

На правах рукописи

*Казаченко*

Казаченко Сергей Андреевич

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

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

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

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор  
**Зерцалов Михаил Григорьевич**

Официальные оппоненты: **Мазеин Сергей Валерьевич**,  
доктор технических наук, Общероссийская общественная организация «Тоннельная ассоциация России», Исполнительная дирекция, заместитель руководителя  
**Шарафутдинов Рафаэль Фаритович**,  
кандидат технических наук, АО «НИЦ «Строительство», НИИОСП им. Н.М. Герсевича, директор

Ведущая организация: Акционерное общество «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука»

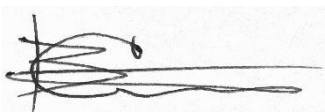
Защита состоится «06» марта 2024 г. в 12:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.05 (Д 212.138.14), созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, Зал ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИУ МГСУ и на сайте <http://www.mgsu.ru>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Сидоров Виталий Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 полузакрытый способы возведения. Глубина таких выработок может достигать 30 м, примером может послужить комплекс зданий «Москва-Сити», наибольшая глубина котлованов в котором была 26 метров. Но чаще, в повседневной практике распространены котлованы меньшей глубины, вмещающие в себя 2-4 подземных этажа (6-12 м).

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.

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-Мартиросян 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 грунтовой 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** 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:**

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.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано восемь статей, из них пять опубликованы в изданиях, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** посвящена обзору разработанных ранее различных экспериментально-аналитических и расчетных методов.

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., Семянюк-Ситников В.В., Симагин В.Г., Сливец К.В., Стаин А.В., Тер-Мартиросян 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.

Отмечается, 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 исследований можно заключить, что неучет «углового эффекта» может существенно повлиять на результаты расчета в зависимости от сочетания различных факторов.

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

**Вторая глава** посвящена описанию выбранной методики исследования, основанной на совместном использовании МКЭ и МПЭ.

Описана принятая геомеханическая модель, обоснованы размеры расчетной области, а также описан инженерный метод для снижения влияния известных недостатков принятой упруго-пластической модели, основанный на уменьшении удельного веса изымаемого грунта пропорционально отношению модулей деформации при нагрузке и разгрузке, а также увеличению начального коэффициента бокового давления для уравнивания действующих горизонтальных напряжений.



Рисунок 1 - График зависимости деформаций от напряжений при экскавации грунта (разгрузке основания), в том числе для расчета со снижением удельного веса изымаемого грунта (синим)

Рассмотрены следующие виды 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.

Расчетная область 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.

Глубина расчетной области принята как  $2 \cdot H_{ст}$  (где  $H_{ст}$  – высота ограждения).

Здание моделируется эквивалентным сечением, с приведенным модулем деформации ( $E_{пр}$ ) и занимающим пространство от подошвы фундамента до отметки дневной поверхности и размеры сооружения в плане.

Приведенный модуль деформации  $E_{пр}$  здания с кирпичными стенами на ленточном фундаменте имел значения от 93 до 132 МПа. В задаче принято значение  $E_{пр}=100$  МПа. Размеры сооружения назначались минимально возможными 12x20 м.

Далее осуществляется выбор наиболее влияющих факторов, определяются интервалы их варьирования. В работе приняты к рассмотрению следующие факторы:

**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 –  $B$ .

Также определяется форма зависимости искомой функции отклика от выбранных факторов и составляется матрица планирования эксперимента. Расчетная область разделена на 2 части, в пределах призмы обрушения принята квадратичная зависимость, за ней - применяется линейная зависимость.

**Третья глава** посвящена разработке численно-аналитического метода оценки влияния разработки котлована на окружающую застройку. Метод основан на решении задачи Мелана о приложенной внутри полуплоскости сосредоточенной силе.

Строгого решения подобной задачи в настоящее время не имеется. В то же время, подходы, использованные в работах С.В. Босакова и М.И. Горбунова-Посадова, частично были применены Д.А. Сапиным при разработке метода определения технологических осадок зданий прилегающей застройки при отрывке траншеи для сооружения «стены в грунте».

Аналогичный подход использован в данной работе, расчётная область показана на рис. 2.



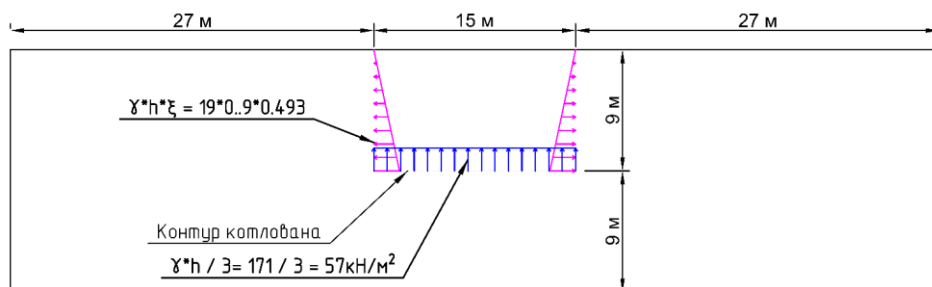


Рисунок 2 - Расчетная область с применением нагрузок к границам предполагаемой выемки

В соответствии с принятой схемой на основании решения Мелана рассчитываются величины дополнительных горизонтальных и вертикальных напряжений. Полученные результаты сопоставлялись с результатами расчёта с использованием МКЭ. На рис. 3 представлены эпюры горизонтальных и вертикальных напряжений для сечений, отстоящих от борта котлована соответственно на 0,5 м и 5,0 м.

