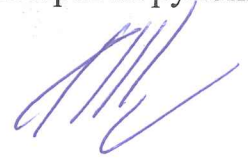


На правах рукописи



ШУЛЯТЬЕВ ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЁТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ
ПЛИТНЫХ И СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ
ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ**

Специальность: 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

доктора технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство», Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсевича» (АО «НИЦ Строительство» – НИИОСП им. Н.М. Герсевича).

Научный консультант: Доктор технических наук, профессор

Готман Альфред Леонидович

Официальные оппоненты: **Знаменский Владимир Валерианович**

доктор технических наук, профессор,

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), профессор кафедры «Механика грунтов и геотехника»

Мангушев Рашид Абдуллович

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ), заведующий кафедрой «Геотехника»

Мирсаяпов Илизар Талгатович

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет» (КазГАСУ), заведующий кафедрой «Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ПГУПС)

Защита состоится 20 мая 2020 г в 11-00 на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

И.о. учёного секретаря
диссертационного совета

Крылов Сергей Борисович

Актуальность темы исследования

Темпы роста объёма строительства высотных зданий каждый год увеличиваются. В Санкт-Петербурге построена башня «Лахта Центр» высотой 464 м, ставшая самым высоким зданием в Европе. В Москве только в районе Москва – Сити возведено 20 небоскрёбов. Уже построены и планируются к строительству высотные здания практически во всех крупных городах России.

Большие нагрузки, передаваемые на фундаменты высотных зданий (ФВЗ) от надземных конструкций, а также их высокая чувствительность к крену создают свои особенности для расчёта и конструирования фундаментов высотных зданий, которые недостаточно изучены и требуют дополнительных исследований. В связи с этим исследования указанных вопросов актуальны и имеют практическую ценность.

Степень разработанности темы исследований

В связи с бурным ростом строительства высотных зданий во всем мире вопросами расчёта и проектирования фундаментов высотных зданий активно занимался и в настоящее время занимается ряд специалистов. За границей это W. F. Baker, Yit Lin Chew, A. Mandolini, H.G. Polous, K. Kayvani, R. Katzenbach, G. Russo, C. Viggiani и др. В России в области инженерно-геологических изысканий следует упомянуть таких исследователей как Е.А. Вознесенский, И.Т. Мирсаяпов, В.П. Петрухин, З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, А.Н. Труфанов, в области расчёта и проектирования фундаментов высотных зданий — С.Г. Безволев, А.Л. Готман, Н.З. Готман, К.Е. Егоров, В.В. Знаменский, В.А. Ильичёв, И.В. Колыбин, И.Г. Ладыженский, Р.А. Мангушев, И.Т. Мирсаяпов, Н.В. Никитин, В.П. Петрухин, З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, В.И. Травуш, В.М. Улицкий, В.Г. Федоровский, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин, В.И. Шейнин и др.

Вопросами напряжённо-деформированного состояния (НДС) однородных, неоднородных и переуплотнённых оснований занимались В.Г. Березанцев, Г.Г. Болдырев, А.И. Боткин, Ж. Буссинеск, Г. Генки, Р. Гук, Ю.К. Зарецкий, Г.К. Клейн, Ш. Кулон, С.Г. Лехницкий, М.В. Малышев, Е. Мелан, Р.Э. Мизес, О.К. Мор, А.Л. Надаи, А.Б. Пономарев, Л. Прандтль, Я.А. Пронозин, Л.Н. Рассказов, З.Г. Тер-Мартirosян, С.П. Тимошенко, В.Г. Федоровский, А. Фламан, В.А. Флорин, О.К. Фрелих, Н.А. Цытович, В.И. Шейнин, Ф. Шлейхер и др. В результате выявлено влияние неоднородности и переуплотнения грунта на распределение напряжений в массиве грунта и на значение конечной осадки.

Вопросы взаимодействия свай между собой и грунтом исследовали J.B. Burland, J. Haninsch, T.H. Hanna, R. Katzenbach, A. Kedzi, A. Mandolini, H.G Polous., M.F. Randolph, G. Russo, C. Viggiani, T. Whitaker, A.A. Бартоломей, Б.В. Бахолдин, С.Г. Безволев, В.Г.

Березанцев, В.Н. Голубков, А.Л. Готман, Н.З. Готман, А.А. Григорян, Е.Э. Девальтовский, А.М. Дзагов, Н.М. Дорошкевич, В.В. Знаменский, А.А. Луга, В.М. Мамонов, Р.А. Мангушев, А.И. Полищук, А.Б. Пономарёв, Д.Е. Разводовский, З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, В.Г. Федоровский, Л.А. Фурмонавичус и др. В результате выявлено специфическое поведение одиночных свай в отличие от свай в составе свайного поля, наличие углового эффекта и др.

Научно-техническая гипотеза: принимая во внимание особенности конструкций высотных зданий и, соответственно, их фундаментов, существует ряд факторов, процессов и явлений, а также допущений при расчётах, влияющих на напряжённо-деформированное состояние оснований фундаментов, но не учитываемых в расчётах и конструировании фундаментов высотных зданий, что снижает их эффективность, а в некоторых случаях – и надёжность.

Целью исследования является разработка основных принципов расчёта и конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий.

Задачи исследования:

- Выполнить обзор и анализ конструктивных особенностей высотных зданий и их влияния на напряжённо-деформированное состояние плитных и свайных фундаментов.
- Провести теоретические и экспериментальные исследования влияния параметров грунта на напряжённо-деформированное состояние основания фундаментов высотных зданий, на базе чего разработать принципы проведения инженерно-геологических изысканий оснований фундаментов высотных зданий.
- Выявить конструктивные и технологические факторы, влияющие на напряжённо-деформированное состояние плитных и свайных фундаментов высотных зданий.
- Разработать основные принципы конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий, включающие в себя, в том числе, выравнивание усилий в сваях свайного поля, повышение несущей способности одиночной сваи, подготовку основания фундаментной плиты.
- Разработать методику и провести натурные исследования взаимодействия свай в свайном поле между собой и с грунтом.
- Провести натурные экспериментальные исследования влияния фильтрационной консолидации на изменение напряжённо-деформированного состояния массива грунта.
- Определить параметры напряжённо-деформированного состояния оснований и фундаментов, необходимые для контроля корректности выполнения инженерно-геологических изысканий, расчётов и конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий, а также качества выполнения строительно-монтажных работ.

Объектом исследования в диссертации являются плитные и свайные фундаменты высотных зданий.

Предмет исследования: выявление особенностей расчёта и конструирования фундаментов высотных зданий.

Научная новизна проведённых исследований состоит в следующем.

- Разработана научная концепция, заключающаяся в научно-обоснованных, экспериментально подтверждённых и практически доказанных принципах проведения инженерно-геологических изысканий, расчёта и конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий.
- На основании теоретических и экспериментальных исследований определены дополнительные параметры твёрдых глинистых грунтов, которые следует учитывать при расчёте напряжённо-деформированного состояния оснований фундаментов высотных зданий, такие как анизотропия деформационных характеристик грунта, параметры переуплотнения, зависимость модуля деформации грунта от напряжённого состояния.
- Предложены новые способы определения фильтрационных и механических характеристик грунтов, заключающиеся в том, что фильтрационные характеристики определяются по скорости изменения порового давления в процессе гидрокомпрессионных испытаний на основании разработанной соответствующей модели грунта, а механические характеристики определяются путём обратных расчётов испытания грунта двунаправленной нагрузкой по специально разработанной методике.
- Доказана необходимость учёта в расчётах ряда конструктивных и технологических факторов, влияющих на напряжённо-деформированное состояние основания плитных и свайных фундаментов высотных зданий, к основным из которых следует отнести разуплотнение грунта при разработке котлована, наличие конструкций ограждения котлована, существующее напряжённое состояние основания, строительство рядом расположенных зданий и сооружений, а также развитие осадки во времени.
- Доказано, что в процессе фильтрационной консолидации грунтов, обладающих фильтрационной анизотропией, в краевой зоне фундамента может возникнуть уменьшение эффективных напряжений в результате фильтрации воды из центральной зоны. Это приводит к расширению области пластических деформаций в краевой зоне, и, соответственно, к изменению конечных значений напряжённо-деформированного состояния основания фундамента. Аналогичный эффект может произойти и при расположении на пути фильтрации водонепроницаемых преград в виде стены в грунте и др.

- На основании статических испытаний грунта буронабивными сваями выявлен эффект увеличения сопротивления грунта по боковой поверхности буронабивных свай в результате их взаимодействия в свайном поле.
- Предложена методика учёта зависимости модуля деформации грунта от напряжённого состояния основания при расчёте осадки фундаментов.

Теоретическая значимость

- Определено влияние прочностных характеристик грунта на распределение усилий между сваями.
- На основе проведённых лабораторных исследований для большинства песчаных (пылеватых, мелких и средней крупности) и твёрдых глинистых (вендские глины) грунтов получены зависимости между модулем деформации грунта в вертикальном направлении и горизонтальными напряжениями.
- Доказан эффект возрастания порового давления в краевой зоне основания фундамента в процессе фильтрационной консолидации после приложения нагрузки в грунтах, обладающих фильтрационной анизотропией.
- Разработаны предложения по определению сопротивления грунта по боковой поверхности буронабивных свай в твёрдых глинистых грунтах.
- Получена зависимость коэффициента фильтрации грунта от скорости изменения порового давления при проведении как гидростатических, так и компрессионных испытаний.
- Теоретически и экспериментально обоснованы контрольные параметры напряжённо-деформированного состояния оснований и фундаментов в процессе возведения высотного здания.

Практическая значимость

- Предложены предельные величины осадок фундаментов высотных зданий, зависящие от высоты здания.
- Даны рекомендации по выбору конструкций плитных и свайных фундаментов высотных зданий в зависимости от высоты здания и грунтовых условий.
- Разработаны конструкции и технологические мероприятия, позволяющие повышать несущую способность одиночной сваи и основания фундаментной плиты, выравнивать усилия в сваях свайного поля, регулировать напряжённо-деформированное состояние основания фундамента высотного здания, а также снижать взаимное влияние фундамента высотного здания и окружающих сооружений при строительстве многофункциональных комплексов.

- Предложена и практически опробована методика проведения испытаний грунта сваями методом двунаправленной нагрузки для уточнения параметров грунта и апробации расчётной модели.
- Разработана методика расчёта требуемого объёма инъекционного раствора для повышения сопротивления грунта по боковой поверхности буронабивной сваи.
- Определены требования к составу и объёму мониторинга при строительстве высотных зданий.
- Усовершенствовано оборудование для проведения геотехнического мониторинга, позволяющее определять послойные деформации основания.

Методология и методы исследований

Для решения поставленных задач использовались методы теории упругости, теории пластичности, а также консолидации и ползучести многофазных грунтов, в том числе принцип эффективных напряжений К. Терцаги, теория ламинарной фильтрации жидкости в пористой среде А. Дарси, теория сжимаемой газосодержащей жидкости Л.С. Лейбензона, закон Бойля – Мариотта, теория прочности Кулона – Мора и др.

В испытаниях использовались как натурные фундаменты (свайные и на естественном основании), так и отдельные сваи и баретты, высокотехнологичные средства измерения и автоматического сбора и обработки информации. Для расчётов, теоретического и графического анализа результатов использовались пакеты стандартных отечественных и зарубежных компьютерных программ.

Личный вклад автора в получение результатов работы заключается в постановке цели и задач исследования, проведении обзора и анализа конструктивных особенностей высотных зданий, а также факторов, влияющих на напряжённо-деформированное состояние плитных и свайных фундаментов, разработке программы и проведении теоретических и экспериментальных исследований влияния параметров грунта на напряжённо-деформированное состояние основания фундаментов высотных зданий, разработке основных принципов проведения инженерно-геологических изысканий оснований высотных зданий, изучении конструктивных и технологических факторов, влияющих на напряжённо-деформированное состояние плитных и свайных фундаментов высотных зданий, разработке основных принципов конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий, разработке методики и проведении натурных исследований взаимодействия свай в свайном поле между собой и с грунтом, проведении натурных экспериментальных исследований влияния фильтрационной консолидации на изменение напряжённо-деформированного состояния массива грунта, проведении лабораторных исследований на гидрокompрессионном

приборе изменения порового давления в процессе гидростатических и компрессионных испытаний грунта, выявлении параметров напряжённо-деформированного состояния оснований и фундаментов, необходимых для контроля корректности выполнения инженерно-геологических изыскания, расчётов и конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий, а также качества выполнения строительно-монтажных работ, подготовке и написании основных публикаций по выполненной работе.

На защиту выносятся:

- Научная концепция, заключающаяся в научно-обоснованных, экспериментально подтверждённых и практически доказанных принципах проведения инженерно-геологических изысканий, расчёта и конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий;
- Методика определения фильтрационных характеристик грунта по скорости изменения порового давления;
- Способ учёта изменения модуля деформации в процессе приложения нагрузки при расчёте осадки фундаментов;
- Предложения по определению сопротивления по боковой поверхности буронабивных свай в твёрдых глинистых грунтах;
- Рекомендации по выбору конструкций плитных и свайных фундаментов высотных зданий в зависимости от высоты здания и грунтовых условий;
- Требования к составу и объёму мониторинга при строительстве высотных зданий;
- Методика расчёта требуемого объёма инъекционного раствора для повышения сопротивления грунта по боковой поверхности буронабивной сваи;
- Конструкции и технические решения, позволяющие выравнивать жёсткость свай (усилий в сваях) свайного поля фундаментов высотных зданий, снижать взаимное влияния высотной части многофункционального комплекса и окружающих строений, изменять напряжённо-деформированное состояние основания, повышать несущую способность одиночных свай, а также эффективно включать в работу фундаментную плиту.

Степень достоверности результатов проведённых исследований базируется на использовании в работе классических методов расчёта из механики грунтов и строительной механики. Достоверность результатов исследований обеспечена также применением апробированных методов математического и численного моделирования геотехнических задач, сопоставлением результатов аналитических и численных расчётов напряжённо-деформированного состояния грунтового основания и исследуемых фундаментов с

результатами экспериментальных исследований, использованием апробированных приборов и оборудования, подвергаемых систематической поверке.

Апробация работы. Основные результаты исследований доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах: IXX, XVIII, XI Международной конференции по механике грунтов и геотехнике, г. Сеул – 2017 г., Париж – 2013 г., Сан-Франциско – 1985 г.; Международная конференция по фундаментам глубокого заложения, г. Франкфурт-на-Майне, 2009 г.; Международная геотехническая конференция «Геотехнические аспекты устройства подземных сооружений в слабых грунтах», г. Амстердам, 2005 г.; Международная конференция по геотехнике «GeoMos 2010», г. Москва, 2010 г.; III Международная конференция молодых инженеров-геотехников, г. Раубичи, 1989 г.; Герсевановские чтения, г. Москва, 2017 г. и 2012 г.; Доклад на заседании секции научно-технического совета Российской академии архитектуры и строительных наук на тему «Особенности геотехнических расчётов при проектировании Лахта Центра», г. Москва, 2017 г.; V, IV, III и I Петрухинские чтения, г. Москва, 2019 г., 2018 г., 2017 г. и 2015 г.; Международный форум высотного и уникального строительства 100+, г. Екатеринбург, 2018 г., 2017 г., 2016 г., 2015 г.; XIII Международный семинар по реологии грунтов и Международное совещание заведующих кафедрами механики грунтов, оснований и фундаментов, подземного строительства и гидротехнических работ, инженерной геологии и геоэкологии строительных вузов и факультетов, г. Казань, 2012 г.; Всероссийская конференция «Фундаменты глубокого заложения и проблемы освоения подземного пространства», г. Пермь, 2014 г.; Международная конференция «Взаимодействие оснований и сооружений. Подземные сооружения и подпорные стены», г. Санкт-Петербург, 2014 г.; Международная научно-техническая конференция «Численные методы расчётов в практической геотехнике», г. Санкт-Петербург, 2012 г.; Научно-техническая конференция «Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции», г. Санкт-Петербург, 2010 г.; Международная конференция «Развитие городов и геотехническое строительство», г. Санкт-Петербург, 2008 г.; Международная геотехническая конференция «Геотехнические проблемы строительства крупномасштабных и уникальных объектов», г. Алматы, 2004 г.; II Научно-техническая конференция «Эксплуатация и долговечность портовых и судоходных сооружений», г. Ленинград, 1983 г.; Научно-техническая конференция «Гидротехническое строительство», г. Ленинград, 1983 г.; Межвузовская конференция «Фундаментостроение в условиях слабых и мёрзлых грунтов», г. Ленинград, 1983 г., 1981 г.; Межвузовская конференция «Вопросы устройства оснований и фундаментов в слабых и мёрзлых грунтах», г. Ленинград, 1982 г.; II Российско-Американский геотехнический симпозиум, г. Москва, 2018 г.;

Научно-практический семинар по геотехнике, г. Кемерово, 2018 г.; Научно-практическая конференция, г. Хабаровск, 2016 г.; Научно-практическая конференция, г. Сочи, 2017 г.

