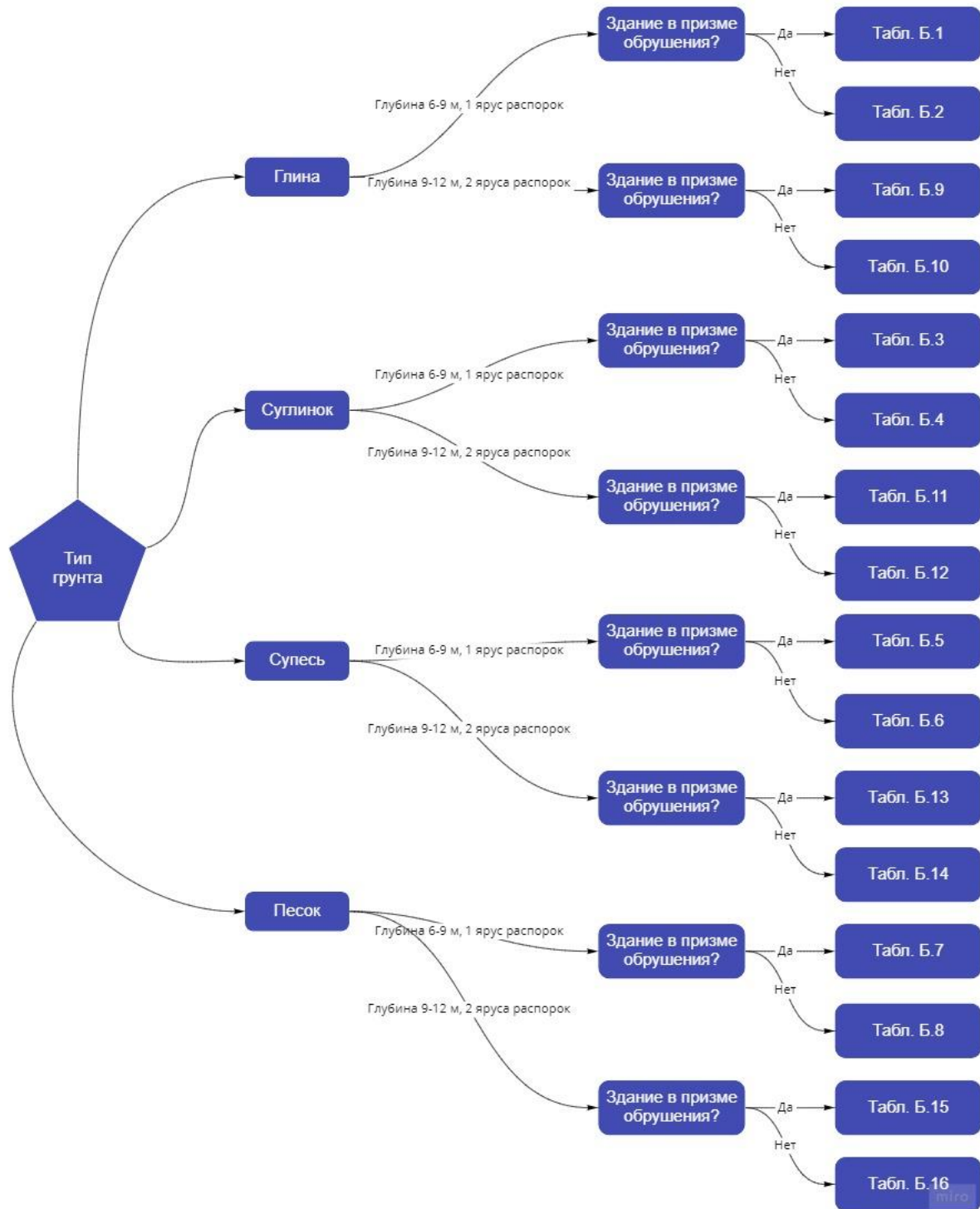


Рисунок 6.6. – Блок-схема для нахождения коэффициентов регрессии для определения дополнительных горизонтальных смещений верха ограждения котлована

#### 6.4. Определение дополнительных деформаций инженерных коммуникаций

Устройство котлованов в условиях плотной застройки неизбежно сопровождается наличием большого количества инженерных коммуникаций,

расположенных в массиве грунта, при этом зачастую на разных глубинах и в нерегулярных направлениях. Для оценки допустимости влияния нового строительства на существующие коммуникации в зависимости от их конструкции, материала, типа стыков и назначения разработаны методики, которые подразумевают определение дополнительных перемещений исследуемых коммуникаций в разных направлениях [63].

Для оценки влияния на существующие коммуникации на предварительной стадии проектирования были получены уравнения для определения перемещения точек внутри массива грунта в пределах призмы обрушения. При этом, как было показано в главе 3, в силу неоднородности изменения перемещений точек вдоль котлована, рекомендуется выполнять анализ в нескольких сечениях. Предлагается следующий алгоритм работы:

1. Определяется глубина заложения существующей коммуникации, по рисунку 4.1 выбирается ближайшая точка (или несколько точек, значения между ними определяются по линейной интерполяции);
2. По блок-схемам определяются коэффициенты уравнений регрессии для вычисления дополнительных вертикальных и горизонтальных перемещений в точках массива (см. рисунки 6.7 и 6.8);
3. На геоподоснове наносятся изолинии перемещений точек грунта (см. рисунок 6.9);
4. Выявляются места пересечения коммуникации с изолиниями;
5. Производится расчет коммуникации на дополнительные перемещения как балки с фактической жесткостью.

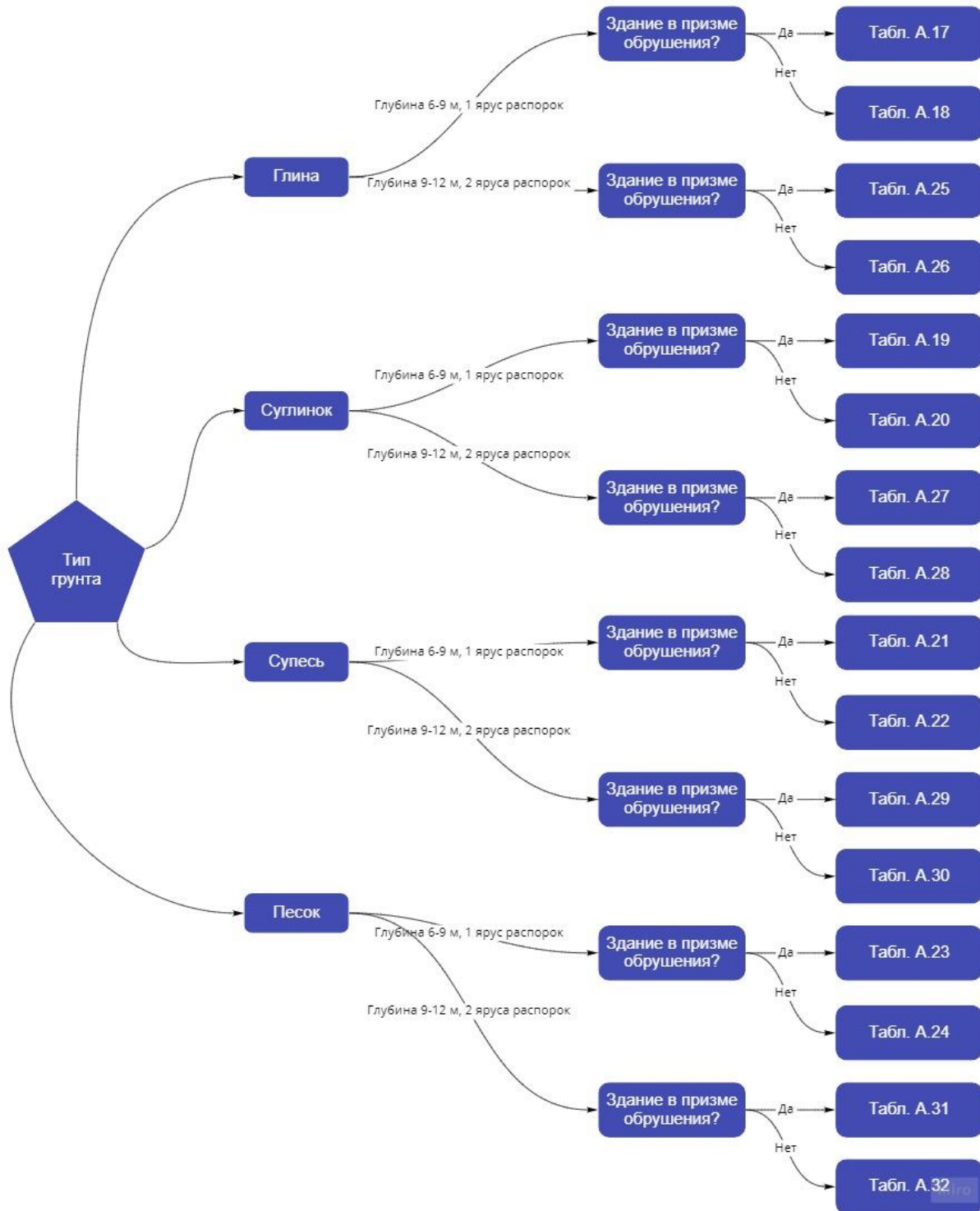


Рисунок 6.7. – Блок-схема для нахождения коэффициентов регрессии для определения дополнительных вертикальных перемещений при расчете подземных коммуникаций

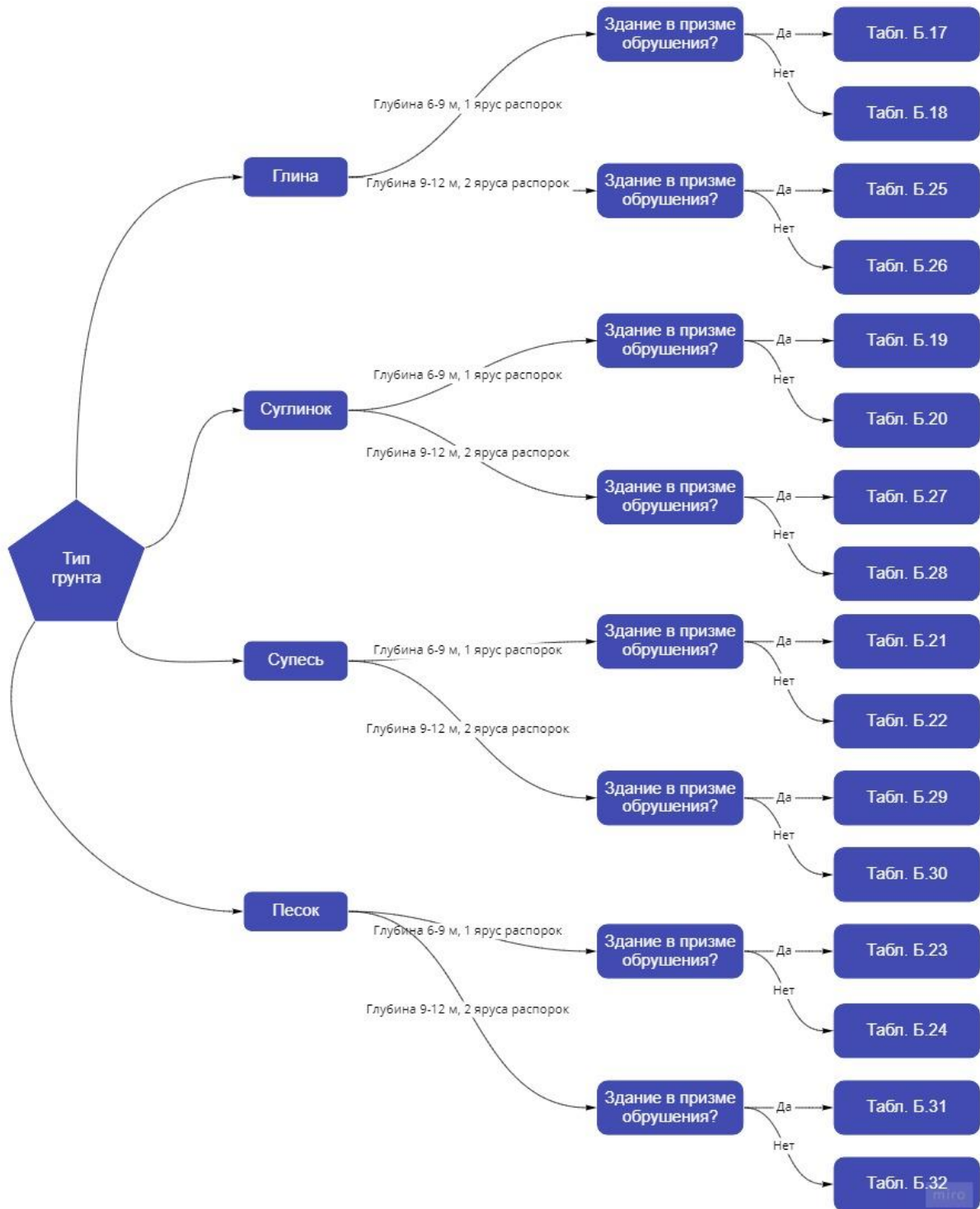


Рисунок 6.8. – Блок-схема для нахождения коэффициентов регрессии для определения дополнительных горизонтальных перемещений при расчете подземных коммуникаций

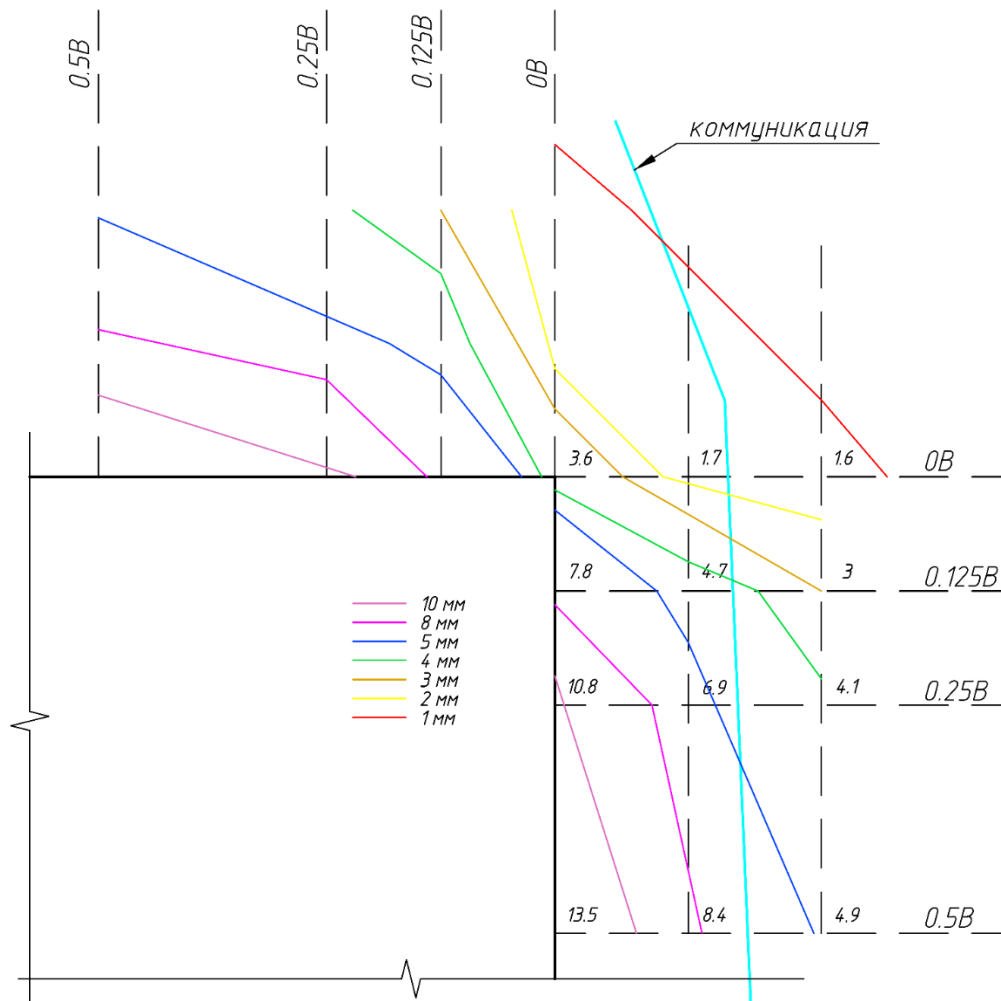


Рисунок 6.9. – Изолинии вертикальных перемещений в массиве грунта

Действующей нормативной документацией [63] предписывается учитывать жесткость сооружений окружающей застройки, в том числе инженерных коммуникаций, при выполнении оценки влияния строительства. Учет может выполняться как в 1 стадию посредством прямого моделирования существующей коммуникации в массиве грунта, так и в 2 стадии, при которой в геотехническом комплексе определяются перемещения точек массива грунта, а затем выполняется расчет коммуникации на заданные перемещения с учетом ее жесткости. Однако, ввиду низкой жесткости инженерных коммуникаций в связи с их протяженностью, возникает вопрос целесообразности введения конструкций коммуникаций в расчетную модель. Для решения этой задачи были рассмотрены расчетные случаи с расположением подземной инженерной коммуникации вдоль котлована прямоугольной формы при различных диаметрах этих коммуникаций.