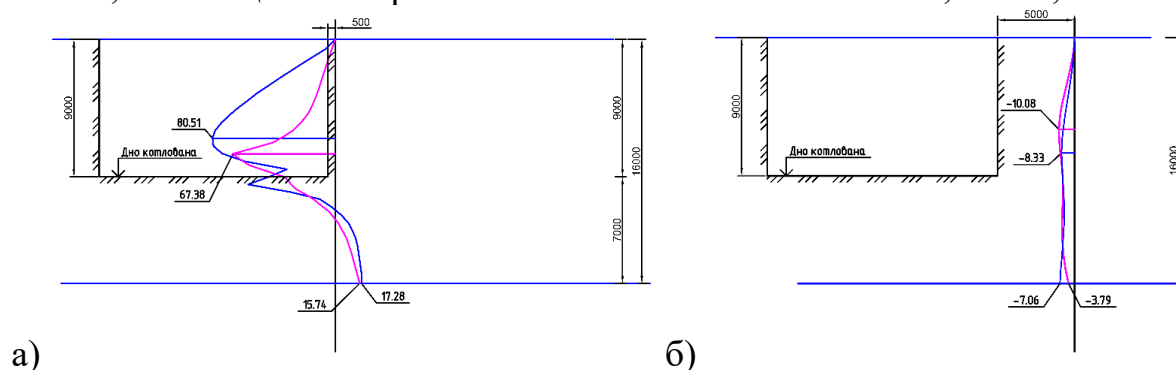


Рисунок 3 - Эпюры дополнительных вертикальных напряжений в полуплоскости от устройства выемки на удалении 0,5 м (а) и 5,0 м (б). Розовым цветом представлены результаты, полученные по МКЭ, синим – аналитическим методом

Сопоставление результатов аналитического решения и численного моделирования показало расхождение порядка 20%.

На рис. 4 представлены эпюры осадок, расхождение результатов не более 15,0%, что свидетельствует о возможности применения предлагаемого расчётного метода на стадии предварительного проектирования.

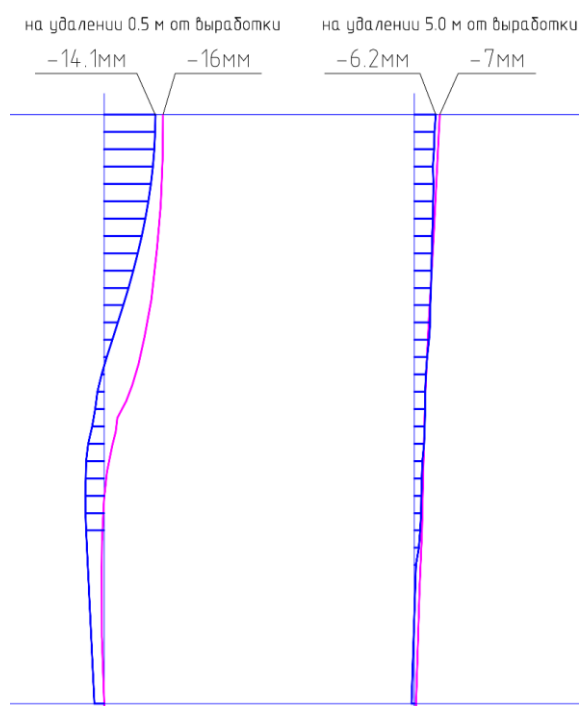


Рисунок 4 - Эпюры дополнительных вертикальных деформаций от устройства выемки на удалении 0,5 м и 5,0 м. Розовым цветом представлены результаты, полученные по МКЭ, синим – аналитическим методом

Для учета ограждения котлована в соответствии с МПЭ была выполнена серия экспериментов с варьированием параметров (см. табл. 1). Ограждение котлована - консольное, заделка - 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.

Таблица 1. Значения факторов.

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

На основании выполненного факторного анализа также получено уравнение регрессии (1) 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.

$$Y = 27,75 - 21,75 \cdot X_1 + 15,75 \cdot X_2 + 7,0 \cdot X_3 - 13,25 \cdot X_1 X_2 - 7,5 \cdot X_1 X_3 + 6,0 \cdot X_2 X_3 \quad (1)$$

Важным критерием подбора ограждения является величина допустимых осадок окружающей застройки, при недостаточной жесткости ограждения, их осадки могут превысить допустимые значения.

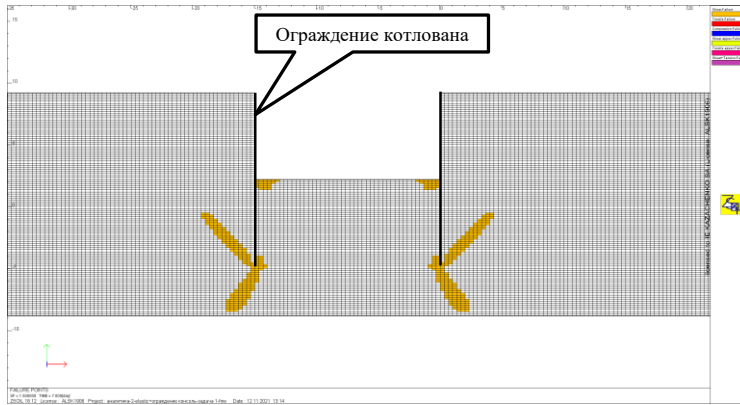


Рисунок 5 - Распределение зон предельного состояния (оранжевым) в массиве грунта в окрестностях выработки и конструкции ограждения

Если же жесткость ограждения достаточна, тогда зоны предельного состояния в массиве незначительны (рис. 5), следовательно могут быть использованы известные решения теории упругости. При этом само ограждение котлована в решение не вводится.

Установлена зависимость (рис. 6) между горизонтальными смещениями ограждения верха ограждения котлована (по оси X) и дополнительными вертикальными осадками (по оси Y) массива ( $R^2 > 0.99$ ) для определения величины предельного горизонтального отклонения ограждения.