Внедрение результатов исследования осуществлено при разработке комплекса нормативно-технической документации, а также непосредственно при проектировании высотных зданий, благодаря чему был достигнут значительный экономический эффект.

Результаты работы легли в основу или были учтены при разработке следующих нормативно-технических документов:

- СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» – автором в составе коллектива был разработан раздел 10 «Особенности проектирования оснований высотных зданий», раздел 12 «Геотехнический мониторинг», приложение М «Контролируемые параметры при геотехническом мониторинге»;
- СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования» п. 8.1 «Основания и фундаменты» раздела 8 «Конструктивные решения», приложение Б «Геотехнический мониторинг»;
- СП 24.13330.2016 «Свайные фундаменты» – результаты исследований автора были применены при составлении п. 5.7, 7.2.5а и приложения Б «Расчёты несущей способности свай, взаимодействующих со скальными и полускальными грунтами по боковой поверхности»;
- СП 412.1325800.2018 «Конструкции фундаментов высотных зданий и сооружений. Правила производства работ» – автор является одним из руководителей разработки темы;
- СП 305.1325800.2018 «Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга» – автором в составе коллектива был разработан п. 6.3 «Параметрические методы»;
- ГОСТ 24846-2012 «Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений» – автором в составе коллектива был разработан раздел 9 «Стереофотограмметрический метод измерения горизонтальных и вертикальных перемещений и наклонов» и подраздел в части измерения послойных деформаций грунта и подраздел 6.6 «Методы измерения вертикальных и горизонтальных перемещений при помощи экстензометров и волоконно-оптических датчиков».

Результаты диссертационного исследования внедрены при разработке программы проведения инженерно-геологических изысканий, выполнении расчётов, проектировании фундаментов и разработке программы геотехнического мониторинга следующих высотных зданий:

- Многофункциональный комплекс «Лахта Центр», расположенный по адресу: г. Санкт-Петербург, Лахтинский проспект, дом 2, корпус 3;
- Многофункциональный высотный комплекс «Ахмат-Тауэр», строящийся по адресу: Российская Федерация, Чеченская республика, г. Грозный, Ленинский район, проспект А.А. Кадырова;
- Многофункциональный Терминальный Комплекс на участке №11 ММДЦ «Москва-Сити» (IQ квартал), расположенный по адресу: Москва, Пресненская набережная, дом 10, строение 2;
- Многофункциональный центр «Башня Эволюция» на участках №2-3 ММДЦ «Москва-Сити», расположенный по адресу: Москва, Пресненская набережная, дом 2;
- Многофункциональный административно-деловой комплекс «Нева Тауэрс» состоящий из двух высотных башен высотой 296,05 м и 343,7 м на общем 7-этажном стилобате, расположенный по адресу: г. Москва, Краснопресненская наб., участок №17-18 ММДЦ «Москва-Сити».
- Высотное административное здание №1 по генеральному плану многофункционального комплекса в г. Минск в границах ул. Филимонова – просп. Независимости – ул. Макаенка.

Публикации. По материалам исследований опубликованы 88 работ, в том числе 4 монографии, 27 патентов и 57 научных работ по теме диссертации, из них 14 статей в журналах, включённых в перечень рецензируемых научных изданий по списку ВАК РФ (13,16 печатных листов, из них 4,76 выполнены автором) и 17 публикаций в сборниках трудов конференций. Общий объем публикаций составляет 198,54 печатных листа, из них лично автором 105,7 печатных листа.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из Введения, 7 глав, выводов, списка использованной литературы из 337 наименований (в том числе 57 зарубежных) и приложений. Работа изложена на 352 страницах основного текста и приложений на 5 страницах, содержит 294 рисунка и 47 таблиц.

Автор благодарит сотрудников института НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», и, в частности, лаборатории № 35, за советы и помощь в выполнении работы.

Особую благодарность автор выражает своему научному консультанту доктору технических наук, профессору Альфреду Леонидовичу Готману.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, приведена общая характеристика работы.

Глава 1 посвящена раскрытию особенностей расчёта и конструирования ФВЗ, в ней рассмотрено влияние неоднородности, фильтрационной и механической анизотропии, переуплотнения грунта на НДС основания ФВЗ, выявлены способы определения сопротивления грунта по боковой поверхности буронабивных свай, а также проанализированы исследования взаимодействия свай между собой и с грунтом и особенности проектирования плитно-свайных фундаментов.

В **главе 2** рассматриваются основные принципы инженерно-геологических изысканий (ИГИ) при проектировании ФВЗ, включающие, в отличие от обычных зданий, два этапа их проведения (предпроектный и проектный), а также увеличенные размеры зоны изысканий. Учитывая большую глубину изысканий, особое внимание уделяется качеству отбора образцов и достоверности полученных данных. На основе проведённых исследований доказано, что при ИГИ для ФВЗ преимущество должно быть отдано полевым методам исследования грунтов (штампами, прессиометрами) и испытаниям грунта сваями, с выполнением обратных расчётов по разработанной методике. В качестве примера на рисунке 1 приведены результаты испытания воскресенских глин на глубине 30 м штампами со дна котлована на участке № 11 «Москва–Сити». Вычисленный средний модуль деформации (180 МПа) в несколько раз превышает полученный в лабораторных условиях. В таблице 1 показано, что среднее значение модуля деформации вендских глин («Охта–Центр», Санкт-Петербург), полученного по результатам испытаний нижней части баретты на глубине 80 м, и в результате стандартных трёхосных испытаний, отличаются в среднем в 2 раза.

В этой главе также описываются впервые выполненные крупномасштабные исследования вендских глин, проведение которых стало возможным в связи со строительством башен «Охта–Центр» и «Лахта Центр» в Санкт-Петербурге. В результате установлено, что эти глины обладают рядом свойств, существенно влияющих на осадку, таких как переуплотнение, анизотропия (рисунок 2), ползучесть и изменение модуля деформации по глубине (рисунок 3). Последний фактор связан с зависимостью модуля деформации от напряжённого состояния. Для исследования этого вопроса были проведены исследования песчаного грунта в стабилометре при различных значениях горизонтальных напряжений σ_3 . В результате установлено, что при увеличении горизонтальных напряжений на 0,5 МПа (это эквивалентно нагрузке от зданий высотой 200 м) модуль деформации E_0 увеличивается практически в 2 раза (рисунок 4). Аналогичная картина была получена для вендских глин.

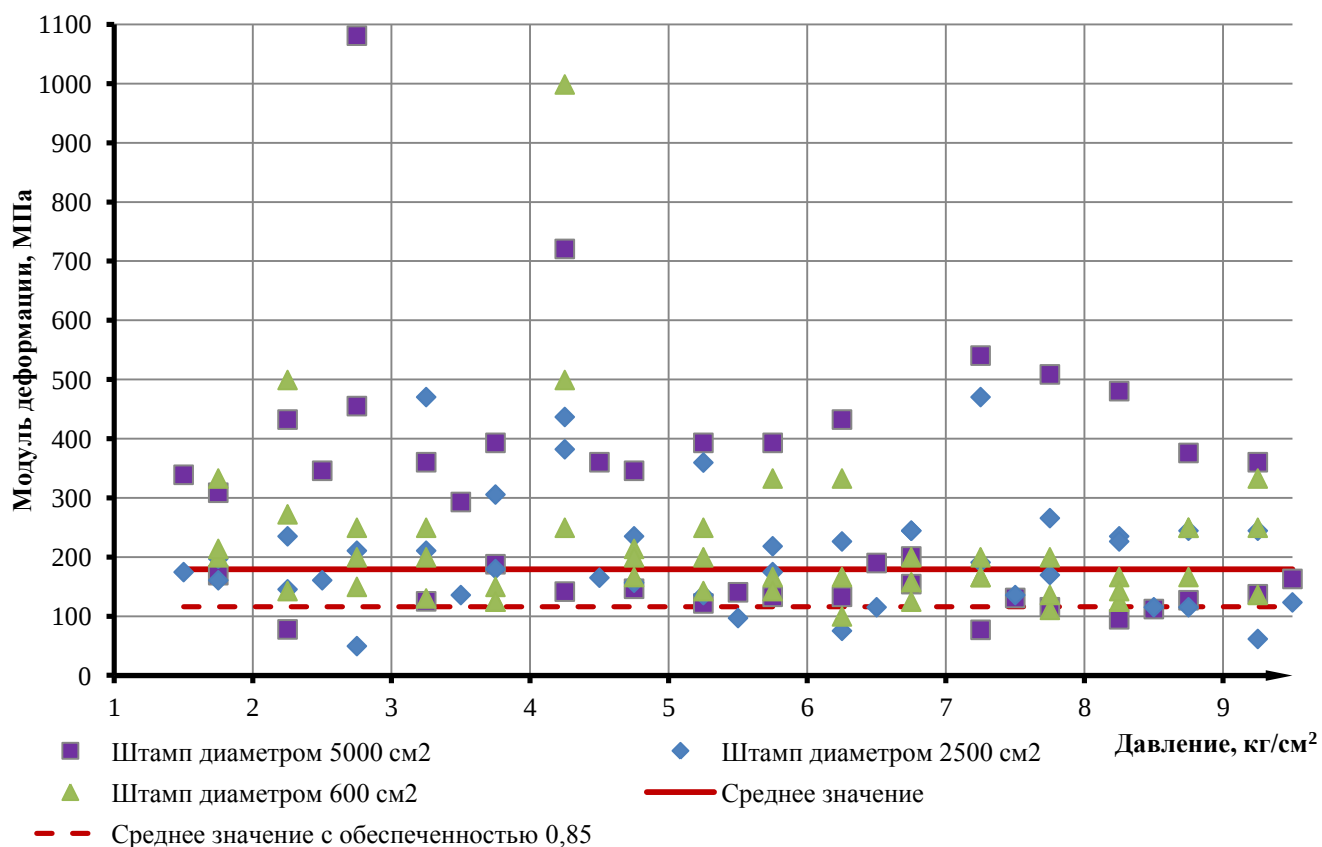


Рисунок 1 — Значения модуля деформации воскресенских глин

Таблица 1 — Модуль деформации грунта под пятой баретт Б1 – Б5 (ГОСТ 20276 – 2012)

Диапазон давления, МПа	Модуль общей деформации, МПа						По результатам трёхосных лабораторных испытаний
	Номер баретты					Среднее значение	
	Б1	Б2	Б3	Б4	Б5		
0,7-1,7	95	189	132	110	139	133	78
0,9-2,2	121	191	120	118	152	140	
1,3-2,8	182	222	139	170	175	178	
1,7-3,3	213	210	153	178	170	185	
2,2-4,2	212	192	197	203	176	196	—
2,8-5,1	250	165	209	182	143	190	
3,3-5,9	201	137	170	146	104	152	



Рисунок 2 — Вид образца вендской глины, отобранного с глубины 84,4 м

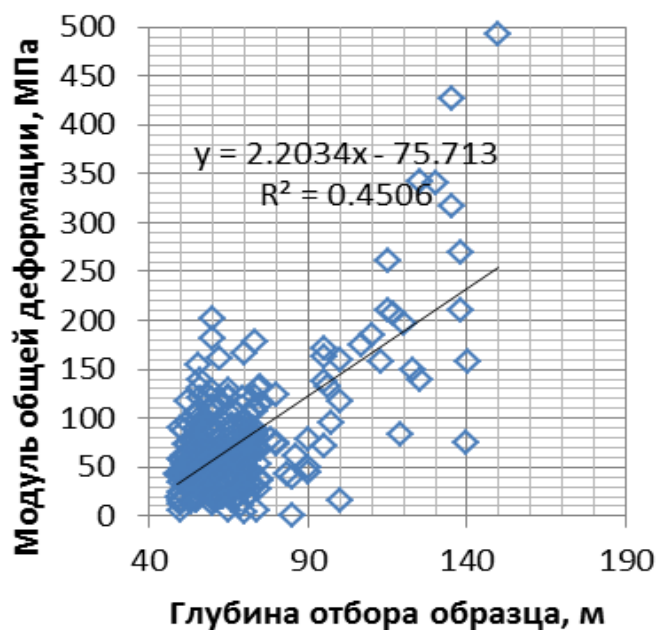


Рисунок 3 — График зависимости модуля деформации от глубины

В главе 3 на основе анализа конструкций высотных зданий даны рекомендации по назначению предельных осадок фундаментов, оценена возможность применения существующих конструкций ФВЗ, сформулированы предложения по их совершенствованию, определены параметры и разработаны требования к составу и объёму мониторинга.

Классификация ФВЗ представлена на рисунке 5, а типы фундаментов в зависимости от грунтовых условий приведены в таблице 2. Эта таблица составлена на основе анализа результатов расчётов и материалов мониторинга высотных зданий, а также архивных данных по зданиям, начиная со «сталинских высоток».

Среди объектов строительства, расположенных в различных грунтовых условиях, можно выделить несколько десятков зданий уникальной и массовой застройки, построенных в последние 20 лет как на песчаных, так и на глинистых грунтах, в том числе высотные здания ММДЦ «Москва-Сити», МФК «Лахта Центр» и «Ахмат-Тауэр», в основании которых залегают твёрдые переуплотнённые глинистые грунты, плотные пески, скальные грунты.

При устройстве высотного здания в объёме комплексов возникает взаимовлияние между фундаментами высотной и стилобатной частей. Для минимизации взаимного влияния, наряду с известными мероприятиями, разработаны и внедрены следующие: в зоне влияния от высотной части стилобат или соседнее здание устраивают на свайном фундаменте; фундаменты высотного здания и стилобата разделяют геотехническим барьером или выполняют компенсационное нагнетание в основание стилобата в зоне влияния высотной части; весь комплекс располагается на единой фундаментной плите с устройством (при необходимости) свай под высотной частью.

