

На правах рукописи



Кайгородов Михаил Дмитриевич

**РЕГУЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПЛИТНЫХ
ФУНДАМЕНТОВ МЕТОДОМ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВОГО
ОСНОВАНИЯ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пронозин Яков Александрович

Официальные оппоненты: **Богомоллов Александр Николаевич**
доктор технических наук, профессор
Конюшков Владимир Викторович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет», доцент
кафедры «Геотехника»

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

Защита диссертации состоится «23» декабря 2021 года в 10.00 на заседании диссертационного совета 24.2.419.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте www.tyuiu.ru.

Автореферат разослан «11» ноября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Степанов Максим Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в Российской Федерации активно развивается многоэтажное (повышенной этажности и высотное) строительство, в том числе на слабых водонасыщенных и сильносжимаемых основаниях. В таких городах, как Санкт-Петербург, Пермь, Тюмень и т.д. это вызывает ряд проблем, связанных с обеспечением эксплуатационной надежности объектов, в частности с соблюдением нормативных показателей по абсолютной и относительной осадке, а также отклонения остова здания от вертикали и, как следствие, его крена. Наиболее опасными, с позиций надежности и безопасности, являются случаи сложного в пространственном отношении и нестабилизирующиеся во времени крены зданий. Несмотря на известные и широко распространенные методы усиления оснований и выравнивания кренов зданий и сооружений, остается нерешенной проблема стабилизации осадок фундаментов и ликвидации кренов объектов в условиях слабых оснований, при сложных, нестабилизирующихся кренах.

Таким образом, разработка метода усиления основания и контролируемого регулирования неравномерности осадок зданий и сооружений на плитных фундаментах, на слабых основаниях, является *актуальной задачей*.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами создания теоретической расчетной базы для определения напряженно-деформированного состояния грунта, в условиях наличия полостей заданной формы, применения технологий по стабилизации осадок и снижению их неравномерности, регулирования геометрического положения зданий и сооружений занимались такие ученые, как М.Ю. Абелев, Н.Н. Баранов, А.А. Бартоломей, А. Н. Богомолов, Ю.К. Болотов, Н.И. Ватин, А.Л. Готман, В.П. Дыба, В.А. Ермолаев, М.В. Зотов, Д.В. Зотов, В.А. Ильичев, А. Камбефор, П.А. Коновалов, К.В. Королев, В.В. Конюшков, С.Н. Клепиков, В.В. Лушников, А.Г. Малинин, И. Т. Мирсаяпов, Л.В. Нуждин, А.А. Петухов, А.И. Полищук, А.Б. Пономарев, Я.А. Пронозин, А.П. Пулатов, М.М. Сабри, Г.М. Скибин, Е.А. Сорочан, И.В. Степура, З.Г. Тер-Мартиросян, В.И. Чаплыгин, М. Jamiolkowski, J.V. Burland, M. Pepe, C. Viggiani, D.M. Potts, J.K. Mitchell, N. Muhra, P. Marinos, Q. Yue, X. Zhang, Y. Chen и др.

Объект исследования: грунтовое основание зданий и сооружений на плитных фундаментах, сложенное слабыми пылевато-глинистыми грунтами.

Предмет исследования: напряженно-деформированное состояние грунтового основания, сложенного слабыми пылевато-глинистыми грунтами, при выбуривании скважин с целью контролируемого регулирования геометрического положения зданий и сооружений на плитных фундаментах.

Цель диссертационной работы: разработать метод регулирования геометрического положения зданий и сооружений на плитных фундаментах путем выбуривания грунта вертикальными или малонаклонными к вертикали скважинами на основе аналитической методики определения основных параметров скважин.

Задачи исследования:

– выполнить анализ методов, позволяющих регулировать геометрическое положение зданий и сооружений;

– провести лабораторные исследования для определения эффективности метода выбуривания грунта на моделях плитных фундаментов;

- разработать методику расчета основных параметров напряженно-деформированного состояния грунта при бурении вертикальных скважин;
- выявить наиболее значимые параметры бурения, влияющие на эффективность процесса устранения неравномерных осадок и выравнивание кренов;
- выполнить промышленное внедрение разработанной технологии.

Научная новизна работы состоит в теоретическом и экспериментальном обосновании параметров бурения, позволяющих эффективно применять метод устройства вертикальных или малонаклонных к вертикали скважин для выравнивания неравномерности осадок и контролируемого регулирования геометрического положения зданий и сооружений на основаниях, сложенных слабыми пылевато-глинистыми грунтами.

В рамках исследования получены следующие **научные результаты**:

– на основе анализа существующих технологий по выправлению кренов предложен и обоснован метод контролируемого регулирования геометрического положения зданий и сооружений на плитных фундаментах в условиях слабых грунтовых оснований;

– разработана методика определения основных параметров скважин при выбуривании грунта для снижения жесткости основания с целью контролируемого регулирования геометрического положения зданий и сооружений на плитных фундаментах;

– выявлены наиболее значимые параметры, влияющие на процесс снижения неравномерности осадки при устройстве вертикальных или малонаклонных к вертикали скважин для выравнивания неравномерности осадок зданий и сооружений.

Теоретическая значимость работы заключается в аналитических решениях и теоретическом обосновании эффективности технологии выбуривания вертикальных и малонаклонных к вертикали скважин для устранения неравномерных осадок зданий и сооружений на плитных фундаментах в условиях слабых пылевато-глинистых грунтов; в определении параметров скважин, влияющих на эффективность метода регулирования геометрического положения зданий и сооружений, путем выбуривания.

Практическая значимость работы заключается в обосновании, разработке и доказательстве эффективности метода регулирования геометрического положения зданий и сооружений на плитных фундаментах в условиях слабых оснований путем выбуривания грунта вертикальными или малонаклонными к вертикали скважинами при сложных, нестабилизирующихся кренах.

Методология и методы исследования:

Методологической основой работы послужила нормативная и научно-техническая литература, отображающая современные принципы механики грунтов и фундаментостроения.

Личный вклад автора состоит в разработке метода регулирования геометрического положения зданий и сооружений на плитных фундаментах в условиях слабых оснований, в разработке аналитической методики расчета параметров скважин, создании программного продукта GsMonitor, определении наиболее значимых факторов, влияющих на процесс снижения неравномерности осадок фундаментов; участии в выполнении проекта и его реализации по контролируемому регулированию геометрического положения многоэтажного двухсекционного жилого дома в г. Тюмени.

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование предлагаемого метода регулирования геометрического положения зданий и сооружений на основе анализа известных способов и инженерных приемов;
- результаты лабораторных исследований эффективности метода выбуривания скважин в грунтовом основании плитных фундаментов на моделях;
- разработка аналитической методики расчета основных параметров бурения вертикальных скважин с целью контролируемого снижения жесткости основания;
- выявление закономерностей и определение наиболее значимых параметров бурения скважин в грунтовом основании;
- результаты промышленного внедрения разработанной технологии.

Достоверность защищаемых положений обеспечивается:

- использованием современных принципов механики грунтов, изложенных в трудах ведущих ученых-геотехников;
- использованием актуализированных нормативных документов и применением современных методов оценки определения напряженно-деформированного, в том числе предельного, состояния грунтовых оснований;
- согласованностью аналитических расчетных данных с последующими результатами мониторинга реальных объектов.

Апробация работы. Результаты работы были доложены на международных конференциях в Тюмени, Перми, Москве.

Публикации. По результатам выполненной работы в рамках диссертации было опубликовано 7 статей, из которых 3 в журналах из перечня ВАК и 1 статья в журнале входящем в базу Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа имеет общий объем в 115 страниц, включающих 59 рисунков, список литературы из 102 источников, 4 таблицы. По структуре диссертация представляет собой введение, 4 главы, заключение, список литературы.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа, согласно своим научным результатам, соответствует п. 7, 10, 12 паспорта специальности 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Приведена общая характеристика работы и обоснована актуальность исследований.

Первая глава. Проанализированы актуальные технологии по снижению неравномерности осадок фундаментов, проведен анализ современных способов стабилизации основания при возникновении неравномерных осадок.

В строительной практике существует два основных подхода по регулированию неравномерных осадок:

Поднятие наиболее просевшей части или частей здания или сооружения реализуется следующими методиками: поддомкрачивание надфундаментных конструкций с использованием различных подъемных приспособлений и инъекция расширяющихся в грунте составов. Разработками в данной области занимались такие ученые, как Болотов Ю.К., Зотов М.В., Зотов Д.В., Клепиков С.Н., Скибин Г.М., Сорочан Е.А., Гусаренко С.П., Brylla H., Jones R., Kansehcu K., Kawulok M.

- Опускание здания или его части – способы, при которых снижается жесткость основания со стороны меньших осадок путем снижения прочностных и деформационных характеристик грунтов. К данным способам относятся такие технологии: регулируемое замачивание основания со стороны здания с меньшими осадками, удаление грунта из активной зоны основания наклонными или горизонтальными скважинами. Разработками в данной области занимались такие ученые, как Гендель Э.М., Далинчук В.С., Дыба В.П., Нуждин Л.В., Чаплыгин В.И., Пронозин Я.А. Пулатов А.П., Степура И.В., Jamiolkowski M., Burland J.B., Viggiani C., Klettke A.J., Yue Q., Zhang X., Chen Y.

В условиях залегания в основании слабых пылевато-глинистых грунтов с учетом их особенности работы под различными видами нагрузок и воздействий одним из наиболее перспективных методов снижения кренов является способ контролируемого вертикального выбуривания грунта в активной зоне основания. Такой метод позволяет достигать смыкания зон пластических деформаций по глубине скважин, добиваться разрушения грунтовых целиков между скважинами и формировать поверхности сдвигов в основании при выдавливании грунта основания в выбуренное пространство скважин. Данный механизм снижения жесткости основания, сложенного слабыми пылевато-глинистыми грунтами со стороны меньших осадок плитных фундаментов, позволяет вовлекать в работу значительную часть основания и равномерно уменьшать крен без существенного изменения напряженно-деформированного состояния в надземных конструкциях. Кроме того, данный метод не зависит от уровня подземных вод, он весьма технологичен и выполним в стесненных условиях.