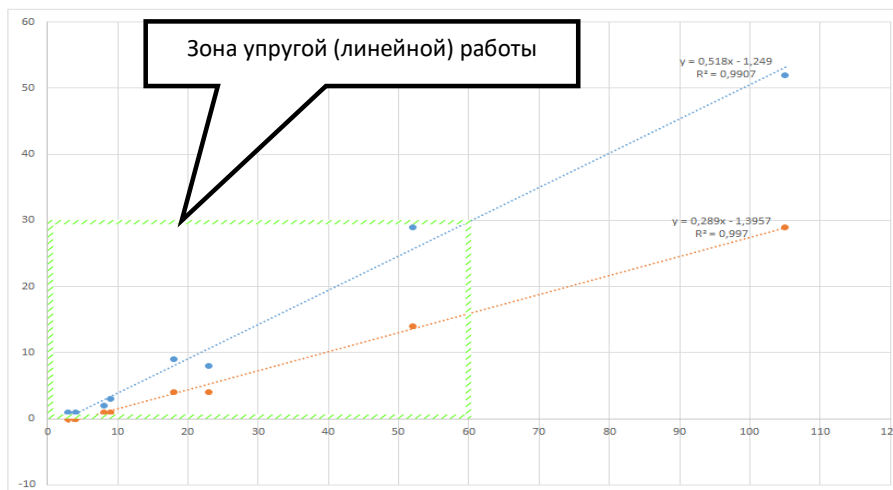


Рисунок 6 - Определение зависимости между дополнительными вертикальными осадками (по оси Y) массива и горизонтальным смещением (по оси X) ограждения на удалении 0,5 м (синим) и 5,0 м (оранжевым) от ограждения

Предлагается следующий алгоритм получения решения. По графику и зависимостям, приведенным на рис. 6 определяется горизонтальное смещение ограждения, соответствующее допустимой дополнительной осадке сооружения, а затем по уравнению 1 перебором определяется необходимая жесткость ограждения.

**Четвертая глава** посвящена анализу вертикальных деформаций массива грунта и окружающей застройки.

Для анализа изменения деформированного состояния массива грунта при сооружении котлована, в соответствии с планом эксперимента, проводилась серия расчетов для четырёх видов грунта.

Искомymi являются следующие функции отклика ( $Y_n$ ): горизонтальные и вертикальные перемещения точек массива грунта в пределах призмы обрушения (рис. 7), горизонтальные смещения верха ограждения котлована, вертикальные перемещения фундамента здания. Для этих функций отклика на основании регрессионного анализа получены уравнения.

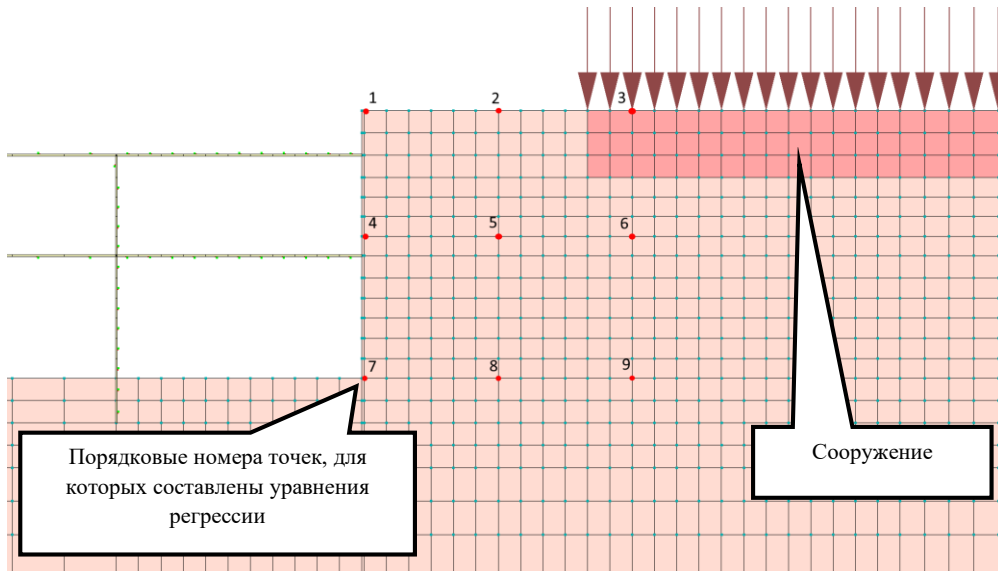


Рисунок 7 - Точки и массива грунта, для которых выполняется анализ данных и построение уравнений регрессии.

*Анализ изменения вертикальных перемещений поверхности в пределах призмы обрушения в направлении перпендикулярном котловану*

Распределение осадок точек поверхности массива грунта носит нелинейный характер как в направлении перпендикулярном ограждению котлована, так и вдоль него.

