

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

На правах рукописи



Гребенников Иван Олегович

**УСИЛЕНИЕ ГЛИНИСТЫХ ОСНОВАНИЙ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Кандидат технических наук,
Ломов Пётр Олегович

Новосибирск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ АРМИРОВАНИЯ ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ИХ СЖИМАЕМОСТИ.....	10
1.1 Методы армирования грунтовых массивов фундаментов зданий и сооружений	10
1.2 Армирование грунтов основания вертикальными грунтоцементными элементами, изготовленными буросмесительным способом	16
1.3 Современные методы расчета армированных грунтовых массивов грунтоцементными элементами.....	20
1.3.1 Натурное моделирование	22
1.3.2 Численное моделирование	25
1.4 Цель и задачи исследования.....	27
РАЗДЕЛ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ, АРМИРОВАННЫХ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ БУРОСМЕСИТЕЛЬНЫМ СПОСОБОМ.....	29
2.1 Анализ и систематизация данных геотехнического мониторинга за строительством зданий на армированных грунтоцементными элементами основаниях	31
2.2 Численная модель грунтового основания, армированного вертикальными грунтоцементными элементами.....	36
2.3 Валидация численной модели грунтового основания, армированного вертикальными грунтоцементными элементами.....	42
2.3.1 Методика натуральных испытаний	44
2.3.2 Методика численного моделирования для валидации модели	51
2.3.3 Сопоставление данных натуральных испытаний и численного моделирования.....	54
2.4 Выводы по разделу 2.....	60
РАЗДЕЛ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ, АРМИРОВАННЫХ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, ПРИ	

ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ.....	62
3.1 Методика проведения моделирования.....	62
3.2 Исследование работы усиленного грунтового массива (первый этап)	69
3.3 Исследование параметров армирования на деформационные свойства усиленного массива (второй этап).....	77
3.4 Выводы по разделу 3.....	82
РАЗДЕЛ 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСИЛЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ ОСНОВАНИЙ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗГОТОВЛЕННЫМИ БУРОСМЕСИТЕЛЬНЫМ СПОСОБОМ	84
4.1 Особенности армирования грунтовых массивов бурсмесительным способом.....	84
4.2 Проектирование усиления глинистого основания грунтоцементными элементами, изготовленными бурсмесительным способом	85
4.2.1 Развитие методики проектирования на примере проектирования и реализации бурсмесительного способа.....	89
4.3 Оборудование для армирования грунтовых массивов бурсмесительным способом.....	99
4.4 Контроль качества устройства глинистых оснований, армированных грунтоцементными элементами.....	102
4.4.1 Способ контроля деформационных характеристик армированных массивов грунтоцементными элементами глинистого грунта	104
4.4.2 Способ контроля деформационных характеристик армированных массивов грунтоцементными элементами на любой глубине армированного грунтового массива	107
4.5 Эффективность усиления глинистых основания грунтоцементными элементами, изготовленных бурсмесительным способом.....	112
4.6 Выводы по разделу 4.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	122
Приложение А – Акты о внедрении результатов исследований.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В соответствии с распоряжением правительства Российской Федерации от 31 октября 2022 г. № 3268-р создана стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ на период до 2030 с прогнозом до 2035 года. В данной стратегии выделяются ключевые задачи, включая вовлечение в хозяйственный оборот ранее не задействованных земельных участков и повышение их эффективности использования. К таким земельным участкам относятся участки с неблагоприятными грунтовыми условиями (обводненные, заболоченные или с высоким уровнем грунтовых вод).

При использовании таких участков необходимы нестандартные (нетиповые) методы устройства фундаментов для будущих зданий и сооружений. Одним из таких методов является армирование грунтов основания вертикальными грунтоцементными элементами. Метод подразумевает преобразование механических характеристик грунтового основания за счёт создания в его массиве вертикальных грунтоцементных элементов с заданными параметрами (шаг элементов, длина, диаметр, прочность). Наиболее известные способы создания вертикальных грунтоцементных элементов: струйный способ (*Jet-Grouting*), буросмесительный (*Deep Soil Mixing*) и др. Способы являются простыми в реализации, однако, требуют большого опыта и научно-технических наработок при его реализации.

Несмотря на то, что эти способы широко применяются как на территории РФ, так и за рубежом, нормативная база для таких способов содержит определенные допущения и неточности и требует доработки. Требуются периодические корректировки и дополнительные исследования, что является серьёзным препятствием для широкого применения метода армирования грунтов основания грунтоцементными элементами. Из-за имеющихся допущений и обобщений нормативной базы, проектирование усилений оснований

армированием грунтоцементными элементами зачастую осуществляется с использованием научных разработок и собственного опыта исполнения работ. А в ряде случаев реальный опыт реализации усиления может противоречить положениям нормативных документов, что на стадии экспертизы соответствующей проектной документации может усложнить её прохождение. Получение качественных результатов при усилении грунтовых оснований зданий и сооружений армированием грунтоцементными элементами осложняется специфическими особенностями производства работ и отсутствием критериально обоснованной методики проектирования и способа контроля качества.