Проведенная серия расчетов показала, что жесткость коммуникации начинает сказываться при достижении ей диаметра в 1000 мм и более, что позволяет сделать вывод необходимости введения конструкции коммуникации в схему только при превышении указанного диаметра. Результаты определения дополнительных перемещений инженерных коммуникаций при разных диаметрах поперечного сечения приведены на рисунках 6.10-6.12 (грунтовый массив условно не показан).

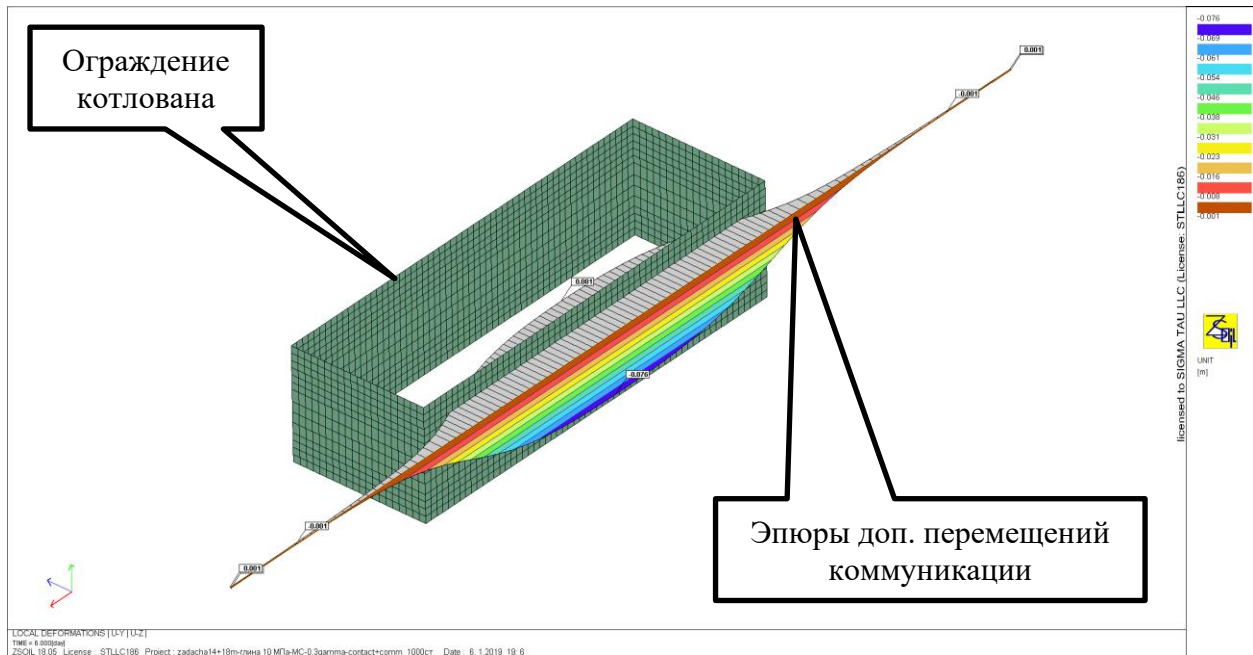


Рисунок 6.10. – Эпюры дополнительных вертикальных (цветом) и горизонтальных (серым) деформаций инженерной коммуникации диаметром 1000 мм



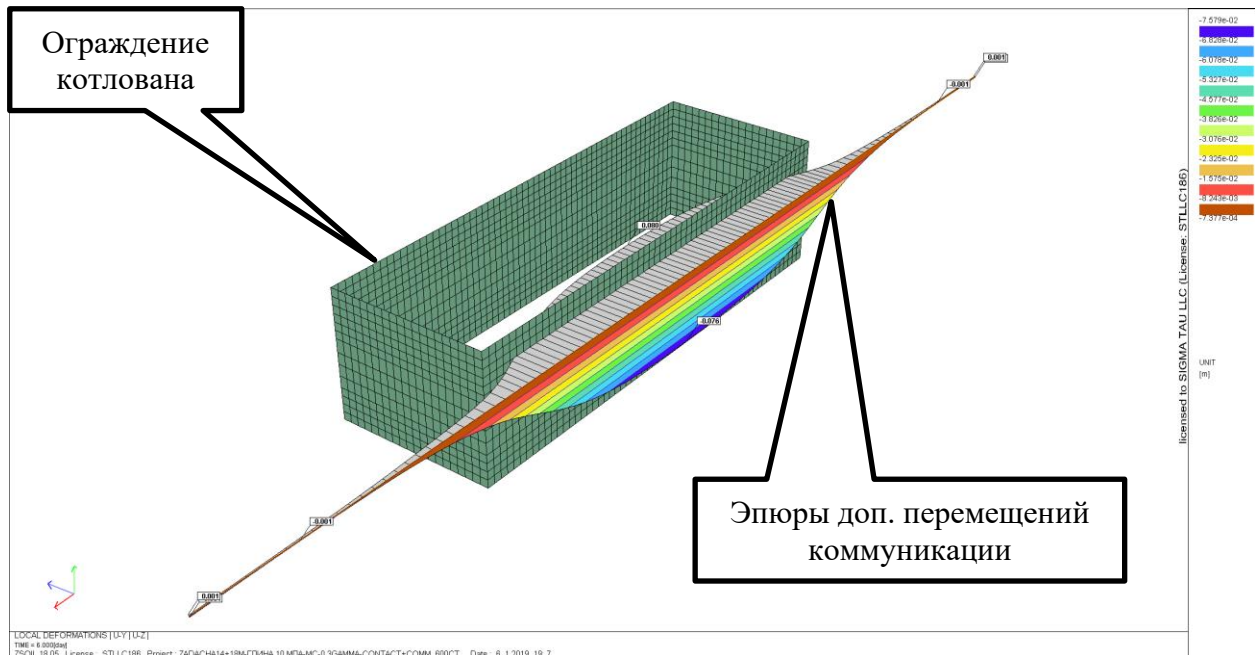


Рисунок 6.11. – Эпюры дополнительных вертикальных (цветом) и горизонтальных (серым) деформаций инженерной коммуникации диаметром 600 мм

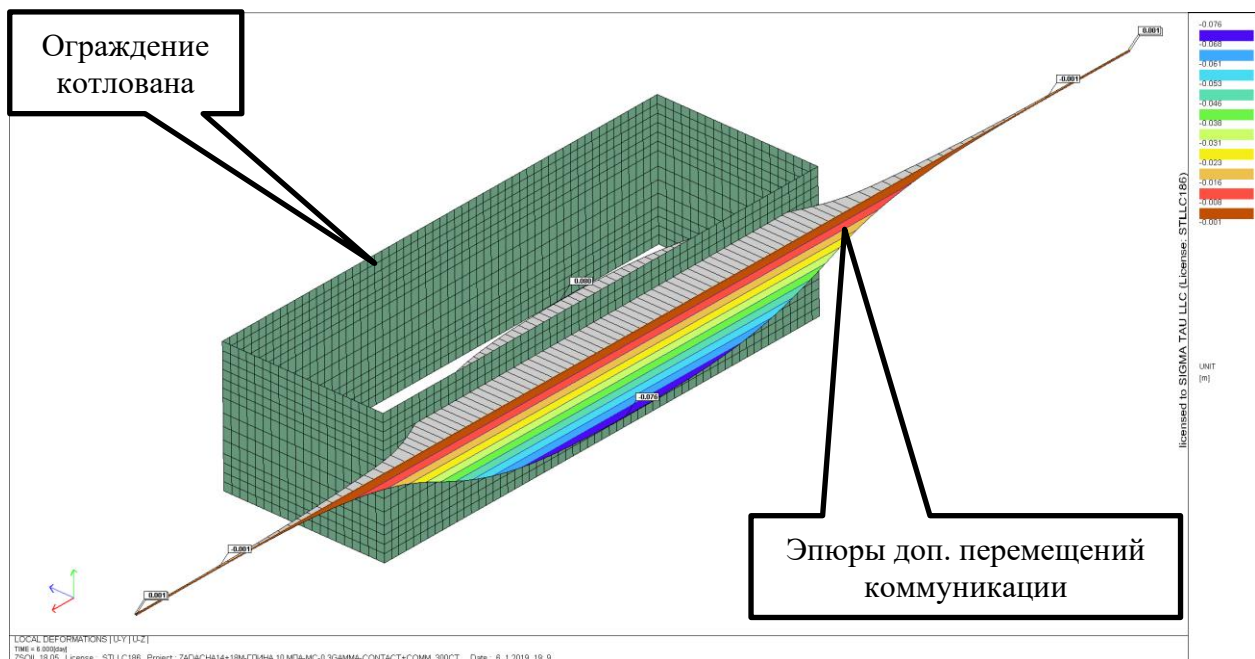


Рисунок 6.12. – Эпюры дополнительных вертикальных (цветом) и горизонтальных (серым) деформаций инженерной коммуникации диаметром 300 мм

### Выводы по главе 6

1. Разработан метод определения перемещения точек грунтового массива и дополнительных осадок зданий в окрестностях разрабатываемого котлована с



помощью уравнений регрессии, полученных на основании расчётов МКЭ, выполненных в трёхмерной постановке.

2. Результаты расчётов с использованием уравнений регрессии сравнивались с результатами численного моделирования и геотехнического мониторинга. Сравнение показало сходимость результатов со средней точностью 15 – 25%, что соответствует требуемой инженерной точности расчётов на стадии предварительного проектирования разработки котлована.
3. Использование предлагаемых уравнений регрессии, основанных на численном моделировании в трёхмерной постановке и методе планирования эксперимента, позволяет оценить влияние разработки котлованов на прилегающий грунтовый массив и окружающую котлован застройку, учитывая виды грунта, глубину котлована и месторасположение, по отношению к нему, зданий и сооружений окружающей застройки.
4. Возможность определения с помощью предлагаемых уравнений регрессии перемещений точек, прилегающего к котловану массива, позволяет также оценить влияние разработки котлована на существующие подземные коммуникации.
5. Результаты исследования влияния сооружения котлована на инженерные коммуникации позволили прийти к заключению, что при диаметрах коммуникаций менее 1000 мм в расчётах можно не учитывать их жёсткость.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволили сделать следующие обобщённые выводы:

1. На основе анализа литературных источников и предварительных расчетов определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на перемещение точек грунтового массива на прилегающей к котловану территории. Собранный информация позволила более детально сформулировать цель и задачи выполненных исследований.
2. На основании решённой задачи Мелана предложен численно – аналитический метод оценки влияния устройства котлованов на окружающую городскую застройку. Напряжённо – деформированное состояние массива, определённое аналитическим путём, корректируется подбором жёсткости, ограждающей откосы котлована, конструкции. Алгоритм подбора базируется на результатах численного моделирования и метода планирования экспериментов. Такой подход позволяет оперативно оценить влияние котлована на НДС грунтового массива и выбрать приемлемый вариант ограждающей конструкции. Метод, как альтернативный, может быть использован на предварительной стадии проектировании устройства котлованов. Результаты аналитического решения сопоставлялись с результатами расчётов, выполненных с использованием метода конечных элементов, и показали сходимость в пределах 5 – 20%, что хорошо согласуется с принятой инженерной точностью расчётов.
3. Предложен метод оценки влияния котлована на осадки и горизонтальные перемещения точек земной поверхности прилегающей территории и вмещающего грунтового массива, основанный на совместном использовании МКЭ и метода планирования эксперимента. Указанная комбинация

позволила в условиях пространственной задачи получить зависимости в виде уравнений регрессии, связывающих искомые перемещения (функции отклика) с независимыми факторами, оказывающими наибольшее влияние на деформирование грунтового массива.

4. Исследовано влияние «углового эффекта» на дополнительные осадки поверхности земли и существующего сооружения, а также на дополнительные горизонтальные деформации ограждения котлована и массива грунта за его пределами. Определены сечения по ширине котлована, в которых исследуемые деформации изменяются наиболее интенсивно. Выявлены общие тенденции к нелинейному изменению перемещений в пределах призмы обрушения. Анализ, выполненный в главах 4 и 5 показывает, что призма обрушения грунта имеет сложную форму, ее габаритные размеры значительно уменьшаются при развитии «углового эффекта». Данный эффект требует дополнительного исследования.
5. Предложен метод расчета осадок здания, моделируемого в виде объема с приведенной изгибной жесткостью с использованием упруго-пластической модели Мора-Кулона, который можно рекомендовать к использованию, как менее трудоемкий, при оценке влияния строительства при условии допустимости прогнозируемых осадок.
6. Рассмотрен инженерный метод получения адекватного решения задачи по оценке влияния отрывки котлована на окружающую застройку с использованием идеальной упруго-пластической модели поведения грунта. Метод основан на понижении удельного веса изымаемого грунта на отношение модулей деформации по первичной ветви нагружения и на разгрузку, который может быть принят по табличным данным. Применяемый метод хорошо зарекомендовал себя на практике.
7. Предложен метод определения влияния котлована на перемещения точек прилегающего вмещающего массива, что, в свою очередь, позволяет оценить

его влияние на работу инженерных коммуникаций. Показано, что при выполнении расчетов по оценке указанного влияния на инженерные коммуникации диаметром до 1000 мм допускается применять «двухкомпонентные» расчетные схемы (проектируемое сооружение – грунтовый массив); для диаметров от 1000 мм следует применять «трехкомпонентные» расчетные схемы (проектируемое сооружение – грунтовый массив – инженерная коммуникация).

8. В табличной форме даны коэффициенты уравнений регрессии для определения дополнительных деформаций зданий окружающей застройки и точек массива грунта в пределах призмы обрушения, которые могут быть использованы на стадии технико-экономического обоснования проекта. Для пользования таблицами предлагается алгоритм, состоящий из комбинации блок-схем, для отыскания нужных коэффициентов в зависимости от комбинаций расчетных факторов, и уравнений, составляемых в программном комплексе MS Excel.
9. **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.** Направлением дальнейшего исследования темы является учет жесткости ограждения, «сложных» форм ограждения котлована, исследование размеров и характера изменения призмы обрушения грунта в условиях объемной постановки задачи с развитием «углового эффекта».

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Адлер, Ю.П. Введение в планирование эксперимента. / Ю.П. Адлер. - М.: Металлургия, 1968. - 155 с.
2. Амусин, Б.З. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики / Б.З. Амусин, А.Б. Фадеев. - М.: Недра, 1975.
3. Безухов Н.И. - Основы теории упругости, пластичности и ползучести. Изд. "Высшая школа", М. 1961, 537 с.
4. Босаков С.В. Изгиб стержня в упругом полупространстве с учетом разрыва сплошности упругого основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1986. – Вып.1. – С.21-23.
5. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Знаменский В.В., Мнушкин М.Г. Численное моделирование строительства зданий с фундаментами глубокого заложения в условиях плотной городской застройки// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 2. С. 170-179.
6. Вялов С.С. Геологические основы механики грунтов. Издательство "Высшая школа". 1978. 447 с.
7. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы. / Р. Галлагер. - М.: МИР, 1984.
8. Гарагаш Б.А. Надежность пространственных регулируемых систем «сооружение-основание» при неравномерных деформациях основания. – Сочи: Издательство «Кубанькино», 2004г;
9. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. – 627 с.
10. Горбунов-Посадов М.И., Огранович А.Б. Расчет фундаментной стенки на горизонтальную нагрузку с учетом разрыва сплошности основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1966. – Вып.3. – С.7-9.