Принципиальным отличием от представленных выше способов, является то, что предлагаемый способ устранения кренов основывается на устройстве вертикальных скважин.

Метод регулирования геометрического положения зданий и сооружений на плитных фундаментах при наиболее сложном случае нестабилизирующегося крена изложен на рисунке–1.

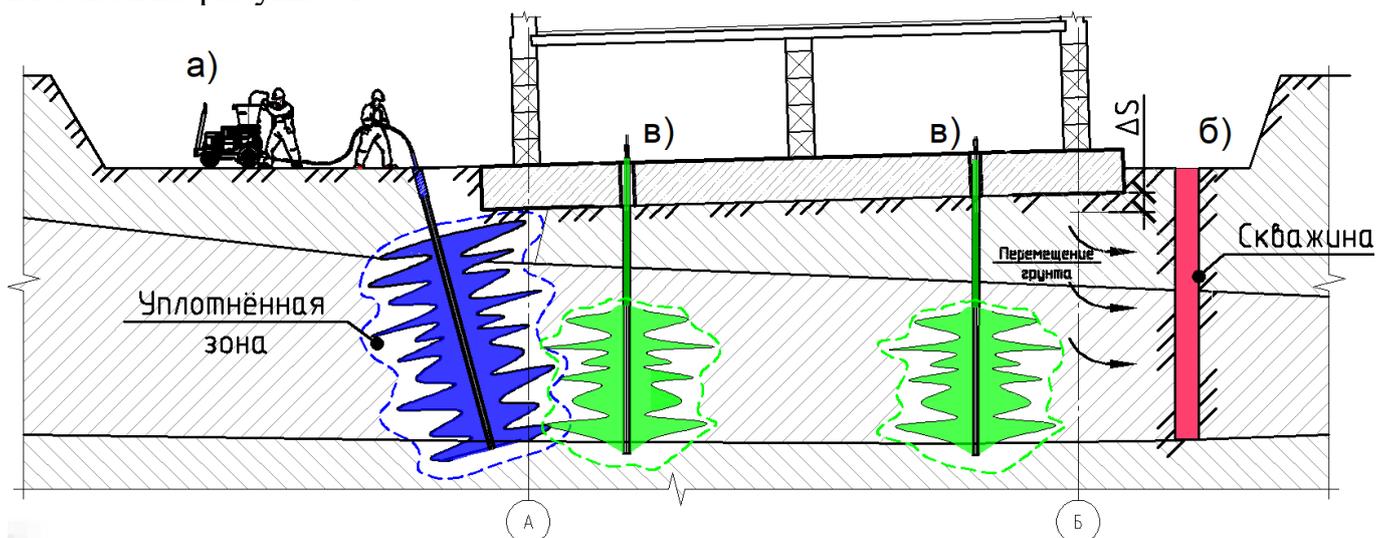


Рисунок 1– Этапы производства работ: а) *Первый этап*: закрепление основания со стороны максимальных осадок (со стороны крена); б) *Второй этап*: выбуривание грунта со стороны противоположной крену; в) Третий этап: закрепление основания по периметру.

Основным вопросом при применении предлагаемого метода является определение таких параметров бурения, как расположение, глубина, диаметр и шаг

скважин. Разработкой теоретической базы расчета НДС основания при образовании или создании в них полостей различного направления и формы занимались такие зарубежные и отечественные ученые, как Гречко О.В., Дыба В.П., Чаплыгин В.И., Chen Y., Zhang X., Viggiani C., Wang X.L.

Исследования показывают, что возникновение зон пластических деформаций ведет к обрушению стенок скважины и тем самым достигается требуемый эффект по созданию дополнительных деформаций основания со стороны противоположной крену, а шаг скважин рационально назначать исходя из принципа наложения зон пластических деформаций вокруг скважины – рисунок 2.

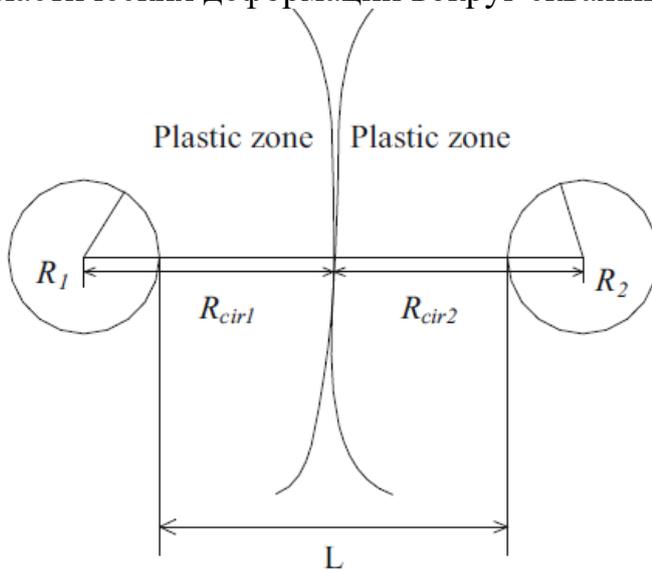


Рисунок 2 – Максимальное расстояние между двумя соседними скважинами.

Формула для определения шага скважин выглядит следующим образом:

$$L = R_{cir1} + R_{cir2} - R_1 - R_2 \quad (1)$$

Решения по определению тангенциальных и радиальных напряжений вокруг скважины при прессиометрических испытаниях грунтов предложены отечественными учеными: Тер-Мартirosяном З.Г., Болдыревым Г.Г. Основываясь на известном напряженно-деформированном состоянии грунта вокруг скважины и используя закон прочности Мора-Кулона, можно определить зоны пластических

деформаций, иначе зоны потенциального разрушения. Таким образом, в первой главе на основании литературного обзора предложен метод по регулированию кренов зданий и сооружений на фундаментах мелкого заложения и сформулированы задачи по его реализации на основании определения параметров бурения, исходя из расчета областей грунта вокруг скважин, для контролируемого снижения жесткости основания.

Во второй главе описаны методика, планирование и результаты лабораторных экспериментов на модели плитного фундамента. Определены качественные показатели влияния длины и угла наклона бурения скважин на процесс снижения неравномерности осадки.

В ходе экспериментальных исследований использовался грунт с заданными характеристиками, близкими к натурным исследованиям. В качестве плитных фундаментов рассматривались модели (штампы), загруженные с эксцентриситетом для создания неравномерности осадки.



Рисунок 3 – Испытательная установка.



Рисунок 4 – Процесс снижения «крена» штампа.

Бурение вертикальных или малонаклонных к вертикали скважин.

В первой серии экспериментальных исследований рассматривалось влияние выбуривания вертикальных цилиндрических полостей на процесс снижения неравномерности осадки. Первоначально бурение велось на глубину $0,5b$, после двух циклов по 7 скважин в каждой глубина была увеличена до $1b$ по причине отсутствия прогресса по снижению неравномерности осадки. Как можно видеть из графика на рисунке 5, длина скважины равная $1b$ также не произвела должного эффекта. На третьей стадии глубина составила $1,5b$, при данной глубине стал проявляться требуемый эффект. Для полного выравнивания модели фундамента глубина бурения была увеличена до $2b$. В итоге разность осадок крайних точек модели фундамента снизилась до $\Delta s=0,2\text{мм}$.

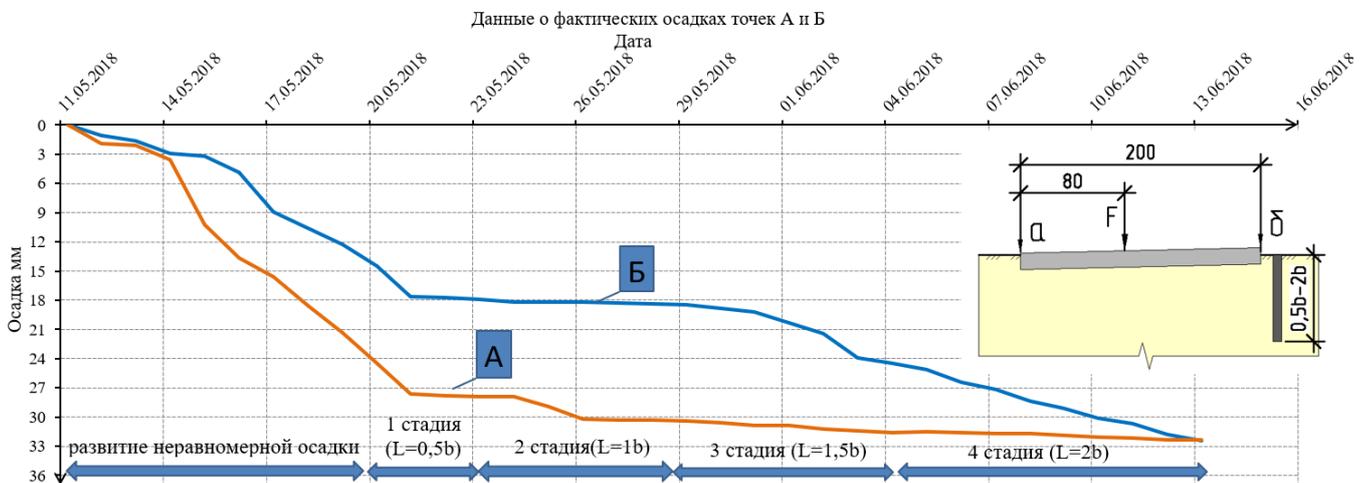


Рисунок 5 – График развитие осадки модели фундамента во времени

Бурение наклонных скважин

Во втором эксперименте исследовалось влияние угла наклона скважины на процесс снижения неравномерности осадки. Модель фундамента доводилась до разности осадки $\Delta s=12\text{мм}$. После наступления условной стабилизации выбуривались скважины $d=14\text{мм}$ под углом 30° к вертикали. Скважины выбуривались длиной от $0,5b$ до $1,5b$ с шагом $0,5b$.