Исследование направлено на совершенствование существующих методик проектирования усиления грунтового массива армированием грунтоцементными элементами, изготовленными бурсмесительным способом, и контроля качества усиленных данным способом грунтовых массивов, что является однозначно актуальным для развития строительной отрасли.

Степень разработанности темы.

Исследованию армирования грунтовых массивов посвятили труды Ю.М. Абелев, В.В. Аскалонов, Е.С. Ашпиз, А.А. Барталомей, Б.В. Бахолдин, Н.З. Готман, А.Л. Готман, В.Н. Голубков, А.А. Григорян, Б.И. Далматов, К.Д. Джоунс, Г.Н. Жинкин, А.М. Караулов, К.В. Королев, В.В. Леденёв, Р.А. Мангушев, И.Т. Мирсаяпов, Н.С. Никифорова, Л.В. Нуждин, А.И. Полищук, А.Б. Пономарев, К. Терцаги, В.М. Улицкий, В.Г. Федоровским, В.А. Флорин, Н.А. Цытович, Р.Ф. Шарафутдинов, A. Bishop, R. Dobry, P.V. Palmeira и их ученики.

Вопросами, связанными с усилением грунтовых массивов вертикальными грунтоцементных элементов и другими методами преобразования грунтового массива, занимались С.Г. Богов, И.И. Бройд, Х.А. Джантемирова, М.С. Засорин, Н.В. Купчикова, А.Л. Ланис, П.О. Ломов, О.А. Маковецкий, А.Г. Малинин, Д.Е. Разводовский, А.З. Тер-Мартirosян, З.Г. Тер-Мартirosян, А.В. Черняков, Т.В. Шепитько, D. Alexiew, D.T. Bergado, J.P. Giroud, R.W. Henn, R.H. Karol, R.M. Koerner, M.P. Moseley, T. Paul и их ученики.

Объект исследования: являются основания, усиленные вертикальными грунтоцементными элементами, буросмесительным способом.

Предмет исследования: являются закономерности изменения сжимаемости оснований, усиленных грунтоцементными элементами буросмесительным способом, от заданных параметров.

Цель исследования – совершенствование методики проектирования усиления глинистых оснований грунтоцементными элементами, выполненными буросмесительным способом.

В соответствии с целью были поставлены следующие **задачи исследования:**

1. Выполнить анализ существующего подхода к проектированию усиления оснований грунтоцементными элементами и опыта реализации усиления с выявлением особенностей работы усиленного основания.

2. Разработать численную модель грунтового основания, армированного грунтоцементными элементами в глинистых грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е.

3. Провести экспериментальные исследования работы усиленного армированием грунтоцементными элементами грунтового массива для валидации разработанной численной модели.

4. Установить закономерности изменения сжимаемости, усиленного армированием грунтоцементными элементами грунтового массива при варьировании параметров армирования и грунтовых условий.

5. Разработать алгоритм проектирования усиления основания строящихся зданий и сооружений армированием грунтоцементными элементами, и способ контроля деформационных характеристик таких армированных массивов.

Методология и методы исследования.

Методологической основой для решения поставленных задач является системный подход, включающий проведение натурного и численного экспериментов. Натурные испытания проводились на армированных грунтовых массивах грунтоцементными элементами на строительных площадках города

Новосибирска. Создание численных моделей для определения напряженно-деформированного состояния усиленных грунтовых массивов выполнено с использованием метода конечных элементов в специализированном геотехническом программном комплексе.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана и валидирована численная модель взаимодействия грунтоцементных элементов и глинистых грунтов с показателем текучести более 0,5 д.е.

2. Подтверждена гипотеза о том, что с увеличением модуля деформации армирующих грунтоцементных элементов, расположенных в глинистых грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е., возможно повышение доли нагрузок на нижележащие грунтовые слои и увеличение сжимаемой толщи.

3. Установлены закономерности изменения модуля деформации усиленного грунтового массива от коэффициента армирования, модуля деформации грунта, модуля деформации грунтоцементного элемента, и соотношения модулей деформации окружающего грунта и грунтоцементного элемента.

4. Установлены условия проскальзывания грунтоцементных элементов по боковой поверхности на контакте с грунтом, приводящего к продавливанию подстилающих грунтов армирующими элементами.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Выполненное исследование позволило предложить подход к оценке деформационных характеристик глинистого основания, усиленного армированием вертикальными грунтоцементными элементами, учитывающими соотношение модулей деформации усиливаемых грунтов и усиливающих грунтоцементных элементов, разработать способ контроля деформационных характеристик основания, армированного грунтоцементными элементами.

На основании проведенных исследований усовершенствована методика проектирования усиления глинистых оснований, с показателем текучести более 0,5 д.е., армированием вертикальными грунтоцементными элементами.