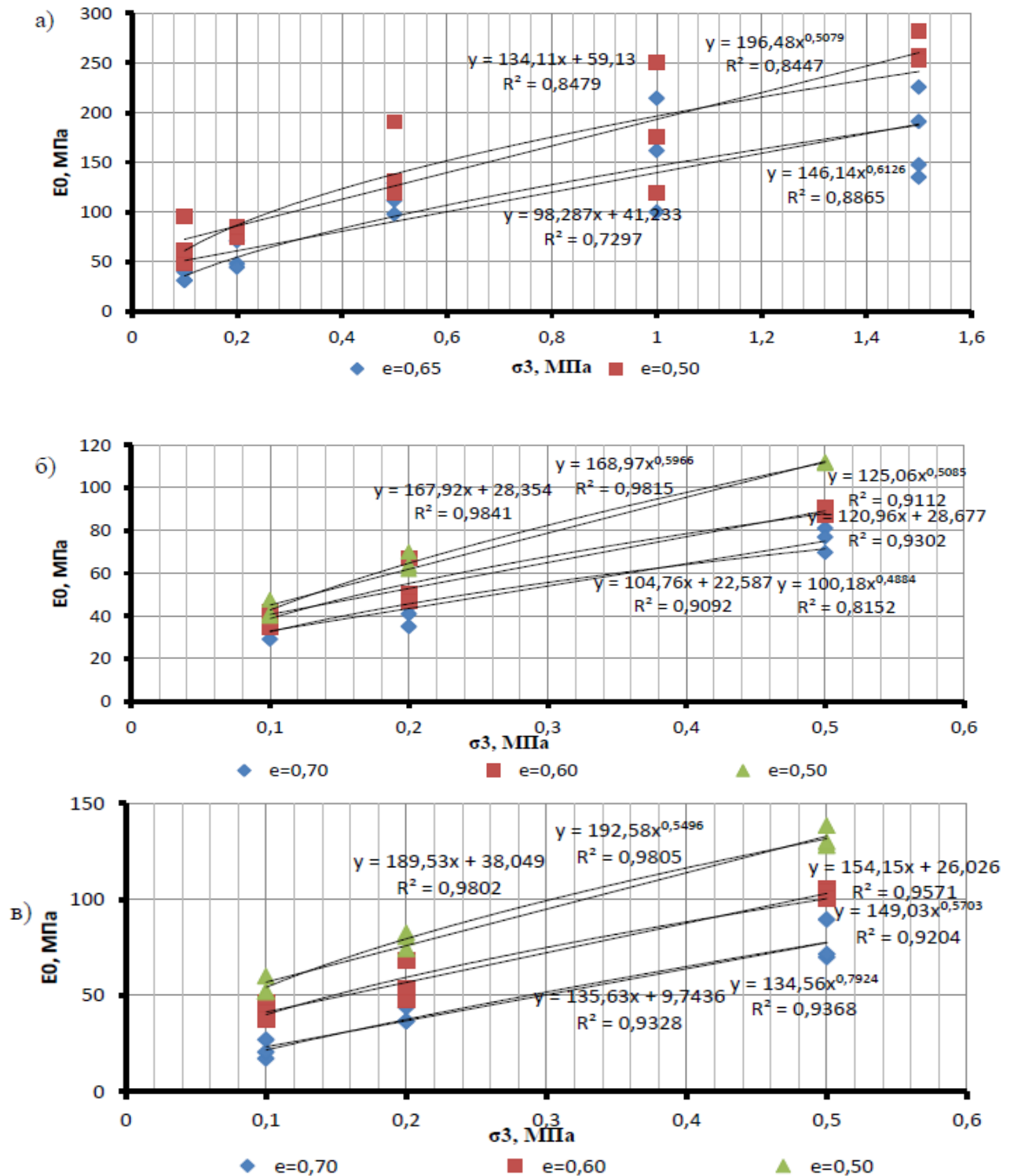


Рисунок 4 — Зависимость E_0 от σ_3 для песков средней крупности (а), мелкого (б) и пылеватого (в)

В случае применения свайно-плитного фундамента (СПФ) важно иметь высокую несущую способность массива грунта под подошвой плиты, которая может быть, кроме уплотнения или закрепления грунта, достигнута выполнением работ по изменению НДС массива грунта инъекцией твердеющего раствора по манжетной технологии или применением свай вытеснения. Расчёт объёмов твердеющего раствора для инъекции или свай вытеснения может быть выполнен по формулам (16) – (21).

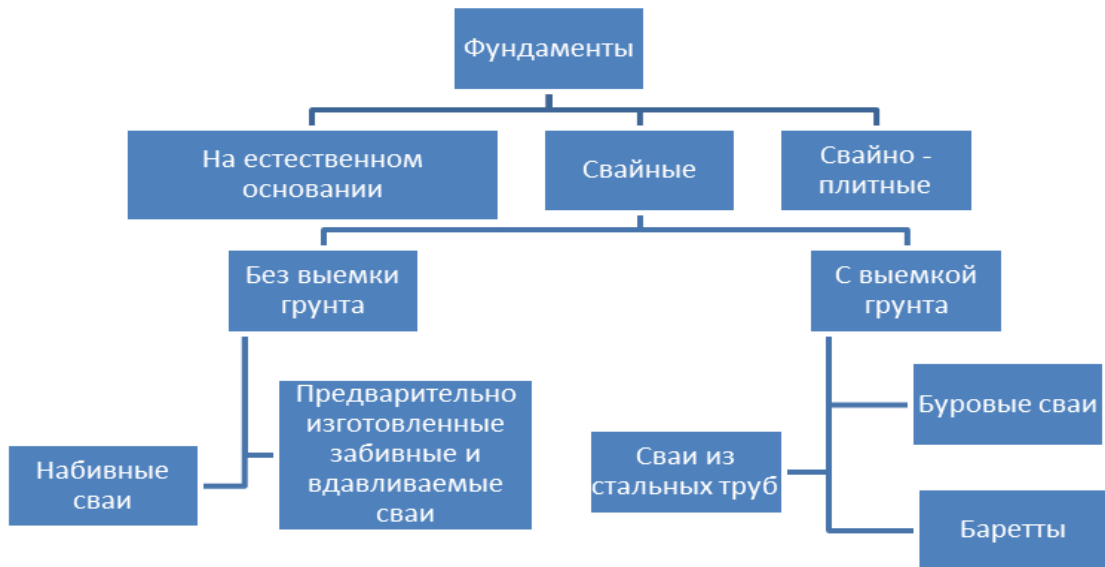


Рисунок 5 — Классификация фундаментов высотных зданий

Таблица 2 — Типы фундаментов высотных зданий в зависимости от вида грунта и высоты здания

Вид грунта	Высота здания, м		
	75-150	150-300	Св. 300
Пески средней плотности, переуплотнённые глинистые грунты (моренные и флювиогляциальные отложения)	Плита	Сваи	Сваи
Плотные песчаные и гравелистые отложения, твёрдые переуплотнённые глинистые грунты	Плита	Плита	Сваи
Крупнообломочные и скальные грунты	Столбчатые и ленточные фундаменты	Столбчатые и ленточные фундаменты, плита	Плита

Полномасштабные экспериментальные исследования углового эффекта были выполнены при строительстве монолитного высотного здания со связевым каркасом переменной этажности (высотой 70...90 м). В процессе строительства здания проводились измерения усилий с помощью специально разработанной конструкции свайных динамометров, установленных в головах свай (рисунок 6). После возведения всех конструкций здания впервые было подтверждено наличие углового эффекта в свайном поле из забивных свай: максимальные усилия были зафиксированы в угловых сваях, наименьшие — во внутренних сваях (рисунок 7), при этом отношение усилий в угловых сваях к внутренним (K_v) составило 2,5. Для периметральных свай $K_v = 1,3$.

По результатам экспериментальных исследований проведены апробация расчётной модели и численные исследования влияния нагрузки, шага и длины свай, а также механических характеристик грунта на распределение усилий между сваями. В результате исследований

подтверждено, что с увеличением шага свай значение коэффициента влияния снижается. Было установлено, что существует прямо пропорциональная зависимость между изменением прочностных параметров грунта и усилиями в сваях: при увеличении/уменьшении прочностных характеристик грунта на 30% усилия в центральных сваях уменьшаются/увеличиваются на 10%, а в угловых и периметральных возрастают/уменьшаются на 15 и 10% соответственно.

Результаты исследований доказали, что для определения усилий в забивных сваях свайного поля необходимо проводить расчёты системы «основание – фундамент – здание» в объёмной постановке и с механическими характеристиками грунта, определёнными с введением коэффициента надёжности γ_g в сторону как их повышения, так и понижения, а подбор сечения и армирование свай и фундаментной плиты проводить для наиболее неблагоприятного варианта. Для выравнивания усилий между центральными и периметральными сваями, кроме выполнения последних более короткими, были разработаны следующие способы, направленные на повышение несущей способности свай, расположенных в центре фундамента: устройство крайних свай с использованием бентонита, а центральных – с применением полимера; повышение сопротивления по боковой поверхности инъекцией твердеющего раствора; предварительное обжатие свай домкратами.

Также в главе 3 рассмотрены вопросы геотехнического мониторинга при строительстве высотных зданий, выделены параметры, сформулированы требования к его составу и объёму.

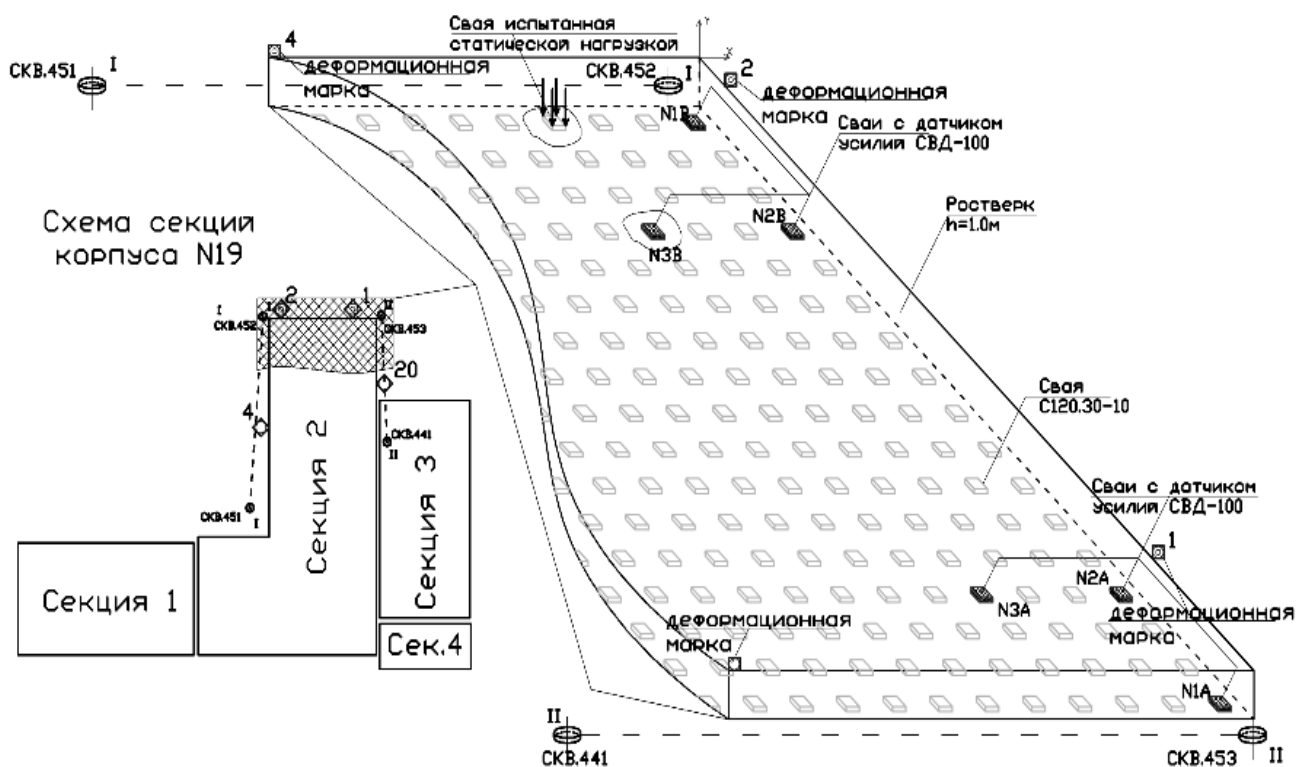


Рисунок 6 — Схема расположения свай, на которые были установлены динамометры и марки для наблюдения за осадками ростверка

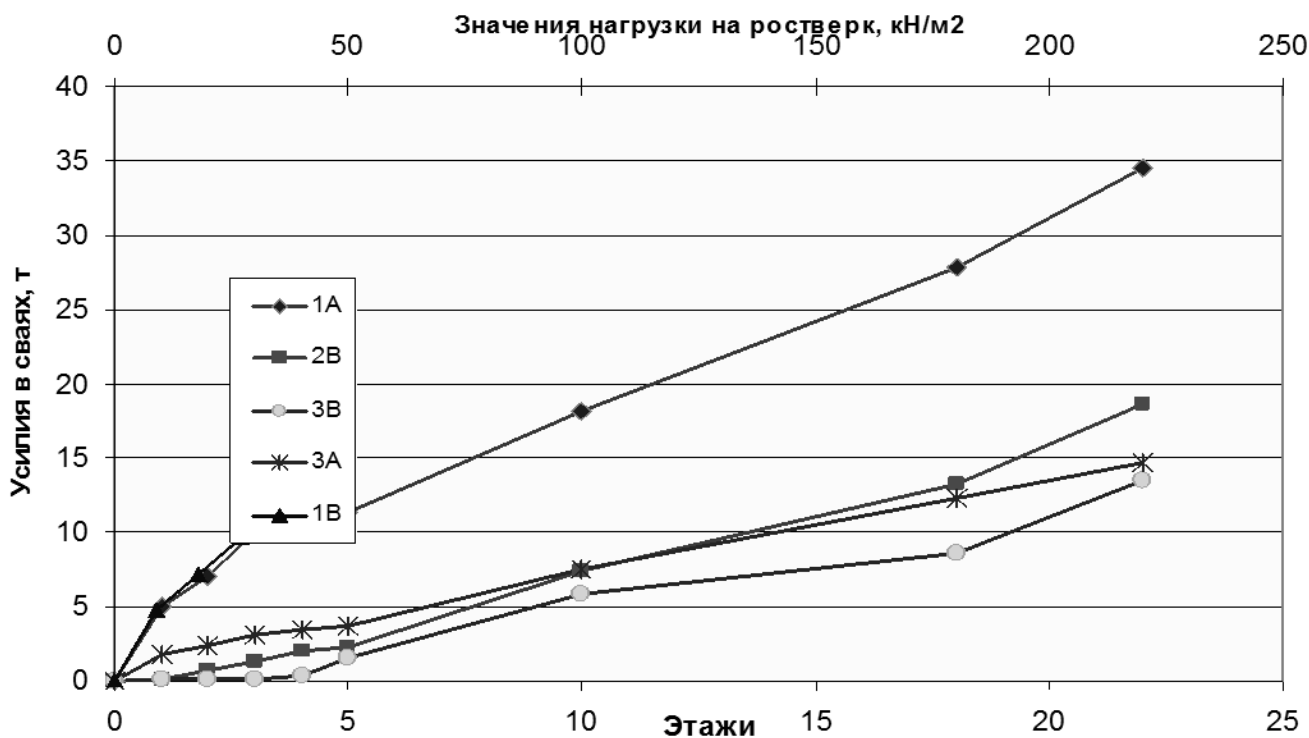


Рисунок 7 — Значения измеренных усилий в сваях в процессе строительства здания: 1А, 1В — динамометры установлены в угловых сваях; 2В — в периметральных сваях; 3А и 3В — в центральных сваях

В главе 4 на основе теоретических и экспериментальных исследований выявлены факторы, влияющие на НДС оснований ФВЗ. К ним относятся разуплотнение при экскавации грунта из котлована, ограждающая конструкция котлована, процессы фильтрационной консолидации и развитие осадки во времени, а также такие параметры грунта как переуплотнение, неоднородность (зависимость модуля деформации грунта от напряжённого состояния) и анизотропия.