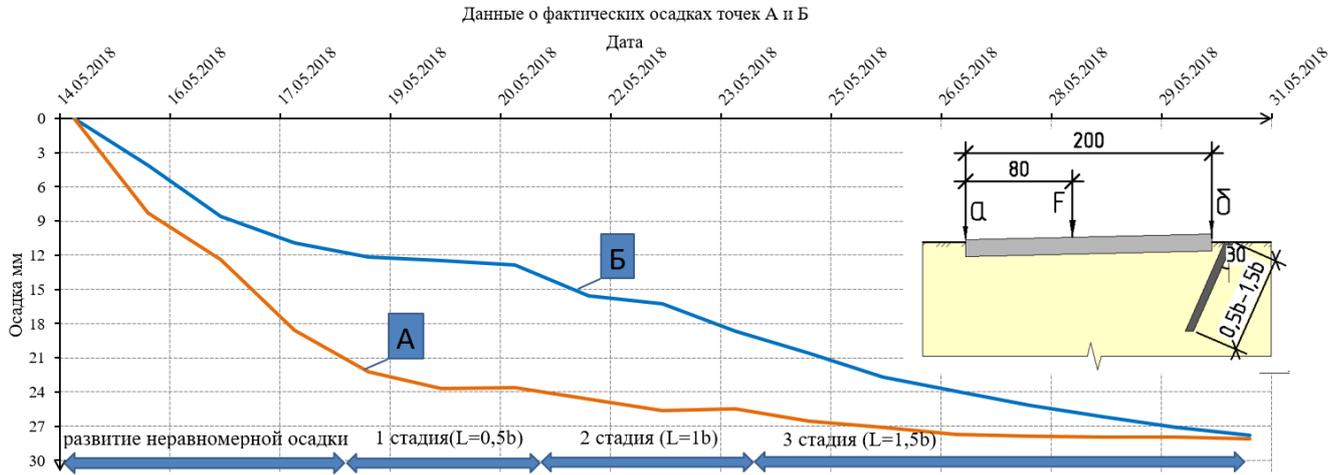


Рисунок 6 – График развитие осадки во времени в процессе уменьшения неравномерности осадки модели фундамента.

Исследования по бурению вертикальных и наклонных скважин (с углом наклона до 30° к вертикали) на модели плитного фундамента показали возможность контролируемого снижения неравномерности осадки с 1,2 см до 0,2 мм. Таким образом была обоснована эффективность разработанной технологии по снижению неравномерности осадок. По результатам серии экспериментов была воссоздана неравномерность осадок плоского штампа, и затем в четыре стадии выбуривания с поэтапным увеличением глубины скважины удалось снизить неравномерность осадок. Результатом второй главы является экспериментальное подтверждение эффективности предлагаемого метода в лабораторных условиях при моделировании основания мягкопластичным суглинком.

В третьей главе представлена методика аналитического расчета по определению основных технологических параметров бурения вертикальных и малонаклонных скважин.

Принято, что основными параметрами, влияющими на состояние грунтового основания вокруг скважин, являются физико-механические характеристики грунтов, геометрия скважины, ее положение относительно фундамента и напряженное состояние в основании.

Целью теоретического решения является нахождение границы распространения зон, в которых происходит нарушение условия прочности грунта, возникающее вокруг скважины. Зная границы данных зон по радиусу и глубину, на которой достигается ее максимальное значение, можно назначить шаг, длину и диаметр скважин, исходя, например, из принципа смыкания этих зон в основании, что, в соответствии с теорией предельного равновесия грунтов, должно приводить к разрушению основания в зоне расположения скважин и дополнительным осадкам основания.

Одним из важных и малоизученных факторов, влияющих на эффективность способа выбуривания, является расположение скважины относительно фундамента мелкого заложения, в том числе плитного. Для рассмотрения и выявления зависимостей в работе рассматривается три основных случая расположения скважины: одиночная скважина в удалении от фундамента (базовое решение, в осесимметричной постановке); скважина под фундаментной плитой (решение в осесимметричной постановке); скважина за пределами фундаментной плиты, в зоне влияния одностороннего поля дополнительных напряжений от фундамента (рис. 7).

В первом случае на одиночную скважину в удалении от фундамента действует только напряжения от собственного веса грунта, которые увеличиваются с ростом глубины линейно или по ломаной эпюре в зависимости от удельного веса грунта.

$$\sigma_{zg} = \int_0^z \gamma(z) dz \quad (2)$$

Горизонтальные напряжения принимаются по геостатической теории и определяются следующим соотношением $\sigma_x = \sigma_z \zeta$, где ζ -коэффициент бокового давления.

Во втором и третьем случаях, помимо собственного веса грунта, на устойчивость стенки скважины оказывает дополнительное влияние фундамент существующего здания. В соответствии с задачей Фламана теоретическое распространение изолиний напряжений в линейно-деформируемом полупространстве хорошо известно.

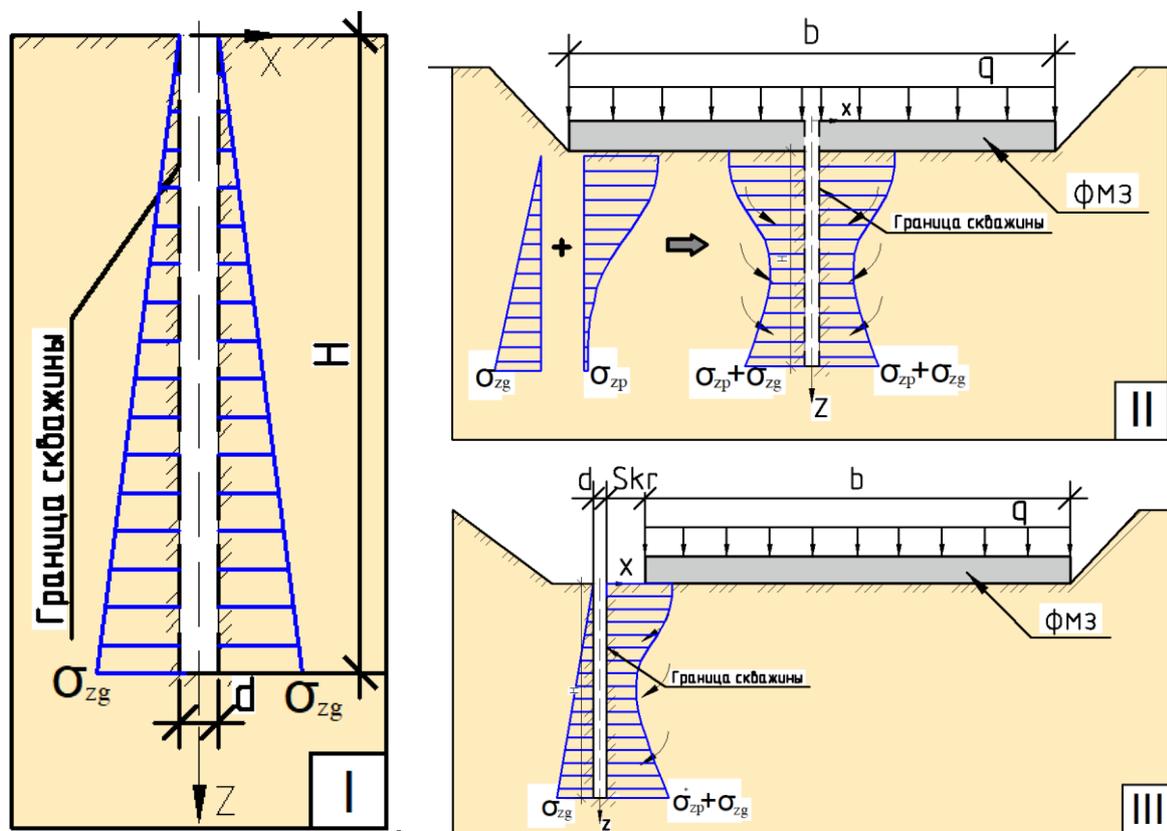


Рисунок 7 – Возможные случаи расположения вертикальных скважин; I-одиночная скважина, II-скважина в контуре здания, III-скважина вне контура здания

В первом расчетном случае для определения появления зон с нарушением закона прочности используется уравнение, приведённое в классических трудах по механике грунтов Цытовича Н.А., Тер-Мартirosян З.Г. и других.

Условие прочности Кулона-Мора составлено в полярной системе координат и выглядит следующим образом:

$$\sin \varphi = \frac{(\sigma_r - \sigma_\vartheta)}{(\sigma_r + \sigma_\vartheta + 2 * C * ctg \varphi)} \quad (3)$$

Механические характеристики грунтов, используемые в законе прочности: c, φ , считаем известными величинами, недостающими величинами являются радиальные и тангенциальные напряжения в массиве грунта вокруг скважины.

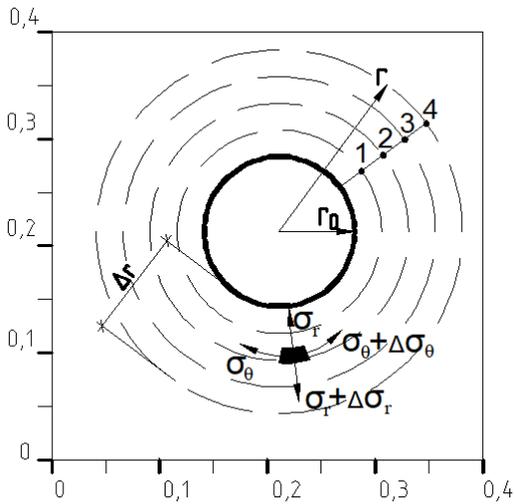


Рисунок 8 – Разрез скважины с изолиниями распределения зон пластических деформаций вокруг скважины.