Предложены и запатентованы способ контроля деформационных характеристик армированного вертикальными элементами слабого грунта (Патент РФ №2809481, МПК G01N 33/24 (2006.01)) и способ определения деформируемости основания из армированного вертикальными элементами слабого грунта (Патент РФ № 2829041, МПК G01N 33/24 (2006.01)).

Результаты исследования и отдельные положения внедрены при проектировании и строительстве административных и жилых зданий в г. Новосибирске и г. Барнауле. В дополнение к этому результаты исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Сибирского государственного университета путей сообщения», при подготовке бакалавров и специалистов для железнодорожной и строительной отраслей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Численная модель взаимодействия грунтоцементных элементов и глинистых грунтов с показателем текучести более 0,5 д.е.

2. Гипотеза о том, что с увеличением модуля деформации армирующих грунтоцементных элементов, расположенных в глинистых грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е., возможно повышение доли нагрузок на нижележащие грунтовые слои и увеличение сжимаемой толщи.

3. Закономерности изменения модуля деформации усиленного грунтового массива от коэффициента армирования, от модуля деформации грунта, от модуля деформации грунтоцементного элемента, и от соотношения модулей деформации окружающего грунта и грунтоцементного элемента.

4. Условия проскальзывания грунтоцементных элементов по боковой поверхности на контакте с грунтом, приводящего к продавливанию подстилающих грунтов армирующими элементами.

5. Усовершенствованная методика проектирования усиления глинистых оснований грунтоцементными элементами, выполненными буросмесительным способом.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов исследования подтверждена:

- использованием современных методов исследования, основанных на принципах механики грунтов;

- использованием актуализированных нормативных документов и применением поверенных приборов, оборудования и средств измерений;

- применением сертифицированных и верифицированных программных комплексов, основанных на использовании метода конечных элементов;

- согласованностью теоретических данных с результатами лабораторных и натуральных экспериментальных исследований;

- сопоставлением с результатами других авторов;

- результатами внедрения разработок автора на строительных объектах.

Основные положения и материалы диссертационной работы были представлены на XII Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, СГУПС, сентябрь 2022 г.), XIII Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, СГУПС, октябрь 2024 г.).

РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ АРМИРОВАНИЯ ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ИХ СЖИМАЕМОСТИ

1.1 Методы армирования грунтовых массивов фундаментов зданий и сооружений

При строительстве зданий и сооружений различного назначения возникают проблемы, связанные с недостаточной несущей способностью основания и неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, что требует усиления грунтов основания. В данных инженерно-геологических условиях необходимо применение нетиповых методов преобразования грунтового массива, с целью повышения его прочностных и деформационных характеристик. Применение нестандартных решений в части преобразования грунтового массива обусловлено технологической сложностью применения стандартных решений [81].

В настоящее время, часто используются различные методы армирования грунтов основания для устройства усиленных грунтовых массивов.

Методы усиления, армированием грунтовых массивов, позволяют создавать грунтовые массивы с повышенными прочностными и деформационными характеристиками. Армирующие элементы улучшают прочностные и деформационные характеристики грунтовых массивов. Вопросами армирования грунтов занимались такие ученые как: Ю.М. Абелев [130], В.В. Аскалонов [6], Е.С. Ашпиз [13], А.А. Барталомей [19], Б.В. Бахолдин [22], Н.З. Готман [42], А.Л. Готман [43], В.Н. Голубков [30], А.А. Григорян [45], Б.И. Далматов [47], К.Д. Джоунс [49], Г.Н. Жинкин [54], А.М. Караулов [60], К.В. Королев [83], В.В. Леденёв [11], Р.А. Мангушев [87], И.Т. Мирсаяпов [90], Н.С. Никифорова [91], Л.В. Нуждин [96], А.И. Полищук [101], А.Б. Пономарев [102], К. Терцаги [180], В.М. Улицкий [128], В.Г. Федоровским [131], В.А. Флорин [133], Н.А. Цытович [136],

Р.Ф. Шарафутдинов [138], А Bishop [147], R. Dobry [150], P.V. Palmeira [171] и их ученики.

Вопросами, связанными с усилением грунтовых массивов армированием грунтоцементными элементами (далее ГЦЭ) и другими методами преобразования грунтового массива, занимались С.Г. Богов [25], И.И. Бroyд [29], Х.А. Джантемирова [48], М.С. Засорин [55], Н.В. Купчикова [72], А.Л. Ланис [76], П.О. Ломов [81], О.А. Маковецкий [83], А.Г. Малинин [86], Д.Е. Разводовский [104], А.З. Тер-Мартirosян [126], З.Г. Тер-Мартirosян [125], А.В. Черняков [137], Т.В. Шепитько [141], D. Alexiew [176], D.T. Bergado [146], J.P. Giroud [153], R.W. Henn [155], R.H. Karol [158], R.M. Koerner [159], M.P. Moseley [168], T. Paul [172] и их ученики.

Армирование грунта является методом преобразования его свойств путем введения в него специальных элементов, обеспечивающих улучшение деформационных и прочностных характеристик.