11. Горбунов-Посадов М.И., Шехтер О.Я., Кофман В.А. Давление грунта на жесткий закругленный фундамент и свободные деформации котлована // Механика грунтов. – 1954. – Вып.24. – С.39-80.

12. Дидух Б.И., Иоселевич В.А. Смещения ограждающей стенки в процессе выемки котлована. – Основания, фундаменты и механика грунтов, 1996, №6.

13. Зарецкий Ю.К., Карабаев М.И. Оценка влияния проектируемого подземного перехода на осадки гостиницы «Москва». – СПб. Реконструкция исторических городов и геотехническое строительство. Труды международной конференции, 2003, т. 2.

14. Зенкевич, О. Метод конечных элементов и теории сооружений и в механике сплошных сред / О. Зенкевич, И. Чанг. - М.: Недра, 1974.

15. Зерцалов М.Г., Казаченко С.А. Численно-аналитический метод инженерной оценки влияния разработки котлована на перемещения прилегающего к нему грунтового массива с учётом жёсткости ограждающей конструкции // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2021. – Т. 27. – № 3. – С. 396-409.

16. Зерцалов М.Г., Конюхов Д.С. Основные подходы к формированию программы комплексного освоения подземного пространства Москвы. Труды Международной конференции по геотехнике «Развитие городов и геотехническое строительство». Санкт-Петербург, 16-19 июня 2008 г. Под ред. В.М. Улицкого. Том 4. – С.-Пб., Издательство «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2008. – с.511-514.

17. Зерцалов М.Г., Устинов Д.В., Конюхов Д.С., Меркин В.Е., Щекудов Е.В. Применение методов математического моделирования для оценки влияния строительства объектов городской инфраструктуры на сооружения метрополитена. – Труды Международной научно-технической конференции «Современная механизация работ при строительстве тоннелей и освоении подземного

пространства крупных городов». Москва, ВВЦ, 20 октября 2009 г. – М.: ООО «Метро и тоннели», 2009.

18. Зерцалов М.Г., Устинов Д.В., Королёв М.В., Скрылев Г.Е., Гутерман М.С. Моделирование реконструкции и нового строительства сооружений исторической застройки. – Вестник МГСУ, № 4, 2010, т. 4. – с. 85 – 87.

19. Зерцалов, М.Г. Научное обоснование проектов подземных сооружений на современном этапе / М.Г. Зерцалов, С.А. Юфин // Гидротехническое строительство, № 11.- М., 2000. - С. 17-21.

20. Зерцалов М.Г., Казаченко С.А., Конюхов Д.С. Исследование влияния разработки котлована на окружающую застройку // Вестник МГСУ. 2014. №6. С. 77-86.

21. Зерцалов М.Г., Казаченко С.А. «Учёт жесткости сооружений при оценке изменения НДС системы «сооружение – грунтовый массив» // Транспортное строительство. 2021. №2. С. 18-21.

22. Зерцалов М.Г., Казаченко С.А. Численно-аналитический метод инженерной оценки влияния разработки котлована на перемещения прилегающего к нему грунтового массива, с учётом жёсткости ограждающей конструкции // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: сборник трудов 11-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского. Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2021. С. 335-345.

23. Знаменский В.В., Чунюк Д.Ю. Опыт применения распорных и подкосных креплений ограждающих конструкций котлованов. – Геотехника, № 3, 2010. – с. 6-11.

24. Знаменский В.В., Чунюк Д.Ю., Морозов Е.Б. Устройство ограждающих систем котлованов в стесненных городских условиях // Москва.: Жилищное строительство №9, 2012г, с. 60-63;

25. Ильичев В.А., Знаменский В.В., Морозов Е.Б. Опыт устройства котлованов при возведении зданий и сооружений в стесненных условиях города Москвы. – Вестник МГСУ, №4-2, 2010. – с. 223-230.

26. Ильичёв 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/ СПбГАСУ. – СПб., 2010. – с. 33-37.

27. Ильичев В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Деформации существующих зданий при строительстве заглубленных сооружений. // Научное издание. НИИОСП им. Н.М. Герсеванова – 70 лет. – М.: Экономика, строительство, транспорт, 2001. – с. 253-263.

28. Ильичёв В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Прогноз деформаций зданий вблизи котлованов в условиях плотной городской застройки г. Москвы. – Основания, фундаменты и механика грунтов, № 4, 2004. – с.17-21.

29. Инструкция пользователя ZSoil.PC 2014 manual. Zace Services Ltd Report 1985-2014. Lausanne: Elmepress International;

30. Казаченко С.А., Зерцалов М.Г. Исследование влияния разработки котлована на окружающую застройку // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: Сборник трудов XV международной научно-технической конференции. Москва: Издательство МИСИ-МГСУ, 2012. С. 625-626.

31. Катценбах Р., Вейдле А., Рамм Х. Геотехнические основы моделирования совместной работы здания и основания для длительного повторного использования исторических фундаментов и конструкций. – Реконструкция городов и геотехническое строительство, № 7, 2003. – с.105-114.

32. Колыбин И.В. Подземные сооружения и котлованы в городских условиях – опыт последнего десятилетия. Труды юбилейной конференции, посвящённой РОМГГиФ. Российская геотехника – шаг в XI век. Москва, 15 – 16 марта 2007 г. Том I. – М.: РОМГГиФ, 2007, - с. 114-153.



33. Колыбин И.В. Уроки аварийных ситуаций при строительстве котлованов в городских условиях. Труды Международной конференции по геотехнике «Развитие городов и геотехническое строительство». Санкт-Петербург, 16-19 июня 2008 г. Под ред. В.М. Улицкого. Том 3. – С.-Пб., Издательство «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2008. – с.89-123.

34. Коновалов П.А., Основания и фундаменты реконструируемых зданий. ВНИИТПИ, 4-е издание. Москва, 2000 год.

35. Конюхов Д.С., Казаченко С.А. «Влияние выбора расчетной схемы на результаты геотехнических расчетов объектов метрополитена» // Транспортное строительство. 2017. №11. С. 8-10

36. Конюхов Д.С., Казаченко С.А. Влияние математической модели поведения грунта под нагрузкой на моделирование воздействия строительства метрополитена на окружающую застройку // Транспортное строительство. – 2017. – №10 – С.12-15;

37. Конюхов Д.С., Казаченко С.А. Анализ факторов, влияющих на сходимость результатов геотехнических расчётов с данными мониторинга // Тенденции, проблемы и перспективы развития подземного строительства в России: сборник трудов международного научно-технического форума. Санкт-Петербург: Рекламно-издательский центр Тоннельной ассоциации России, 2017. С. 14-27.

38. Леушин В.Ю., Шишкин В.Я., Карабаев М.И., Конюхов Д.С., Шмыков В.Е. Анализ деформаций в окружающей застройке при сооружении глубоких котлованов. - БСТ «Доступное и комфортное жильё», № 3, 2011. – с. 57-63.

39. Мозгачева О.А., Петрухин В.П., Разводовский Д.Е., Шулятьев О.А. Геотехнические аспекты реконструкции московского Манежа. - СПб.: Реконструкция городов и геотехническое строительство, 2006, № 10, стр. 222-232.

40. Морозов Е.Б., Знаменский В.В. Влияние устройства траншейной стены в грунте» на деформации рядом расположенного здания. – Вестник МГСУ, Спецвыпуск, № 1, 2009. – с. 505-508.

41. Нгуен Вьет Туан. Напряженно-деформированное состояние грунтов основания и бортов котлована с учетом пространственного фактора: дисс. Канд. Техн. наук – М.: МГСУ, 2006. - 197 с.
42. Никифорова Н.С. Закономерности деформирования оснований зданий вблизи глубоких котлованов и защитные мероприятия. Дисс... доктора техн. наук. – М.: МГУПС, 2008.
43. Никифорова Н.С. Прогноз деформаций зданий вблизи глубоких котлованов. – Вестник гражданских инженеров, № 2(3), 2005. – с. 38-43.
44. Никифорова Н.С., Внуков Д.А. Защита зданий вблизи глубоких котлованов и коммуникационных коллекторов геотехническими отсечными экранами. // Вестник МГСУ. 2011. № 5. С. 108.
45. Парамонов В.Н. Проблемы расчётной оценки влияния проектируемых зданий и сооружений на существующие подземные коммуникации в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. – Реконструкция городов и геотехническое строительство, № 7, 2003. – с. 193-200
46. Парамонов В.Н., Стеглянников Н.И Оценка взаимного влияния зданий и сооружений и подземных коммуникаций в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. //Труды международной конференции по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов». Москва, 7-10 июня 2010 г. Под редакцией В.П. Петрухина, В.М. Улицкого, И.В. Колыбина, М.Б. Лисюка, М.Л. Холмянского. Том 4. – Москва, ПИ «Геореконструкция», 2010. – с. 1525-1532.
47. Перминов Н.А., Ломбас С.В. Геомониторинг при инженерном освоении и эксплуатации подземного пространства мегаполиса. Труды Международной конференции по геотехнике «Развитие городов и геотехническое строительство». Санкт-Петербург, 16-19 июня 2008 г. Под ред. В.М. Улицкого. Том 4. – С.-Пб., Издательство «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2008. – с. 645-648.

48. Петренко Е. В. Освоение подземного пространства. - М.: Недра, 1988.- 150 с.
49. Петрухин В.П. Геотехнические проблемы строительства в Москве – крупнейшем мегаполисе России. //Труды международной конференции по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов». Москва, 7-10 июня 2010 г. Под редакцией В.П. Петрухина, В.М. Улицкого, И.В. Колыбина, М.Б. Лисюка, М.Л. Холмянского. Том 1. – Москва, ПИ «Геореконструкция», 2010. – с. 259-320.
50. Петрухин В.П., Колыбин И.В., Разводовский Д.Е. Ограждающие конструкции котлованов, методы строительства подземных и заглубленных сооружений // НИИОСП. Режим доступа: <http://www.ecsrf.com>. Дата обращения: 02.04.14;
51. Петрухин В.П., Шулятьев О.А. Геотехнические особенности строительства московского международного делового центра (ММДЦ) «Москва-Сити». Труды Международной конференции по геотехнике «Развитие городов и геотехническое строительство». Санкт-Петербург, 16-19 июня 2008 г. Под ред. В.М. Улицкого. Том 3. – С.-Пб., Издательство «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2008. – с. 29-65.
52. Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Мозгачева О.А. Опыт проектирования и мониторинга подземной части Турецкого торгового центра. - М.: Основания, фундаменты и механика грунтов, 2004, № 5, с. 2-8.
53. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений к СНиП 2.02.01-83;
54. Поспехов В.С. Исследование углового эффекта конструкции ограждения котлована. – Вестник ПНИПУ, №2, 2014. – с. 238-248.
55. Рассказов Л.Н. Напряженно-деформированное состояние и устойчивость каменно-земляных плотин: Дисс. ... доктора техн. наук: - Москва, 1977. - 477 с.

56. Речицкий В.В. Прогнозирование деформаций дневной поверхности при проходке туннелей. Автореферат дисс. канд. техн. наук. – М.: МГСУ, 2005. – 24 с.
57. Руководство по проектированию зданий и сооружений на подрабатываемых территориях. Часть II Промышленные и гражданские здания, М. 1986.
58. Сапин Д.А. Дополнительные технологические осадки фундаментов зданий соседней застройки при устройстве траншейной «стены в грунте»: дисс. Канд. Техн. наук – С.-Пб.: СПбГАСУ, 2016. - 177 с.
59. Семенюк-Ситников В.В. Количественная оценка влияния устройства глубокого котлована на близлежащие здания в стесненных условиях городской застройки. Дисс. Канд. техн. наук. – М.: МГСУ, 2005.
60. Симагин В.Г. Проектирование и устройство фундаментов вблизи существующих сооружений в условиях плотной застройки. Изд. АСВ, М. 2010, 126 стр.
61. СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений»;
62. СП 248.1325800.2016 «Сооружения подземные. Правила проектирования»;
63. СП 249.1325800.2016. «Коммуникации подземные»;
64. Степаненко, С.В. Прогноз деформаций грунтового массива при строительстве полузаглубленных подземных сооружений способом «стена в грунте»: дисс. Канд. Техн. наук – С.-Пб.: СПбГУ, 2015. - 141 с.
65. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. Изд. АСВ, М. 2009, 550 стр.
66. Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В., Тер-Мартirosян З.Г., Чернышев С.Н. - Механика грунтов, основания и фундаменты. Изд. "Высшая школа", М. 2007, 566 стр.

67. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. - М.: Недра, 1987.-224с.
68. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа. 1979.
69. Шарафутдинов, Р.Ф. Совершенствование методов прогноза деформаций земной поверхности при щитовой проходке тоннелей для подземных коммуникаций: дисс. Канд. Техн. наук – М.: МГСУ, 2013. - 165 с.
70. Шулятьев О.А., Мозгачева О.А., Поспехов В.С. Освоение подземного пространства городов: Научное издание. - М.: Издательство АСВ, 2017. - 510с.
71. Bowles, J.E. (1988), *Foundation Analysis and Design*, 4<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
72. Chew S.H., Yong K.Y., Lim A.Y.K. (1997). Three-dimensional finite element analysis of a strutted excavation. *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Vol. 3, pp. 1915-1920;
73. Clough, G.W. and O'Rourke, T.D. (1990), Construction-induced movements of in situ walls, *Design and Performance of Earth Retaining Structures*, ASCE Special Publication, No. 25, pp. 439-470.
74. Franzius, J.N., Potts, D.M., Addenbrooke, T.I., and Burland, J.B. (2004), The influence of building weight on tunneling-Induced ground and building deformation, *Soils and foundations*, Vol. 44, No. 1, pp. 25-38.
75. Gouw, Tjie-Liong. (2014) Common Mistakes on the Application of Plaxis 2D in Analyzing Excavation Problems, *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 9, No. 21, pp. 8291-8311.
76. Melan E. Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft im Innern beanspruchten Halbscheibe // *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. – 1932. – Vol.12. – No.6. – Pp.343-346.
77. Meyerhof G.G. The settlement analysis of building frames // *The Structural Engineering*. — 1947. — Vol. 25. — P.369-409

78. Ou, C.Y., Deep Excavation. Theory and Practice. – 2006.
79. Ou, C.Y., Chiou, D.C, Wu, T.S (1996) *Three-dimensional finite element analysis of deep excavations*, Journal of geotechnical engineering, Vol. 122, pp. 337-345;
80. Ou, C.Y., Hsieh, P.G., and Duan, S.M. (2005), A simplified Method to Estimate the Ground Surface Settlement Induced by Deep Excavation, Geotechnical Research Report No. GT200502, Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology.
81. Ou, C.Y., Liao, J.T., and Cheng, W.L. (2000), Building response and ground movements induced by a deep excavation, Geotechnique, Vol. 50, No. 3, pp. 20-220.
82. Peck, R.B. (1969) Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics, Geotechnique, Vol. 19, No. 2, pp. 171-187.
83. Rowe, R.K, Mabrouk, A. (2007) *Three-dimensional finite element analysis of deep excavations*, OttawaGeo, pp. 1142-1147;
84. Sugimoto, T. (1986) *Prediction for the Maximum Settlements of Ground Surface by Open Cut* // Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, 1986. № 373. VI-5.
85. Sugimoto, T. and Sasaki, S. (1987) *Relationship between the maximum movements of walls and the maximum settlements of ground surface* // Proceedings of the 22nd annual meeting of J SSMFE, pp.1261-1262.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А. Коэффициенты уравнений регрессии для вертикальных перемещений