В работе З.Г. Тер-Мартirosяна приведены зависимости из теории упругости (4), модифицированные для определения напряжений в грунтах при проходке скважин в условиях прессиометрических испытаний.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\mu}{1-\mu} * \gamma * z * \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \\ \sigma_\vartheta &= \frac{\mu}{1-\mu} * \gamma * z * \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \\ u_r &= \frac{\mu}{1-\mu} * \gamma * z * \frac{1+\mu}{E} * \frac{r_0^2}{r^2} \end{aligned} \right\} (4)$$

где u_r – перемещение стенки скважины; r – радиус до точки определения НДС; r_0 – радиус скважины; z – глубина скважины;

Последовательное решение системы уравнений 3 и неравенства 4 положено в основу аналитического метода определения НДС грунта вокруг выбуриваемой скважины.

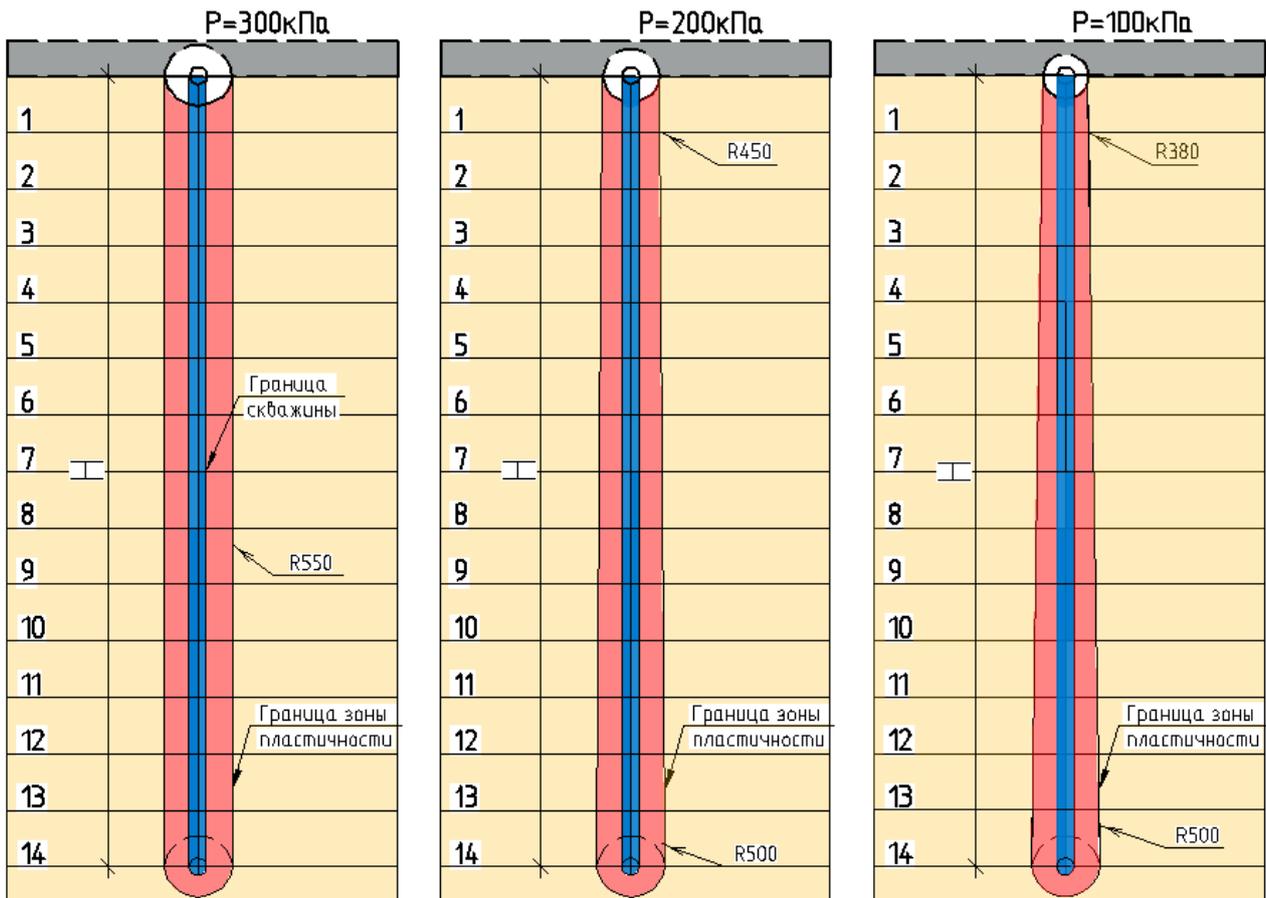


Рисунок 9 – Картина распределения зон с нарушением закона прочности грунта вокруг скважины, 2-ой расчетный случай.

Соотношения, описанные выше, справедливы для первого расчетного случая. Во втором расчетном случае скважина расположена под плитой вертикально. К системе уравнений 4 добавляются напряжения от фундаментной плиты (σ_{zp}):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\mu}{1-\mu} * \sigma_z * \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \\ \sigma_\vartheta &= \frac{\mu}{1-\mu} * \sigma_z * \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\text{где } \sigma_z = \sigma_{z\rho} + \sigma_{z\gamma} \quad (6)$$

Таким образом, получаем картину зон пластических деформаций под фундаментной плитой (рис. 9)

Установлено, что зоны пластичности при выбуривании грунта возникают от уровня устья скважины; с ростом давления под подошвой увеличивается радиус пластических деформаций; зоны пластических деформаций симметричны относительно центральной оси скважины.

Третий расчетный случай подразумевает расположение вертикальной скважины вне контура фундамента. Развитие деформаций основания под фундаментами имеет место в случае разрушения грунта вокруг скважины, т.е. возникновения, в данном случае, областей с нарушением закона прочности грунта вокруг цилиндрических полостей. Таким образом происходит сдвиг грунта из-под подошвы фундамента в ослабленные скважинами зоны. Для решения задачи необходимо рассмотреть механизм разрушения самой скважины вне контура фундамента. Напряжения в грунте вокруг скважины действуют несимметрично, поскольку с одной стороны на стенки скважины действует только собственный вес грунта, в то время как с другой стороны, действует и собственный вес грунта, и напряжения от фундамента. Рассмотрим напряженное состояние грунта вокруг скважины со стороны действия фундамента. Обрушение скважины может происходить по трем сценариям:

- 1) Потеря устойчивости стенки скважины.
- 2) Выдавливание грунта из пространства между скважинами.
- 3) Одновременно потеря устойчивости скважины и разрушение целика.

Рассмотрим первый сценарий:

Напряжённое состояние вокруг скважины формируется двумя составляющими σ_r^* и σ_ϑ^* . Радиальные и тангенциальные напряжения вокруг скважины формируются под действием собственного веса грунта, уравнение 4 и под действием нагрузки от фундамента:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^f &= P_x \left[\frac{1+\lambda}{2} * \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \frac{1-\lambda}{2} \left(1 + 3 * \frac{r_0^4}{r^4} - 4 * \frac{r_0^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \right] \\ \sigma_\vartheta^f &= P_x \left[\frac{1+\lambda}{2} * \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \frac{1-\lambda}{2} \left(1 + 3 * \frac{r_0^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Для определения давления, приходящегося на стенку скважины от действия фундамента, примем:

$$P_x = \sigma_x^{\text{бок}} \quad (8)$$

Для определения бокового давления $\sigma_x^{\text{бок}}$ использовалось решение И.Х. Митчела.

В итоге напряжённое состояние вокруг скважины описывается следующей закономерностью:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^* &= \sigma_r^{\text{гп}} + \sigma_r^{\text{ф-та}} \\ \sigma_\vartheta^* &= \sigma_\vartheta^{\text{гп}} + \sigma_\vartheta^{\text{ф-та}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Рассмотрим второй сценарий:

Выдавливание грунта из целика в скважину.

Считаем, что грунт в пространстве между скважинами теряет устойчивость раньше стенок скважины и обрушается, тем самым вызывая процесс обрушения скважины с достижением необходимого эффекта.

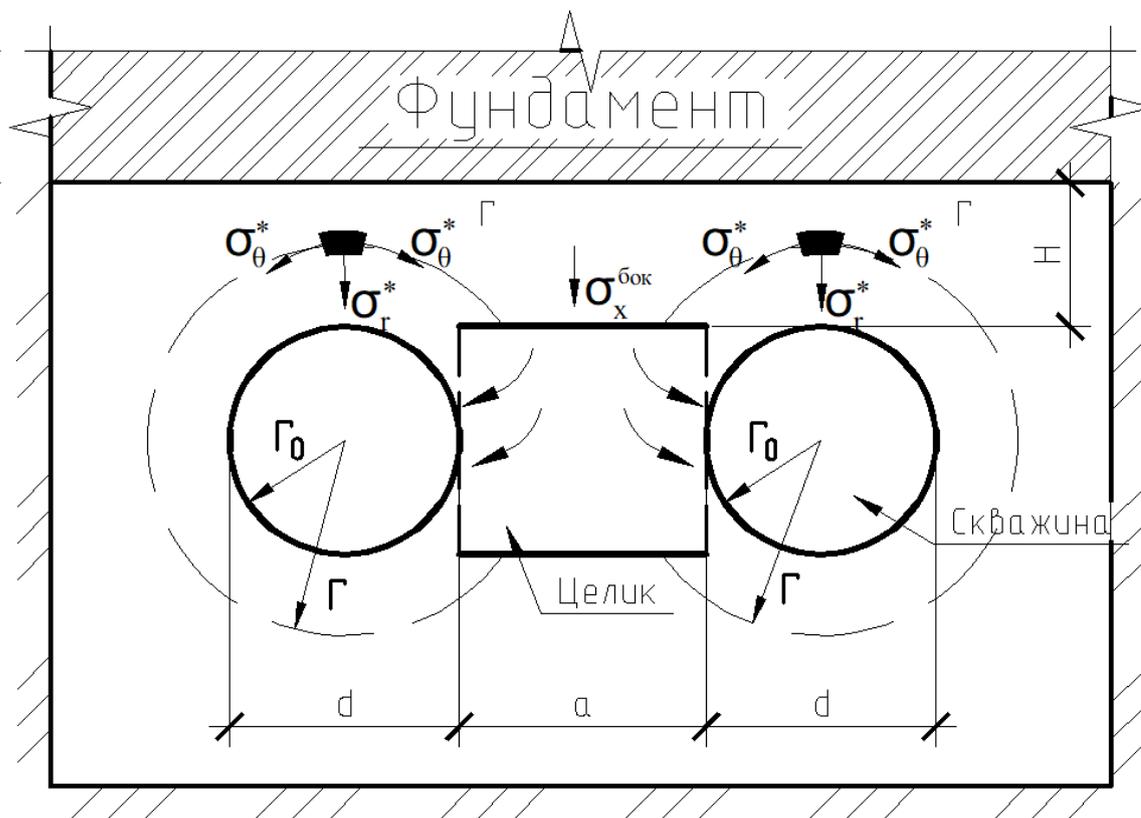


Рисунок 10 – Расчетная схема.