Согласно [76] армирование грунта подразделяется по характеру расположения армирующих элементов, по материалу элементов, по способу производства работ (рисунок 1.1):



Рисунок 1.1 – Схема состава армирования грунтов

Вертикальное армирование применяют для улучшения свойств естественных или устройства искусственных оснований, повышения устойчивости склонов и откосов, снижения деформаций окружающей застройки и подземных коммуникаций при проведении строительных работ в

непосредственной близости от них. В качестве армирующих элементов допускается использовать железобетонные, бетонные, грунтоцементные (устраиваемые путем цементации, струйным или буросмесительным способом (глубинным перемешиванием), металлические элементы, а также столбы из песчаных грунтов или щебня.

Горизонтальное армирование применяют для исключения выпора слабых грунтов из-под сооружения или искусственной насыпи, повышения устойчивости склонов и откосов, снижения активного и повышения пассивного давления грунта на подпорные стены и сооружения. Такое армирование выполняют с применением металлических нагелей, геотекстиля, полимерных пленок и волокон, кордовой ткани.

Наклонное армирование в одном или нескольких направлениях применяют для повышения устойчивости склонов и откосов; повышения несущей способности и деформационных характеристик основания, как при новом строительстве, так и при усилении оснований существующих сооружений; снижения активного и повышения пассивного давления грунта на подпорные стены и сооружения. Наклонное армирование выполняют путем устройства элементов с применением свай, струйным и буросмесительным способом, или путем устройства грунтовых нагелей.

При армировании в двух и более направлениях или сплошным способом называется ячеистыми структурами и объёмно-дисперсными.

Вертикальное армирование грунтовых массивов можно выполнить следующими способами производства:

– задавливание, забивка, погружение/вибропогружение малосжимаемых элементов (железобетонные сваи);

– способ погружения буронабивных свай (БНС) с помощью непрерывного полого шнека (*Continuous Flight Auger – CFA*);

– формирование армоэлементов из инертных материалов способом виброуплотнения;

– изготовление буронабивных и буроинъекционных свай (БИС);

- набивные сваи в раскатанных скважинах (раскатка скважин);
- инъекционные методы (напорное инъецирование);
- струйная цементация (*Jet-Grouting*);
- буросмесительный способ (*Deep Soil Mixing – DSM*).

При погружении сваи происходит вытеснение грунта, что приводит к формированию уплотненной зоны вокруг нее. Негативным моментом при погружении свай забивкой или вибропогружением возникает динамическое воздействие, что однозначно негативно влияет и ограничивает применение городской застройке в стеснённых условиях.

Буронабивные и буроинъекционные сваи создаются непосредственно в грунте. Основным материалом данных свай является бетон. Благодаря этому в грунтовом массиве создаются малосжимаемые армирующие элементы, обеспечивающие повышение деформационных характеристик основания. Данный способ имеет низкую производительность при формировании свай.

Устройство вертикальных свай из инертных материалов (например, щебня, строительного песка, песчано-гравийной смеси и т.п.) происходит при помощи вибрирующего инструмента. Скважина при формировании формируется с использованием вибрирующего инструмента под воздействием вибрации и сжатого воздуха. Инертный материал подается сверху по подводящей трубе, расположенной параллельно вибрирующему инструменту, при помощи сжатого воздуха [12, 140]. Недостатком применения данного типа армирования при использовании в слабых грунтах является потеря формы стенок скважины из-за низкого бокового сопротивления скважины [127].

Способ раскатки скважин в современном строительстве применяется довольно часто. На основании нормативных документов [114], данный способ классифицируется как глубинный способ уплотнения грунтов. Благодаря специальному устройству (раскатчику) происходит формирование скважины при её проходке по глубине. Особенностью данного способа отсутствие выноса грунта на поверхность при устройстве скважин [81, 107].

Способ усиления грунтов напорной инъекцией позволяет выполнять усиление грунтов основания зданий и сооружений путем образования локально направленных гидроразрывов (вертикальных, горизонтальных, наклонных), заполняемых твердеющим раствором [27, 69, 76, 79, 81, 95, 116]. Его достоинством является то, что данный способ можно применять как для нового строительства, так и для существующих зданий и сооружений при реконструкции.

За последние 10–15 лет большое развитие получили буросмесительный и струйный (*Jet-Grouting*) способы, они показывают высокую эффективность на строительных площадках с глинистыми обводненными грунтами. Эти способы в целом схожи и позволяют создавать в грунтах грунтоцементные элементы большого диаметра (от 0,5 до 1,5 м и более) [111]. Для создания армированных оснований с использованием указанных способов в основном используется идентичные ключевые компоненты – вода, цемент и местный грунт. Различия заключаются непосредственно в способах изготовления армирующих грунтоцементных элементов. У каждого из этих способов есть свои преимущества и недостатки.

Струйный способ обладает высокой производительностью и возможностью получения требуемых параметров армированного грунтового массива. Имеет возможность устройства усиленного основания не только для нового строительства, но и под существующие здания и сооружения.