Таблица А.1. – Участок 1, здание в призме, глина

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	12,39
b <sub>1</sub>	8,25
b <sub>2</sub>	-10,58
b <sub>3</sub>	-11,03
b <sub>4</sub>	-8,12
b <sub>5</sub>	-0,37
b <sub>6</sub>	5,23
b <sub>7</sub>	4,33
b <sub>8</sub>	-2,82
b <sub>9</sub>	-5,43
b <sub>10</sub>	-4,02
b <sub>11</sub>	-4,53
b <sub>12</sub>	6,28
b <sub>13</sub>	5,74
b <sub>14</sub>	5,51

Таблица А.2. – Участок 1, здание за призмой, глина

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	4,94
b <sub>1</sub>	2,89
b <sub>2</sub>	-2,56
b <sub>3</sub>	-2,89
b <sub>4</sub>	-1,89
b <sub>5</sub>	-1,59
b <sub>6</sub>	-1,61
b <sub>7</sub>	-1,09
b <sub>8</sub>	1,74
b <sub>9</sub>	0,99
b <sub>10</sub>	1,29

Таблица А.3. – Участок 1, здание в призме, суглинок

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	15,40
b <sub>1</sub>	4,99
b <sub>2</sub>	-5,87
b <sub>3</sub>	-9,65
b <sub>4</sub>	-7,32
b <sub>5</sub>	-0,77
b <sub>6</sub>	2,08
b <sub>7</sub>	3,58
b <sub>8</sub>	-3,42
b <sub>9</sub>	-1,63
b <sub>10</sub>	-0,80
b <sub>11</sub>	-1,66
b <sub>12</sub>	2,60
b <sub>13</sub>	2,56
b <sub>14</sub>	4,11

Таблица А.4. – Участок 1, здание за призмой, суглинок

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	5,09
b <sub>1</sub>	3,11
b <sub>2</sub>	-2,43
b <sub>3</sub>	-2,48
b <sub>4</sub>	-1,58
b <sub>5</sub>	-1,32
b <sub>6</sub>	-0,99
b <sub>7</sub>	-0,77
b <sub>8</sub>	0,79
b <sub>9</sub>	0,67
b <sub>10</sub>	1,82



Таблица А.5. – Участок 1, здание в призме, супесь

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	12,42
b <sub>1</sub>	3,63
b <sub>2</sub>	-6,49
b <sub>3</sub>	-8,50
b <sub>4</sub>	-6,68
b <sub>5</sub>	-0,10
b <sub>6</sub>	2,25
b <sub>7</sub>	3,20
b <sub>8</sub>	-2,55
b <sub>9</sub>	-2,25
b <sub>10</sub>	-0,23
b <sub>11</sub>	-1,10
b <sub>12</sub>	2,36
b <sub>13</sub>	2,36
b <sub>14</sub>	3,56

Таблица А.6. – Участок 1, здание за призмой, супесь

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	4,48
b <sub>1</sub>	2,37
b <sub>2</sub>	-2,66
b <sub>3</sub>	-2,54
b <sub>4</sub>	-1,97
b <sub>5</sub>	-1,39
b <sub>6</sub>	-0,93
b <sub>7</sub>	-1,11
b <sub>8</sub>	1,44
b <sub>9</sub>	0,97
b <sub>10</sub>	1,43

Таблица А.7. – Участок 1, здание в призме, песок

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	14,61
b <sub>1</sub>	4,28
b <sub>2</sub>	-6,89
b <sub>3</sub>	-8,13
b <sub>4</sub>	-7,12
b <sub>5</sub>	-1,03
b <sub>6</sub>	4,22
b <sub>7</sub>	2,17
b <sub>8</sub>	-3,58
b <sub>9</sub>	-2,37
b <sub>10</sub>	-0,07
b <sub>11</sub>	-1,49
b <sub>12</sub>	2,39
b <sub>13</sub>	2,99
b <sub>14</sub>	3,34

Таблица А.8. – Участок 1, здание за призмой, песок

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	5,29
b <sub>1</sub>	2,81
b <sub>2</sub>	-2,94
b <sub>3</sub>	-3,24
b <sub>4</sub>	-2,34
b <sub>5</sub>	-1,46
b <sub>6</sub>	-1,34
b <sub>7</sub>	-1,26
b <sub>8</sub>	1,66
b <sub>9</sub>	1,39
b <sub>10</sub>	1,71

Таблица А.9. – Участок 2, здание в призме, глина

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	18,71
b <sub>1</sub>	5,52
b <sub>2</sub>	-11,74
b <sub>3</sub>	-14,69
b <sub>4</sub>	-7,80
b <sub>5</sub>	-2,25
b <sub>6</sub>	5,35
b <sub>7</sub>	6,45
b <sub>8</sub>	-2,35
b <sub>9</sub>	-1,58
b <sub>10</sub>	-1,40
b <sub>11</sub>	-0,50
b <sub>12</sub>	5,45
b <sub>13</sub>	4,33
b <sub>14</sub>	4,50

Таблица А.10. – Участок 2, здание за призмой, глина

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	8,56
b <sub>1</sub>	3,31
b <sub>2</sub>	-4,33
b <sub>3</sub>	-3,15
b <sub>4</sub>	-2,55
b <sub>5</sub>	-1,70
b <sub>6</sub>	-0,80
b <sub>7</sub>	-0,65
b <sub>8</sub>	1,81
b <sub>9</sub>	1,49
b <sub>10</sub>	1,16

Таблица А.11. – Участок 2, здание в призме, суглинок

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	15,83
b <sub>1</sub>	2,86
b <sub>2</sub>	-7,39
b <sub>3</sub>	-13,02
b <sub>4</sub>	-7,80
b <sub>5</sub>	-5,76
b <sub>6</sub>	6,04
b <sub>7</sub>	6,89
b <sub>8</sub>	-0,01
b <sub>9</sub>	-1,00
b <sub>10</sub>	-0,24
b <sub>11</sub>	0,11
b <sub>12</sub>	3,36
b <sub>13</sub>	2,56
b <sub>14</sub>	4,68

Таблица А.12. – Участок 2, здание за призмой, суглинок

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	16,41
b <sub>1</sub>	2,54
b <sub>2</sub>	-5,57
b <sub>3</sub>	-11,44
b <sub>4</sub>	-11,02
b <sub>5</sub>	-0,88
b <sub>6</sub>	-0,36
b <sub>7</sub>	-0,23
b <sub>8</sub>	3,13
b <sub>9</sub>	3,23
b <sub>10</sub>	9,81

Таблица А.13. – Участок 2, здание в призме, супесь

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	14,38
b <sub>1</sub>	2,19
b <sub>2</sub>	-7,72
b <sub>3</sub>	-10,61
b <sub>4</sub>	-6,15
b <sub>5</sub>	-2,31
b <sub>6</sub>	2,19
b <sub>7</sub>	4,04
b <sub>8</sub>	0,29
b <sub>9</sub>	-0,89
b <sub>10</sub>	0,03
b <sub>11</sub>	0,52
b <sub>12</sub>	3,62
b <sub>13</sub>	2,11
b <sub>14</sub>	3,81

Таблица А.14. – Участок 2, здание за призмой, супесь

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	6,31
b <sub>1</sub>	1,86
b <sub>2</sub>	-3,13
b <sub>3</sub>	-2,03
b <sub>4</sub>	-1,62
b <sub>5</sub>	-0,81
b <sub>6</sub>	-0,36
b <sub>7</sub>	-0,07
b <sub>8</sub>	1,03
b <sub>9</sub>	0,67
b <sub>10</sub>	0,74

Таблица А.15. – Участок 2, здание в призме, песок

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	2,40
b <sub>1</sub>	2,55
b <sub>2</sub>	-7,97
b <sub>3</sub>	-9,64
b <sub>4</sub>	-6,63
b <sub>5</sub>	3,02
b <sub>6</sub>	3,72
b <sub>7</sub>	2,32
b <sub>8</sub>	8,67
b <sub>9</sub>	-1,36
b <sub>10</sub>	0,08
b <sub>11</sub>	0,51
b <sub>12</sub>	3,73
b <sub>13</sub>	2,41
b <sub>14</sub>	3,74

Таблица А.16. – Участок 2, здание за призмой, песок

Коэффициент	Осадка сооружения
b <sub>0</sub>	7,01
b <sub>1</sub>	2,21
b <sub>2</sub>	-3,59
b <sub>3</sub>	-2,58
b <sub>4</sub>	-1,85
b <sub>5</sub>	-1,16
b <sub>6</sub>	-0,53
b <sub>7</sub>	-0,18
b <sub>8</sub>	1,30
b <sub>9</sub>	0,83
b <sub>10</sub>	0,99

Таблица А.17. – Участок 1, здание в призме, глина

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	20,77	12,16	7,28	23,09	11,95	7,12	16,06	8,25	6,08
b <sub>1</sub>	9,5	7,42	4,44	10,35	7,24	4,46	8,5	5,32	3,56
b <sub>2</sub>	-14,39	-10,52	-6,58	-14,98	-10,29	-6,37	-13,43	-8,12	-5,2
b <sub>3</sub>	-4,93	-4,63	-3,05	-4,68	-4,66	-3,11	-4,44	-3,45	-2,5
b <sub>4</sub>	-9,86	-8,05	-4,97	-10,47	-7,98	-4,84	-9,19	-5,69	-3,8
b <sub>5</sub>	-1,61	-0,18	-0,15	-1,88	-0,67	-0,23	-1,54	-0,52	-0,39
b <sub>6</sub>	8,49	5,57	3,7	9,22	5,58	3,67	8,66	4,88	2,91
b <sub>7</sub>	0,74	2,32	0,8	0,12	2,43	0,72	0,11	1,08	0,71
b <sub>8</sub>	-4,56	-2,53	-1,15	-5,38	-2,52	-1,13	-3,64	-1,32	-0,84
b <sub>9</sub>	-6,34	-5,22	-3,34	-6,58	-5,15	-3,38	-6,29	-4,22	-2,68
b <sub>10</sub>	-2,45	-2,27	-1,71	-2,06	-2,14	-1,57	-1,99	-1,79	-1,33
b <sub>11</sub>	-4,66	-4,51	-2,79	-5,28	-4,64	-2,89	-5,18	-3,44	-2,25
b <sub>12</sub>	2,93	3,09	2,49	2,54	3,26	2,56	3,08	2,68	2,1
b <sub>13</sub>	7,01	5,78	3,81	7,2	5,71	3,71	7,09	4,56	2,93
b <sub>14</sub>	3,75	2,98	2,24	3,24	2,98	2,32	3,42	2,58	1,93

Таблица А.18. – Участок 1, здание за призмой, глина

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	16,72	11,00	6,45	18,33	11,01	6,07	12,10	7,35	5,42
b <sub>1</sub>	6,67	4,89	2,71	7,83	4,85	2,69	6,17	3,41	2,16
b <sub>2</sub>	-11,09	-7,40	-4,11	-12,06	-7,08	-3,73	-10,05	-5,47	-3,09
b <sub>3</sub>	-0,62	-0,67	-0,19	-0,66	-0,54	-0,28	-0,61	-0,29	-0,18
b <sub>4</sub>	-6,16	-4,99	-2,86	-7,14	-4,99	-2,69	-5,75	-3,25	-2,04
b <sub>5</sub>	-1,20	-1,12	-0,61	-1,37	-1,63	-0,73	-1,12	-0,92	-0,78
b <sub>6</sub>	6,75	5,43	2,79	7,73	5,62	2,57	6,98	4,13	2,07
b <sub>7</sub>	-0,25	-0,82	-0,56	-0,47	-0,63	-0,33	-0,47	-0,57	-0,28
b <sub>8</sub>	-3,80	-2,57	-1,01	-4,42	-2,93	-1,03	-2,97	-1,52	-0,83
b <sub>9</sub>	-3,98	-2,98	-1,61	-4,49	-2,93	-1,58	-4,13	-2,28	-1,21
b <sub>10</sub>	-0,53	-0,50	-0,16	-0,56	-0,48	-0,34	-0,47	-0,29	-0,21
b <sub>11</sub>	-1,84	-2,11	-1,03	-2,94	-2,34	-1,14	-2,78	-1,43	-0,81
b <sub>12</sub>	0,37	0,39	0,16	0,36	0,31	0,24	0,34	0,20	0,16
b <sub>13</sub>	3,98	3,18	1,76	4,49	3,08	1,59	3,98	2,19	1,18
b <sub>14</sub>	0,23	0,40	0,11	0,33	0,32	0,08	0,29	0,13	0,03

Таблица А.19. – Участок 1, здание в призме, суглинок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	25,76	15,42	8,70	27,74	15,32	8,51	23,08	11,51	7,01
b <sub>1</sub>	5,05	4,11	2,55	5,72	3,73	2,34	4,30	2,82	2,19
b <sub>2</sub>	-7,86	-6,18	-4,30	-7,86	-6,00	-3,95	-6,53	-4,78	-3,72
b <sub>3</sub>	-3,44	-2,95	-1,84	-3,22	-3,01	-1,69	-2,70	-1,65	-1,27
b <sub>4</sub>	-10,05	-6,91	-3,95	-10,66	-6,82	-3,59	-10,04	-4,50	-2,81
b <sub>5</sub>	-1,19	-0,80	-0,52	-0,98	-1,09	-0,72	-1,11	-1,03	-0,72
b <sub>6</sub>	2,91	2,20	2,13	2,62	2,11	2,08	1,49	1,67	1,73
b <sub>7</sub>	0,46	2,20	0,33	0,22	1,66	0,18	0,84	0,42	0,28
b <sub>8</sub>	-5,84	-3,70	-1,57	-6,58	-3,49	-1,62	-6,16	-2,48	-1,27
b <sub>9</sub>	-1,06	-1,43	-1,18	-1,18	-1,38	-1,00	-0,47	-0,32	-0,74
b <sub>10</sub>	-0,41	-0,16	-0,05	-0,13	-0,05	0,31	0,43	-0,24	-0,13
b <sub>11</sub>	-1,56	-1,63	-0,94	-2,17	-1,61	-0,73	-2,41	-1,32	-0,88
b <sub>12</sub>	0,78	1,09	0,94	0,77	1,23	0,78	0,62	1,18	1,04
b <sub>13</sub>	3,58	2,99	1,93	3,76	3,01	1,64	4,11	2,48	1,69
b <sub>14</sub>	1,58	1,24	0,80	1,13	1,21	0,60	1,41	0,33	0,33

Таблица А.20. – Участок 1, здание за призмой, суглинок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	21,47	13,63	7,79	24,10	13,36	7,29	20,22	9,90	6,11
b <sub>1</sub>	4,03	3,58	2,27	4,92	3,42	2,27	4,11	2,35	1,83
b <sub>2</sub>	-6,64	-4,80	-3,10	-6,81	-4,58	-2,84	-5,54	-3,34	-2,42
b <sub>3</sub>	-1,11	-0,77	-0,47	-1,17	-0,61	-0,48	-1,07	-0,47	-0,42
b <sub>4</sub>	-7,96	-5,44	-3,02	-9,02	-5,44	-2,90	-8,15	-3,97	-2,37
b <sub>5</sub>	-1,60	-0,70	-0,70	-1,88	-0,73	-0,80	-2,30	-1,01	-0,77
b <sub>6</sub>	3,40	2,15	0,40	3,77	1,82	0,45	3,75	1,94	0,68
b <sub>7</sub>	-0,40	-0,65	0,55	-0,68	-0,53	0,60	-0,80	-0,51	0,43
b <sub>8</sub>	-5,30	-2,90	-1,35	-6,68	-3,13	-1,40	-6,45	-2,31	-1,17
b <sub>9</sub>	-0,10	-0,71	-0,77	-0,18	-0,73	-0,84	-0,02	-0,41	-0,72
b <sub>10</sub>	-0,59	-0,45	-0,28	-0,64	-0,38	-0,42	-0,54	-0,30	-0,29
b <sub>11</sub>	-1,38	-1,49	-0,86	-2,29	-1,61	-0,91	-2,48	-1,08	-0,71
b <sub>12</sub>	0,69	0,54	0,36	0,71	0,46	0,37	0,62	0,36	0,33
b <sub>13</sub>	3,10	2,40	1,43	3,66	2,45	1,36	3,63	1,76	1,09
b <sub>14</sub>	0,51	0,39	0,22	0,49	0,28	0,16	0,51	0,20	0,14