В работе Дыбы В.П. рассмотрено регулирование геометрического положения здания выбуриванием горизонтальных скважин. В качестве одной из задач, стоявшей перед авторами, было определение критического давления, которое может выдержать «столб» грунта - $P_{кр}$.

$$P_{кр} = \frac{4cH}{a} \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (9)$$

Обрушение целика грунта возникает при условии:

$$P_{кр} \leq P_x \quad (10)$$

Третий сценарий возникает одновременно при соблюдении условия 10 и возникновении областей с нарушением закона прочности грунта вокруг скважины. При достижении третьего сценария путем подбора соответствующих параметров, очевидно, процесс разрушения грунта для достижения заданного результата более гарантирован, но при этом может происходить достаточно быстро, что необходимо учитывать для обеспечения безопасности сооружения в процессе выравнивания осадок и устранения крена.

Для выявления закономерностей изменения НДС основания при выбуривании скважин была составлена программа для ЭВМ GsMonitor.

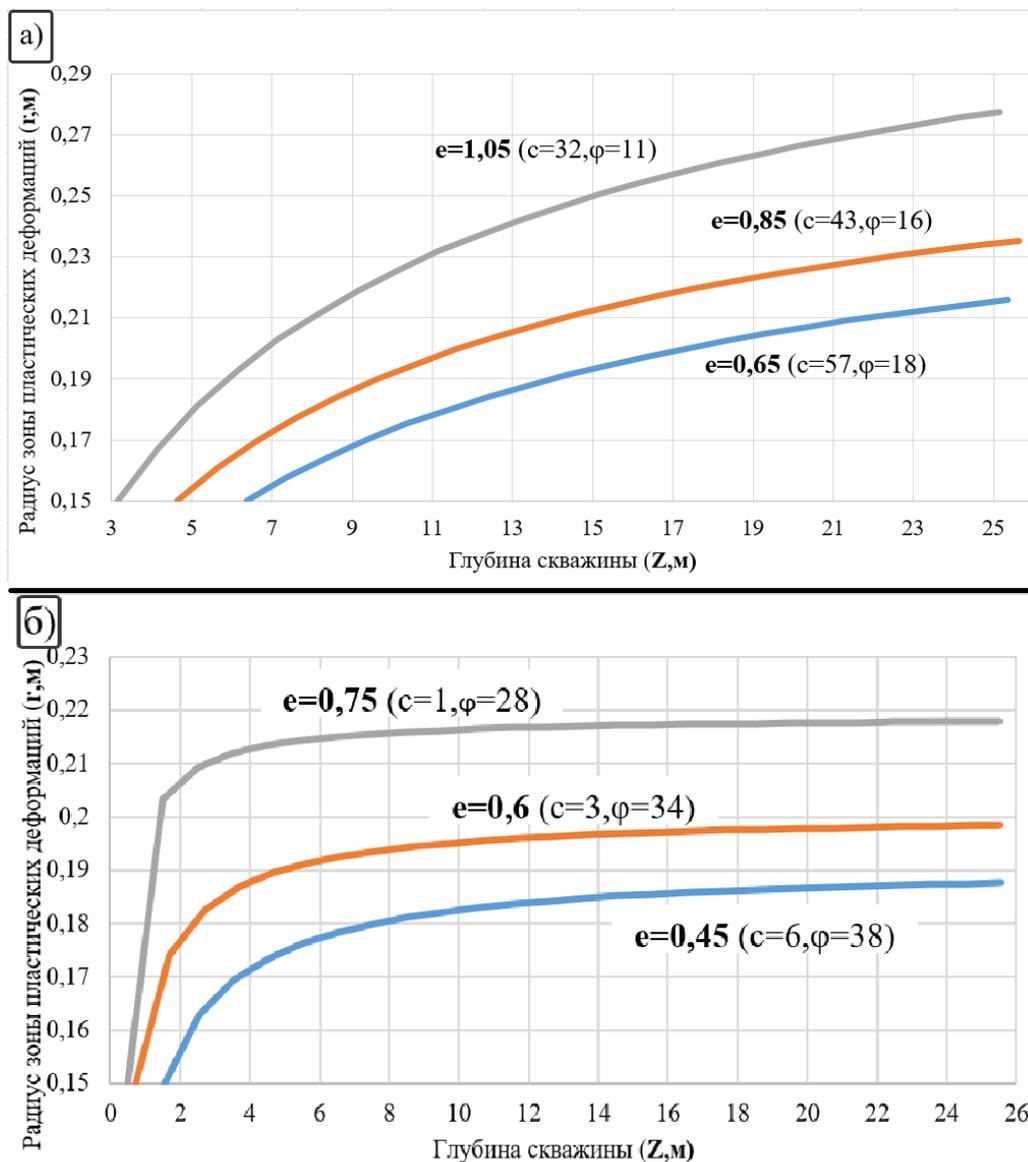
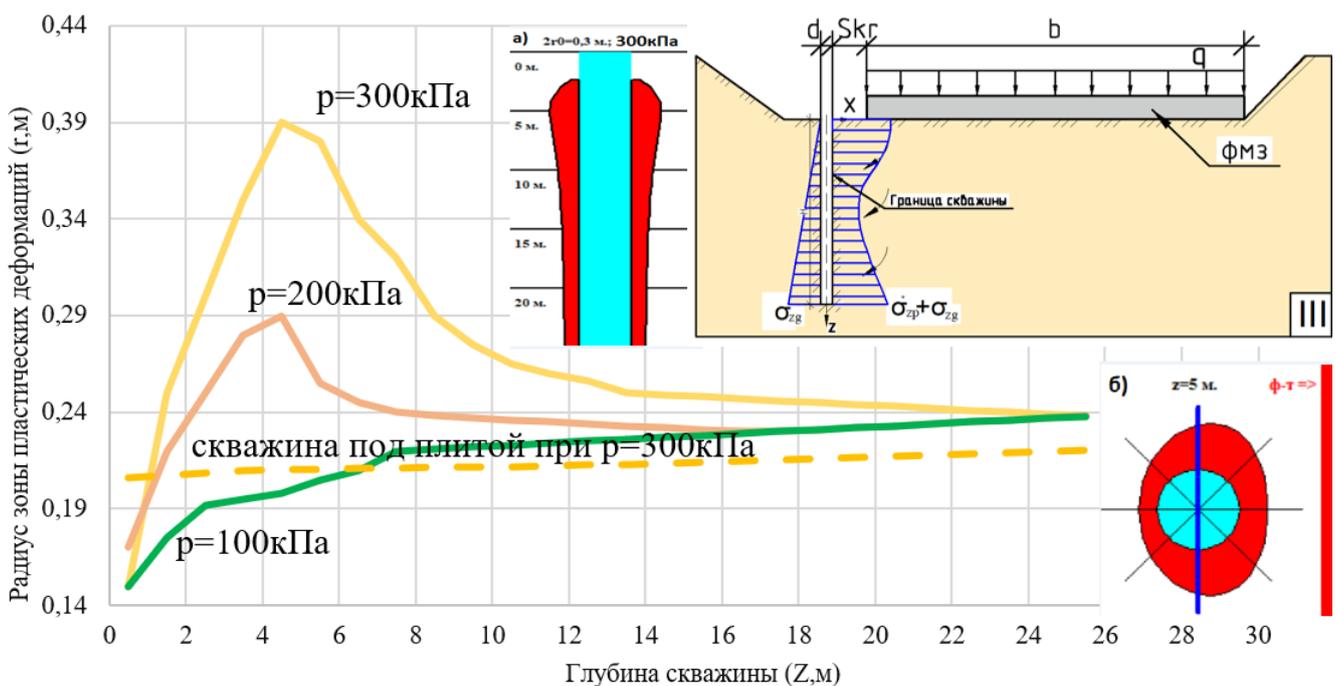
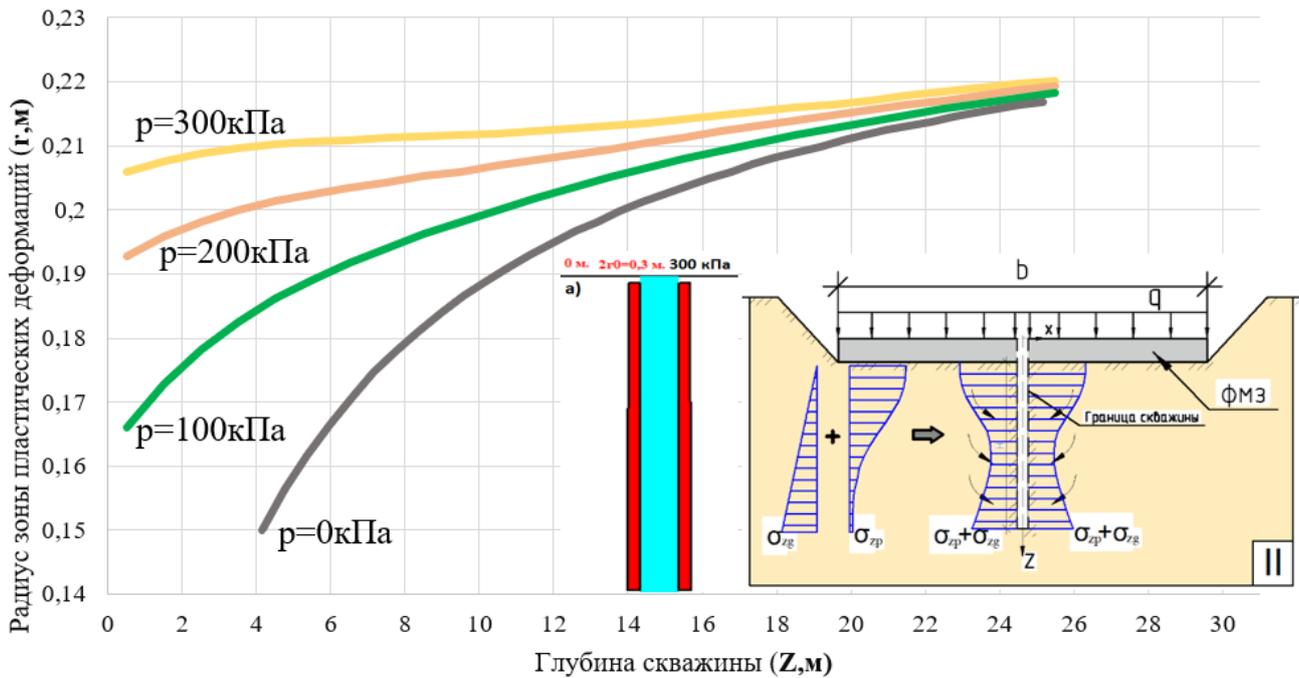