К минусам струйного способа стоит отнести обязательную проверку проектных параметров на этапе опытных работ, что влечет за собой дополнительные расходы и увеличение сроков проектирования и строительно-монтажных работ. Также стоит отметить значительный расход раствора при изготовлении грунтоцементных элементов, что является особенностью данного способа усиления.

Струйный способ заключается в использовании энергии высоконапорной струи цементного раствора или воды с воздушным потоком для разрушения и одновременного перемешивания грунта с цементным раствором. После твердения смеси образуется грунтоцементный элемент, обладающий повышенными (в

сравнении с исходным грунтом) прочностными и деформационными характеристиками.

Бурсмесительный способ преобразования грунта заключается в механическом перемешивании грунта с цементным раствором. Перемешивание грунта осуществляется при помощи лопастей (ножей) на буровом инструменте (смесителе). После твердения смеси образуется грунтоцементный элемент. Бурсмесительный способ преобразования грунта позволяет создавать грунтоцементные элементами с выдержанными геометрическими параметрами.

Эти способы получили широкое распространение за рубежом и в нашей стране [56, 111]. В настоящее время накоплен опыт, разработаны отдельные профильные научно-технические документы, затрагивающие вопросы армирования грунтовых массивов грунтоцементными элементами, опубликовано множество соответствующих научных трудов, подробный анализ которых позволяет выделить имеющиеся вопросы к способам изготовления грунтоцементных элементов, соответствующим методикам расчета, проектирования и контроля качества усиления [41, 65, 67, 75, 77, 85, 86].

Большой интерес представляет метод усиления грунтов армированием вертикальными грунтоцементными элементами, как альтернативный вариант свайного фундамента. Данный метод усиления позволяет создавать в основании зданий геотехнические массивы с относительно высокими прочностными и деформационными показателями, и, в зависимости от конкретных грунтовых условий и конструктивных особенностей объектов строительства и способов устройства армирующих элементов, позволяет снизить расходы на устройство фундаментов сооружений [74, 56].

1.2 Армирование грунтов основания вертикальными грунтоцементными элементами, изготовленными буросмесительным способом

Буросмесительный способ был предложен ещё в 1932 г. советским инженером Т.А. Молчановым [5]. Первое применение нашел в 1949 г. профессором А.В. Силенко. В СССР большой вклад в развитие технологии перемешивания грунтов внесли В.М. Безрук, Э.В. Мокс, В.Е. Соколович, А.Н. Токин, А.В. Шапошников и др. В нашей стране в советские годы этот способ преобразования грунтового основания не получил широкого распространения в связи с невысоким уровнем оборудования.

Зарубежные компании довели оборудование для закрепления грунтов до практического применения, поэтому за рубежом он использовался и используется довольно успешно. В связи с этим, основные научные исследования, связанные с изучением буросмесительного способа в различных инженерно-геологических условиях, производились зарубежными учёными. Исходя из этого, считается, что буросмесительный способ был изначально разработан в США в 1954 году. Однако, современные техники в основном отражают инновации, предложенные в Японии и скандинавских странах за последние 40 лет. Концепция глубинного перемешивания впервые была обнародована в технической публикации PHRI в 1968 году [157]. Terashi, Tanaka и Kitazume расширили исследование, чтобы изучить работу армированного грунтового массива грунтоцементными элементами. Японское геотехническое общество опубликовало, имеющиеся достижения в этой области исследований, в ежемесячном журнале общества (Noto et al., 1983; Terashi, 1983 [170]).

До 1996 года в международной технической литературе появилось значительное количество работ, посвященных разработке и применению буросмесительного способа. Однако большинство из них было опубликовано на японском и шведском языках.

Грунтоцементные элементы выполняют различные функции, включая закрепление грунтов для улучшения их физико-механических характеристик, использование в составе армированных оснований для обеспечения необходимых прочностных и деформационных характеристик, а также создание временных ограждающих конструкций и анкерных устройств.

Бурсмесительный способ, применяемый для усиления грунтового массива, приобрел широкое распространение в мировой практике для формирования разнообразных грунтоцементных элементов. Этот метод является эффективным решением для укрепления различных типов слабых грунтов, обладая при этом экономической выгодой. При сравнении результатов применения данного метода с другими обнаруживается его применимость к усилению разнообразных слабых грунтов.

Бурсмесительный способ преобразования грунта включает в себя создание грунтоцементных элементов, привязанных к вяжущему, с предварительно заданными формой, диаметром и длиной, а также формирование элементов с определенными деформационными и прочностными характеристиками. Основная идея заключается в том, что вяжущее вводится в грунт одновременно с вращением и опусканием рабочего органа (смесителя) (рисунок 1.2).