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что на неравномерное изменение НДС основания ФВЗ и соответствующую неравномерную осадку и крен здания влияют как экскавация грунта из котлована, так и ограждение котлована. На рисунке 8 представлены результаты расчётной оценки влияния стены в грунте на осадку одного из зданий многофункционального комплекса на плитном фундаменте, расположенном рядом со стеной в грунте. Расчёты были выполнены при разных значениях интерфейсов k , характеризующих снижение прочностных характеристик грунта на границе со стеной в грунте. При изменении k с 0,33 до 1,0 крен здания уменьшается в 2 раза (рисунок 8, б). Результаты мониторинга показали, что наиболее близкие расчётные значения соответствуют данным мониторинга при отсутствии изменения прочностных характеристик грунта на границе со стеной в грунте ($k = 1$). Зона влияния стены в грунте составляет 10–15 м, что примерно равно половине ширины фундамента. Аналогичные результаты существенного влияния стены в грунте на деформации фундаментной плиты были получены при

расчётах и подтверждены результатами мониторинга при строительстве ряда многофункциональных комплексов в Москве, в том числе на участках №11 и №17–18 «Москва-Сити».

Поскольку одной из причин, влияющих на снижение осадки фундамента рядом со стеной в грунте, является сопротивление грунта по боковой поверхности ограждающей конструкции, были разработаны следующие мероприятия, позволяющие регулировать осадку фундамента: фундамент в зоне максимальных осадок, возникших в результате геологического напластования или большей нагрузки, размещать рядом со стеной в грунте; для снижения осадки повышать сопротивление грунта по боковой поверхности стены в грунте (до 30%), применяя вместо бентонитового полимерный раствор (рисунок 9); для увеличения осадки понижать сопротивление грунта по боковой поверхности стены в грунте (до 30%) путём установки на боковой поверхности стены в грунте металлических листов (рисунок 10).

Следующим важным фактором является процесс развития осадки во времени. Как показывают наблюдения за осадками зданий на полутвёрдых глинистых грунтах, основная часть осадки затухает в течение первых 5 лет после окончания строительства и может составлять от 30 до 50% от суммарной величины осадки.

На основе анализа опытных данных и результатов расчётов предложено определять величину осадки после завершения строительства по формуле

$$S_e = k \times S_T, \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от вида грунта и определяемый по таблице 3; S_T – осадка на момент окончания строительства.

Одной из причин изменения осадки во времени является процесс фильтрационной консолидации в основании плитных фундаментов после приложения всех проектных нагрузок.

Поскольку в *процессе фильтрационной консолидации* происходит постепенная передача нагрузки с поровой воды на скелет грунта, в случае анизотропного грунта и свободной фильтрации вверх и в стороны напряжения в скелете грунта со временем возрастают. Если грунт анизотропен или имеются ограничения процесса фильтрации в каком-либо из направлений, возможно временное локальное повышение порового давления и, соответственно, снижение эффективных напряжений в массиве грунта после приложения нагрузки, что приводит к росту величины и размеров области пластических деформаций в краевой зоне, а также к изменению траектории нагружения отдельных зон массива грунта и конечных значений НДС массива грунта. Это подтвердили как результаты расчётов и мониторинга при строительстве многофункциональных комплексов, так и результаты исследований на экспериментальной площадке (рисунок 11, а) с основанием из глинистых грунтов с коэффициентом фильтрации в горизонтальном направлении, превышающим в 4 раза коэффициент фильтрации в вертикальном направлении.

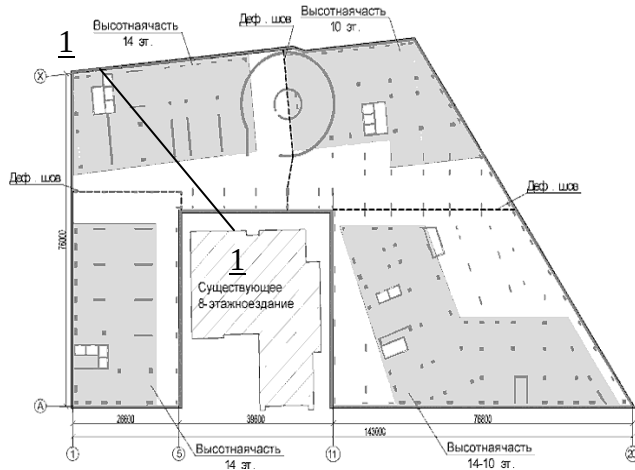
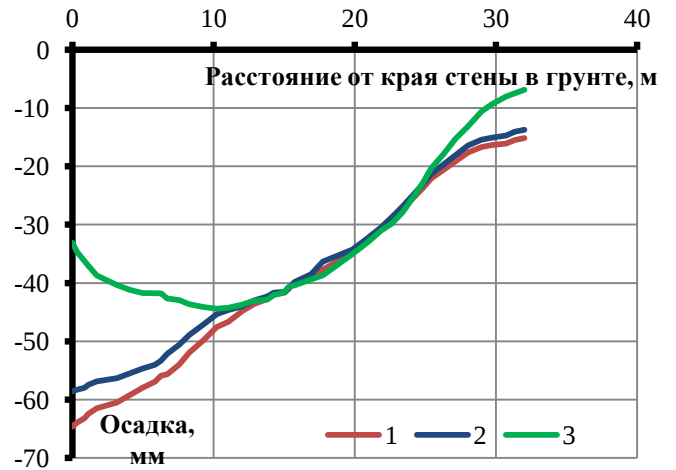
a*б*

Рисунок 8 — Влияние стены в грунте на осадку здания (пример): *a* — размещение зданий в плане и стены в грунте; *б* — осадка фундаментной плиты по сечению 1-1; 1 — расчёт без учёта стены в грунте; 2 — то же с учётом стены в грунте при $k = 0,33$; 3 — то же при $k = 1$

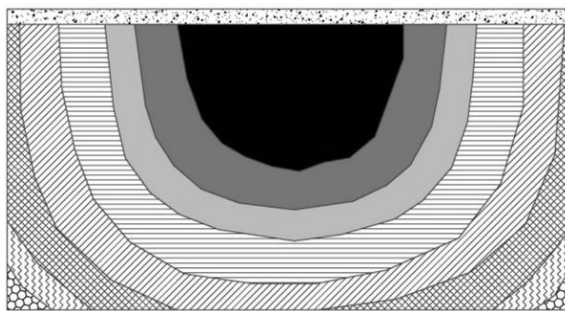
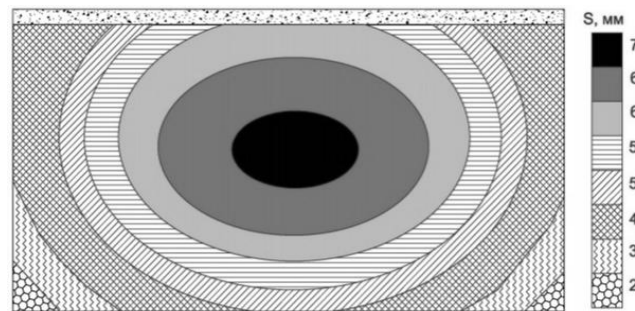
a*б*

Рисунок 9 — Осадка фундамента в части, примыкающей к стене в грунте, устроенной с применением бентонитового раствора (*a*) и полимерного состава (*б*)

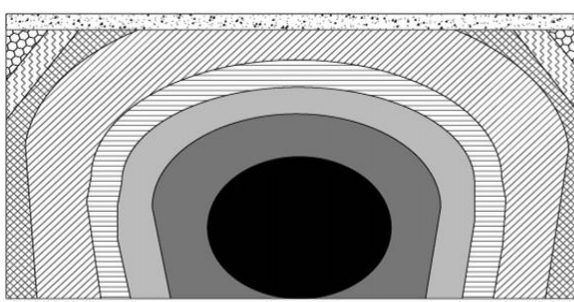
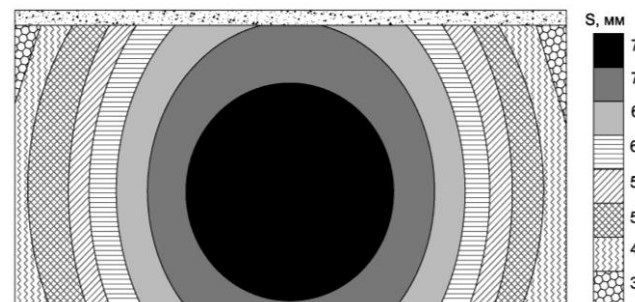
a*б*

Рисунок 10 — Результаты расчёта со стенами в грунте без металлического листа (*a*) и покрытой металлическим листом (*б*)

В результате исследований установлено, что после возведения насыпи (25 суток) поровая вода воспринимает 80 – 90% нагрузки, после чего под центром насыпи поровое давление начинает падать, в то время как в краевой зоне некоторое время остаётся постоянным или даже возрастает (рисунки 11, *в*, и 11, *г*).

Для снижения влияния рассматриваемого эффекта на конечное значение НДС основания ФВЗ целесообразно выполнять мероприятия, исключающие неоднородную фильтрационную консолидацию, например, устройство дренажа под фундаментной плитой или увеличение срока строительства.

Для исследования влияния *переуплотнения, неоднородности и анизотропии грунта* на распределение напряжений в основании ФВЗ был выполнен численный эксперимент. Размеры расчётной области были выбраны из условия отсутствия влияния граничных условий на результаты расчёта. Расчёты выполнялись в объёмной постановке (решалась осесимметричная задача) с использованием модели упрочняющегося грунта (HS). Нагрузка прикладывалась к штампу диаметром 2 м.

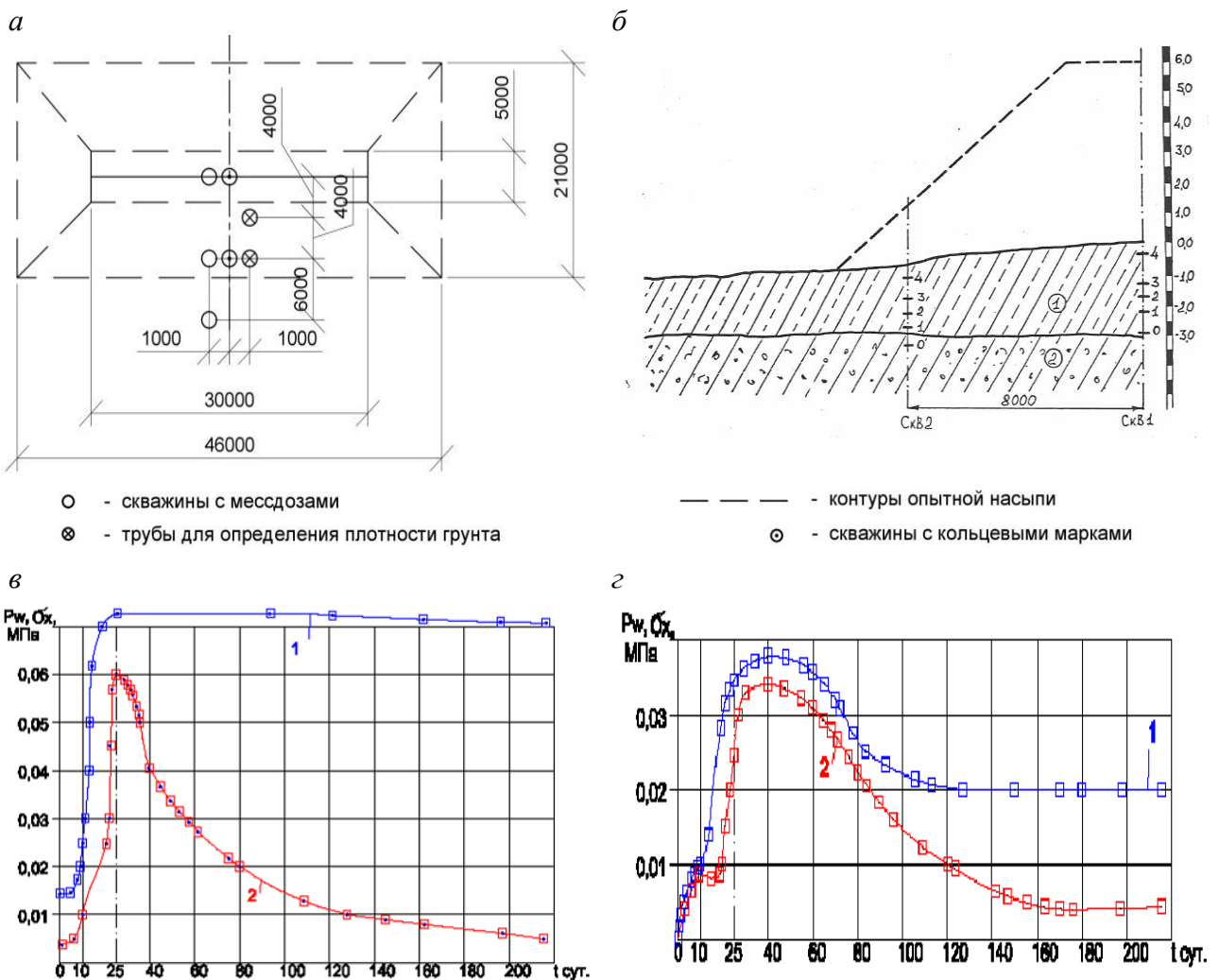


Рисунок 11 — Результаты исследований на экспериментальной площадке: *а* — план экспериментальной площадки; *б* — схема расположения кольцевых марок по высоте скважины; *в* — изменение горизонтальных напряжений (кривая 1) и порового давления (кривая 2) под центром насыпи на глубине 0,8 м, *з* — изменение горизонтальных напряжений (кривая 1) и порового давления (кривая 2) в краевой зоне насыпи на глубине 2,0 м

В результате расчётов было получено, что с увеличением коэффициента *переуплотнения* грунта (OCR) осадка уменьшается (рисунок 12, *а*), а сжимаемая толщина, если её ограничивать по модели упругого полупространства в соответствии с СП 22.13330, возрастает (рисунок 12, *б*).

Аналогичным образом были выполнены исследования влияния *неоднородности* и *переуплотнения* грунта. В результате получено, что при совместном действии неоднородности и переуплотнения грунта осадка снижается до 50%.

С увеличением коэффициента *анизотропии* $k_a = E_r/E_v$ осадка уменьшается на 25% (рисунок 13, *а*, таблица 4). Вертикальные напряжения на глубине $d/4$ по оси фундамента, где d – ширина подошвы фундамента, снижаются на 10%, горизонтальные напряжения возрастают в 3 раза (рисунок 13, *б*, см. таблицу 4). Зона распространения горизонтальных напряжений увеличивается на 30%.