Рисунок 10 – График зависимости радиуса зон пластических деформаций по глубине скважины характерных для грунтов: а) – глинистых; б) – песчаных.

Установлено, что при снижении сцепления (наиболее характерно проявляется этот эффект в песчаных грунтах) пластические деформации формируются у устья скважины и с определенной глубины перестают меняться (рис. 10), из этого условия можно назначать глубину бурения. В глинистых грунтах (рис. 10). зоны развития пластических деформаций возникают значительно ниже и увеличиваются с ростом глубины.

Во втором и третьем случаях рассматривалось расположение скважины относительно фундамента в одинаковых грунтовых условиях.

Для сравнительного анализа принималась скважина $d=0,3\text{ м}$ и длиной $z=25\text{ м}$, ширина фундамента $b=14\text{ м}$, глинистый грунт со следующими характеристиками: $c=28\text{ кПа}$, $\varphi=22^\circ$. Давление под подошвой принималось от 100 до 300 кПа, с шагом 100 кПа. Влияние грунтовых вод на напряженное состояние скважины не рассматривалось.



Установлено (рис. 11, 12), что увеличение давления под подошвой фундамента ведет к увеличению зон пластичности вокруг скважины. Особенно этот фактор значителен при выбуривании скважины вне контура фундамента, то есть при ее несимметричном нагружении. При одинаковых исходных данных (характеристики грунта и геометрия скважины) вынесение скважины из-под подошвы фундамента дает увеличение зоны пластических деформаций в среднем в два раза.

Таким образом, следует констатировать, что третий расчетный случай является наиболее эффективным с точки зрения достижения конечной цели – контролируемых дополнительных осадок фундаментов и исправления крена.

В качестве критерия эффективности применения технологии выбуривания предложено условие:

$$V_{sp} \geq V_h \quad (11)$$

где V_{sp} – объем грунта, попадающего в зону пластических деформаций, V_h – объем скважины.

Так, если условие выполняется и объем грунта превышает объем скважины, то принимается, что скважина заполнена полностью и ее выбуривание имеет максимальную эффективность.

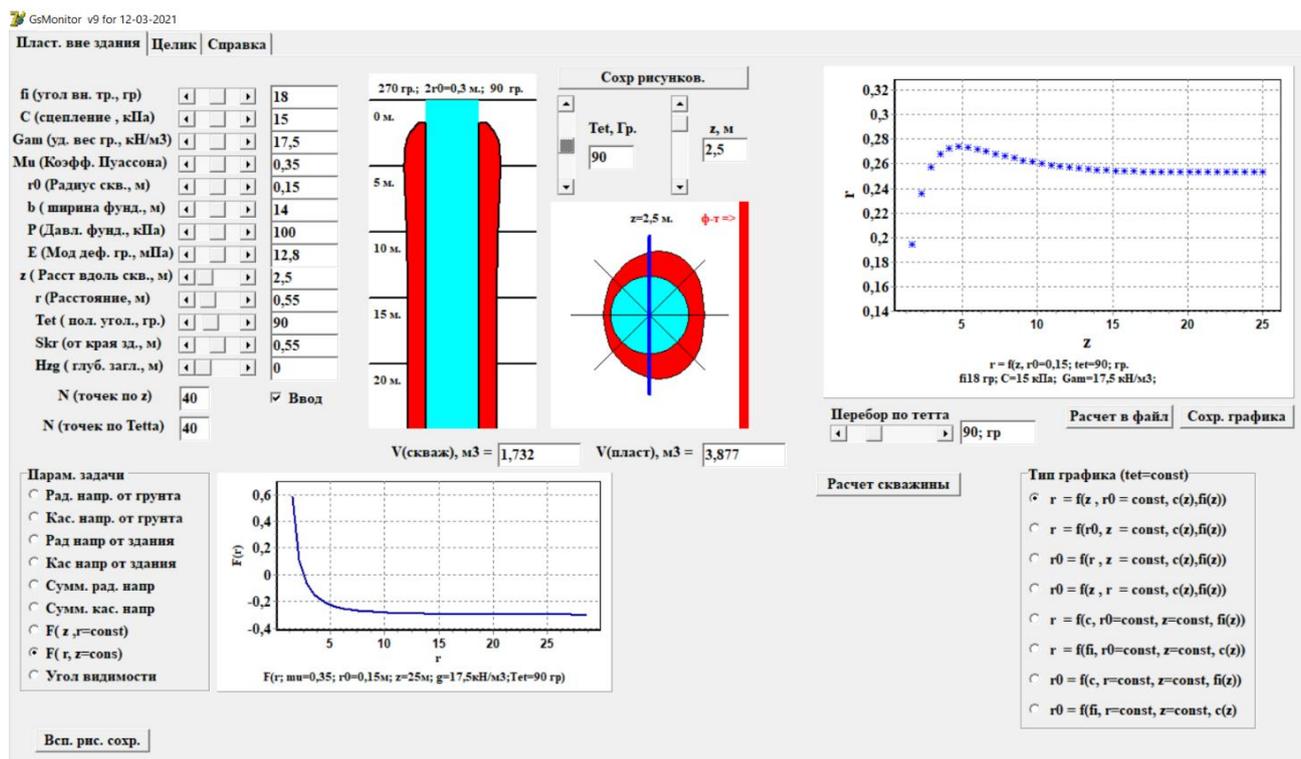


Рисунок 13 – Общий вид интерфейса программы GsMonitor.

Анализируя полученные в работе зависимости, можно сделать вывод, что бурение эффективнее всего производить не у самого края фундамента, а с определённым отступом - S_{kr} .

Установлена зависимость, что при таких изменяющихся расчетных условиях, как давление под подошвой, шаг скважин, отступ скважины от фундамента, устойчивость целика в 2 – 3 раза выше в грунтах с высоким сцеплением.

Рассмотрев оба случая разрушения, можно прийти к выводу, что заполнение скважины грунтом, вероятнее всего, будет происходить вследствие обрушения грунта при сочетании обрушения стенок скважины за счет возникновения зон пластических деформаций и потери устойчивости целика. Сценарий, когда одновременно сочетаются оба фактора, ведет к повышению эффективности и скорости выполнения работ по снижению неравномерности.

Таким образом, в третьей главе предложен аналитический метод и создана автоматизированная программа для расчета НДС грунта вокруг скважин, с учетом их различного расположения по отношению к полю нагружения, выявлены основные

закономерности необходимые для назначения параметров скважин в различных грунтах.

В четвертой главе раскрыты особенности реализации разработанного метода регулирования геометрического положения на примере строительства двухсекционного жилого комплекса в г. Тюмени, (далее — Объект).

Жилой дом разной этажности, блокированный в плане: «Г-образный», состоящий из четырех секций, которые поделены между собой через деформационные швы. Из них две секции – девятиэтажные и две секции четырнадцатипятиэтажные, повернутые под прямым углом к девятиэтажным секциям.

В ходе комплексного обследования строительных конструкций, а также проведения контрольных инженерно-геологических испытаний, выявлены следующие отклонения и дефекты:

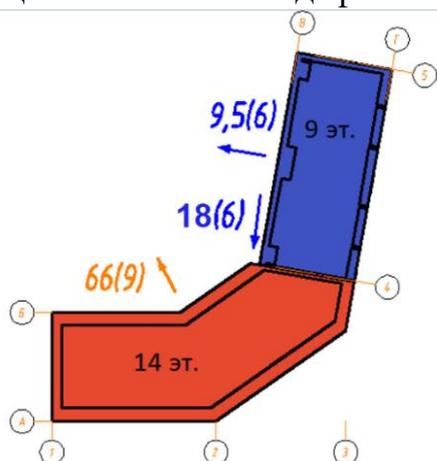


Рисунок 14 – Горизонтальные отклонения здания в (см), в скобках даны предельные значения для данного типа конструкций(см).