Таблица А.21. – Участок 1, здание в призме, супесь

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	18,73	12,55	8,09	19,73	12,27	7,68	15,97	8,66	6,45
b <sub>1</sub>	2,94	3,05	2,22	3,16	2,76	2,07	1,41	1,23	1,44
b <sub>2</sub>	-7,51	-6,59	-4,96	-7,50	-6,43	-4,76	-4,83	-4,55	-3,75
b <sub>3</sub>	-4,88	-3,62	-2,29	-4,71	-3,59	-2,15	-3,00	-2,29	-1,69
b <sub>4</sub>	-8,49	-6,46	-4,02	-9,05	-6,34	-3,86	-8,25	-4,56	-3,14
b <sub>5</sub>	-0,46	0,03	-0,25	-0,26	-0,09	0,16	-0,59	-0,27	-0,16
b <sub>6</sub>	2,94	2,28	1,90	2,89	2,26	1,96	1,81	1,78	1,39
b <sub>7</sub>	0,99	1,53	0,80	0,84	1,31	0,06	0,46	0,68	0,29
b <sub>8</sub>	-4,01	-2,57	-1,55	-4,76	-2,59	-1,34	-4,89	-1,72	-0,96
b <sub>9</sub>	-2,05	-2,09	-1,63	-2,05	-1,98	-1,53	-0,86	-1,01	-0,98
b <sub>10</sub>	-0,56	-0,19	-0,01	-0,26	-0,03	0,16	0,24	0,18	0,14
b <sub>11</sub>	-0,49	-1,21	-0,83	-1,13	-1,17	-0,81	-1,53	-0,62	-0,53
b <sub>12</sub>	1,33	1,17	0,88	1,28	1,16	0,88	0,66	0,69	0,63
b <sub>13</sub>	2,48	2,58	1,96	2,71	2,57	1,90	2,66	1,89	1,48
b <sub>14</sub>	1,96	1,46	0,90	1,43	1,34	0,84	1,38	0,71	0,58

Таблица А.22. – Участок 1, здание за призмой, супесь

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	14,07	9,78	5,32	15,20	9,74	5,03	4,85	6,59	4,35
b <sub>1</sub>	2,60	2,81	1,95	2,98	2,76	1,91	1,44	1,51	1,47
b <sub>2</sub>	-5,00	-4,59	-3,40	-5,00	-4,56	-3,26	-3,73	-3,42	-2,77
b <sub>3</sub>	-1,28	-1,03	-0,78	-1,39	-0,87	-0,73	-1,20	-0,70	-0,50
b <sub>4</sub>	-5,68	-4,53	-2,81	-6,88	-4,63	-2,75	-3,22	-3,41	-2,35
b <sub>5</sub>	4,51	1,95	0,53	4,38	1,69	0,26	0,44	1,60	0,20
b <sub>6</sub>	-0,24	1,25	1,43	0,08	1,44	1,41	1,59	1,05	1,15
b <sub>7</sub>	-1,59	-0,95	-0,27	-1,52	-1,01	-0,14	0,04	-0,80	-0,05
b <sub>8</sub>	-4,59	-2,80	-0,97	-5,72	-3,11	-0,94	-0,76	-2,25	-0,80
b <sub>9</sub>	-1,24	-1,58	-1,23	-1,35	-1,61	-1,23	-0,71	-0,98	-0,91
b <sub>10</sub>	-0,41	-0,37	-0,32	-0,51	-0,26	-0,37	0,16	-0,17	-0,15
b <sub>11</sub>	-0,14	-1,14	-0,81	-1,25	-1,30	-0,91	-0,38	-0,84	-0,70
b <sub>12</sub>	1,01	0,83	0,66	1,11	0,74	0,59	1,12	0,41	0,34
b <sub>13</sub>	1,59	1,96	1,44	2,20	2,05	1,43	1,96	1,66	1,21
b <sub>14</sub>	0,91	0,59	0,38	0,79	0,50	0,34	0,87	0,49	0,25

Таблица А.23. – Участок 1, здание в призме, песок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	19,49	14,57	9,62	20,80	14,35	9,38	17,72	10,27	7,09
b <sub>1</sub>	3,11	3,88	2,99	3,67	3,66	2,81	2,33	1,87	1,75
b <sub>2</sub>	-7,56	-7,16	-5,67	-7,69	-7,03	-5,43	-6,08	-5,10	-4,05
b <sub>3</sub>	-4,68	-3,51	-2,35	-4,31	-3,47	-2,29	-2,86	-2,21	-1,73
b <sub>4</sub>	-8,74	-7,22	-4,70	-8,71	-6,97	-4,39	-7,73	-4,62	-3,20
b <sub>5</sub>	-1,92	-1,25	-0,29	-2,04	-1,37	-0,49	-2,04	-1,48	-0,65
b <sub>6</sub>	6,03	4,50	3,21	6,51	4,43	3,11	5,91	3,92	2,40
b <sub>7</sub>	1,03	1,15	-0,09	-0,09	1,03	-0,14	-0,54	0,17	0,10
b <sub>8</sub>	-5,27	-3,35	-1,84	-5,39	-3,42	-1,84	-5,39	-2,33	-1,20
b <sub>9</sub>	-1,63	-2,20	-1,93	-1,93	-2,10	-1,85	-1,24	-1,33	-1,13
b <sub>10</sub>	-0,84	-0,34	-0,22	-0,30	-0,11	0,06	0,33	0,24	0,14
b <sub>11</sub>	-0,62	-1,69	-1,19	-1,08	-1,64	-1,18	-1,52	-0,76	-0,59
b <sub>12</sub>	1,41	1,25	1,09	1,36	1,28	1,08	0,99	0,84	0,77
b <sub>13</sub>	3,08	3,45	2,72	3,04	3,38	2,56	2,77	2,31	1,73
b <sub>14</sub>	1,94	1,49	0,93	1,61	1,44	0,90	1,64	0,88	0,66

Таблица А.24. – Участок 1, здание за призмой, песок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	12,63	9,47	6,41	13,16	9,28	5,90	11,46	6,53	4,84
b <sub>1</sub>	1,79	2,98	2,30	2,70	3,07	2,30	2,19	1,77	1,61
b <sub>2</sub>	-5,87	-5,56	-4,11	-5,99	-5,52	-3,86	-4,70	-4,05	-3,06
b <sub>3</sub>	-0,97	-0,97	-0,91	-1,10	-0,81	-0,88	-1,04	-0,64	-0,57
b <sub>4</sub>	-6,33	-5,28	-3,37	-6,66	-5,19	-3,12	-5,64	-3,48	-2,36
b <sub>5</sub>	0,30	0,86	-0,32	0,72	1,06	-0,26	0,47	0,26	-0,35
b <sub>6</sub>	2,25	1,96	1,73	2,07	1,86	1,54	1,52	1,51	1,20
b <sub>7</sub>	0,70	0,66	0,38	0,87	0,51	0,44	0,82	0,41	0,25
b <sub>8</sub>	-2,00	-1,69	-0,82	-2,28	-1,84	-0,81	-2,43	-0,94	-0,50
b <sub>9</sub>	-0,57	-1,49	-1,34	-1,09	-1,56	-1,38	-0,94	-1,04	-0,92
b <sub>10</sub>	-0,54	-0,54	-0,47	-0,64	-0,47	-0,59	-0,42	-0,32	-0,29
b <sub>11</sub>	-0,28	-1,49	-1,09	-1,21	-1,67	-1,20	-1,61	-0,96	-0,74
b <sub>12</sub>	0,42	0,42	0,47	0,46	0,31	0,48	0,51	0,31	0,26
b <sub>13</sub>	2,33	2,69	2,04	2,37	2,73	1,94	1,87	1,82	1,36
b <sub>14</sub>	0,56	0,52	0,44	0,49	0,37	0,40	0,52	0,29	0,21

Таблица А.25. – Участок 2, здание в призме, глина

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	32,51	18,51	10,09	36,49	17,76	9,73	25,47	13,01	8,56
b <sub>1</sub>	6,02	3,9	2,28	7,22	3,68	2,30	5,79	2,75	1,85
b <sub>2</sub>	-16,87	-11,84	-7,06	-18,33	-11,31	-6,52	-17,15	-8,95	-5,33
b <sub>3</sub>	-4,23	-3,27	-1,57	-3,49	-2,82	-1,66	-2,81	-1,68	-1,11
b <sub>4</sub>	-9,8	-7,23	-4,02	-11,02	-6,95	-3,76	-9,50	-4,75	-3,01
b <sub>5</sub>	-1,41	-2,29	-0,76	-2,20	-2,09	-0,65	-1,52	-1,33	-0,57
b <sub>6</sub>	6,84	5,51	4,04	7,95	5,71	3,75	8,23	4,67	2,88
b <sub>7</sub>	1,19	2,91	0,24	0,10	1,81	0,15	-0,77	0,57	0,23
b <sub>8</sub>	-4,46	-2,09	-0,71	-4,80	-1,94	-0,80	-2,27	-0,93	-0,62
b <sub>9</sub>	-0,89	-1,23	-0,96	-1,23	-1,22	-1,03	-1,88	-1,02	-0,69
b <sub>10</sub>	-0,72	-0,02	0,02	-0,21	0,12	0,23	0,01	0,11	0,14
b <sub>11</sub>	0,09	-0,17	-0,02	-0,12	-0,13	-0,11	-0,16	0,07	-0,07
b <sub>12</sub>	0,88	1,02	0,71	0,22	0,97	0,87	0,72	0,57	0,49
b <sub>13</sub>	5,92	4,42	2,57	6,88	4,37	2,33	7,53	3,31	1,81
b <sub>14</sub>	2,24	1,11	0,52	1,36	0,71	0,52	1,39	0,51	0,29

Таблица А.26. – Участок 2, здание за призмой, глина

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	25,11	14,51	8,09	29,32	14,08	7,46	20,01	10,05	6,89
b <sub>1</sub>	4,30	3,35	2,21	6,17	3,45	2,26	5,65	2,54	1,83
b <sub>2</sub>	-17,49	-12,32	-7,04	-20,29	-12,12	-6,28	-18,82	-9,66	-5,28
b <sub>3</sub>	2,37	2,43	1,27	3,52	3,07	1,25	2,97	1,82	0,90
b <sub>4</sub>	-4,13	-3,27	-1,85	-5,15	-3,34	-1,73	-4,28	-2,24	-1,42
b <sub>5</sub>	-1,62	-0,65	-0,01	-1,23	-0,52	0,02	0,94	-0,23	-0,25
b <sub>6</sub>	8,78	6,00	3,24	9,92	5,78	2,77	9,19	4,77	2,40
b <sub>7</sub>	2,03	2,15	0,94	1,72	2,33	1,22	-0,06	1,17	1,00
b <sub>8</sub>	-0,87	0,20	0,64	-1,33	0,33	0,57	-0,11	0,67	0,45
b <sub>9</sub>	-0,26	-1,09	-1,03	-1,17	-1,24	-1,10	-2,46	-0,94	-0,70
b <sub>10</sub>	-0,61	-0,41	-0,01	-0,31	-0,18	-0,19	-0,18	-0,21	-0,06
b <sub>11</sub>	0,28	-0,02	0,02	0,09	-0,07	-0,10	0,11	0,04	-0,09
b <sub>12</sub>	-1,92	-1,83	-0,97	-2,73	-2,22	-0,94	-2,85	-1,63	-0,68
b <sub>13</sub>	2,49	1,96	1,11	3,24	1,99	0,98	3,24	1,52	0,85
b <sub>14</sub>	3,94	3,27	1,88	5,06	3,33	1,74	4,33	2,28	1,49

Таблица А.27. – Участок 2, здание в призме, суглинок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	29,61	18,72	10,72	34,65	18,09	10,07	29,04	13,36	8,23
b <sub>1</sub>	2,73	2,62	1,92	3,55	2,47	1,63	2,50	1,42	1,31
b <sub>2</sub>	-9,05	-7,02	-4,95	-9,14	-7,07	-5,01	-6,39	-5,01	-4,45
b <sub>3</sub>	-5,17	-3,61	-2,05	-4,25	-3,25	-1,76	-2,72	-1,92	-1,35
b <sub>4</sub>	-10,59	-6,89	-3,57	-12,51	-7,40	-3,73	-12,69	-5,23	-3,10
b <sub>5</sub>	-0,65	-0,50	-0,83	-0,70	-0,57	-0,74	-0,83	-0,58	-0,50
b <sub>6</sub>	4,30	3,15	3,07	4,30	3,58	3,11	2,62	2,47	2,85
b <sub>7</sub>	1,25	1,45	-0,08	0,10	0,98	-0,09	-0,23	0,32	0,10
b <sub>8</sub>	-5,00	-2,80	-1,18	-6,85	-2,72	-1,09	-6,43	-1,63	-0,90
b <sub>9</sub>	-0,66	-1,11	-1,03	-0,66	-0,79	-0,74	0,37	-0,38	-0,64
b <sub>10</sub>	-0,68	0,39	0,41	-0,07	0,03	0,27	0,27	0,21	0,23
b <sub>11</sub>	0,82	0,05	-0,03	-0,04	-0,04	0,18	-0,72	0,31	0,20
b <sub>12</sub>	1,91	1,95	1,34	1,89	1,62	1,02	0,94	0,99	0,84
b <sub>13</sub>	3,31	2,41	1,31	3,99	2,79	1,53	5,03	1,91	1,26
b <sub>14</sub>	1,96	1,51	0,92	1,06	1,02	0,54	1,33	0,53	0,35

Таблица А.28. – Участок 2, здание за призмой, суглинок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	25,92	17,19	9,64	31,85	16,93	8,79	26,33	12,04	7,41
b <sub>1</sub>	1,68	2,59	1,89	2,87	2,37	1,64	2,49	1,53	1,37
b <sub>2</sub>	-6,84	-5,08	-3,56	-6,87	-5,19	-3,63	-5,24	-3,83	-3,30
b <sub>3</sub>	-1,20	-0,56	-0,31	-1,44	-0,66	-0,57	-1,03	-0,53	-0,46
b <sub>4</sub>	-8,18	-5,44	-2,82	-11,22	-6,23	-3,16	-10,94	-4,56	-2,71
b <sub>5</sub>	-1,25	-1,32	-0,85	-1,94	-1,21	-0,66	-1,61	-0,90	-0,42
b <sub>6</sub>	5,35	3,43	1,75	5,96	3,34	1,69	4,49	2,50	1,63
b <sub>7</sub>	-1,40	-0,72	0,20	-2,09	-0,66	0,44	-1,86	-0,45	0,33
b <sub>8</sub>	-5,35	-2,72	-1,35	-7,94	-3,06	-1,31	-6,76	-1,70	-0,97
b <sub>9</sub>	-0,23	-0,97	-1,04	-0,17	-0,74	-0,78	0,33	-0,41	-0,71
b <sub>10</sub>	-0,41	-0,54	-0,41	-0,63	-0,19	-0,25	-0,23	-0,14	-0,15
b <sub>11</sub>	1,03	-0,04	-0,13	-0,49	-0,09	0,04	-0,98	0,16	0,06
b <sub>12</sub>	0,68	0,23	0,04	0,94	0,42	0,34	0,58	0,33	0,29
b <sub>13</sub>	2,37	1,71	0,88	3,93	2,34	1,23	4,46	1,66	1,05
b <sub>14</sub>	0,52	0,03	-0,15	0,19	0,22	0,05	0,44	0,17	0,06