Таблица 4 — Значения осадки, вертикальных и горизонтальных напряжений круглого штампа на изотропном и анизотропном грунте

№ п/п	Параметр	$E_v = E_g = 25$ МПа	$E_v = 25$ МПа; $E_g = 50$ МПа	$E_v = 25$ МПа; E_g =100 МПа
1	Осадки, мм	32	29	24
2	Вертикальные напряжения, кПа	430	410	390
3	Горизонтальные напряжения, кПа	100	150	220

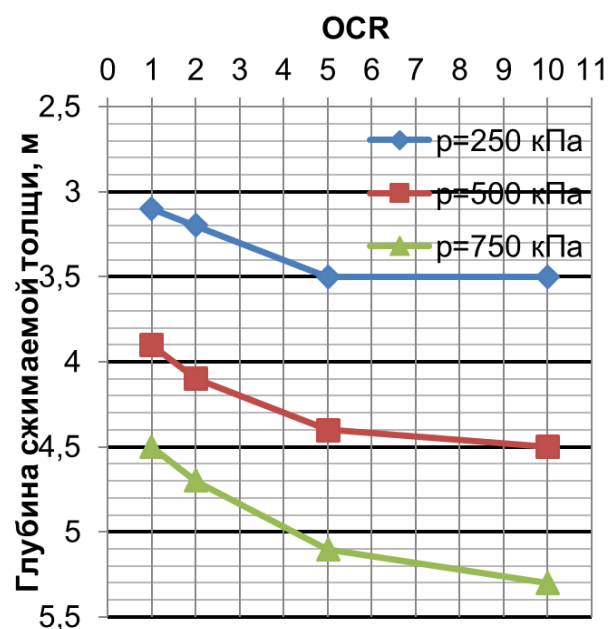
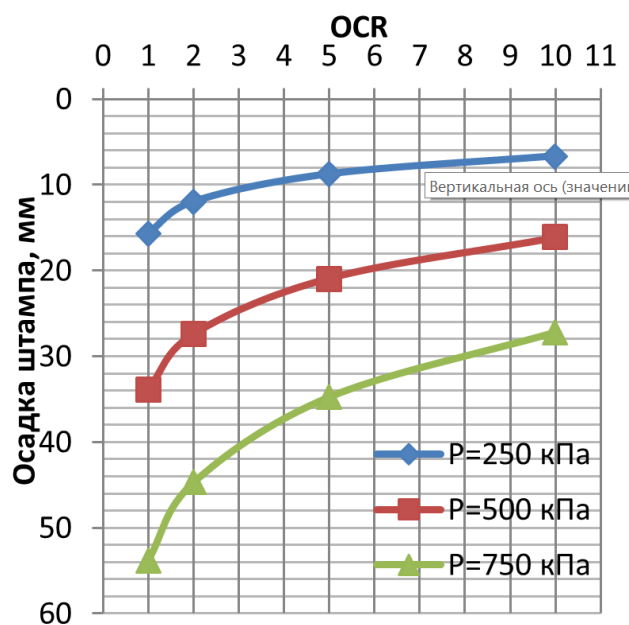
*а**б*

Рисунок 12 — Результаты численных экспериментов: *а* – зависимость осадки от OCR при разной нагрузке на штамп; *б* – зависимость глубины сжимаемой толщи, рассчитанной по модели упругого полупространства, от OCR при разной нагрузке на штамп

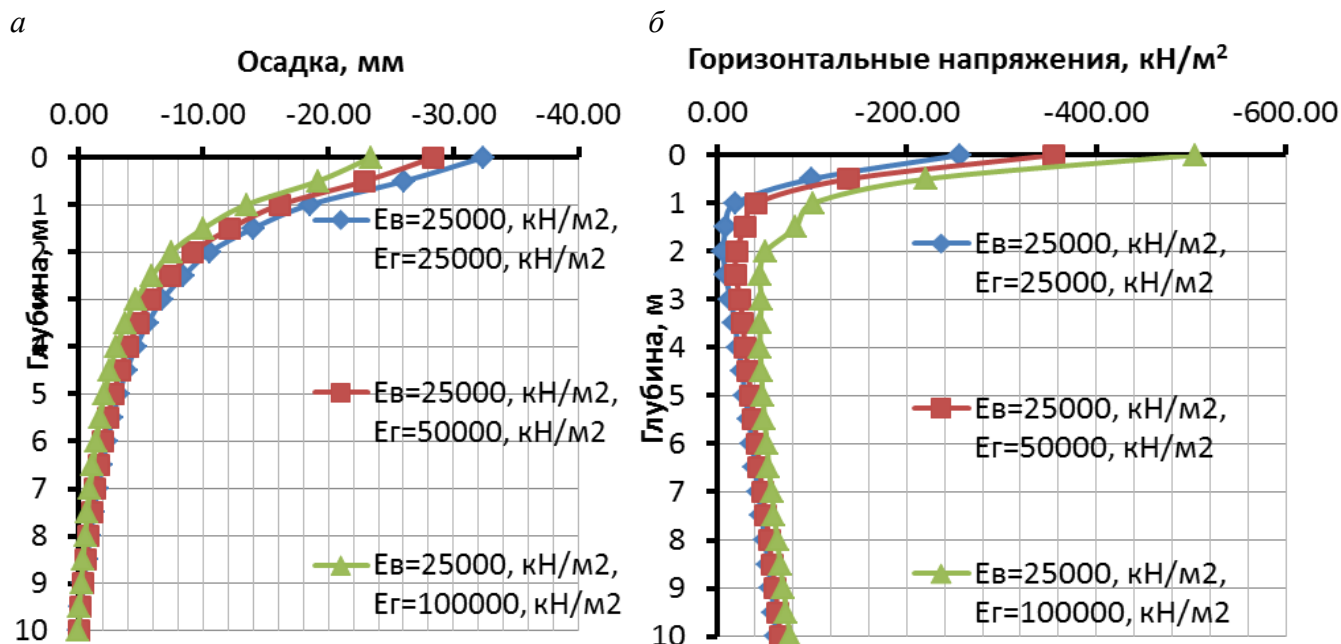


Рисунок 13— Изменение осадки (а) и горизонтальных напряжений (б) по глубине при разных значениях коэффициента анизотропии

Таким образом, переуплотнение, неоднородность и анизотропия существенно влияют на распределение напряжений и значение осадки и должны учитываться при расчёте ФВЗ.

С учётом результатов численных экспериментов разработана методика расчёта осадки плитного фундамента высотного здания с учётом зависимости модуля деформации грунта от напряжённого состояния (неоднородности), переуплотнения и анизотропии.

В соответствии с теорией упругости относительная вертикальная деформация зависит от всех трёх компонентов напряжений $\varepsilon_{zi} = f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$. Осадка фундамента S_i при этом по аналогии с методом послойного суммирования, может быть определена следующим образом:

$$S_i = (1 - 2\nu_i K_{0i}) h_i \left(\sum_{j=1}^m \frac{\Delta \sigma'_{zpi,j}}{E_{zi,j}} - \frac{\sigma'_{z\gamma i}}{E_{zgi}} + \frac{\sigma'_{z\gamma i}}{E_{ezi}} \right); \quad (2)$$

$$K_{vi} = 1 - 2\nu_i K_{0i}; \quad (3)$$

$$E_{zi,j} = A(\sigma'_{zpi,j} + \sigma'_{zgi}) K_{0i} + B; \quad (4)$$

$$E_{zgi} = A \sigma'_{zgi} K_{0i} + B; \quad (5)$$

$$E_{ezi} = C \sigma'_{zgi} K_{0i} + D, \quad (6)$$

$$a = A K_{0i}; \quad (7)$$

$$b = A \sigma'_{zgi} K_{0i} + B, \quad (8)$$

где m — число ступеней нагружения; $\sigma'_{zpi,j}$, σ'_{zgi} и $\sigma'_{z\gamma i}$ — вертикальные эффективные напряжения в i -м слое грунта соответственно от приложенной ступени нагрузки j , от собственного веса грунта и от собственного веса грунта, выбранного на уровне дна котлована; $\Delta \sigma'_{zpi,j}$ — величина изменения давления в i -м слое грунта на ступени нагружения j , где A и B — коэффициенты, определённые из стабилометрических испытаний грунта при разных значениях

горизонтальных напряжений в процессе первичного нагружения; C и D – то же при повторном нагружении.

После интегрирования (2) с учётом (4) и (8), проведя преобразования, получим

$$\begin{aligned} S_i &= K_{vi} h_i \left(\int_0^{\sigma'_{zpi}} \frac{d\sigma'_{zp}}{a\sigma'_{zpi} + b} - \frac{\sigma'_{zyi}}{E_{zgi}} + \frac{\sigma'_{zyi}}{E_{ezi}} \right) = \\ &= K_{vi} h_i \left(\frac{1}{a} \ln \left(\frac{a}{b} \sigma'_{zpi} + 1 \right) - \frac{\sigma'_{zyi}}{E_{zgi}} + \frac{\sigma'_{zyi}}{E_{ezi}} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда суммарная осадка S всех n слоёв грунта составит

$$S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n K_{vi} h_i \left(\frac{1}{a} \ln \left(\frac{a}{b} \sigma'_{zpi} + 1 \right) - \frac{\sigma'_{zyi}}{E_{zgi}} + \frac{\sigma'_{zyi}}{E_{ezi}} \right). \quad (10)$$

Коэффициент бокового давления K_0 для нормально уплотнённого грунта принимается по формуле (11), для переуплотнённого – по формуле (12):

$$K_0 = (1 - \sin \varphi); \quad (11)$$

$$K_0 = (1 - \sin \varphi) OCR^{\sin \varphi}. \quad (12)$$

Формула (10) позволяет при известном распределении напряжений выполнить расчёт осадки по аналогии с методом послойного суммирования для неоднородного, анизотропного и переуплотнённого грунта. Распределение напряжений в данном случае для неоднородного грунта предложено определять по формуле Г.К. Клейна, для анизотропного грунта — по зависимостям, полученным А.В. Пилягиным для условий плоской задачи. В некоторых случаях возможно применение гибридного варианта: напряжения рассчитывать численно, а осадку — предлагаемым методом.

В главе 5 рассмотрены вопросы взаимодействия буронабивных свай с грунтом и между собой. Свайные фундаменты из буронабивных свай (далее — сваи) при высотном строительстве, как правило, представляют собой сплошное свайное поле. При проведении расчётов свайного поля, которые в настоящее время выполняются преимущественно численным методом, основная цель испытания грунта сваями – получение информации, необходимой для апробации расчётной модели и уточнения механических характеристик грунта (E , c , φ) обратным расчётом, а также для определения сопротивления грунта по боковой поверхности и под нижним концом свай.

Для достижения поставленной цели при проведении испытаний одиночных свай статической нагрузкой подлежат определению зависимости «нагрузка – осадка» и «осадка – сопротивление по боковой поверхности и пяте», пиковые значения сопротивления по боковой поверхности и пяте, а также распределение усилия вдоль сваи. Анализ существующих методов испытаний свай показал, что в данном случае лучше подходит метод опускных домкратов. Взяв его за основу, была разработана методика проведения испытаний.

Исследования на основе разработанной методики показали, что модуль деформации, полученный обратными расчётами по результатам испытания свай, в несколько раз больше определённого по результатам ИГИ, что было учтено при расчёте грунта основания на участках №11 и №17–18 «Москва–Сити». Аналогичные результаты были получены при испытании баретт на объекте «Охта–Центр», буронабивных свай на объектах «Лахта Центр», «Ахмат–Тауэр» и др.

Доказательство достоверности полученных параметров грунтов по результатам обратного расчёта было получено при проведении испытаний свай диаметрами 1,5 и 0,8 м методом опускных домкратов в процессе строительства башни «Ахмат–Тауэр». После проведения испытания свай диаметром 1,5 м были выполнены обратные расчёты и уточнены параметры грунта. Модуль деформации всех грунтов по результатам обратных расчётов (таблица 5) получился более чем вдвое выше значений, полученных по результатам стандартных ИГИ. Затем были проведены испытания свай диаметром 0,8 м и выполнены расчёты осадки свай по параметрам грунта, полученным в процессе уже упоминавшихся обратных расчётов (см. таблицу 5). Сравнение их показало, что осадка свай по результатам испытаний меньше, чем по расчёту, примерно на 30%. Это можно объяснить тем, что для расчётов были приняты минимальные значения модулей деформации грунта. Если бы в расчёт принимались значения модуля деформации грунта, определённые в процессе стандартных ИГИ, то разница в расчётах и в результатах испытаний составила бы 200%. Полученные результаты, с одной стороны, доказывают важность уточнения параметров грунта по результатам обратных расчётов, а с другой – дают возможность провести апробацию расчётной модели для выполнения расчётов всего свайного поля.

В результате проведения испытаний грунта по разработанной методике были получены также сопротивления твёрдых глинистых грунтов по боковой поверхности свай, существенно, в 2–3 раза превышающие значения, рассчитанные по СП 24.13330.2016. В связи с этим были проанализированы существующие методы расчёта (таблица 6).

Таблица 5 – Уточнённые деформационные характеристики грунтов. Объект «Ахмат–Тауэр»

№ ИГЭ	Наименование грунта	Модуль деформации E , МПа	
		Инженерно-геологический отчёт	Обратный расчёт
7, 76, 8	Пески плотные водонасыщенные, крупности от средней до гравелистых	66-98	150
11	Гравийно-галечниковые грунты	92	230
10	Гравийно-галечниковые грунты	53	150

Сравнение результатов расчёта с результатами испытаний показало, что наиболее близкие значения к экспериментальным данным для твёрдых глинистых грунтов получены при расчёте с учётом прочностных характеристик и коэффициента переуплотнения грунта по методу 6 с учётом технологии выполнения работ (таблица 7), где разница в расчётах составляет не более 10%. В связи с этим для оценочных расчётов сопротивления грунта по боковой поверхности буронабивных свай для переуплотнённых глинистых грунтов может быть рекомендована формула метода 6 из таблицы 6. Окончательное значение должно приниматься по результатам статических испытаний свай.

Таблица 6 – Методы расчёта

№ метода	Метод расчёта
1	$f_i = \alpha S_u F_1 F_2$
2*	$f_i = (1 - \sin \delta') \sigma'_v \tan \delta' (\text{OCR})^{0,5}$
3	по таблице СП 24.13330
4	$f_i = (K_0 \sigma'_v \tan \varphi + c); K_0 = \tan(45^\circ - \varphi/2)$
5	$f_i = \sigma'_x \tan \varphi + c; \sigma'_x = K_{nc} \sigma_z; K_{nc} = (1 - \sin \varphi)$
6	$f_i = \sigma'_x \tan \varphi + c; \sigma'_x = K_{\text{OCR}} \sigma_z; K_{\text{OCR}} = (1 - \sin \varphi) \text{OCR}^{\sin \varphi}$

* δ' - эффективный угол внутреннего трения глины

Таблица 7 – Сравнение материалов экспериментальных исследований с результатами расчётов, проведённых с учётом технологии выполнения работ

№ п/п	Вид грунта (объект)	Значения f_i , кПа*, при расчёте по методу №						Экспериментальные значения, кПа
		1	2	3	4	5	6	
1	Воскресенские глины (Москва–Сити)	-	76	56	108	150	230	900–1800
2	Вендские глины (Охта–Центр)	115	167	93	178	298	342	310
3	Вендские глины (Лахта Центр)	134	195	109	208	405	455	400–450
4	Юрские глины (ВТБ «Арена–Парк»)	-	43	56	76	93	108	104
5	Морена (Загорская ГАЭС)	17	66	47	71	67	83	80–85

* Расчёт выполнен с коэффициентом, учитывающим технологию производства работ в соответствии с СП 24.13330. Для всех пунктов он принят 0,6, для п.п. 3 и 5 — как для свай, устраиваемых сухим способом, — равным 0,7.

При этом установлено, что расчёт по методу 6 может быть применён как при выполнении работ по устройству буронабивных свай под бентонитовым раствором (баретты, Охта–Центр) или под водой (юрские глины, ВТБ «Арена–Парк»), так и в случае выполнения работ «насухо» (морена на Загорской ГАЭС и вендские глины на объекте «Лахта Центр»). Разница в значениях сопротивления по боковой поверхности составила не более 10%.

В случае выполнения численного расчёта сопротивление грунта по боковой поверхности будет определяться автоматически. При этом важно задать историю изменения напряжённого состояния, начиная с устройства скважины и её бетонирования.

В соответствии с известными данными давление на стенки скважины в процессе бетонирования определяется по билинейному закону:

$$\Delta\sigma_{gb} = \begin{cases} \gamma_{\text{бетон}} \times h & \text{при } h \leq h_{\text{крит}}; \\ \gamma_{\text{бентонит}} \times h + (\gamma_{\text{бетон}} - \gamma_{\text{бентонит}}) \times h_{\text{крит}} & \text{при } h > h_{\text{крит}}, \end{cases} \quad (13)$$

где $\Delta\sigma_{gb}$ — давление свежего бетона и бентонита на стенки траншеи; $\gamma_{\text{бетон}}$ — объёмный вес бетонной смеси; $\gamma_{\text{бентонит}}$ — объёмный вес бентонитового раствора; $h_{\text{крит}}$ — критическая глубина; h — глубина ниже уровня верха стены в грунте.