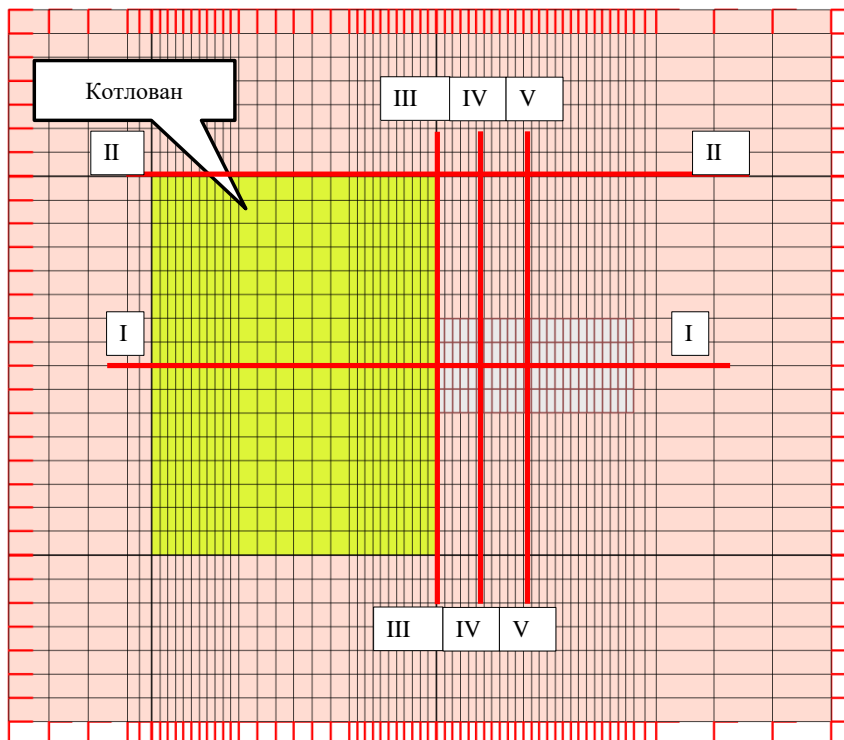


Рисунок 8 - Направления, в которых производится анализ перемещений для всех сочетаний факторов, типов грунтов и рассматриваемых функций отклика

Анализа характера распределения осадок поверхности приводится в виде графиков. В качестве примера приведены графики для створа I-I в точках 1-3 на рис. 9.

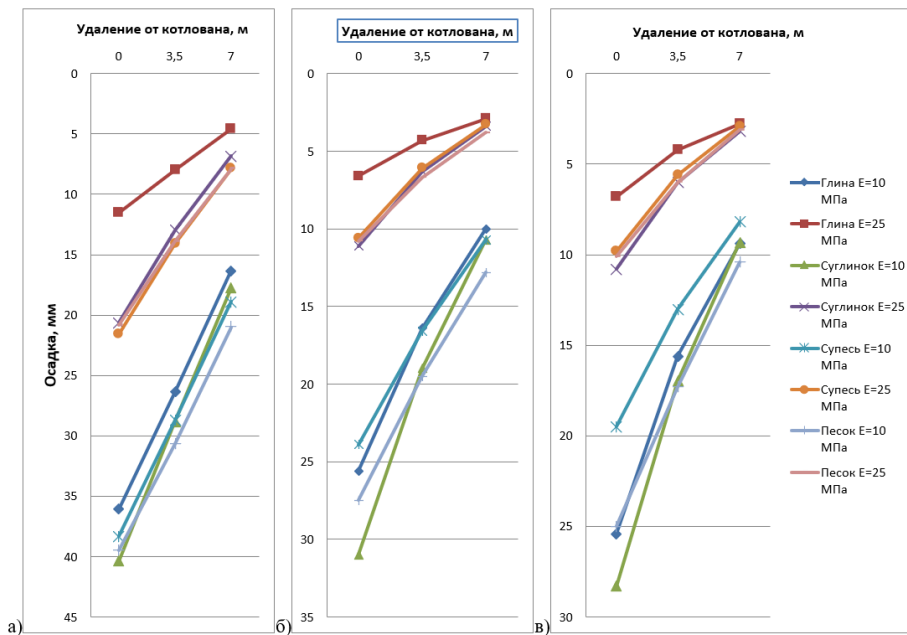


Рисунок 9 - Графики вертикальных перемещений поверхности земли у котлована глубиной 6м

На полученных в работе 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.

*Анализ изменения вертикальных перемещений поверхности в пределах призмы обрушения в направлении вдоль котлована*

Анализ осадок дневной поверхности, выполненный для 2 сечений (по центру котлована и на его углу) 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 (рис. 10).

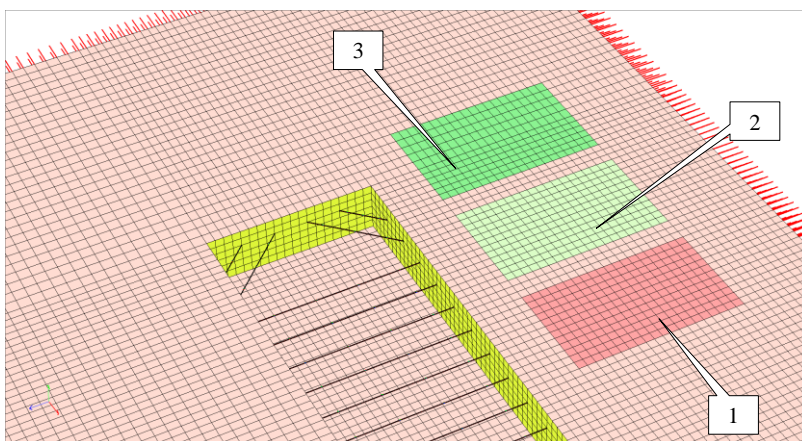


Рисунок 10 - Расположения здания в середине котлована (1), в промежуточной точке на  $\frac{1}{4}$  пролета (2) и на углу котлована (3)

Распределение осадок дневной поверхности в направлении вдоль котлована рассматривалось по 3 сечениям III-III, IV-IV и V-V (рис. 8). При этом были введены дополнительные точки для оценки перемещений, в зависимости от ширины котлована (рис. 11).