Таблица А.29. – Участок 2, здание в призме, супесь

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	21,21	14,73	9,31	24,99	14,44	8,93	19,42	10,06	7,57
b <sub>1</sub>	1,34	1,47	1,12	0,74	1,35	1,00	-0,30	0,22	0,63
b <sub>2</sub>	-8,70	-7,50	-5,34	-7,89	-7,23	-5,01	-4,27	-4,50	-3,89
b <sub>3</sub>	-6,44	-3,96	-2,12	-5,07	-3,63	-1,98	-2,71	-2,07	-1,39
b <sub>4</sub>	-7,52	-5,63	-3,12	-10,50	-5,79	-3,10	-10,17	-4,38	-2,79
b <sub>5</sub>	-2,29	-1,31	-0,98	-3,02	-1,16	-0,95	-2,69	-1,33	-0,48
b <sub>6</sub>	1,81	1,84	1,97	1,48	1,79	1,80	-0,49	0,77	1,17
b <sub>7</sub>	0,96	0,94	-0,08	-0,47	0,49	-0,10	-1,44	-0,23	-0,23
b <sub>8</sub>	0,26	-0,01	0,02	-1,72	-0,26	-0,10	-1,39	0,57	-0,03
b <sub>9</sub>	-0,64	-0,69	-0,54	0,29	-0,61	-0,43	0,57	0,06	-0,14
b <sub>10</sub>	-0,60	0,07	0,14	0,62	0,14	0,23	0,28	0,24	0,23
b <sub>11</sub>	1,16	0,64	0,52	-0,54	0,48	0,40	-0,47	0,42	0,32
b <sub>12</sub>	2,63	1,86	1,17	1,69	1,63	1,08	0,98	0,88	0,69
b <sub>13</sub>	1,96	2,23	1,44	3,76	2,31	1,45	3,28	1,88	1,33
b <sub>14</sub>	2,68	1,47	0,81	2,36	1,24	0,65	1,42	0,62	0,38

Таблица А.30. – Участок 2, здание за призмой, супесь

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	13,38	9,94	6,21	17,15	9,89	6,07	13,49	6,82	5,63
b <sub>1</sub>	0,41	1,35	1,07	0,92	1,37	1,01	0,37	0,35	0,79
b <sub>2</sub>	-5,35	-5,12	-3,66	-5,39	-5,12	-3,48	-3,41	-3,41	-3,03
b <sub>3</sub>	-1,35	-0,99	-0,68	-1,41	-0,84	-0,63	-0,47	-0,56	-0,41
b <sub>4</sub>	-3,89	-3,73	-2,20	-7,37	-4,20	-2,38	-7,36	-3,35	-2,22
b <sub>5</sub>	0,10	-0,01	0,18	-0,43	0,10	0,16	-0,46	-0,24	0,01
b <sub>6</sub>	2,15	1,69	0,93	2,27	1,45	0,71	1,09	1,31	0,86
b <sub>7</sub>	0,20	0,49	0,33	-0,03	0,50	0,41	0,24	0,06	0,16
b <sub>8</sub>	-1,40	-0,71	-0,17	-3,98	-0,95	-0,34	-3,91	-0,64	-0,44
b <sub>9</sub>	-0,36	-0,63	-0,50	-0,27	-0,67	-0,43	-0,14	-0,02	-0,24
b <sub>10</sub>	-0,35	-0,24	-0,19	-0,36	-0,14	-0,19	0,44	-0,13	-0,08
b <sub>11</sub>	1,35	0,54	0,39	0,11	0,32	0,26	-0,21	0,28	0,21
b <sub>12</sub>	0,71	0,56	0,44	0,72	0,47	0,38	-0,19	0,23	0,16
b <sub>13</sub>	0,26	1,32	0,94	1,96	1,56	1,06	2,01	1,49	1,07
b <sub>14</sub>	0,68	0,33	0,08	0,47	0,26	0,04	0,99	0,21	0,13

Таблица А.31. – Участок 2, здание в призме, песок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	18,02	14,67	10,08	22,00	14,44	9,53	18,51	9,13	7,11
b <sub>1</sub>	1,41	1,96	1,39	2,31	1,98	1,32	1,04	0,66	0,75
b <sub>2</sub>	-9,83	-8,49	-6,13	-10,31	-8,30	-5,83	-7,34	-5,79	-4,42
b <sub>3</sub>	-6,49	-4,02	-2,25	-5,68	-3,68	-2,10	-2,74	-1,98	-1,45
b <sub>4</sub>	-7,62	-6,12	-3,56	-8,78	-6,13	-3,39	-8,95	-3,91	-2,61
b <sub>5</sub>	0,54	-1,05	-1,05	-0,09	-1,07	-0,99	-0,04	-0,15	-0,42
b <sub>6</sub>	3,84	3,60	2,60	4,71	3,78	2,66	3,91	2,35	1,88
b <sub>7</sub>	3,54	2,10	0,45	1,66	1,53	0,21	0,31	1,10	0,48
b <sub>8</sub>	-2,16	-1,00	-0,45	-3,24	-1,07	-0,49	-4,34	-0,40	-0,42
b <sub>9</sub>	-1,05	-1,22	-0,97	-1,21	-1,19	-0,92	-0,48	-0,58	-0,44
b <sub>10</sub>	-0,78	0,08	0,18	-0,39	0,08	0,28	0,14	0,17	0,24
b <sub>11</sub>	1,40	0,47	0,37	0,38	0,29	0,24	-0,51	0,49	0,34
b <sub>12</sub>	2,38	1,82	1,24	2,33	1,68	1,17	1,11	1,06	0,76
b <sub>13</sub>	2,50	2,71	1,88	2,76	2,74	1,81	2,68	1,86	1,31
b <sub>14</sub>	2,43	1,53	0,88	1,74	1,38	0,76	1,56	0,71	0,42

Таблица А.32. – Участок 2, здание за призмой, песок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	12,99	11,16	7,08	16,33	11,24	6,69	14,93	7,25	5,62
b <sub>1</sub>	0,33	1,70	1,28	1,49	1,81	1,27	0,81	0,75	0,85
b <sub>2</sub>	-6,76	-6,11	-4,33	-7,30	-6,15	-4,09	-5,67	-4,46	-3,39
b <sub>3</sub>	-1,07	-0,91	-0,76	-1,20	-0,69	-0,75	-1,04	-0,63	-0,48
b <sub>4</sub>	-4,89	-4,39	-2,56	-6,80	-4,58	-2,52	-7,25	-3,21	-2,12
b <sub>5</sub>	1,59	0,77	0,50	1,14	0,84	0,50	0,64	0,68	0,37
b <sub>6</sub>	1,99	1,67	1,10	2,89	1,54	1,00	2,74	1,28	0,82
b <sub>7</sub>	0,44	0,57	0,20	0,34	0,54	0,25	0,04	0,38	0,12
b <sub>8</sub>	-0,56	-0,68	-0,20	-2,41	-0,86	-0,35	-3,71	-0,27	-0,23
b <sub>9</sub>	-0,61	-1,03	-0,81	-0,84	-1,08	-0,76	-0,44	-0,51	-0,48
b <sub>10</sub>	-0,37	-0,34	-0,27	-0,44	-0,23	-0,33	-0,39	-0,21	-0,14
b <sub>11</sub>	1,59	0,38	0,28	0,25	0,21	0,13	-1,09	0,23	0,15
b <sub>12</sub>	0,54	0,43	0,41	0,55	0,31	0,41	0,46	0,32	0,20
b <sub>13</sub>	1,23	1,71	1,23	1,71	1,88	1,21	1,86	1,38	1,01
b <sub>14</sub>	0,47	0,30	0,14	0,34	0,25	0,13	0,21	0,13	0,08

Приложение Б. Коэффициенты уравнений регрессии для горизонтальных  
перемещений

Таблица Б.1. – Участок 1, здание в призме, глина 6-9м

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
$b_0$	3,55
$b_1$	1,55
$b_2$	-4,04
$b_3$	-2,66
$b_4$	-4,33
$b_5$	-0,01
$b_6$	2,09
$b_7$	1,59
$b_8$	-1,06
$b_9$	-1,74
$b_{10}$	-1,42
$b_{11}$	-0,89
$b_{12}$	1,69
$b_{13}$	3,34
$b_{14}$	1,84

Таблица Б.2. – Участок 1, здание за призмой, глина

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
$b_0$	3,55
$b_1$	0,13
$b_2$	-2,39
$b_3$	-0,01
$b_4$	-3,03
$b_5$	-0,54
$b_6$	-0,24
$b_7$	0,40
$b_8$	-0,05
$b_9$	2,11
$b_{10}$	-0,19



Таблица Б.3. – Участок 1, здание в призме, суглинок

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	7,37
b <sub>1</sub>	1,24
b <sub>2</sub>	-2,41
b <sub>3</sub>	-2,35
b <sub>4</sub>	-4,87
b <sub>5</sub>	-0,83
b <sub>6</sub>	0,47
b <sub>7</sub>	1,77
b <sub>8</sub>	-2,38
b <sub>9</sub>	-0,29
b <sub>10</sub>	-0,36
b <sub>11</sub>	-0,48
b <sub>12</sub>	0,60
b <sub>13</sub>	1,81
b <sub>14</sub>	1,49

Таблица Б.4. – Участок 1, здание за призмой, суглинок

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	5,46
b <sub>1</sub>	0,42
b <sub>2</sub>	-2,26
b <sub>3</sub>	1,29
b <sub>4</sub>	-1,76
b <sub>5</sub>	0,48
b <sub>6</sub>	-0,44
b <sub>7</sub>	-0,14
b <sub>8</sub>	-0,49
b <sub>9</sub>	0,76
b <sub>10</sub>	1,73

Таблица Б.5. – Участок 1, здание в призме, супесь

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	5,86
b <sub>1</sub>	0,47
b <sub>2</sub>	-2,02
b <sub>3</sub>	-2,57
b <sub>4</sub>	-4,08
b <sub>5</sub>	-0,77
b <sub>6</sub>	1,03
b <sub>7</sub>	1,13
b <sub>8</sub>	-1,82
b <sub>9</sub>	-0,43
b <sub>10</sub>	-0,43
b <sub>11</sub>	0,08
b <sub>12</sub>	0,68
b <sub>13</sub>	1,29
b <sub>14</sub>	1,62

Таблица Б.6. – Участок 1, здание за призмой, супесь

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	2,47
b <sub>1</sub>	-0,32
b <sub>2</sub>	-0,94
b <sub>3</sub>	-0,49
b <sub>4</sub>	-2,16
b <sub>5</sub>	0,22
b <sub>6</sub>	-0,38
b <sub>7</sub>	0,63
b <sub>8</sub>	0,32
b <sub>9</sub>	0,63
b <sub>10</sub>	0,43

Таблица Б.7. – Участок 1, здание в призме, песок

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	8,05
b <sub>1</sub>	0,11
b <sub>2</sub>	-2,37
b <sub>3</sub>	-2,49
b <sub>4</sub>	-5,44
b <sub>5</sub>	-1,21
b <sub>6</sub>	1,89
b <sub>7</sub>	1,04
b <sub>8</sub>	-2,76
b <sub>9</sub>	-0,25
b <sub>10</sub>	-0,64
b <sub>11</sub>	0,53
b <sub>12</sub>	0,66
b <sub>13</sub>	1,85
b <sub>14</sub>	1,59

Таблица Б.8. – Участок 1, здание за призмой, песок

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	4,26
b <sub>1</sub>	-0,71
b <sub>2</sub>	-1,49
b <sub>3</sub>	-0,41
b <sub>4</sub>	-3,67
b <sub>5</sub>	0,52
b <sub>6</sub>	-0,29
b <sub>7</sub>	1,29
b <sub>8</sub>	0,27
b <sub>9</sub>	1,41
b <sub>10</sub>	0,32

Таблица Б.9. – Участок 2, здание в призме, глина 9-12

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	5,99
b <sub>1</sub>	1,75
b <sub>2</sub>	-5,89
b <sub>3</sub>	-3,14
b <sub>4</sub>	-5,35
b <sub>5</sub>	-0,40
b <sub>6</sub>	2,55
b <sub>7</sub>	2,45
b <sub>8</sub>	-1,90
b <sub>9</sub>	-1,03
b <sub>10</sub>	-0,50
b <sub>11</sub>	-0,51
b <sub>12</sub>	1,45
b <sub>13</sub>	3,79
b <sub>14</sub>	1,56

Таблица Б.10. – Участок 2, здание за призмой, глина

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	5,52
b <sub>1</sub>	1,11
b <sub>2</sub>	-4,22
b <sub>3</sub>	-0,21
b <sub>4</sub>	-3,98
b <sub>5</sub>	-0,68
b <sub>6</sub>	-0,12
b <sub>7</sub>	-0,24
b <sub>8</sub>	0,13
b <sub>9</sub>	3,18
b <sub>10</sub>	0,09

Таблица Б.11. – Участок 2, здание в призме, суглинок

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	8,97
b <sub>1</sub>	1,11
b <sub>2</sub>	-3,27
b <sub>3</sub>	-3,20
b <sub>4</sub>	-6,08
b <sub>5</sub>	-1,53
b <sub>6</sub>	1,67
b <sub>7</sub>	2,27
b <sub>8</sub>	-2,48
b <sub>9</sub>	-0,43
b <sub>10</sub>	-0,40
b <sub>11</sub>	-0,16
b <sub>12</sub>	1,03
b <sub>13</sub>	1,84
b <sub>14</sub>	1,61

Таблица Б.12. – Участок 2, здание за призмой, суглинок

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	7,78
b <sub>1</sub>	0,88
b <sub>2</sub>	-2,62
b <sub>3</sub>	-2,81
b <sub>4</sub>	-6,62
b <sub>5</sub>	-0,17
b <sub>6</sub>	-0,41
b <sub>7</sub>	-0,24
b <sub>8</sub>	1,02
b <sub>9</sub>	1,96
b <sub>10</sub>	2,69

Таблица Б.13. – Участок 2, здание в призме, супесь

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	6,54
b <sub>1</sub>	0,62
b <sub>2</sub>	-2,50
b <sub>3</sub>	-3,55
b <sub>4</sub>	-4,21
b <sub>5</sub>	-1,20
b <sub>6</sub>	0,85
b <sub>7</sub>	1,15
b <sub>8</sub>	-0,60
b <sub>9</sub>	-0,31
b <sub>10</sub>	-0,29
b <sub>11</sub>	0,12
b <sub>12</sub>	1,29
b <sub>13</sub>	1,38
b <sub>14</sub>	1,92

Таблица Б.14. – Участок 2, здание за призмой, супесь

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	2,73
b <sub>1</sub>	0,12
b <sub>2</sub>	-0,83
b <sub>3</sub>	-0,62
b <sub>4</sub>	-1,74
b <sub>5</sub>	0,08
b <sub>6</sub>	-0,23
b <sub>7</sub>	0,37
b <sub>8</sub>	0,37
b <sub>9</sub>	0,34
b <sub>10</sub>	0,51

Таблица Б.15. – Участок 2, здание в призме, песок

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	3,68
b <sub>1</sub>	0,71
b <sub>2</sub>	-3,02
b <sub>3</sub>	-3,01
b <sub>4</sub>	-5,59
b <sub>5</sub>	1,05
b <sub>6</sub>	1,60
b <sub>7</sub>	0,90
b <sub>8</sub>	1,30
b <sub>9</sub>	-0,33
b <sub>10</sub>	-0,46
b <sub>11</sub>	0,07
b <sub>12</sub>	1,27
b <sub>13</sub>	2,04
b <sub>14</sub>	1,97

Таблица Б.16. – Участок 2, здание за призмой, песок

Коэффициент	Горизонтальные смещения верха ограждения
b <sub>0</sub>	4,81
b <sub>1</sub>	0,14
b <sub>2</sub>	-1,66
b <sub>3</sub>	-0,50
b <sub>4</sub>	-3,44
b <sub>5</sub>	-0,09
b <sub>6</sub>	-0,20
b <sub>7</sub>	0,19
b <sub>8</sub>	0,30
b <sub>9</sub>	1,31
b <sub>10</sub>	0,38