Исследование факторов, влияющих на $h_{\text{крит}}$, показало, что эта глубина зависит, в основном, от скорости бетонирования. После математической обработки известных результатов измерения давления на стенки скважины в процессе бетонирования была получена формула

$$h_{\text{крит}} = 0,85Vt + 1,78, \quad (14)$$

где V — средняя скорость бетонирования, м/ч; t — время, равное 1 часу, определяется по таблице 8.

Таблица 8 – Скорость бетонирования

Наличие обсадных труб	Скорость подачи бетона, м ³ /ч	Диаметр свай, м	Скорость бетонирования, м/ч
Без обсадных труб	40,5	1,0	31,8
		1,5	22,9
		1,8	15,9
		2,0	12,9
С обсадными трубами	6,3	1,0	8,0
		1,5	4,8
		2,0	3,4

Проведённые исследования *сопротивления грунта по нижнему концу свай* в дисперсных грунтах показали, что даже при отсутствии шлама для включения в работу свай по её нижнему концу требуются перемещения порядка 50–100 мм, что может быть недопустимо для высотных зданий. Учитывая, что свая по боковой поверхности «срывается» при перемещении 10–20 мм, при расчетах свай по несущей способности сопротивление грунта под нижним концом свай без проведения специальных мероприятий (опрессовка давлением твердеющего раствора, обжатие домкратами и др.) не должно учитываться.

В процессе проектирования башни «Охта–Центр» в Санкт-Петербурге были проведены полевые *совместные испытания трёх баретт* поперечным сечением $1,5 \times 3,0$ м, глубиной до 80 м и расстоянием между бареттами 2,5 м в свету (рисунок 14).

Основная цель проведения испытаний заключалась в исследовании взаимного влияния баретт. В результате испытаний выявлено, что наибольшее сопротивление по боковой поверхности имеет место у центральной баретты В2 (рисунок 15).

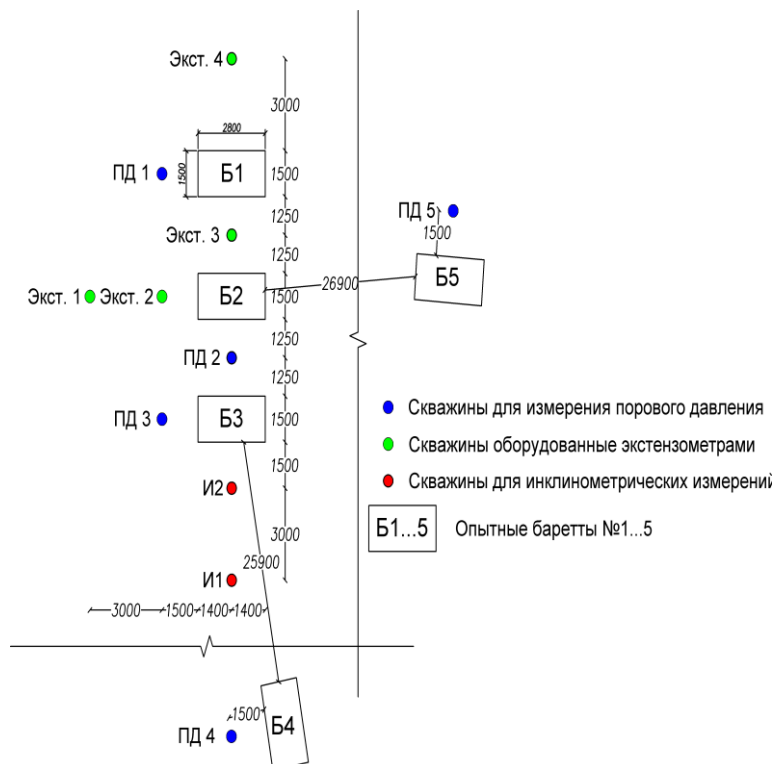
Этот эффект можно объяснить механизмом взаимодействия баретт между собой и с грунтом, представленным на рисунке 16. В результате приложения нагрузки в грунте возникают дополнительные напряжения $\Delta\sigma_z$, которые создают горизонтальные напряжения $\Delta\sigma_x$, действующие нормально к поверхности баретты.

Увеличение горизонтальных напряжений σ_x приводит к возрастанию сопротивления по боковой поверхности f_i , (рисунок 17), которое зависит главным образом от механических характеристик грунта и от расстояния между сваями, а также от их длины и может определяться по формуле

$$f_i = (\sigma_{x,s} + \Delta\sigma_x) \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (15)$$

где $\Delta\sigma_x$ — дополнительные горизонтальные напряжения при расположении свай в свайном поле; $\sigma_{x,s}$ — горизонтальные напряжения, действующие на поверхности одиночной сваи.

а



б

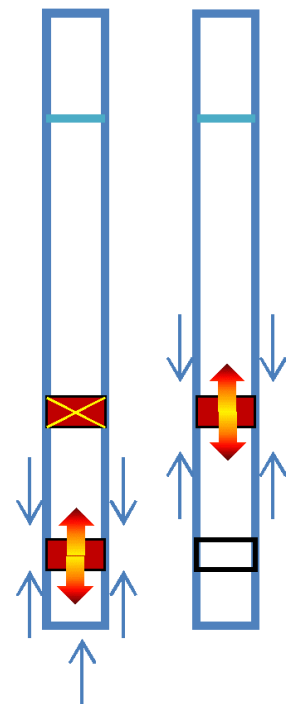
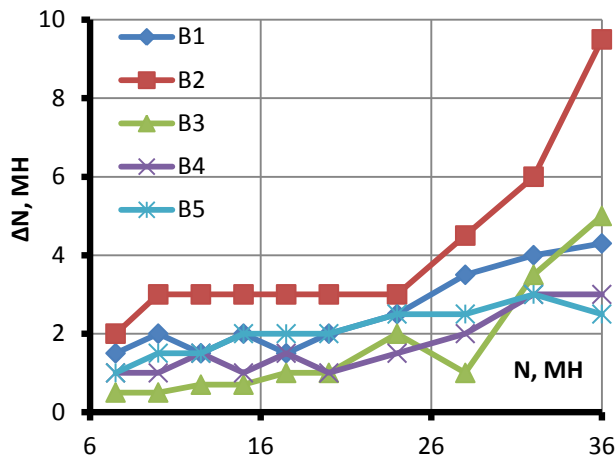


Рисунок 14 — Совместные испытания баретт: *а* — схема расположения опытных баретт; *б* — схема проведения испытаний

а



б

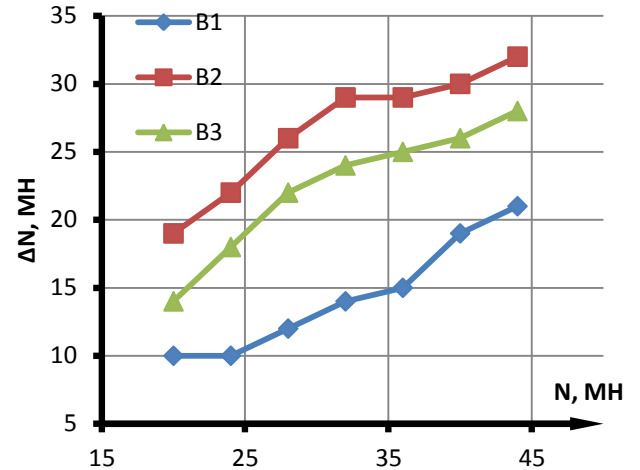


Рисунок 15 — Результаты совместных испытаний баретт: а — изменение усилия ΔN в теле баретт в процессе нагружения N нижней ячейкой домкратов (рисунок 14, б); б — изменение усилия ΔN в теле баретт в процессе нагружения N верхней ячейкой домкратов (рисунок 14, б)

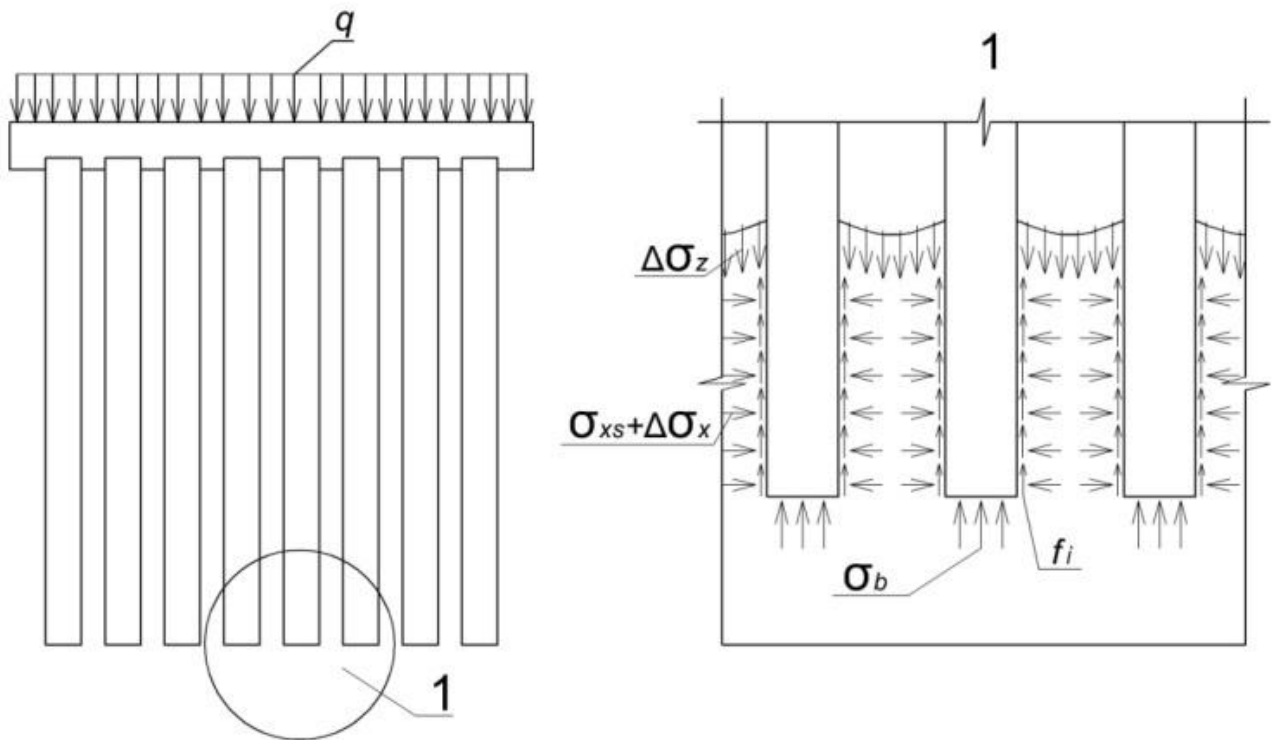


Рисунок 16 — Механизм взаимодействия сваи с грунтом в случае свайного поля

Для повышения сопротивления грунта по боковой поверхности буронабивных свай разработаны технология и методика расчёта требуемого объёма инъекции твердеющего раствора для создания заданного напряжения в массиве грунта. В отличие от известной предлагаемая методика заключается в выполнении инъекции по боковой поверхности буронабивной сваи твердеющего раствора многократно через иньектор, установленный снаружи арматурного каркаса, по манжетной технологии через отверстия, выполненные с шагом $0,3 \dots 0,5$ м.

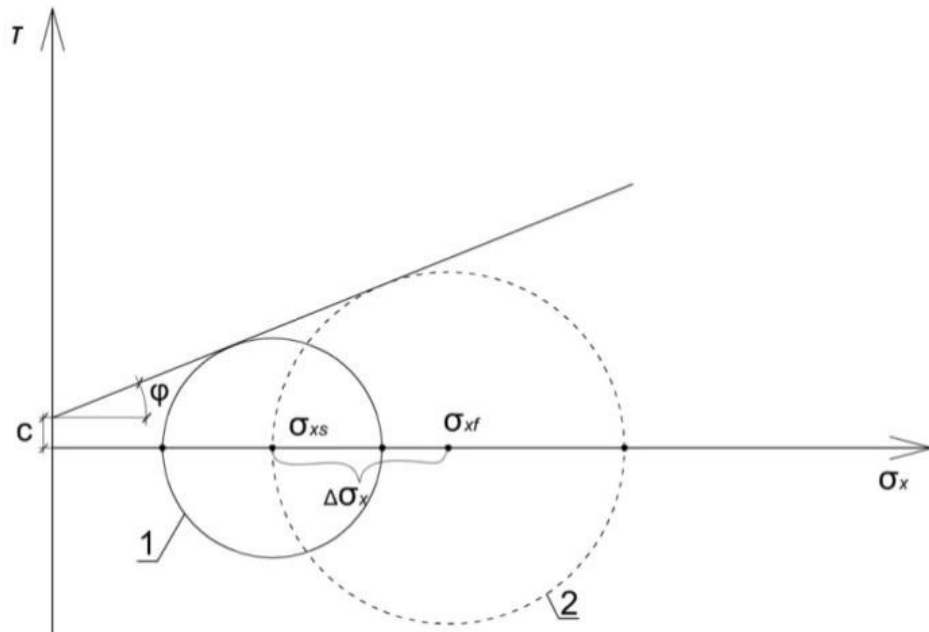


Рисунок 17 — Сравнение величин нормальных напряжений на боковой поверхности для одиночных свай (1) и свай в составе свайного поля (2)

В осесимметричной задаче требуемый объём расширения ΔV на единицу длины l скважины определяется по формуле

$$\Delta V = l \times \pi[(r_1 + u_1)^2 - r_1^2], \quad (16)$$

где u_1 — перемещение грунта на расстояние r_1 от центра иньектора, которое может быть определено при известном требуемом радиальном напряжении σ_1 по формуле Ламе

$$u_1 = (1 + \mu) r_1 \sigma_1 / E, \quad (17)$$

где μ — коэффициент Пуассона.

С другой стороны, общий объём иньектируемого раствора Q_n для выполнения опрессовки боковой поверхности сваи зависит от механических и фильтрационных характеристик грунта, а также от пористости и от наличия пустот в грунте и в общем виде может быть определён по формуле

$$Q_n = Q_d + Q_{\phi 1} + Q_{\phi 2}, \quad (18)$$

где Q_d — объём раствора, необходимый для создания требуемых объёмных деформаций грунта; $Q_{\phi 1}$ — объём раствора, заполнившего поры и отдельные пустоты в грунте; $Q_{\phi 2}$ — объём раствора, профильтровавшегося за расчётную зону иньекции.

Объём раствора Q_d для создания объёмных деформаций грунта ΔV определяется по формуле

$$Q_d = 100 \Delta V / K_o, \quad (19)$$

где K_o — объём цементного камня, образовавшегося после твердения, в процентах от объёма раствора.

Объём раствора, заполнившего поры и отдельные пустоты в грунте, составит

$$Q_{\phi 1} = (0,1 \dots 0,5) V_{\text{гр}} n, \quad (20)$$

где $V_{\text{гр}}$ – объём рассматриваемого грунта; n – пористость.

Минимальное значение в формуле (20) соответствует супеси, максимальное значение — гравелистым пескам.

Параметры компенсационного нагнетания (состав и общий объём инъецируемого раствора, число инъекторов и циклов инъекции, расстояние между инъекторами) подбирают таким образом, чтобы объём раствора, профильтровавшегося за расчётную зону инъекции $Q_{\phi 2}$, был минимальным и во всех случаях меньше значений, вычисленных по формуле

$$Q_{\phi 2} \leq K_1(Q_d + Q_{\phi 1}), \quad (21)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий расход объёма раствора, профильтровавшегося за пределы расчётной области и равный 0,5.

Таким образом, задавшись требуемым значением σ_1 , с учётом зависимостей (16)–(21) можно получить требуемый общий объём раствора Q_n .