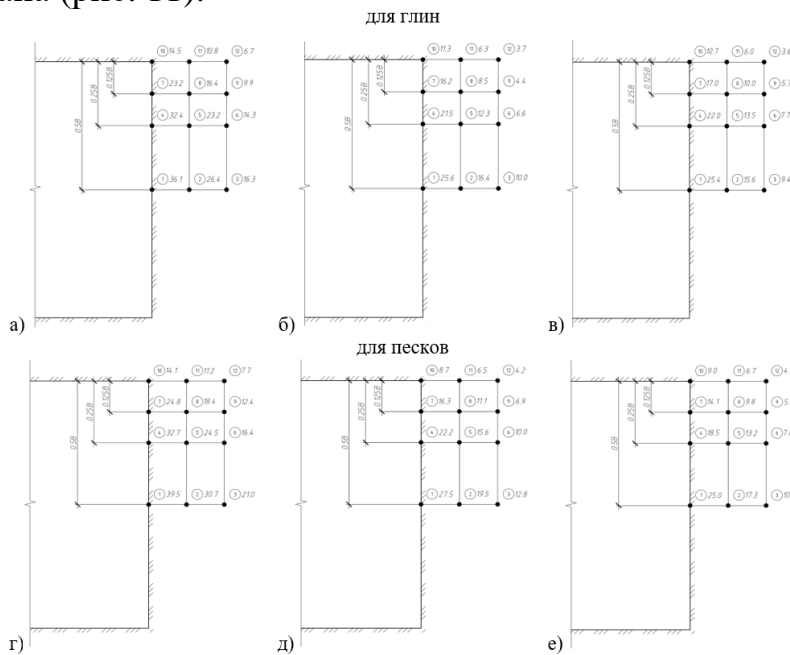


Рисунок 11 - Распределение вертикальных перемещений поверхности по мере приближения к углу котлована глубиной 6м: а, г – здание на бровке; б, д – здание на границе призмы; в, е – свободная поверхность

Наибольшие перемещения находятся в центре котлована (удаление  $0,5B$  от угла котлована, где  $B$  – ширина котлована), далее к углу значения осадок изменяются незначительно (10-15% - удаление  $0,25B$ ), а затем в среднем на 30-45% (удаление  $0,125B$ ).

В глинистых грунтах скорость затухания осадок ниже на бровке котлована, в песчаных же грунтах затухание осадок по сечениям вдоль котлована распределяется равномерно вне зависимости от удаления от котлована в поперечном направлении.

#### *Анализ вертикальных перемещений точек массива грунта в пределах призмы обрушения*

В разделе приведены результаты анализа изменения вертикальных перемещений точек массива внутри призмы обрушения, что представляет особенный интерес при наличии подземных коммуникаций на разных глубинах. Распределение перемещений точек массива в направлении вдоль котлована рассматривалось по центру котлована и на его углу.

Вертикальные перемещения в глубине массива с удалением от котлована изменяются нелинейно. Вне зависимости от расположения сооружения и вида грунтов, вертикальные перемещения в уровне середины котлована изменяются сначала на величину 25-35% (от точки 4 к точке 5), а затем более значительно, на величину порядка 60-70% (от точки 5 к точке 6). В уровне дна котлована наоборот, от точки 7 к точке 8 происходит большее изменение вертикальных перемещений (60-70%), а затем интенсивность падает, что в целом позволяет обозначить границу призмы обрушения грунта, имеющую нелинейную форму. Для анализа построены схемы с обозначением дополнительных осадок точек массива в пределах призмы обрушения (рис. 12).

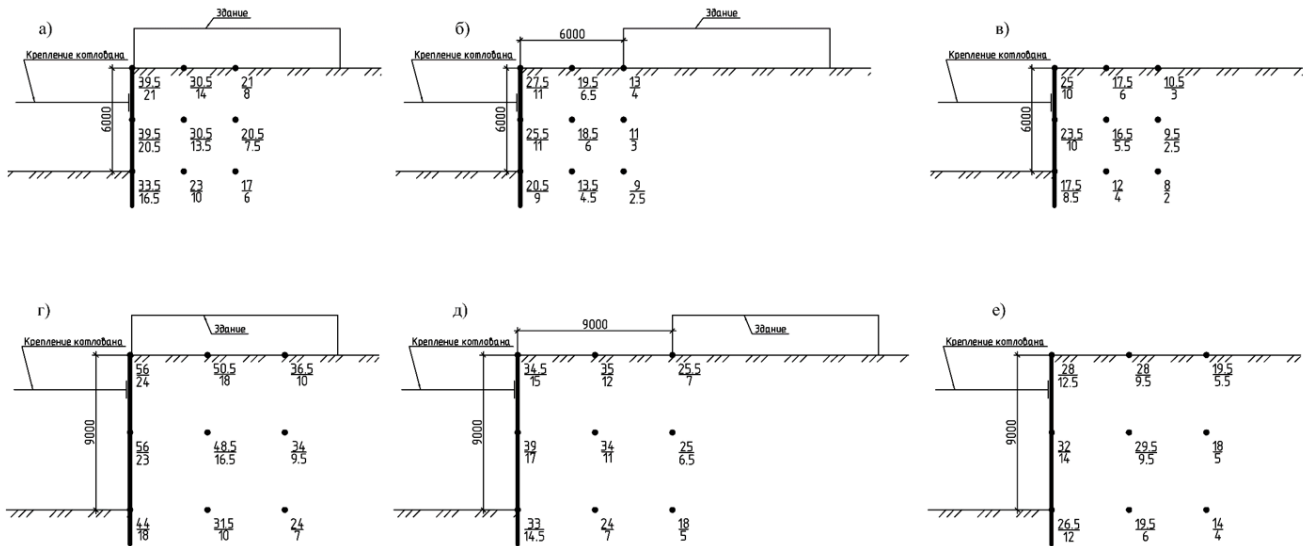


Рисунок 12 - Величины вертикальных перемещений точек массива грунта для котлованов глубиной 6 и 9 м, сооружаемых в песках. В числителе для  $E=10$  МПа, в знаменателе – для  $E=25$  МПа. а) и г) – при расположении здания на бровке; б) и д) – при расположении здания на границе призмы обрушения; в) и е) – при свободной поверхности.