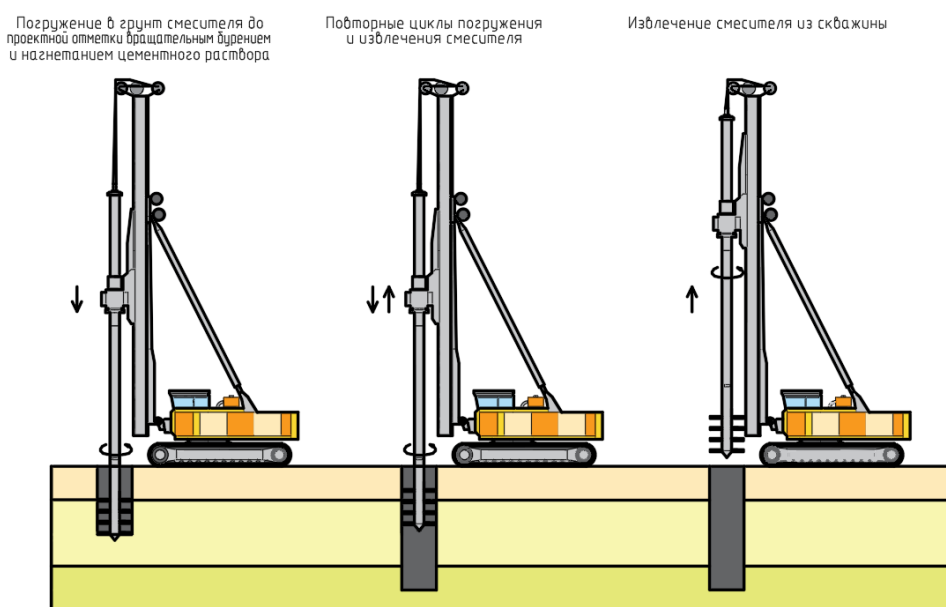


Рисунок 1.2 – Схема устройства грунтоцементного элемента бурсмесительным способом

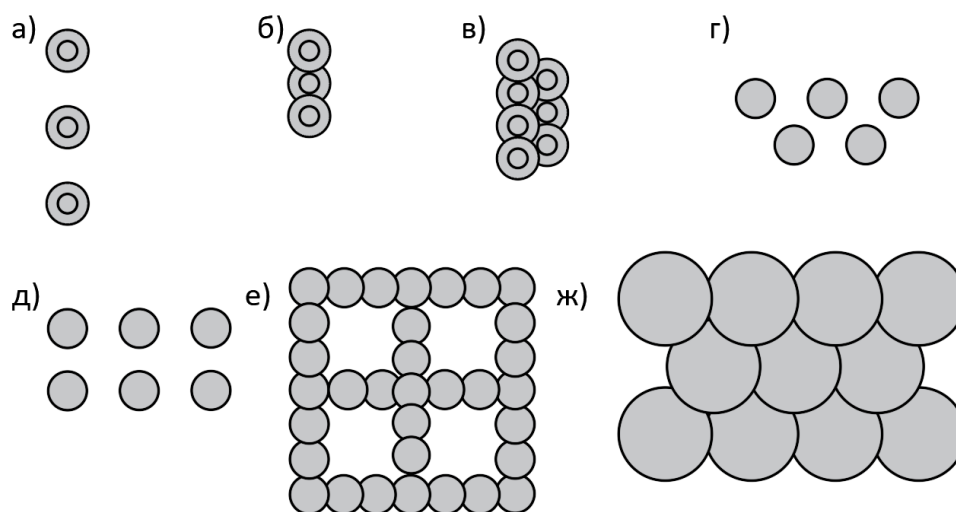
При этом контролируются различные параметры, такие как водоцементное отношение, давление и скорость ввода вяжущего, скорость вращения смесителя, количество подъемов и опусканий, крутящий момент, сила вдавливания, и фактический расход раствора.

Согласно п. 4.5.1 СП 291.1325800 сущность усиления грунтов буросмесительным способом состоит в измельчении грунта без извлечения его на поверхность в процессе погружения навесного оборудования буровой и смешивании грунта с раствором или сухим материалом (цементом), подаваемыми через полые штанги, соединенные на конце со смесителем. При формировании образовывается грунтоцементный элемент заданных размеров по глубине и диаметру. Физико-механические характеристики грунтоцементных элементов зависят от расхода цемента и вида грунта. Перемешивание грунтов осуществляется при помощи лопастей на буровом инструменте (смесителе).

Важным аспектом при формировании грунтоцементного элемента является обеспечение равномерного распределения, вяжущего по всей длине элемента в процессе выполнения работ. Буросмесительный способ усиления грунтового массива условно можно разделить на «влажный» и «сухой», в зависимости от грунтовых условий, а именно от влажности грунтов и их способность реагировать с вяжущим.

Одним из критериев для эффективного усиления грунтового основания является правильный выбор варианта размещения грунтоцементных элементов, который может включать различные схемы, такие как одиночное расположение, треугольную или квадратную сетку, ячеистую структуру или сплошной массив.

Варианты размещения грунтоцементных элементов приведены на рисунке 1.3.