Требуемое значение радиальных напряжений $\sigma_r = \sigma_1$ в формуле (17) может быть получено путём применения зависимостей, полученных впервые З.Г.Тер – Мартиросяном на основе решения задачи Ламе с учётом релаксации напряжений. При этом повышение значений σ_r не может происходить бесконечно. Их максимальное значение следует определять, исходя из уравнения предельного равновесия:

$$(\sigma_r - \sigma_v)/(\sigma_r + \sigma_v + 2c \operatorname{ctg} \varphi) = \sin \varphi, \quad (22)$$

$$\sigma_r = \sigma_v (1 + \sin \varphi)/(1 - \sin \varphi) + 2c \cos \varphi/(1 - \sin \varphi), \quad (23)$$

где σ_v – вертикальные напряжения в массиве грунта в рассматриваемой точке.

В главе 6 описаны способы определения коэффициента фильтрации слабопроницаемого грунта по скорости изменения порового давления как в процессе приложения гидростатического давления, так и в процессе консолидации.

Исследования действия гидростатического давления на образец глинистого водонасыщенного грунта в процессе его испытания в усовершенствованном гидрокомпрессионном приборе (рисунок 18) показали, что деформация образца происходит при снятии и приложении гидростатической нагрузки с частичной передачей давления на поровую воду.

Была разработана модель грунта (рисунок 19), принципиальная схема работы которой следующая. При подаче гидростатического давления в камеру 1 будет происходить сжатие всех пружин 4 и перемещение всех поршней 2 вниз до тех пор, пока приложенное гидростатическое давление не скомпенсируется силой сжатия пружин и давлением сжатого газа 8. Далее, в

процессе фильтрации воды 9 через трубочки 3 происходит выравнивание давления во всех камерах, пружины полностью разгружаются, а приложенное гидростатическое давление воспринимается водой и газом. Однако возвращение пружин 4 в начальное положение не происходит, а наблюдается незначительное их перемещение за счёт упругой деформации стойки 7, так как полному возвращению препятствует стопорное устройство 5.

Таким образом, величина уплотнения грунта будет зависеть от величины, скорости приложения и от длительности выдерживания нагрузки, а также от вязкости раствора и его фильтрационных характеристик.

Если гидростатическая нагрузка вызывает несущественные деформации грунта, то происходит только постепенная передача гидростатического давления на поровую воду. В этом случае скорость распространения гидростатического давления по высоте будет зависеть от фильтрационных характеристик грунта и от сжимаемости поровой жидкости, которая зависит, в основном, от объёма газа в порах грунта.

Согласно разработанной модели, при неизменном объёме пространства между поршнями в каждом объёме (9) изменение объёма газа (по закону Бойля – Мариотта) будет равно изменению объёма воды в результате процессов фильтрации (по закону Дарси)

$$\frac{(P_{Г2}-P_{Г1})V_{Гн}}{P_{Г1}P_{Г2}} = K_{\phi}\Delta tF\left(\frac{\Delta P_{w1}}{Z_1} - \frac{\Delta P_{w2}}{Z_2}\right)\frac{1}{Q_w g}, \quad (24)$$

где Q_w – плотность воды; g – ускорение свободного падения, $P_{Г1}$, $P_{Г2}$ – давления в газе.

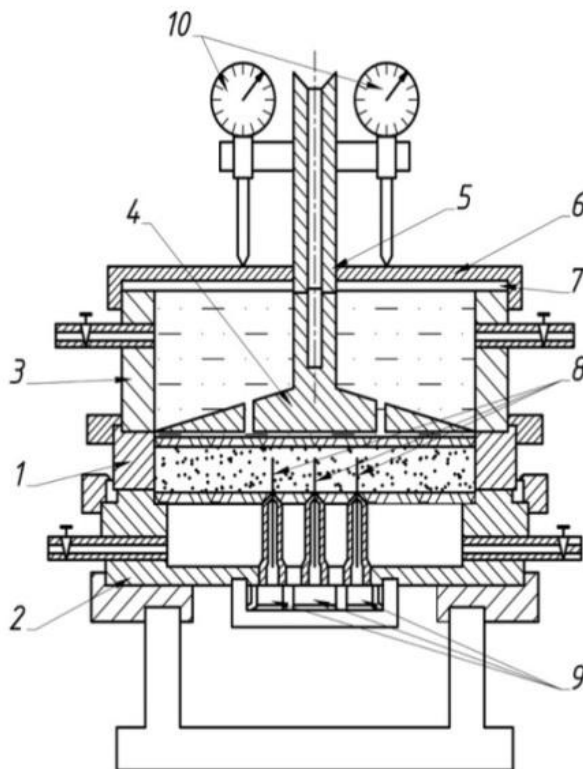


Рисунок 18 — Гидрокомпрессионный прибор усовершенствованный

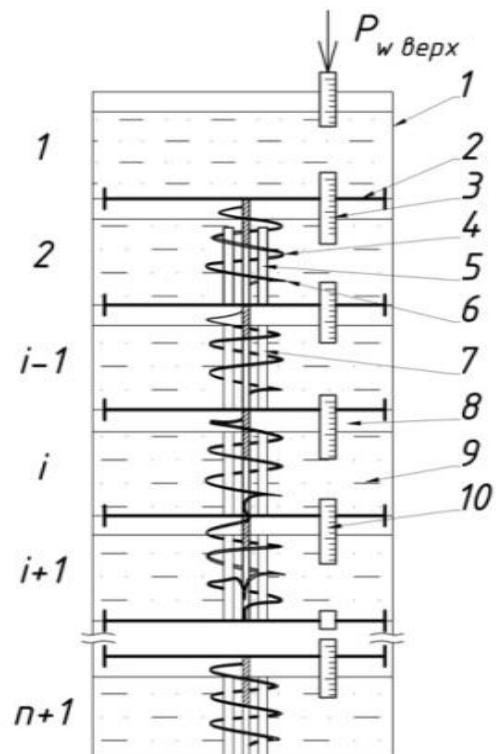


Рисунок 19 — Модель грунта

Давление в газе, как известно, определяется уравнением Лапласа

$$P_r = P_{ат} - P_{нп} + P_w + \frac{2\alpha}{R_0}, \quad (25)$$

где $P_{ат}$ – атмосферное давление; $P_{нп}$ – давление насыщенного пара; P_w – избыточное давление в поровой воде; $\frac{2\alpha}{R_0}$ – давление в пузырьке газа, возникающее вследствие поверхностного натяжения воды.

Представим выражение (24) в виде

$$\frac{\left(P_{ат} + P_{w0} - P_{нп} + \frac{2\alpha}{R_0}\right) V_{гн} \left(P_{w2} + \frac{2\alpha}{R_2} - P_{w1} - \frac{2\alpha}{R_1}\right)}{\left(P_{ат} + P_{w1} - P_{нп} + \frac{2\alpha}{R_1}\right) \left(P_{ат} + P_{w2} - P_{нп} + \frac{2\alpha}{R_2}\right)} = \frac{K_\phi \Delta t F}{Q_w g} \left(\frac{\Delta P_{w1}}{Z_1} - \frac{\Delta P_{w2}}{Z_2}\right). \quad (26)$$

Выражение (26) в дифференциальной форме имеет вид

$$\frac{dP_w}{dt} = K_\phi \frac{1}{m_w n Q_w q} \frac{d^2 P_w}{dz^2}, \quad (27)$$

$$\text{где } m_w = \frac{(P_{ат} + P_{wa} + 2\alpha / R_0) S_r}{n(P_{ат} + P_{w1} + 2\alpha / R_1)(P_{ат} + P_{w2} + 2\alpha / R_2)}. \quad (28)$$

Как можно заметить, уравнение (27) похоже на уравнение неустановившейся фильтрации

$$\frac{dP_x}{dt} = K \frac{d^2 P_w}{dz^2}, \quad (29)$$

где K – коэффициент пьезопроводности, зависящий от коэффициента проницаемости и от упругоёмкости пласта.

Решение уравнения (27) может быть получено как методом конечных разностей (30), так и интегрированием (31)

$$K_{\text{фиг}} = \frac{\Delta P_{wб} Q_w g n m_w h}{\Delta t \left(\frac{P_{\text{верх}} - P_{wб}}{h_1} - \frac{P_{wб} - P_{\text{нижн}}}{h_2} \right)}, \quad (30)$$

где $\Delta P_{wб}$ — изменение порового давления в точке Б за время Δt ; $P_{\text{верх}}$ — гидростатическое давление, действующее сверху образца грунта; $P_{\text{нижн}}$ — гидростатическое давление, действующее снизу образца грунта; $P_{wб}$ – среднее значение порового давления в точке Б за время Δt ; h_1 – расстояние от верхнего торца образца до точки Б; h_2 – расстояние от нижнего торца образца до точки Б;

$$K_{\text{фиг}} = \frac{A_r}{t} \ln B_r \frac{C_r}{C_r - P_{wб}}, \quad (31)$$

$$\text{где } A_r = \frac{4h^2 m_w n Q_w g}{\pi^2}; C_r = P_{wб(max)} = \left(1 - \frac{Z}{h}\right) P_{\text{верх}}; B_r = \sin\left(\frac{\pi z}{2h}\right) \frac{4}{\pi}; \quad (32)$$

$P_{wб(max)}$ – поровое давление в точке Б, соответствующее установившемуся процессу фильтрации.

Сопоставление результатов определения коэффициентов фильтрации предлагаемыми способами с установлением их прямым способом (по объёму профильтровавшейся воды) показало, что различия не превышают 30%. Время проведения испытания при этом сократится с нескольких суток (недель) до нескольких минут (часов). В результате не успевают развиваться процессы механической и химической суффозии, отпадает необходимость в применении специальных мер по предотвращению пристенной фильтрации и испарения профильтровавшейся жидкости. Это открывает возможность определения коэффициента фильтрации слабопроницаемых грунтов с $K_f < 10^{-9}$ м/с.

В главе 7 описываются исследования взаимодействия оснований и фундаментов в условиях реального строительства, в результате которых были подтверждены и доказаны основные положения диссертации.

Результаты исследований и мониторинга при строительстве на твёрдых глинистых грунтах на объектах «Лахта Центр» в Санкт Петербурге и «Москва-Сити» подтвердили, что при расчёте следует учитывать анизотропию, параметры переуплотнения и зависимость модуля деформации грунта от напряжённого состояния.

В процессе строительства на участках №11, №№17 – 18 «Москва-СИТИ» и многофункционального жилого комплекса в Москве было подтверждено существенное влияние наличия стены в грунте на осадку и крен ФВЗ. Строительство в последнем случае на юрских глинах также подтвердило влияние процесса фильтрационной консолидации на конечное напряжённое состояние и необходимость его учёта при наличии в зоне влияния противофильтрационной завесы в виде стены в грунте.

На основании анализа геотехнического мониторинга при строительстве на участках №2–3 и №4 «Москва-Сити» установлено, что осадки имеют очень малые значения, не превышающие нескольких сантиметров (2-3 см). Бóльшая часть деформаций происходит в свайно-грунтовой массе (на участке №2-3 – практически 100%, на участке №4 – около 50%). Сваи работают, в основном, по боковой поверхности (на нижние концы свай приходится не более 10% нагрузки). Всё это свидетельствует о высокой недооценённой несущей способности и низкой деформативности скальных грунтов и твёрдых глин основания фундаментов небоскрёбов «Москва–Сити». Недооценка несущей способности свай вызвана в первую очередь несовершенством расчётного аппарата, в соответствии с которым в скальном грунте свая работает по нижнему концу. Результаты экспериментальных исследований доказали, что буронабивные сваи в скальных грунтах эффективно работают по боковой поверхности.

При строительстве на участках №11 и №17-18 «Москва-СИТИ» и в «Лахта Центре» расчёт ФВЗ выполнялся с предварительной апробацией расчётной модели и уточнением параметров

грунта по результатам обратных расчётов результатов полевых испытаний грунта сваями. Это позволило в несколько раз повысить модуль деформации грунта, снизить осадки фундамента и соответствующим образом сократить объём железобетона подземной части здания, в некоторых случаях отказаться от свай.

Применение разработанных конструктивных решений в виде сплошной (без осадочных швов) фундаментной плиты под всеми сооружениями многофункциональных комплексов на участках №11 и №17-18 «Москва-СИТИ», сохранение грунта под плитой свайно-плитного фундамента за счёт устройства свай с силовой бетонной подготовкой, повышение жёсткости основания плиты свайно-плитного фундамента путём внедрения в грунт твёрдого тела, а также устройство геотехнического барьера для снижения влияния отдельных частей многофункционального комплекса друг на друга при строительстве многофункциональных комплексов по ул. Ярцевская в Москве показало, что они позволяют повысить экономичность и надёжность технического решения ФВЗ.

Состав и объём геотехнического мониторинга, выполненного в соответствии с требованиями главы 3 на большинстве рассмотренных в главе 7 объектах, а также применение усовершенствованного оборудования для определения послойных деформаций грунта на участках №2-3, №4 и №11 «Москва-СИТИ» позволили получить необходимую информацию для проверки правильности проектных решений, технологии выполнения работ и качества применённых строительных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе обзора и анализа конструктивных решений высотных зданий определены их особенности, влияющие на расчёт фундаментов; основными из этих особенностей являются высокая чувствительность к крену, большие вертикальные и горизонтальные (ветровые) нагрузки, конструктивная схема здания, наличие и расположение жёстких элементов.

2. В результате проведённых экспериментальных и теоретических исследований выявлено, что при расчёте напряжённо-деформированного состояния основания фундамента высотных зданий в связи с их высокой чувствительности к крену необходимо учитывать следующие факторы:

- разуплотнение грунта при разработке котлована;
- конструкцию и место расположения ограждения котлована;
- жёсткость конструкций здания и последовательность их монтажа;
- существующее напряжённое состояние в массиве грунта, в том числе возникшее в результате строительства окружающих сооружений и изменения уровня подземных вод;
- развитие осадки во времени и возможное влияние процесса фильтрационной консолидации на конечное напряжённо-деформированное состояние основания фундаментов высотных зданий;
- неоднородность, переуплотнение и анизотропию грунта.

3. В результате теоретических и экспериментальных исследований разработаны принципы проведения инженерно-геологических изысканий при строительстве фундаментов высотных зданий. Установлено, что инженерно-геологические изыскания должны проводиться в два этапа (предпроектный и проектный). Размеры зоны изысканий должны охватывать всё основание фундамента, определённое с учётом неоднородности, переуплотнения и анизотропии грунта (при их наличии). Ширина зоны изысканий должна выходить за пределы фундамента не менее чем на $0,5b$ (где b – ширина подошвы фундамента). Учитывая большую глубину изысканий, приоритетными являются полевые методы испытаний грунта, в том числе штампом и прессиометром (для плитных фундаментов), а также сваями (для свайных фундаментов), с уточнением параметров грунта и апробацией расчётной модели путём обратных расчётов. Для повышения надёжности результатов изысканий рекомендуется не менее 10% всех испытаний выполнять в альтернативной лаборатории.

4. Выявлены специфические характеристики твёрдых глинистых грунтов (параметры переуплотнения, анизотропия деформационных характеристик, изменение модуля

деформации по глубине, ползучесть), которые оказывают существенное влияние на распределение напряжения и осадку фундамента.

5. Показано и доказано, что модуль деформации в большей степени зависит от напряжённого состояния грунта, чем от плотности и влажности, и при дополнительном нагружении массива грунта вертикальным давлением, равным 1 МПа (что соответствует высоте здания 200 м) и более, модуль деформации как твёрдых глинистых грунтов, так и плотных песков изменяется в 2,5 раза и более. Все это свидетельствует о важности учёта влияния напряжённого состояния на модуль деформации грунта при расчёте основания фундаментов высотных зданий. В связи с этим в процессе инженерно-геологических изысканий важно определять зависимость модуля деформации от напряжённого состояния и, соответственно, изменение его по глубине, а при расчётах учитывать его изменение в процессе нагружения.