#### *Анализ дополнительных осадок существующего сооружения*

Существующие сооружения, расположенные в призме обрушения имеют деформации, сходные по характеру с описанными ранее деформациями земной поверхности. Существенным является фактор расположения сооружения относительно угловой части котлована. 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 рис. 13 показаны максимальные осадки сооружения при его расположении по центру и в угловой зоне, а также относительные разности осадок.

Показано, что несмотря на меньшее значение максимальных дополнительных осадок, при расположении здания на углу котлована возможно развитие чрезмерных относительных разностей осадок.

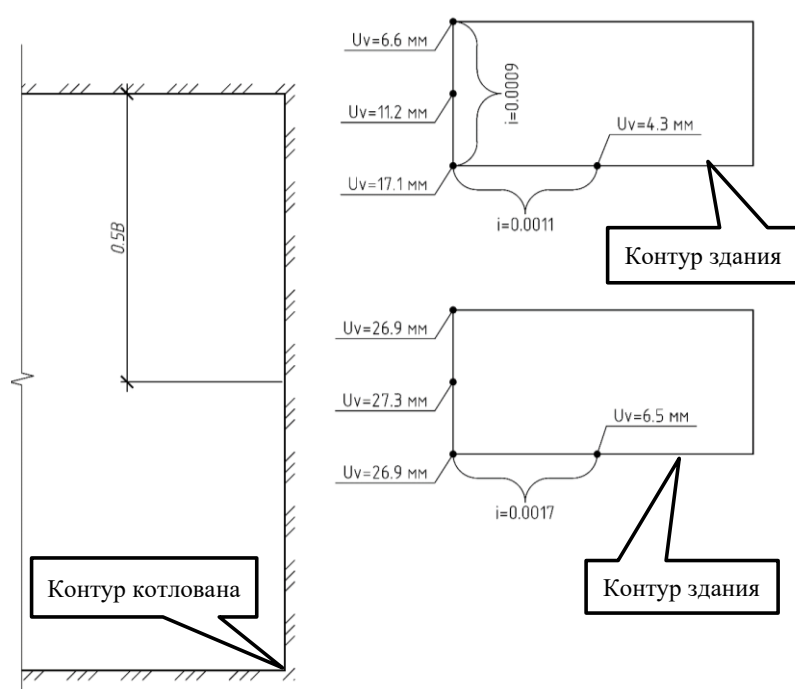


Рисунок 13 - Дополнительные осадки и относительные разницы осадок здания при его расположении по центру и в углу котлована

### Оценка влияния жесткости сооружения на его дополнительные деформации

Приведенные модули деформации, а также осадки, подсчитанные в идентичных условиях приведены в таблице 2. Сделан вывод: при прогнозировании осадок близких к предельным, необходимо детально моделировать конструкции с учетом характеристик материалов и распределением нагрузок, в остальных случаях допускается моделировать сооружение приведенным массивом.

Таблица 2. Значения приведенного модуля деформации и результаты расчетов

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

**Пятая глава** посвящена анализу горизонтальных деформаций массива грунта.

Горизонтальные деформации ограждения котлована являются объектом мониторинга по всей его глубине, в связи с этим оценивались перемещения в точках 1, 4 и 7 (рис. 8). На характер и величину деформаций ограждения в большой степени влияет тип и жесткость крепления, анализ влияния принятых в задаче факторов производился отдельно для каждой серии задач. Отмечено, что влияние «углового эффекта» значительно.

Эпюры перемещений для глубины котлована = 6 м для всех типов грунтов с варьированием модуля деформации приведены на рис. 16.



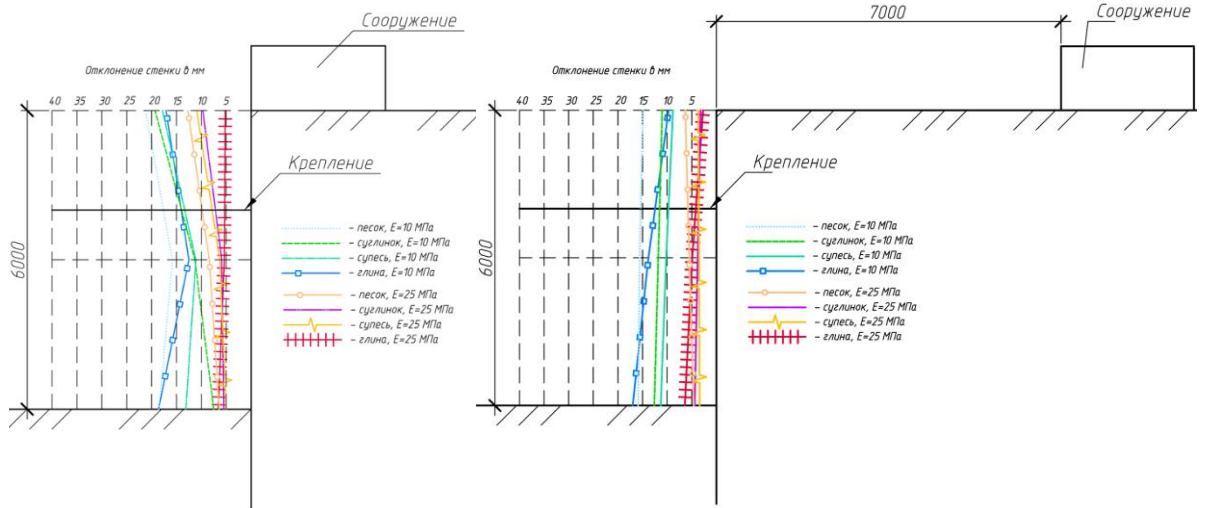


Рисунок 14 - Эпюры горизонтальных перемещений ограждения котлована глубиной 6м при расположении сооружения на бровке (слева) и на границе призмы обрушения (справа)

В ходе анализа выявлено большое расхождение в значениях горизонтальных смещений ограждения котлована в зависимости от варьирования факторов.