Таблица Б.17. – Участок 1, здание в призме, глина

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	3,74	8,33	7,39	9,85	6,05	4,63	13,67	6,88	4,63
b <sub>1</sub>	1,83	3,52	3,35	3,73	2,87	2,22	4,43	2,61	1,58
b <sub>2</sub>	-4,59	-5,85	-5,34	-4,59	-3,68	-3,07	-5,67	-3,39	-2,06
b <sub>3</sub>	-3,22	-1,89	-2,01	-0,99	-0,25	-0,36	-0,39	0,09	0,43
b <sub>4</sub>	-4,23	-4,93	-4,34	-6,44	-4,23	-2,95	-8,49	-4,80	-2,56
b <sub>5</sub>	-0,05	0,00	0,05	0,64	0,54	0,26	0,06	0,21	0,11
b <sub>6</sub>	2,25	3,05	3,00	2,49	1,89	1,66	3,61	2,36	1,31
b <sub>7</sub>	2,15	0,65	0,25	-0,16	-0,26	-0,14	-0,64	-0,54	-0,59
b <sub>8</sub>	-1,00	-1,55	-1,15	-3,96	-1,41	-0,59	-5,59	-2,49	-0,94
b <sub>9</sub>	-1,91	-2,34	-2,26	-2,16	-1,86	-1,50	-2,22	-1,53	-0,83
b <sub>10</sub>	-1,53	-0,69	-0,62	-0,90	-0,42	-0,21	-0,03	0,06	0,16
b <sub>11</sub>	-0,99	-1,59	-1,61	-2,81	-1,81	-1,14	-3,56	-1,98	-0,75
b <sub>12</sub>	1,98	0,98	1,34	0,51	0,31	0,40	0,31	0,10	-0,18
b <sub>13</sub>	3,37	3,18	2,83	3,55	2,54	1,85	4,58	2,74	1,36
b <sub>14</sub>	1,94	1,53	1,57	0,51	0,46	0,66	0,09	0,00	-0,10



Таблица Б.18. – Участок 1, здание за призмой, глина

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	3,11	7,20	6,28	8,74	6,08	4,61	13,11	6,82	4,52
b <sub>1</sub>	0,11	2,67	2,57	2,85	2,33	1,85	4,25	2,49	1,61
b <sub>2</sub>	-2,74	-5,10	-4,30	-4,08	-3,50	-2,81	-5,24	-3,12	-2,10
b <sub>3</sub>	0,12	0,14	0,31	0,05	0,04	0,14	-0,16	-0,22	-0,08
b <sub>4</sub>	-2,65	-3,77	-3,22	-6,12	-3,99	-2,59	-8,34	-4,73	-2,65
b <sub>5</sub>	0,18	0,28	0,10	0,94	0,21	0,23	0,17	0,02	0,17
b <sub>6</sub>	1,93	2,98	2,70	2,34	2,31	1,68	3,27	2,42	1,12
b <sub>7</sub>	-0,17	-0,22	-0,35	-0,51	-0,19	-0,22	-0,58	-0,58	-0,13
b <sub>8</sub>	-1,07	-1,47	-0,95	-3,56	-1,84	-0,72	-5,43	-2,38	-0,83
b <sub>9</sub>	-0,74	-1,81	-1,63	-1,50	-1,44	-1,16	-2,11	-1,45	-0,90
b <sub>10</sub>	-0,25	-0,13	-0,13	0,00	-0,11	-0,15	-0,14	-0,20	-0,11
b <sub>11</sub>	0,39	-0,68	-0,74	-2,08	-1,24	-0,61	-3,45	-1,83	-0,73
b <sub>12</sub>	-0,01	-0,14	-0,26	-0,01	-0,04	-0,11	0,10	0,16	0,09
b <sub>13</sub>	2,23	2,38	1,91	3,39	2,29	1,48	4,46	2,64	1,43
b <sub>14</sub>	-0,21	-0,27	-0,34	-0,19	-0,17	-0,24	0,06	0,11	0,01

Таблица Б.19. – Участок 1, здание в призме, суглинок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	7,73	10,68	9,16	10,17	6,77	5,27	11,46	5,45	3,33
b <sub>1</sub>	1,02	2,67	2,55	3,50	2,66	1,96	4,66	1,78	1,35
b <sub>2</sub>	-3,15	-3,65	-3,39	-3,53	-2,82	-2,22	-3,80	-2,10	-1,48
b <sub>3</sub>	-2,72	-1,62	-1,92	-0,85	-0,28	-0,44	0,23	-0,32	0,00
b <sub>4</sub>	-4,47	-4,67	-3,91	-5,82	-3,35	-2,29	-5,81	-3,34	-1,75
b <sub>5</sub>	-0,59	-0,30	-0,32	0,17	-0,13	-0,33	-0,23	0,04	0,06
b <sub>6</sub>	0,71	0,70	0,93	1,37	0,72	0,67	2,17	1,14	0,56
b <sub>7</sub>	2,46	1,40	0,43	0,12	0,22	0,12	-0,63	-0,11	-0,04
b <sub>8</sub>	-2,24	-1,90	-1,12	-3,58	-1,08	-0,43	-4,38	-1,36	-0,24
b <sub>9</sub>	0,20	-0,58	-0,73	-1,46	-1,08	-0,74	-2,71	-1,48	-0,99
b <sub>10</sub>	-0,94	0,02	0,04	-0,42	-0,04	0,16	-0,79	0,54	0,39
b <sub>11</sub>	-0,89	-0,74	-0,77	-2,64	-1,26	-0,63	-3,76	-0,83	-0,28
b <sub>12</sub>	0,38	0,18	0,61	0,14	-0,04	0,06	-0,56	-0,56	-0,44
b <sub>13</sub>	1,43	1,76	1,59	2,67	1,57	1,02	2,68	1,08	0,48
b <sub>14</sub>	1,71	1,31	1,32	0,33	0,46	0,54	-0,66	0,54	0,30

Таблица Б.20. – Участок 1, здание за призмой, суглинок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	6,04	9,77	8,04	8,26	6,15	4,79	9,84	4,70	2,99
b <sub>1</sub>	0,21	2,47	2,32	2,81	2,46	1,92	3,78	2,25	1,63
b <sub>2</sub>	-2,19	-3,57	-3,04	-3,18	-2,87	-2,24	-4,10	-2,50	-1,80
b <sub>3</sub>	-0,66	-0,06	0,25	-0,31	-0,06	0,08	-0,27	-0,08	-0,07
b <sub>4</sub>	-3,10	-3,50	-2,84	-5,30	-2,96	-1,88	-6,24	-2,85	-1,48
b <sub>5</sub>	-0,60	-0,39	-0,30	0,53	0,29	0,01	0,80	0,49	0,30
b <sub>6</sub>	1,05	1,21	0,50	0,68	0,44	0,21	0,75	0,34	0,20
b <sub>7</sub>	0,25	-0,24	0,05	0,38	0,09	0,21	0,40	0,14	0,35
b <sub>8</sub>	-2,00	-1,39	-0,85	-2,72	-0,81	-0,24	-3,35	-0,96	-0,25
b <sub>9</sub>	0,64	-0,33	-0,49	-0,98	-0,92	-0,71	-1,74	-1,16	-0,86
b <sub>10</sub>	0,14	-0,16	-0,21	-0,26	-0,14	-0,17	-0,17	-0,04	-0,07
b <sub>11</sub>	-0,55	-0,48	-0,49	-2,13	-0,93	-0,46	-2,88	-1,16	-0,47
b <sub>12</sub>	0,63	0,04	-0,13	0,21	0,03	-0,06	0,18	0,04	0,04
b <sub>13</sub>	1,04	1,45	1,21	2,66	1,44	0,88	3,34	1,51	0,77
b <sub>14</sub>	-0,26	-0,01	-0,16	0,18	-0,01	-0,08	0,14	-0,01	0,01

Таблица Б.21. – Участок 1, здание в призме, супесь

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	6,24	8,14	7,13	8,70	5,65	4,11	9,16	3,79	2,44
b <sub>1</sub>	0,62	1,68	1,74	3,05	2,13	1,43	3,61	1,73	1,17
b <sub>2</sub>	-2,22	-3,19	-3,20	-3,31	-2,65	-2,05	-4,38	-2,25	-1,43
b <sub>3</sub>	-3,29	-2,01	-2,14	-1,10	-0,41	-0,51	-0,57	0,24	0,26
b <sub>4</sub>	-4,06	-4,03	-3,48	-5,25	-2,96	-1,98	-5,62	-2,25	-1,18
b <sub>5</sub>	-0,65	-0,31	-0,15	0,04	-0,11	-0,12	0,08	-0,20	-0,09
b <sub>6</sub>	1,15	1,29	1,35	1,99	1,44	1,13	2,93	1,75	0,96
b <sub>7</sub>	1,70	0,99	0,50	-0,16	-0,11	-0,07	-0,57	-0,55	-0,29
b <sub>8</sub>	-1,80	-1,21	-0,95	-3,01	-0,91	-0,32	-3,17	-0,75	-0,04
b <sub>9</sub>	-0,39	-0,82	-0,94	-1,47	-1,05	-0,71	-1,84	-0,91	-0,50
b <sub>10</sub>	-0,53	-0,06	0,02	-0,37	0,01	0,13	0,02	0,10	0,08
b <sub>11</sub>	0,10	-0,39	-0,52	-2,29	-1,01	-0,48	-2,64	-1,06	-0,43
b <sub>12</sub>	0,90	0,36	0,58	0,22	-0,10	0,01	0,20	-0,13	-0,21
b <sub>13</sub>	1,28	1,37	1,37	2,39	1,45	0,97	3,24	1,44	0,71
b <sub>14</sub>	1,54	1,38	1,31	0,49	0,54	0,51	0,15	-0,03	0,01

Таблица Б.22. – Участок 1, здание за призмой, супесь

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	4,08	6,56	5,34	6,48	4,96	3,60	8,05	4,03	2,46
b <sub>1</sub>	-0,04	1,54	1,63	2,41	1,97	1,42	3,45	1,81	1,22
b <sub>2</sub>	-0,90	-2,43	-2,45	-2,61	-2,42	-1,87	-3,81	-2,12	-1,50
b <sub>3</sub>	-0,55	-0,38	-0,02	-0,53	-0,32	-0,09	-0,41	-0,22	-0,12
b <sub>4</sub>	-2,21	-2,55	-2,15	-4,40	-2,32	-1,43	-5,22	-2,16	-1,10
b <sub>5</sub>	1,32	1,98	1,25	1,01	0,63	0,49	0,24	0,02	0,08
b <sub>6</sub>	-0,28	0,18	0,70	1,21	0,98	0,69	2,39	1,32	0,68
b <sub>7</sub>	-0,53	-0,72	-0,70	-0,29	-0,42	-0,31	-0,36	-0,48	-0,07
b <sub>8</sub>	-1,73	-1,37	-0,75	-2,44	-0,87	-0,31	-2,91	-0,83	-0,07
b <sub>9</sub>	0,28	-0,46	-0,69	-0,93	-0,78	-0,59	-1,65	-0,79	-0,46
b <sub>10</sub>	-0,38	-0,30	-0,21	-0,33	-0,24	-0,19	-0,17	-0,11	-0,05
b <sub>11</sub>	0,65	-0,15	-0,33	-1,80	-0,78	-0,34	-2,60	-1,01	-0,36
b <sub>12</sub>	0,38	0,35	0,13	0,38	0,29	0,13	0,33	0,23	0,11
b <sub>13</sub>	0,68	0,98	0,94	2,25	1,25	0,78	3,13	1,33	0,68
b <sub>14</sub>	0,38	0,19	0,09	0,35	0,14	0,07	0,25	0,15	0,09

Таблица Б.23. – Участок 1, здание в призме, песок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	8,61	10,36	9,28	11,61	8,02	6,20	12,25	6,44	3,76
b <sub>1</sub>	0,21	1,86	2,06	3,48	2,54	1,70	4,49	2,29	1,30
b <sub>2</sub>	-2,59	-3,73	-3,80	-4,30	-3,45	-2,67	-6,12	-3,45	-1,92
b <sub>3</sub>	-3,09	-1,86	-2,07	-1,20	-0,47	-0,51	-0,76	0,08	0,23
b <sub>4</sub>	-5,44	-5,52	-4,69	-7,31	-4,68	-3,09	-7,91	-3,68	-1,88
b <sub>5</sub>	-1,23	-0,88	-0,55	0,22	-0,29	-0,46	0,13	-0,45	-0,07
b <sub>6</sub>	2,37	2,92	2,75	2,62	2,06	1,79	3,98	2,65	1,23
b <sub>7</sub>	1,37	0,42	-0,05	-0,33	-0,14	-0,26	-0,77	-0,85	-0,47
b <sub>8</sub>	-3,08	-2,28	-1,80	-4,33	-1,79	-1,06	-4,67	-1,85	-0,52
b <sub>9</sub>	-0,21	-0,88	-1,05	-1,72	-1,33	-0,93	-2,52	-1,42	-0,68
b <sub>10</sub>	-0,79	0,00	0,09	-0,47	-0,04	0,27	-0,03	0,11	0,16
b <sub>11</sub>	0,40	-0,45	-0,71	-2,67	-1,38	-0,62	-3,51	-1,46	-0,44
b <sub>12</sub>	0,85	0,29	0,61	0,21	0,01	0,06	0,34	-0,07	-0,16
b <sub>13</sub>	1,79	2,09	2,04	3,41	2,38	1,57	4,87	2,44	1,12
b <sub>14</sub>	1,46	1,26	1,45	0,53	0,56	0,59	0,33	0,07	0,06

Таблица Б.24. – Участок 1, здание за призмой, песок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	5,36	7,78	6,80	9,23	6,59	4,94	10,70	5,22	3,56
b <sub>1</sub>	-0,85	1,43	1,77	2,57	2,11	1,63	4,20	2,30	1,36
b <sub>2</sub>	-1,56	-3,44	-3,37	-3,75	-3,16	-2,54	-5,22	-3,02	-1,85
b <sub>3</sub>	-0,46	-0,17	0,19	-0,61	-0,27	-0,10	-0,55	-0,44	-0,27
b <sub>4</sub>	-3,75	-4,41	-3,45	-6,39	-4,04	-2,52	-7,24	-3,34	-1,74
b <sub>5</sub>	-0,22	0,41	0,09	0,05	0,45	0,05	0,28	0,32	-0,17
b <sub>6</sub>	0,63	1,46	1,49	2,10	1,55	1,25	3,18	1,67	1,08
b <sub>7</sub>	0,33	0,21	0,14	0,10	0,10	0,05	-0,32	-0,08	-0,12
b <sub>8</sub>	-1,52	-1,19	-0,66	-3,45	-1,50	-0,65	-4,27	-1,53	-0,47
b <sub>9</sub>	0,48	-0,55	-0,78	-1,17	-1,08	-0,80	-2,21	-1,28	-0,66
b <sub>10</sub>	-0,29	-0,31	-0,29	-0,39	-0,33	-0,29	-0,26	-0,14	-0,08
b <sub>11</sub>	1,16	-0,25	-0,49	-1,96	-1,02	-0,51	-3,34	-1,34	-0,41
b <sub>12</sub>	0,28	0,08	-0,14	0,32	0,31	0,09	0,42	0,39	0,23
b <sub>13</sub>	1,35	1,89	1,66	3,26	2,07	1,36	4,48	2,24	1,03
b <sub>14</sub>	0,29	-0,07	-0,13	0,41	0,09	0,00	0,36	0,25	0,11

Таблица Б.25. – Участок 2, здание в призме, глина

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	5,65	11,84	10,11	13,91	8,17	5,89	19,84	7,75	4,93
b <sub>1</sub>	1,61	2,77	2,48	2,75	2,57	2,05	4,81	2,29	1,85
b <sub>2</sub>	-4,83	-8,00	-7,02	-6,68	-5,89	-4,73	-8,61	-4,93	-3,55
b <sub>3</sub>	-2,23	-1,73	-1,90	-1,40	-0,47	-0,18	-0,63	-0,54	0,17
b <sub>4</sub>	-6,52	-4,92	-3,98	-8,36	-5,00	-2,94	-12,29	-5,70	-3,06
b <sub>5</sub>	0,43	-0,67	-0,53	-1,13	-0,64	0,20	0,18	-0,42	0,06
b <sub>6</sub>	3,03	3,08	3,32	3,77	3,36	2,45	4,93	3,98	2,26
b <sub>7</sub>	3,58	1,48	0,22	0,47	0,11	-0,20	-0,62	0,08	-0,29
b <sub>8</sub>	-0,87	-0,87	-0,43	-4,63	-1,29	-0,25	-7,77	-2,07	-0,49
b <sub>9</sub>	-1,34	-1,23	-1,30	-1,48	-1,78	-1,45	-2,64	-2,50	-1,46
b <sub>10</sub>	-0,98	-0,14	-0,01	-0,18	-0,13	-0,03	-0,09	0,56	0,06
b <sub>11</sub>	-0,09	0,13	0,06	-1,53	-0,78	-0,14	-3,52	-1,93	-0,58
b <sub>12</sub>	3,53	0,34	0,93	0,71	0,31	0,14	0,47	-0,07	0,08
b <sub>13</sub>	2,06	3,19	2,63	4,66	3,19	2,05	6,77	4,26	1,89
b <sub>14</sub>	-0,38	1,23	1,26	0,41	0,51	0,42	0,04	-0,33	0,11