1. Определено, что на период проведения обследования (май 2015 года) относительная разность осадок для девятиэтажной секции составляла 0,0045 в сторону дворового фасада здания и 0,0057 в сторону второй(четырнадцатипятиэтажной секции), для первой и второй секции (14-этажной) к маю 2015 года относительная неравномерность осадки составила 0,015 в сторону дворового фасада здания, что превышает допустимое нормативное значение более чем в 6 раз.

2. В ходе проведения геодезического мониторинга для девятиэтажной секции разность осадок по разрезу торца здания составила – 18см, для четырнадцатипятиэтажных секций разность осадок составила 285мм, что

привело к отклонению остова здания от горизонтали на 66,2см, что превысило нормируемое значение более чем в 7 раз (рис.14).

Причиной возникновения неравномерных осадок фундамента послужили следующие факторы:

- смещение центра тяжести надземной части здания в сторону двора относительно фундаментной плиты;
- неравномерное напластование грунтов с выклиниванием слоев;
- ошибки на этапе инженерно-геологических испытаний как следствие ошибки при выборе типа фундамента;
- устройство части котлована на месте бывшего овощехранилища без проведения работ по рекультивации и отсыпке с последующим уплотнением грунта.

Технология и особенности проведения работ.

Для выполнения работ по регулированию геометрического положения на объекте в городе Тюмени на первом этапе производства работ была применена цементация по манжетной технологии.

Следует отметить, что при выполнении гидроразрывов в основании 9-этажной секции наблюдалось ее поднятие до 15мм, и затем в процессе релаксации напряжений

происходило опускание до начального уровня. 14-этажная секция не имела поднятия и опускалась после нагнетания на 1-1,5мм.

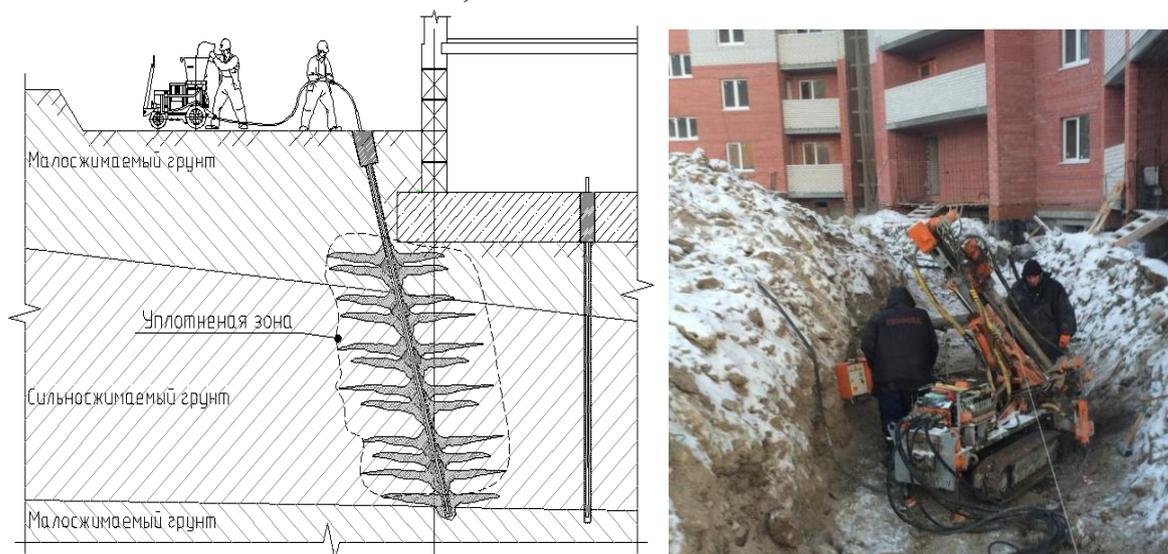


Рисунок 15 – Применение манжетной технологии.

После завершения первой стадии и стабилизации осадок фундамента производилось выбуривания вертикальных скважин со стороны с наименьшими деформациями основания (2-ой этап) (рис. 16).

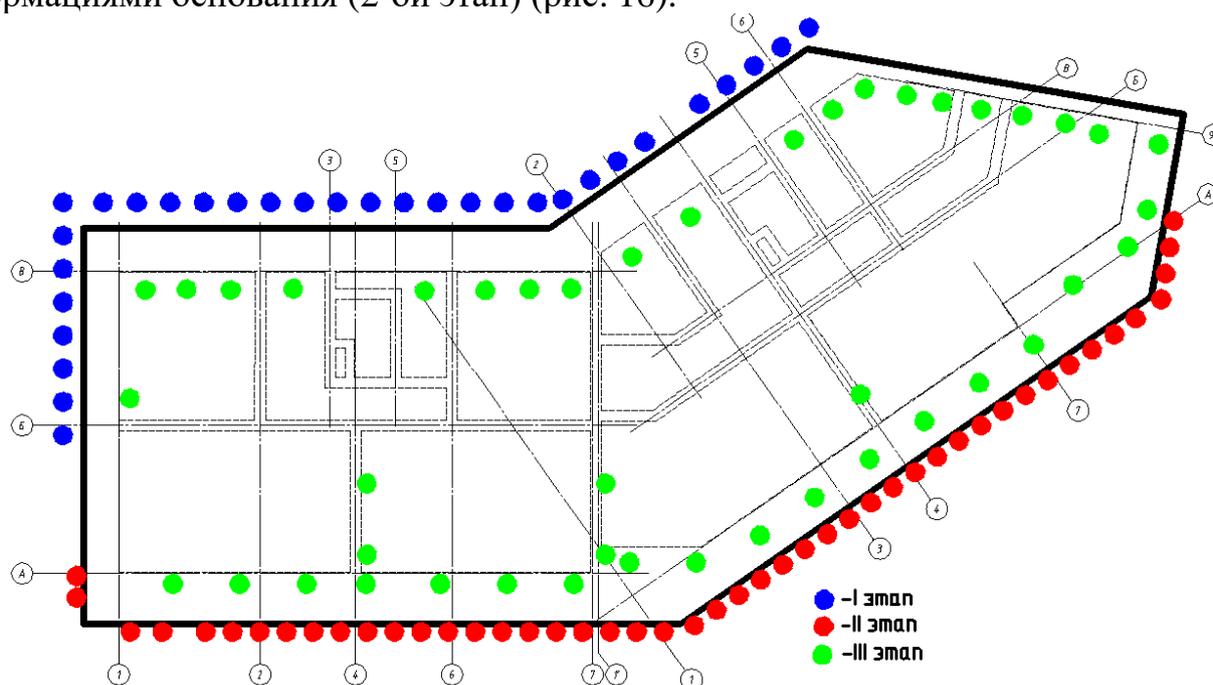
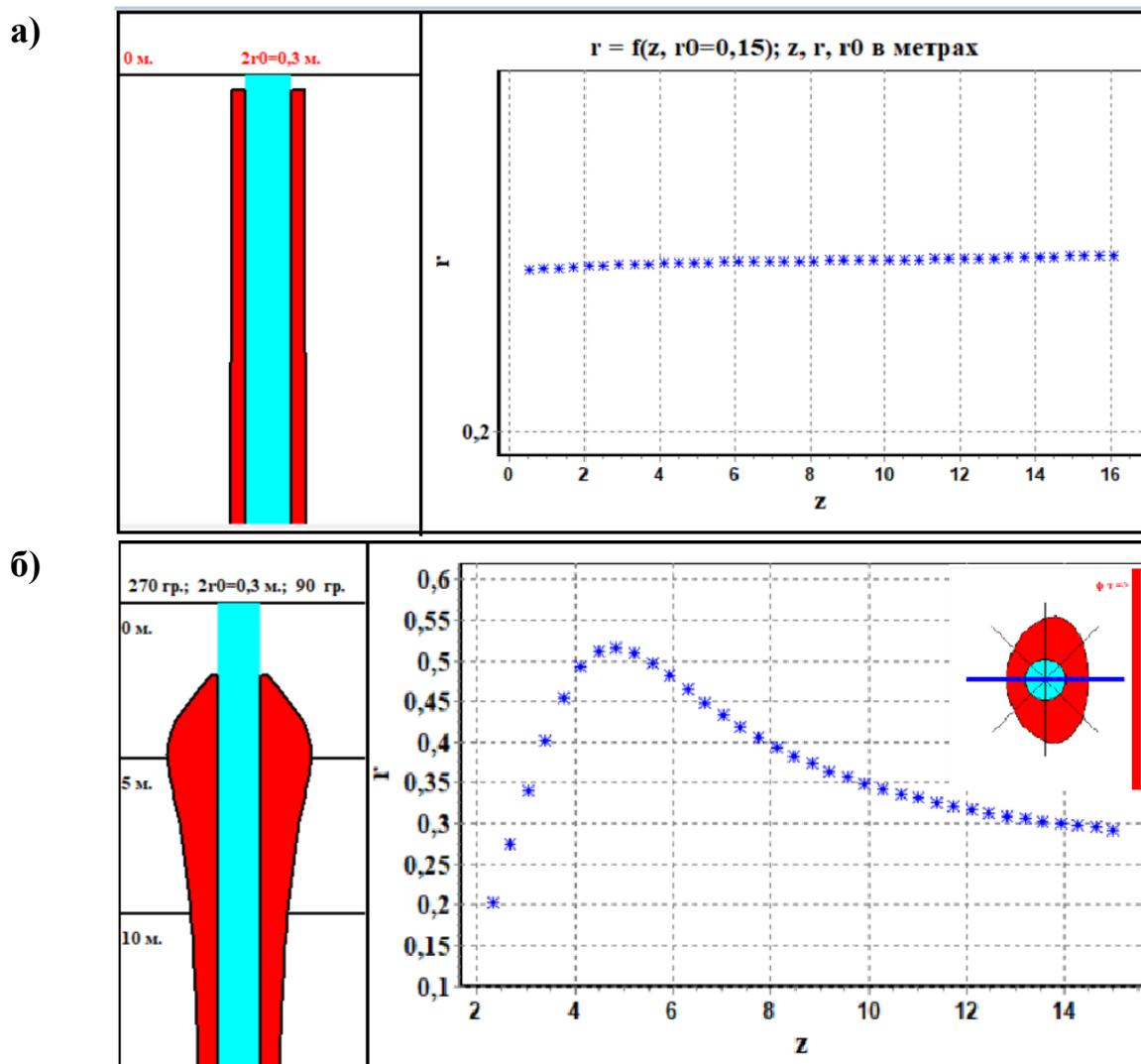


Рисунок 16 – План фундаментной плиты с расположением на нем скважин и инъекторов (синий цвет – этап I: закрепление основания; красный цвет – этап II: выбуривание грунта; зеленый цвет – этап III: закрепление основания по периметру).