Наибольшие перемещения находятся в центре котлована, по мере приближения сечения к его углу значения деформаций изменяются по-разному для верхней точки и в уровне дна котлована. Смещения верха ограждения значительно затухают уже на удалении  $0,25B$ , до 2-3 раз. Горизонтальные смещения в уровне дна изменяются равномерно, с шагом около 20-30% (удаление  $0,25B$  и  $0,125B$ ), а при переходе от удаления  $0,125B$  к угловой точке - в 2 и более раз.

Данная тенденция наблюдается для всех типов грунтов и при разных положениях здания и глубинах котлована. На рис. 15 приведены значения горизонтальных перемещений ограждения по глубине в обозначенных сечениях.

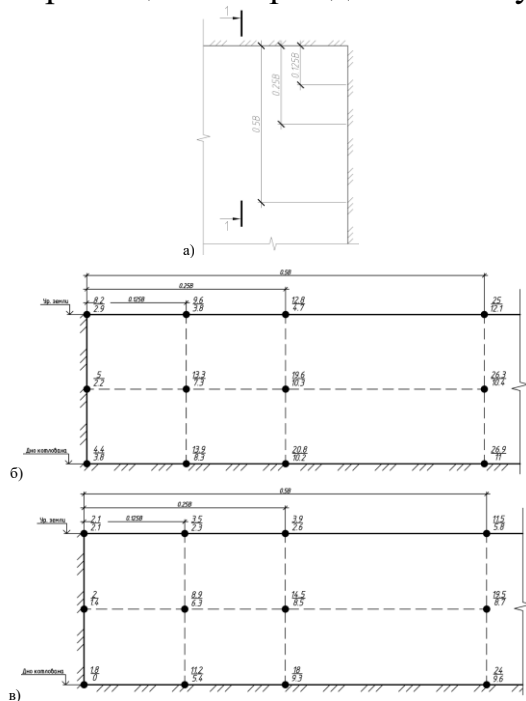


Рисунок 15 - План котлована в угловой части (а) и значения горизонтальных смещений в точках 1, 4 и 7 на разном удалении от угла для котлована глубиной 9 м в песчаных грунтах при здании на бровке (б) и на границе призмы обрушения (в). В числителе при модуле деформации грунта = 10 МПа, в знаменателе при 25 МПа

*Анализ горизонтальных перемещений массива грунта по центру котлована*

Выполненные численные расчеты для песков показали, что горизонтальные перемещения точек поверхности в пределах призмы обрушения практически идентичны, за исключением зоны возле верха ограждения котлована (точка 1, рис. 8), в которой перемещения ниже, что объясняется влиянием изгиба ограждения котлована и расположением распорной системы.

В середине 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).

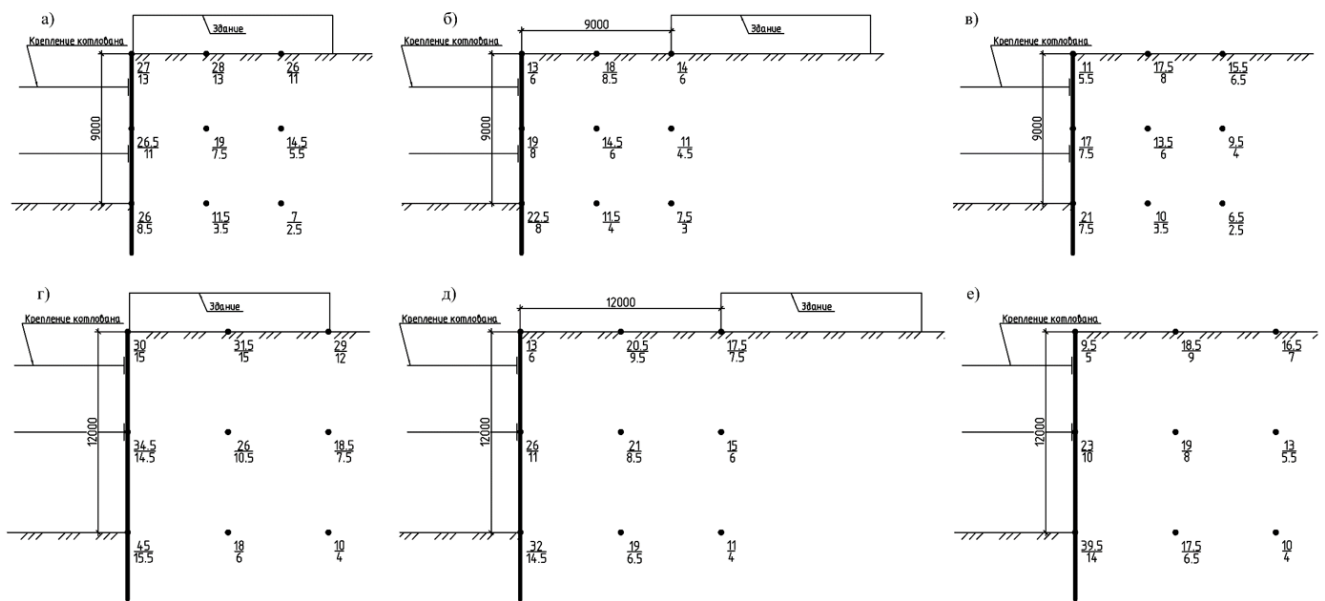


Рисунок 16 - Величины горизонтальных перемещений точек массива грунта для котлованов глубиной 9 и 12 м, сооружаемых в песках. В числителе для  $E=10$  МПа, в знаменателе – для  $E=25$  МПа. а) и г) – при расположении здания на бровке; б) и д) – при расположении здания на границе призмы обрушения; в) и е) – при свободной поверхности.