а) одиночно; б) в один ряд; в) в два ряда; г) по треугольной сетке; д) по квадратной сетке; е) в виде ячеистой структуры; ж) сплошным массивом

Рисунок 1.3 – Варианты размещения грунтоцементных элементов

Вопрос эффективности применения бурсмесительного способа в конкретном проекте зависит от различных факторов, включая практические аспекты проекта (стоимость, график, производительность, геотехнические параметры, логистика, доступность и экология) и традиционные соображения (региональные и исторические практики, а также влияние местных подрядчиков, консультантов и владельцев).

Важно отметить, что бурсмесительный способ, как и любой другой способ армирования грунтового массива, не является универсальным решением для всех проблем, связанных с усилением слабых грунтов. Тем не менее, в определенных обстоятельствах он может представлять собой более практичный, экономичный и быстрый вариант по сравнению с конкурирующими способами (технологиями). Возможные альтернативные способы перечислены в п. 1.1.

Данный способ может оказаться предпочтительным в следующих случаях:

- Глинистый водонасыщенный грунт без крупных включений, таких как валуны или глыбы;
- Необходимая глубина усиления менее 40 метров;
- Возможность обеспечения достаточного количества связующего материала (цемента);

- Требование по вибрационному воздействию от применяемого оборудования на окружающую застройку, а также ограниченность используемой территории для строительства;
- Большие объемы усиления грунтового массива;
- Сроки производства работ по устройству усиленного основания данным способом.

1.3 Современные методы расчета армированных грунтовых массивов грунтоцементными элементами

Основные требования к проектированию, реализации и контролю усиления грунтов армированием грунтоцементными элементами отражены в нормативных документах СП 22.13330 [112], СП 291.1325800 [112115], СП 45.13330 [116].

Существующая методика назначения проектных параметров грунтоцементных элементов обладает определенными обобщениями и допущениями. К примеру, назначение параметров прочности и деформируемости грунтоцемента или диаметра элементов назначается по обобщенным номограммам с разделением только по виду грунта и не учитывает, например, гранулометрический состав грунта, его консистенцию, происхождение, содержание органических включений и т.п. Очевидно, что разное содержание пылеватых и глинистых частиц грунта влияет на прочность грунтоцемента, а консистенция и структурная прочность грунта влияет на диаметр грунтоцементных элементов или расход цемента для Струйной цементации, о чем свидетельствуют исследования, проводимые как в нашей стране, так и за рубежом [77, 85]. В результате чего, для совершенствования методик назначения параметров прочности и деформативности грунтоцемента необходимо проведение обширных лабораторных и полевых исследований. Также, в нормах отсутствуют, необходимые указания по циклам перемешивания грунта смесителем для обеспечения необходимой сплошности закрепленного массива

для буросмесительного способа. Возникает необходимость обязательных предпроектных опытных работ с проверкой заложенных в проекте решений и возможной их корректировкой, а также уточнением технологических параметров.

Анализ отечественной нормативно-технической документации позволяет сделать вывод, что для армированных грунтоцементными элементами массивов, являющихся основанием для фундаментов зданий и сооружений, отсутствует четкий подход к расчетам по предельным состояниям. В СП 22.13330 [112] присутствует раздел, касающийся расчетов армированных грунтов. Для рассматриваемого варианта армирования в этом разделе СП расчеты выполняются по принципам естественных грунтовых оснований – как для сплошной среды с интегральными значениями модуля деформаций и расчетного сопротивления. Расчеты осадок при этом допускается проводить методом послойного суммирования с использованием расчетной схемы в виде линейно деформируемого полупространства. При этом, очевидно, что для армированного массива, допустимо применение положений СП 24.13330 [113] по расчету осадок с рассмотрением армированного массива, как условного фундамента, или использовать метод ячейки. Несущую способность грунтоцементных элементов по грунту рекомендуется оценивать, как для свай.

Еще одним вариантом расчетов является моделирование изменения напряженно-деформированного состояния армированного массива численными методами с применением специализированных геотехнических комплексов. Высокая точность расчетов с использованием метода конечных элементов (МКЭ), требует введения большего количества исходных данных, таких как модель работы грунта и материала грунтоцемента, контактная модель, ограничение расчетной области, характеристики грунта и грунтоцемента и т.п. Набор вводимых исходных данных напрямую влияет на конечный результат расчетов, особенно при определении осадок здания или сооружения. Вызывает вопросы и корректная оценка нагрузки на грунтоцементный элемент, необходимую для проверки прочности армирующих элементов и расчетов несущей способности по грунту. В сравнении со свайным типом основания, армирующие элементы

конструктивно не сопряжены с фундаментом здания, и, как правило, между ним и таким основанием предусматривают буферный слой – песчаную или щебеночную подушку. В результате чего происходит перераспределение напряжений между грунтом и грунтоцементными элементами.

Все они будут показывать различные результаты прогноза деформаций усиленного основания. Проектирование по наихудшему результату прогноза может привести к удорожанию строительства, проектирование по наилучшему несет в себе большие риски. В результате чего, актуально проведение соответствующих исследований по разработке единого подхода к расчетам армированных оснований.