6. Выполнена классификация конструкций фундаментов высотных зданий и разработаны таблицы зависимости типа фундамента от вида грунта и от высоты здания, а также вида свайного фундамента от инженерно-геологических условий, которые могут быть применены для выбора типа фундамента на предпроектной стадии. Разработаны основные принципы конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий, заключающиеся в том, что наряду с увеличением глубины заложения и площади фундамента с увеличением высоты здания, а также в случае применения пирамидальной формы конструкций здания нагрузку на фундамент и жёсткостные элементы следует располагать симметрично относительно центральной оси, а высотное здание – в центре котлована (на расстоянии не ближе чем $b/2$ от ограждения котлована, где b – ширина подошвы фундамента), при увеличении высоты здания снижать предельные значения осадки фундамента. Одновременно при высоте здания до 150 м предельные значения средней осадки фундамента не должны превышать 200 мм, для зданий 300 м и выше – 100 мм.

7. Разработаны конструкции и технологические мероприятия, позволяющие выравнивать усилия в сваях свайного поля, повышать несущую способность одиночной сваи и основания фундаментной плиты, регулировать напряжённо-деформированное состояние основания фундамента высотного здания, а также снижать взаимное влияние фундаментов высотных зданий и окружающих сооружений при строительстве многофункциональных комплексов.

8. Разработаны основные принципы выполнения расчётов фундаментов высотных зданий, состоящие в следующем.

- При назначении размеров сжимаемой зоны грунта следует учитывать влияние неоднородности, анизотропии и переуплотнения грунтов (при их наличии) на распределение

напряжений в основании фундаментов высотных зданий или определять её размеры с использованием специальных моделей грунта, не требующих введения таких ограничений. Ограничивать сжимаемую зону скальными или другими грунтами с модулем деформации более 100 МПа недопустимо;

- При выполнении расчётов учитывать факторы (см. п. 2 настоящих выводов) и специфические свойства грунта (см. п. 4 там же);
- В процессе расчётов учитывать зависимость модуля деформации от напряжённого состояния;
- До выполнения расчётов проводить апробацию расчётной модели и уточнять параметры грунта путём обратных расчётов лабораторных и полевых исследований грунта.

9. В связи с уникальностью и высоким уровнем ответственности проектирование фундаментов высотных зданий должно выполняться с одновременным применением трёх основных способов: расчётного, экспериментального и наблюдательного и при обязательном научно-техническом сопровождении силами специализированной организации. До выполнения основных работ по проектированию проводить подготовительные работы, во время которых выполнять, помимо общепринятых, геотехническую оценку площадки строительства, разработку концептуальных предложений и геотехническое обоснование проектных решений.

10. В результате проведения экспериментальных и теоретических исследований взаимодействия свай в свайном поле выявлено, что наряду с шагом, нагрузкой и длиной свай на распределение усилий между сваями оказывают влияние начальное и вновь образованное в результате нагружения напряжённые состояния основания фундаментов высотных зданий, прочностные, а также деформационные характеристики грунта, зависящие от напряжённо-деформированного состояния основания фундаментов высотных зданий. При этом расчёты необходимо выполнять с введением коэффициента надёжности по грунту как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения механических характеристик грунта.

11. Для определения осадки в случае строительства на неоднородных анизотропных переуплотнённых грунтах предложено в методе послойного суммирования напряжённое состояние определять с учётом указанных в п. 4 специфических свойств грунтов, а модуль деформации принимать изменяющимся в процессе нагружения пропорционально изменению горизонтальных напряжений в грунте Бз. Глубину сжимаемой толщи при этом в запас надёжности рекомендуется рассчитывать как для упругого, изотропного массива грунта по методу послойного суммирования.

12. Экспериментальные и теоретические исследования изменения напряжённо-деформированного состояния при консолидации грунтов показали, что в результате

фильтрации воды из центральной зоны в краевой зоне возможно кратковременное увеличение порового давления при соответствующем уменьшении эффективных напряжений. Этот эффект приводит, с одной стороны, к расширению области пластических деформаций в краевой зоне, а с другой стороны — меняет траекторию нагружения отдельных зон массива грунта, что, как правило, влечёт за собой изменение конечных значений напряжённо-деформированного состояния массива грунта. Аналогичный эффект может произойти и при расположении на пути фильтрации водонепроницаемых преград в виде стены в грунте и т.п.

13. Предложено для твёрдых глинистых грунтов определение сопротивления по боковой поверхности буронабивных свай проводить с использованием условия прочности Кулона – Мора с учётом переуплотнения грунта. В случае численного расчёта рекомендуется проводить моделирование, в том числе и процессов изготовления свай, при этом увеличение сопротивления по боковой поверхности свай будет определяться автоматически. С целью проведения такого моделирования получена эмпирическая формула для определения давления бетона на стенки скважины в процессе бетонирования.

14. Проведённые исследования в гидрокомпрессионном приборе доказали возможность определения фильтрационных характеристик слабопроницаемого грунта по скорости изменения порового давления по формуле, полученной на основе разработанной модели грунта. Для определения фильтрационных характеристик грунта в полевых условиях при точечном задании гидростатического давления разработана специальная конструкция зонда, позволяющая, в том числе, определять коэффициент фильтрации как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях. Разработаны также оборудование и методики определения сжимаемости поровой воды и содержания газовой фазы грунта.

15. Определены параметры напряжённо-деформированного состояния оснований и фундаментов, необходимых для контроля корректности выполнения инженерно-геологических изысканий, расчётов и конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий, а также качества выполнения строительно-монтажных работ. На основании указанных параметров разработаны требования к составу и объёму мониторинга, а также к составу отчётной документации. Предложено, а в некоторых случаях и усовершенствовано оборудование, позволяющее получить необходимую информацию для проверки правильности проектных решений, технологии выполнения работ и качества применённых строительных материалов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Монографии**

1. Шулятьев О.А. Основания и фундаменты высотных зданий. — М.: АСВ, 2016. — 392 с.
2. Шулятьев О.А. Комплексная методика расчёта основания, сложенного слабым водонасыщенным глинистым грунтом / А.В. Голли, О.А. Шулятьев, М.К. Лисюк, Л.К. Тихомирова. — Л.: ЛИСИ, 1989. — 64 с.
3. Шулятьев О.А. Новые способы геотехнического проектирования и строительства: Научное издание / В.П. Петрухин, О.А. Шулятьев, О.А. Мозгачёва.— М.: АСВ, 2015. — 224 с.
4. Шулятьев О.А. Освоение подземного пространства городов: научное издание / О.А. Шулятьев, О.А. Мозгачёва, В.С. Поспехов. — М.: АСВ, 2017. — 510 с.

Авторские свидетельства и патенты

1. А. с. №1118900. Авторы: Голли А.В., Голли О.Р., Далматов Б.И., Шулятьев О.А. Способ определения коэффициента фильтрации грунта. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 15.06.1984 г.
2. А. с. № 1259133. Авторы: Голли А.В., Лисюк М.Б., Шулятьев О.А. Грунтонос. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 22.05.1986 г.
3. А. с. № 1113471. Устройство для определения коэффициента фильтрации грунта. Авторы: Шулятьев О.А., Голли А.В., Мельников А.В. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 15.05.1984 г.
4. А. с. № 1250912. Устройство для определения коэффициента фильтрации грунта. Авторы: Голли А.В., Шулятьев О.А., Мельников А.В., Тарабыкин Д.А. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 15.04.1986 г.
5. А. с. 1265552. Способ определения начального градиента фильтрации. Автор: Шулятьев О.А. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 22.06.1986 г.
6. А. с. 1303901. Способ определения коэффициента фильтрации грунта. Авторы: Голли А.В., Шулятьев О.А., Тихомирова Л.К., Гриценко В.А. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 15.09.1986 г.
7. Патент РФ № 2328576. Способ возведения плитно-свайного фундамента. Авторы: Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Лесницкий В.С., Харичкин А.И. // Бюл. изобр.— 2008. — №19.
8. Патент РФ № 60544 на полезную модель. Ограждающая конструкция котлована. Авторы: Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Поспехов В.С. // Бюл. изобр.— 2007. — №3.

9. Патент РФ на № 63378 на полезную модель. Фундамент для зданий и сооружений с эксцентриситетом. Авторы: Шулятьев О.А., Егоров Е.А. // Бюл. изобр.— 2010. — № 12.
10. Патент РФ № 64648 на полезную модель. Фундамент для зданий и сооружений. Авторы: Шулятьев О.А., Егоров Е.А. // Бюл. изобр.— 2010. — № 12.
11. Патент РФ № 2391464. Способ возведения зданий комплексной застройки. Авторы: Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Мозгачёва О.А. // Бюл. изобр.— 2010. — №16.
12. Патент РФ №95687 на полезную модель. Буровой став. Авторы: Петрухин В.П., Попсуенко И.К., Шулятьев О.А. // Бюл. изобр.— 2010. — №19
13. Патент РФ № 2422592. Способ поддержания начального напряжённо-деформированного состояния грунта в зоне фундамента существующего здания. Авторы: Попсуенко И.К., Шулятьев О.А. // Бюл. изобр.— 2011. — № 18.
14. Патент РФ № 112913 на полезную модель. Буроинъекционная компенсационная свая. Авторы: Попсуенко И.К., Шулятьев О.А. // Бюл. изобр.— 2012. — №3.
15. Патент РФ №129968 на полезную модель. Здание с плитным или плитно-свайным фундаментом. Авторы: Шулятьев С.О., Шулятьев О.А., Федоровский В.Г. // Бюл. изобр.— 2013. — №19.
16. Патент РФ № 130325 на полезную модель. Опытная буронабивная свая для статических испытаний. Авторы: Колыбин И.В., Ладыженский И.Г., Петрухин В.П., Шулятьев О.А. // Бюл. изобр.— 2013. — №20.
17. Патент РФ №1386667 на полезную модель. Сейсмостойкий свайный фундамент. Авторы: Шулятьев О.А., Боков И.А. // Бюл. изобр.— 2013. — №8.
18. Патент РФ на полезную модель № 141161. Свайно-плитный фундамент высотного здания. Авторы: Шулятьев О.А., Боков И.А. // Бюл. изобр.— 2014. — №15.
19. Патент РФ на полезную модель № 141158. Свайно-плитный фундамент высотного здания. Авторы: Шулятьев О.А., Боков И.А. // Бюл. изобр.— 2014. — №15.
20. Патент РФ №2520751. Способ регулирования неравномерных осадок многоэтажного здания с плитным или плитно-свайным фундаментом. Авторы: Шулятьев С.О., Шулятьев О.А., Федоровский В.Г. // Бюл. изобр.— 2014. — №18.
21. Патент РФ №148340 на полезную модель. Фундамент для зданий и сооружений с эксцентриситетом по нагрузке. Авторы: Шулятьев О.А., Лесницкий В.С., Шулятьев С. О. // Бюл. изобр.— 2014. — №34.
22. Патент РФ №152014 на полезную модель. Фундамент для зданий и сооружений с эксцентриситетом по нагрузке. Авторы: Шулятьев О.А., Лесницкий В.С., Шулятьев С.О. // Бюл. изобр.— 2015. — №12.

23. Патент РФ на изобретение №2549632. Способ сооружения свайно-плитного фундамента высотного здания. Авторы: Шулятьев О.А., Боков И.А. // Бюл. изобр.— 2015. — № 12.
24. Патент РФ на изобретение №2549633. Способ сооружения свайно-плитного фундамента высотного здания. Авторы: Шулятьев О.А., Боков И.А. // Бюл. изобр.— 2015. — № 12.
25. Патент РФ на изобретение №2549635. Способ сооружения свайно-плитного фундамента высотного здания. Авторы: Шулятьев О.А., Боков И.А. // Бюл. изобр.— 2015. — № 12.
26. Патент РФ на полезную модель №163420. Буровой став. Авторы: Шулятьев О.А., Попсуенко И.К. // Бюл. изобр.— 2016. — №20.
27. Патент РФ №167384 на полезную модель. Устройство для выполнения буроинъекционных свай. Авторы: Шулятьев О.А., Попсуенко И.К. // Бюл. изобр.— 2017. — №1.

Публикации в изданиях, включённых в перечень рецензируемых научных изданий по списку ВАК РФ

1. Шулятьев О.А. Геотехнические особенности проектирования высотных зданий в Москве / О.А. Шулятьев // Промышленное и гражданское строительство. — 2016. — №10. — С. 17–25.
2. Шулятьев О.А. Прогноз развития деформаций основания многофункционального жилого комплекса / О.А. Шулятьев, О.Н. Исаев, Д.В. Наятов, Р.Ф. Шарафутдинов // Геотехника. — 2017. — № 2. — С. 4–15.
3. Шулятьев О.А. Опыт строительства многофункционального жилого комплекса / О.А. Шулятьев, О.Н. Исаев, Д.В. Наятов, Р.Ф. Шарафутдинов // Жилищное строительство. — 2015. — № 9. — С. 21–29.
4. Травуш В.И. Анализ результатов геотехнического мониторинга башни «Лахта Центр» / В.И. Травуш, О.А. Шулятьев, С.О. Шулятьев, А.М. Шахрамьян, Ю.А. Колотовичев // Основания и фундаменты, механика грунтов. — 2019.— №2.— С. 15-21.
5. Травуш В.И. «Лахта Центр»: автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания / В.И. Травуш, А.М. Шахрамьян, Ю.А. Колотовичев, А.И. Шахворостов, М.А. Десяткин, О.А. Шулятьев, С.О. Шулятьев // Academia. Архитектура и строительство. — 2018.— №4.— С. 94-108.
6. Травуш В. И. К общественному обсуждению глав нового свода правил «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования» (проект, первая редакция), посвящённых проектированию несущих конструкций / В.И. Травуш, С.А. Зенин, Д.В. Конин, Ю.П. Назаров, Н.А. Попов, Б.С. Соколов, О.А. Шулятьев, С.О. Шулятьев // Промышленное и гражданское строительство. — 2016. — № 3. — С. 31–37.

7. Шулятьев О.А. Новый свод правил по проектированию оснований и фундаментов высотных зданий / О.А. Шулятьев, С.О. Шулятьев // Основание, фундаменты и механика грунтов. — 2016. — № 6. — С. 37–40.
8. Труфанов А.Н. Методы определения параметров переуплотнения грунта / А.Н. Труфанов, О.А. Шулятьев, А.В. Ростовцев, Г.У. Габсаясов // Инженерные изыскания. — 2014. — № 11. — С. 32 – 39.
9. Шулятьев О.А. Натурные измерения распределения нагрузок между сваями в фундаменте/ О.А. Шулятьев, А.И. Харичкин / Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2009. № 6. — С. 17-22.
10. Шулятьев О.А. Из практики проектирования ограждающей конструкции и фундаментной плиты административного комплекса зданий с четырёхуровневой подземной автостоянкой / О.А. Шулятьев, В.С. Поспехов, С.О. Шулятьев // Жилищное строительство. — 2012. — № 9. — С. 50–53.
11. Шулятьев О.А. Определение технологических осадок фундаментов близлежащих зданий при устройстве стены в грунте, грунтовых анкеров и буроинъекционных свай / О.А. Шулятьев, О.А. Мозгачёва, Д.К. Минаков, Д.Ю. Соловьёв // Academia. Архитектура и строительство. — 2016. — № 4. — С. 129–141.
12. Шулятьев О.А. Технологические осадки при устройстве стены в грунте траншейного типа / О.А. Шулятьев, Д.К. Минаков // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. — 2017. — №3. — С. 41–50.
13. Шулятьев О. А. Давление свежего бетона на стенки траншеи при устройстве стены в грунте / О.А. Шулятьев, Д.К. Минаков // Геотехника. — 2017. — № 6. — С. 30–38.
14. Шулятьев О.А. Изменение напряжённо-деформированного состояния массива грунта или его уплотнение при инъекции / О.А. Шулятьев // Основание, фундаменты и механика грунтов. — 2016. — № 3. — С. 39–40.