#### *Анализ горизонтальных перемещений массива грунта на углу котлована*

Горизонтальные перемещения точек массива грунта при удалении от центра котлована к его углу изменяются значительно (2-5 раз). Для случаев с большей жесткостью ограждения и крепления деформации практически полностью затухают.

**Шестая глава** посвящена разработке инженерной методики определения точек массива грунта и апробации результатов работы.

В начале главы приводятся таблицы с интервалами варьирования факторов, а также даются формулы для перехода от безразмерных к натуральным значениям, н-р:

$$X_1 = \frac{H-7,5}{1,5}; X_2 = \frac{E-17,5}{7,5}; X_3 = \frac{L-3,5}{3,5}; X_4 = \frac{B-0,5}{0,5} \quad (2)$$

Далее выполняется проверка адекватности полученных уравнений. Для проверки соответствия полученных уравнений регрессии опытным данным определяется искомая функция отклика в нулевых и крайних точках факторного плана:

Таблица 3. Проверка сходимости результатов.

Номер эксперимента по матрице планирования	Номер точки массива	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

Получены результаты с достаточной для предварительных расчетов точность в пределах 15%. В отдельных точках, где величина расхождения в процентах является чрезмерно большой, величина абсолютных значений отличается незначительно (в пределах 5 мм). В большинстве рассмотренных случаев значения дополнительных деформаций, вычисленных по полученным уравнениям регрессии, превышают значения численных экспериментов, что идет «в запас». В главе приводится сравнение результатов мониторинга с решением по МКЭ в плоской и объемной постановках, а также с применением разработанной методики (см. табл. 4).

Таблица 4. 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

В завершении приведены блок-схемы для отыскания коэффициентов уравнения регрессии для проведения экспресс-анализа. Пример указанной блок-схемы приведен на рисунке 20.

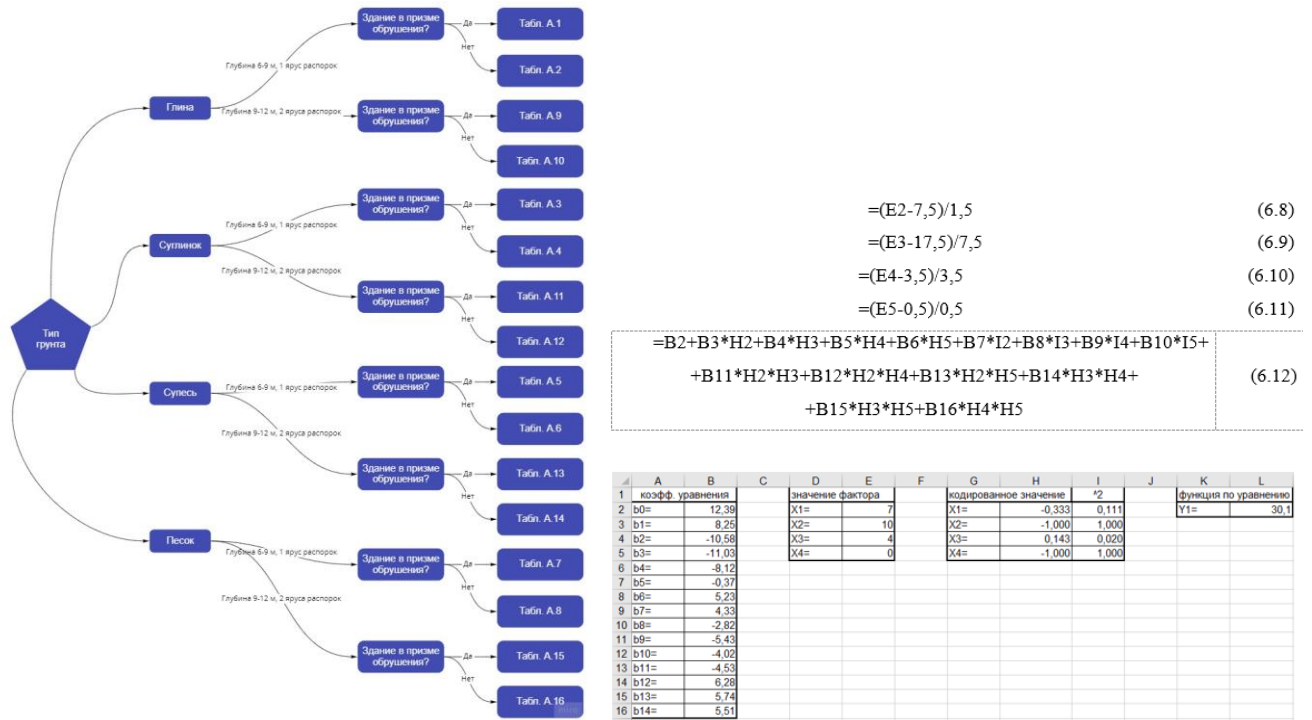


Рисунок 17 - Блок-схема для нахождения коэффициентов регрессии для определения дополнительных осадок зданий окружающей застройки и порядок представления найденных коэффициентов в программе Excel

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении диссертационной работы приведены итоги выполненных исследований. По их результатам сделаны следующие обобщенные 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. Собранная 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 – грунтовой массив); для диаметров от 1000 мм следует применять «трехкомпонентные» расчетные схемы (проектируемое сооружение – грунтовой 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 данной 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 работ, опубликованных автором по теме диссертации**  
**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.