Таблица Б.26. – Участок 2, здание за призмой, глина

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	3,79	9,84	7,54	10,49	6,38	5,00	16,49	6,05	4,21
b <sub>1</sub>	0,83	2,41	2,05	2,84	2,50	1,85	6,12	3,22	2,05
b <sub>2</sub>	-4,70	-9,14	-7,25	-7,76	-6,89	-5,33	-11,13	-6,46	-4,07
b <sub>3</sub>	-0,38	1,87	1,81	2,77	2,07	1,23	5,43	2,90	1,32
b <sub>4</sub>	-3,54	-2,01	-1,46	-4,19	-2,34	-1,30	-6,39	-3,15	-1,55
b <sub>5</sub>	1,69	0,38	0,63	0,34	0,80	0,73	0,73	0,68	0,53
b <sub>6</sub>	3,19	4,08	2,88	5,24	3,45	2,33	7,48	4,13	2,38
b <sub>7</sub>	0,99	0,78	0,88	0,99	1,05	0,73	2,23	1,73	0,78
b <sub>8</sub>	-0,21	0,28	0,93	-2,91	-0,05	0,53	-4,92	-0,62	0,23
b <sub>9</sub>	-1,36	-1,23	-1,13	-1,63	-1,83	-1,37	-3,49	-2,56	-1,74
b <sub>10</sub>	0,08	-0,19	-0,38	0,36	0,08	-0,17	1,86	0,54	0,20
b <sub>11</sub>	0,13	0,24	0,11	-0,79	-0,28	0,02	-1,81	-0,65	-0,21
b <sub>12</sub>	-3,47	-1,63	-1,46	-1,93	-1,55	-0,92	-3,36	-1,83	-0,75
b <sub>13</sub>	-0,19	1,28	0,88	2,22	1,38	0,82	3,36	1,71	0,76
b <sub>14</sub>	3,64	1,99	1,51	4,16	2,43	1,39	6,56	3,19	1,60

Таблица Б.27. – Участок 2, здание в призме, суглинок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	9,64	13,04	11,26	12,70	9,02	6,75	16,13	6,87	4,51
b <sub>1</sub>	1,26	2,05	2,02	0,98	2,26	1,75	4,09	1,78	1,55
b <sub>2</sub>	-3,42	-4,28	-3,86	-3,26	-3,85	-3,01	-6,26	-2,70	-2,38
b <sub>3</sub>	-4,18	-1,91	-2,37	-2,69	-0,61	-0,52	-0,68	-0,26	0,22
b <sub>4</sub>	-5,72	-4,44	-3,37	-5,96	-3,66	-2,06	-9,15	-2,90	-1,38
b <sub>5</sub>	-0,51	-0,62	-0,77	0,03	-0,39	-0,36	0,20	0,16	-0,11
b <sub>6</sub>	1,49	1,28	1,53	2,73	1,56	1,19	3,25	1,16	0,84
b <sub>7</sub>	2,54	1,38	0,23	0,53	0,01	-0,01	-0,50	-0,09	-0,21
b <sub>8</sub>	-2,76	-0,72	-0,32	-3,67	-0,74	0,04	-5,55	-0,89	0,04
b <sub>9</sub>	-0,41	-0,58	-0,70	-2,16	-0,89	-0,66	-1,86	-1,44	-0,64
b <sub>10</sub>	-0,57	0,04	0,18	1,21	-0,06	0,03	-0,07	0,56	0,11
b <sub>11</sub>	-0,06	0,41	0,26	-2,39	-0,35	0,10	-2,88	-1,28	-0,12
b <sub>12</sub>	1,22	0,59	1,09	-0,68	0,20	0,15	0,44	-0,78	-0,23
b <sub>13</sub>	1,98	1,51	1,20	4,44	1,69	0,90	4,76	1,98	0,57
b <sub>14</sub>	1,19	1,68	1,65	-0,84	0,74	0,66	-0,01	-0,49	0,09

Таблица Б.28. – Участок 2, здание за призмой, суглинок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	7,45	12,11	9,76	11,15	8,10	6,17	15,23	6,42	4,12
b <sub>1</sub>	0,51	2,17	1,77	1,90	2,15	1,65	3,96	2,34	1,67
b <sub>2</sub>	-1,99	-4,00	-3,01	-3,51	-3,46	-2,72	-5,51	-3,32	-2,48
b <sub>3</sub>	-0,52	-0,45	0,27	-0,38	-0,17	-0,13	-0,24	-0,06	-0,06
b <sub>4</sub>	-4,25	-3,15	-1,98	-6,44	-2,89	-1,38	-9,02	-3,31	-1,24
b <sub>5</sub>	-0,36	-0,58	-0,58	-0,17	-0,16	-0,18	0,55	0,12	0,07
b <sub>6</sub>	1,24	2,02	1,22	1,63	1,09	0,67	2,00	0,77	0,52
b <sub>7</sub>	-0,11	-0,48	-0,28	0,03	-0,01	0,17	0,00	0,32	0,37
b <sub>8</sub>	-2,41	-0,33	-0,23	-3,52	-0,26	0,17	-5,20	-0,73	0,17
b <sub>9</sub>	-0,18	-0,71	-0,56	-0,65	-0,78	-0,58	-1,70	-0,95	-0,71
b <sub>10</sub>	-0,20	-0,50	-0,37	-0,14	-0,05	-0,11	-0,08	0,03	0,02
b <sub>11</sub>	-0,04	0,28	0,44	-1,19	-0,19	0,28	-2,94	-0,74	-0,08
b <sub>12</sub>	0,29	0,43	-0,19	0,23	0,13	0,08	0,16	0,00	0,04
b <sub>13</sub>	1,35	1,15	0,47	2,85	1,24	0,51	4,65	1,51	0,54
b <sub>14</sub>	0,33	0,34	-0,17	0,21	0,09	0,05	0,13	0,01	0,04

Таблица Б.29. – Участок 2, здание в призме, супесь

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	6,79	6,55	8,14	10,64	6,97	4,89	12,36	4,07	2,89
b <sub>1</sub>	0,69	8,63	1,13	1,75	1,56	1,05	3,32	1,33	0,93
b <sub>2</sub>	-2,71	-11,30	-3,68	-4,04	-3,24	-2,42	-5,45	-2,27	-1,52
b <sub>3</sub>	-4,43	4,98	-2,40	-1,77	-0,71	-0,56	-0,72	0,26	0,25
b <sub>4</sub>	-4,06	-10,89	-2,75	-5,84	-2,89	-1,52	-7,17	-2,21	-0,85
b <sub>5</sub>	-1,10	1,67	-1,06	-0,90	-0,59	-0,40	0,37	-0,08	0,00
b <sub>6</sub>	0,90	3,82	1,24	2,40	1,66	1,20	3,42	1,57	1,00
b <sub>7</sub>	1,85	3,62	0,24	0,05	-0,19	-0,10	-0,38	-0,38	-0,15
b <sub>8</sub>	-0,45	3,57	0,79	-2,85	-0,19	0,35	-4,28	-0,23	0,05
b <sub>9</sub>	-0,24	-8,84	-0,41	-0,74	-0,60	-0,34	-1,31	-0,46	-0,26
b <sub>10</sub>	-0,51	8,33	0,01	-0,13	-0,01	0,03	-0,05	0,08	0,09
b <sub>11</sub>	0,21	-7,89	0,44	-0,79	-0,21	0,11	-2,35	-0,48	-0,04
b <sub>12</sub>	1,59	-7,53	1,03	0,83	0,21	0,14	0,41	-0,01	-0,15
b <sub>13</sub>	1,31	9,77	1,33	2,79	1,64	0,97	4,09	1,51	0,70
b <sub>14</sub>	1,71	-6,71	1,50	0,70	0,88	0,69	0,03	-0,03	0,08

Таблица Б.30. – Участок 2, здание за призмой, супесь

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	3,12	6,37	5,21	8,04	5,19	3,74	11,62	3,85	2,99
b <sub>1</sub>	-0,04	0,88	0,93	1,44	1,42	0,99	3,21	1,44	1,00
b <sub>2</sub>	-0,77	-2,65	-2,53	-2,89	-2,66	-2,03	-4,79	-2,07	-1,57
b <sub>3</sub>	-0,67	-0,63	-0,13	-0,57	-0,42	-0,24	-0,34	-0,13	-0,09
b <sub>4</sub>	-1,81	-1,59	-1,09	-4,76	-1,95	-0,76	-7,07	-2,19	-0,78
b <sub>5</sub>	-0,08	-0,13	0,13	-0,50	-0,01	0,10	0,26	0,14	0,05
b <sub>6</sub>	0,67	1,32	0,73	2,55	1,04	0,60	2,91	0,84	0,60
b <sub>7</sub>	0,12	0,07	0,18	-0,25	0,09	0,15	-0,44	0,04	-0,05
b <sub>8</sub>	-0,83	0,32	0,68	-2,85	0,29	0,60	-3,94	0,19	0,35
b <sub>9</sub>	-0,02	-0,34	-0,31	-0,59	-0,52	-0,33	-1,26	-0,47	-0,26
b <sub>10</sub>	-0,23	-0,24	-0,19	-0,18	-0,13	-0,08	-0,07	0,02	-0,02
b <sub>11</sub>	0,29	0,58	0,54	-0,84	-0,11	0,22	-2,39	-0,56	-0,04
b <sub>12</sub>	0,38	0,36	0,08	0,35	0,29	0,17	0,23	0,13	0,07
b <sub>13</sub>	0,33	0,60	0,53	2,29	1,17	0,57	3,98	1,43	0,64
b <sub>14</sub>	0,44	0,15	0,13	0,32	0,08	0,12	0,14	0,07	0,03

Таблица Б.31. – Участок 2, здание в призме, песок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	10,05	10,38	9,39	13,01	9,04	6,56	15,14	5,63	3,94
b <sub>1</sub>	0,41	1,56	1,52	1,87	2,06	1,48	3,81	1,72	1,11
b <sub>2</sub>	-3,00	-4,68	-4,42	-4,59	-3,95	-3,10	-6,48	-3,09	-1,90
b <sub>3</sub>	-3,84	-2,33	-2,42	-1,99	-0,78	-0,56	-0,91	0,18	0,26
b <sub>4</sub>	-4,08	-4,81	-3,80	-7,45	-4,31	-2,58	-8,96	-3,14	-1,37
b <sub>5</sub>	-2,72	-0,55	-0,66	-0,58	-0,81	-0,57	0,39	-0,34	-0,20
b <sub>6</sub>	-0,92	2,15	2,19	2,42	2,14	1,78	3,69	1,66	1,15
b <sub>7</sub>	-0,12	1,25	0,59	0,27	-0,11	-0,22	-0,71	0,01	-0,30
b <sub>8</sub>	3,83	-0,40	-0,26	-4,03	-0,71	-0,02	-5,16	-0,34	0,00
b <sub>9</sub>	-0,76	-0,60	-0,61	-0,78	-0,83	-0,58	-1,75	-0,77	-0,37
b <sub>10</sub>	-0,99	-0,04	0,03	-0,25	-0,02	0,03	-0,08	0,11	0,09
b <sub>11</sub>	-0,19	0,55	0,42	-0,88	-0,33	0,08	-2,76	-0,53	0,02
b <sub>12</sub>	1,83	0,64	0,99	0,84	0,30	0,21	0,54	0,02	-0,11
b <sub>13</sub>	2,41	1,93	1,81	3,29	2,18	1,46	4,98	2,03	0,89
b <sub>14</sub>	2,12	1,61	1,69	0,79	0,88	0,72	0,07	-0,04	0,06



Таблица Б.32. – Участок 2, здание за призмой, песок

Коэффициент	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b <sub>0</sub>	4,52	7,92	6,82	10,21	7,31	5,29	13,26	5,30	3,58
b <sub>1</sub>	-0,31	1,21	1,25	1,47	1,87	1,43	3,62	1,82	1,19
b <sub>2</sub>	-1,31	-3,66	-3,35	-3,32	-3,24	-2,56	-5,36	-2,75	-1,76
b <sub>3</sub>	-0,95	-0,53	0,03	-0,54	-0,37	-0,29	-0,40	-0,27	-0,18
b <sub>4</sub>	-3,05	-3,44	-2,21	-6,38	-3,40	-1,71	-8,67	-3,09	-1,28
b <sub>5</sub>	0,52	0,52	0,42	0,03	0,17	0,20	1,22	0,34	0,11
b <sub>6</sub>	0,97	1,42	0,97	1,28	1,02	0,70	1,47	0,94	0,61
b <sub>7</sub>	0,37	0,42	0,27	0,38	0,42	0,25	0,37	0,34	0,11
b <sub>8</sub>	-0,93	-0,18	0,47	-3,27	-0,48	0,25	-4,33	-0,41	0,26
b <sub>9</sub>	-0,50	-0,53	-0,54	-0,58	-0,74	-0,60	-1,62	-0,74	-0,40
b <sub>10</sub>	0,25	-0,28	-0,25	-0,18	-0,16	-0,05	-0,13	-0,06	-0,01
b <sub>11</sub>	-0,10	0,62	0,58	-0,88	-0,15	0,21	-2,83	-0,64	0,01
b <sub>12</sub>	-0,16	0,27	-0,06	0,27	0,25	0,20	0,27	0,23	0,15
b <sub>13</sub>	1,64	1,24	1,01	2,75	1,71	0,96	4,72	1,94	0,85
b <sub>14</sub>	-0,09	-0,08	-0,02	0,30	0,09	0,19	0,21	0,08	0,04

Приложение В. Список публикаций автора по теме диссертационной работы

**Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:**

1. Зерцалов М.Г., Казаченко С.А., Конюхов Д.С. Исследование влияния разработки котлована на окружающую застройку // Вестник МГСУ. 2014. №6. С. 77-86.
2. Конюхов Д.С., Казаченко С.А. Влияние математической модели поведения грунта под нагрузкой на моделирование воздействия строительства метрополитена на окружающую застройку // Транспортное строительство. 2017. №10. С. 12-15.
3. Конюхов Д.С., Казаченко С.А. Влияние выбора расчетной схемы на результаты геотехнических расчетов объектов метрополитена // Транспортное строительство. 2017. №11. С. 8-10.
4. Зерцалов М.Г., Казаченко С.А. Учёт жесткости сооружений при оценке изменения НДС системы «сооружение – грунтовый массив» // Транспортное строительство. 2021. №2. С. 18-21.
5. Зерцалов М.Г., Казаченко С.А. Численно-аналитический метод инженерной оценки влияния разработки котлована на перемещения прилегающего к нему грунтового массива с учётом жёсткости ограждающей конструкции // Механика композиционных материалов и конструкций. 2021. Т. 27. № 3. С. 396-409.

**Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:**

1. Казаченко С.А., Зерцалов М.Г. Исследование влияния разработки котлована на окружающую застройку // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: Сборник трудов XV международной научно-технической конференции. Москва: Издательство МИСИ-МГСУ, 2012. С. 625-626.
2. Конюхов Д.С., Казаченко С.А. Анализ факторов, влияющих на сходимость результатов геотехнических расчётов с данными мониторинга // Тенденции, проблемы и перспективы развития подземного строительства в России: сборник трудов международного научно-технического форума. Санкт-Петербург: Рекламно-издательский центр Тоннельной ассоциации России, 2017. С. 14-27.

3. Зерцалов М.Г., Казаченко С.А. Численно-аналитический метод инженерной оценки влияния разработки котлована на перемещения прилегающего к нему грунтового массива, с учётом жёсткости ограждающей конструкции // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: сборник трудов 11-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского. Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2021. С. 335-345.