Выбуривание грунта велось с противоположной крену стороны. Первоначальным проектом предполагалось выполнение скважины в контуре здания и вдоль фундаментной плиты (вне контура), но как можно ближе к ее краю. Следующий цикл разбуривания назначался после визуальной оценки состояния скважин на предмет ее затягивания грунтом. Скважина считается заполненной при наличии в ней грунта более чем на 2/3 ее длины. Однако, после начала работ, в ходе визуальных наблюдений было установлено, что скважины в контуре фундаментной плиты заполняются грунтом не более, чем на 1/3 длины. Основываясь на данных

наблюдения, было решено в дальнейшем не производить бурение в контуре здания. Еще одним важным параметром является глубина скважин. На первом цикле выполнялись скважины глубиной $L=8$ м от дневной поверхности. В результате наблюдений за процессом обрушения стенок скважин, на основании мониторинга, который производился параллельно с ходом работ, было установлено, что восьмиметровые скважины низкоэффективны, ведь они затягивались грунтом не более чем на $1/3$ от глубины, и, по результатам наблюдения, за осадками неравномерность практически не снижалась. В последствии глубина была увеличена до 10 м, а затем до $12\text{ м} - 0,8b$, где b - ширина фундамента, что дало видимый результат по снижению неравномерности осадок. Натурные наблюдения на объекте в последствии подтвердились расчетными данными, максимальные радиусы зон пластических деформаций наблюдались на отметках от 2,5 до 8 метров от устья скважины. С учетом глубины заложения фундамента, равной 3,1 метра, рекомендуемая эффективная глубина бурения составляет 11,1 метра. На объекте применялись скважины глубиной $L=12$ м.

При расчетах напряженного состояния грунта использовались поверочные инженерно-геологические изыскания, выполненные в 2016 году, размеры скважин при моделировании в программе «GsMonitor» принимались, согласно проекту, диаметром $d=0,3$ м, глубиной $L=12$ м от земной поверхности.



Из графиков, приведенных на рисунке 17, можно установить, что при вынесении скважины за контур фундамента радиус зоны пластических деформаций увеличивается до двух раз. Объем грунта, попадающего в зону пластических деформаций, при бурении в контуре: $V_{пл1}=1,91\text{м}^3$, вне контура: $V_{пл2}=7,21\text{м}^3$, то есть вынесение скважины за контур фундамента позволило увеличить зоны запредельной работы грунта в 3,7 раза.



Рисунок 18 – Работы по выбуриванию скважин.

Далее производилась цементация основания по периметру (3-ий этап).

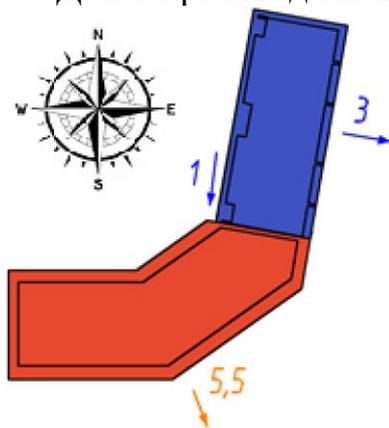


Рисунок 19 – Остаточные горизонтальные отклонения на период 12.02.2020

В результате начавшегося в феврале 2015 года поэтапного производства работ предлагаемым методом удалось остановить прогрессирующую абсолютную и неравномерную осадки фундаментной плиты, приступить к регулированию геометрического положения зданий. В результате, относительные разности осадок уменьшились до $i=0,00054$ для 14-этажной секции и $i=0,00027$ для 3 и 4 секции (9 этажей). Горизонтальное перемещение для девятиэтажной и четырнадцатипятиэтажной секции на период марта 2019 года составляет 3 и 5,5 см, при максимальных значениях для данного типа задний 6 и 9 см соответственно. Полностью объект сдан в эксплуатацию в третьем квартале 2018 года. В четвертой

главе приведением двух зданий в проектное геометрическое положение доказана высокая эффективность предложенного метода регулирования геометрического положения зданий, разработанного на основании выполненных экспериментально-теоретических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработан и обоснован эффективный метод регулирования кренов зданий и сооружений на плитных фундаментах, позволяющий

контролируемо приводить объекты в требуемое пространственное положение путем выбуривания грунта вертикальными или малонаклонными к вертикали скважинами, в условиях оснований, сложенных слабыми пылевато-глинистыми грунтами,

1. При возникновении неравномерных осадок в условиях сложных и нестабилизирующихся кренов плитных фундаментов, в основании которых залегают слабые пылевато-глинистые грунты, эффективным методом регулирования геометрического положения зданий и сооружений является контролируемое выбуривание вертикальных или малонаклонных скважин.
2. Экспериментальными исследованиями в лабораторных условиях по применению методики выбуривания вертикальных или малонаклонных скважин установлено, что контролируемым выбуриванием скважин со стороны противоположной крену можно добиться требуемого геометрического положения плитного фундамента с необходимой точностью, включая возвращение фундамента в проектное положение. Так, на мягкопластичных суглинках удалось контролируемо достичь уменьшения неравномерности осадок с 1,2 см до 0,02 см и тем самым качественно обосновать эффективность данного метода для слабых оснований. Выявлено, что требуемый эффект выравнивания осадок модели фундамента достигается, когда длина скважины составляет 1,5 и 2,0 ширин фундамента, для скважин с углом к вертикали 30° и вертикальных скважин соответственно.
3. Разработана аналитическая методика расчета НДС грунтового основания вокруг скважин для трех расчетных случаев с целью определения их основных параметров, реализованная в программе «GsMonitor». На основании реализации методики расчета установлено, что при одинаковых исходных данных, а именно физико-механических характеристиках грунта, геометрии скважины, необходимо выносить скважины за контур фундамента, что позволяет увеличить зону пластических деформаций (зон потенциального разрушения), примерно в 2 раза, тем самым уменьшить частоту бурения и повысить эффективность предлагаемой технологии.
4. Выявлены закономерности влияния различных параметров на устойчивость стенки скважин, учитывая устойчивость грунтового целика между скважинами. Так, установлено, что для песчаных грунтов с низким сцеплением до 5 кПа зоны пластических деформаций развиваются от устья скважины и с глубины, равной $8-10d$, перестают увеличиваться. Для пылевато-глинистых грунтов, с увеличением сцепления зоны пластических деформаций начинают развиваться с больших глубин (около $10-12d$) и затем увеличиваются пропорционально росту глубины.
5. Объем скважин, с учетом кратности выбуривания, при условии потери устойчивости стенок скважин и нарушения целостности целика между скважинами примерно, в пределах 10%, равен объему грунта, выдавливаемому весом сооружения в скважины. Данный факт установлен в результате промышленного внедрения и натурных исследований и может быть принят в качестве проектного параметра перед производством работ по регулированию пространственного положения объектов.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования: изучение влияния действия подземных напорных и безнапорных вод на устойчивость скважин, применительно к разработанному методу; исследование применимости метода для других видов фундаментов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных

в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. **Кайгородов, М.Д.** Результаты исследования напряженно-деформированного состояния грунтового массива при формировании контролируемого уширения на конце бурой инъекционной сваи / М. А. Самохвалов, Ю. В. Зазуля, **М.Д. Кайгородов** // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2017. – № 2(46). – С. 11-17.

2. **Кайгородов, М.Д.** Аналитическое определение параметров скважины при устранении неравномерной осадки фундаментов методом выбуривания грунта / Я. А. Пронозин, **М. Д. Кайгородов**, А. М. Караулов // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11. – № 2. – С. 40-48. – DOI 10.15593/2224-9826/2020.2.04.

3. **Кайгородов М.Д.** Аналитическое определение напряженного состояния скважины при использовании технологии снижения неравномерности осадок методом выбуривания/Пронозин Я.А., **Кайгородов М.Д.**, Гербер А.Д.// Транспортные сооружения, 2021 №2, <https://t-s.today/PDF/08SATS221.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/08SATS221

Статьи, опубликованные в других журналах и изданиях:

4. **Kajgorodov, M.D.** Structural safety of buildings in excess values of differential settlements. / Pronozin, Y.A, Epifantseva, L.R., **Kajgorodov, M.D.** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2019– 481. 012013. 10.1088/1757-899X/481/1/012013.

5. **Кайгородов, М.Д.** Модельные исследования процесса снижения неравномерности осадки плитного фундамента / **М. Д. Кайгородов** // Вопросы проектирования и устройства надземных и подземных конструкций зданий и сооружений: Межвузовский тематический сборник трудов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – С. 92-96.

6. **Кайгородов, М.Д.** Регулирование геометрического положения зданий, в условиях сильносжимаемых грунтовых оснований / Пронозин Я.А., **Кайгородов М.Д.** / Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы междунар. науч.-техн. конф. - Новочеркасск, 2018. - С. 462-466.

7. **Kaygorodov, M. D.** Comparative analysis of various methods of correction of the inequality of the sediments of the foundations in the basis of which the dust-clay primes come / **M. D. Kaygorodov** // Новые технологии - нефтегазовому региону: Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 16–18 мая 2018 года.2018. – С. 252-255.