1.3.1 Натурное моделирование

В настоящее время этап проектирования и приемки, армированного грунтоцементными элементами грунтового массива, обязательно должен сопровождаться проведением полевых опытных работ, при которых уточняются или проверяются прочностные и деформационные характеристики армированных массивов. В связи с чем, актуальной задачей является обеспечение необходимой достоверности определения характеристик прочности и деформируемости армированных массивов.

При проектировании армирования грунтов с целью уменьшения сжимаемости основания для зданий и сооружений на фундаментах мелкого заложения основной целью усиления является повышение модуля деформации массива. В соответствии с СП 22.13330 значение эффективного (интегрального) модуля деформации армированного грунтового массива ($E_{\text{масс}}$), в направлении, параллельном направлению армирования, для предварительного расчёта по деформациям допускается вычислять по формуле:

$$E_{\text{масс}} = \alpha E_{\text{стб}} + (1 - \alpha) E_{\text{гр}}, \quad (1)$$

где $\alpha = V_{stb}/V_{гр}$ – коэффициент, характеризующий объемную долю армирующих элементов (коэффициент армирования);

$V_{гр}$ – объем усиливаемого армированием грунта;

V_{stb} – объем армирующих элементов;

$E_{stb}, E_{гр}$ – расчетные значения модуля деформации армирующих элементов и модуля деформации грунта.

Ключевым показателем в данной формуле является коэффициент армирования α .

Вычисленное по формуле (1) значение модуля деформации должно уточняться и проверяться натурными испытаниями. Анализ требований и рекомендаций действующих нормативных документов по проектированию армирования грунтов позволяет выделить следующие методы оценки качества и определения прочностных и деформационных характеристик усиленных грунтовых массивов:

- 1) метод контрольного бурения армирующих элементов с отбором кернов (образцов) с последующим лабораторным испытанием;
- 2) метод испытаний армирующих элементов статической нагрузкой;
- 3) метод испытания армированных массивов статической нагрузкой с помощью штампов (штамповые испытания).

Также, в ряде случаев, нормативными документами предусматривается применение геофизических методов контроля. Однако, поскольку такие методы позволяют лишь качественно оценить параметры усиления без возможности количественной оценки характеристик прочности и деформируемости, то они в настоящем исследовании не рассматриваются.

Метод контрольного бурения применим в случаях, когда армирующие элементы выполнены из бетона, грунтоцемента или иного подобного материала. При этом осуществляют колонковое бурение со сплошным отбором керна с определением физико-механических характеристик материала армирующих элементов (плотность, прочность на сжатие, модуль деформации/упругости и т.д.). Метод испытаний армирующих элементов статической нагрузкой

фактически является аналогом испытаний грунтов сваями. В результате таких испытаний устанавливается несущая способность армирующего элемента по грунту. Таким образом, данные методы оценки качества позволяют определить прочностные и деформационные характеристики самих армирующих элементов. Данный подход к оценке качества армирования грунтовых массивов исследован в работах [44, 82, 108, 109, 120, 160] и показывает свою эффективность и востребованность. Однако, он позволяет выявить достижение требуемых параметров только части усиленного массива, при этом не рассматривается проверка совместной работы армирующего элемента и окружающего грунта в массиве. Таким образом, для оценки прочностных и деформационных характеристик армированного массива (интегральных значений) потребуется либо выполнять расчет соответствующих средневзвешенных значений с использованием формулы (1), что несет в себе ряд погрешностей и допущений, либо выполнять дополнительные испытания, но уже для всего массива.

В этой связи большой интерес представляют штамповые испытания, которые считаются наиболее достоверным способом определения деформационных характеристик грунтов. Для армированного грунтового массива штамповые испытания позволяют определить интегральное значение модуля деформации без промежуточных расчетов, с учетом совместной работы армирующих элементов и окружающего их грунта. Однако широкое применение данного способа затруднено из-за отсутствующей единой утвержденной методики проведения штамповых испытаний для армированных массивов.

В настоящее время модуль деформации грунта с использованием штампов определяется согласно методике ГОСТ 20276.1. При штамповом испытании регламентированная площадь штампа составляет от 600 до 5000 см² или с соответствующими значениями диаметров от 27,7 до 79,8 см. Применение стандартной методики испытаний и стандартных размеров штампов для армированных массивов в ряде случаев может привести к существенному завышению или занижению полученных деформационных характеристик, поскольку армирующие элементы могут иметь диаметры от нескольких

сантиметров до полутора-двух метров. Для испытания грунтовых массивов, усиленных армирующими элементами большого диаметра возможно использование штампов индивидуального изготовления, однако это повлечет за собой необходимость устройства более масштабной нагрузочной системы, возникнут вопросы с назначением размера такого штампа и с интерпретацией результатов испытания ввиду необходимости учета соотношения площадей сечения армирующего элемента, самого штампа и грунта, попадающего в зону влияния штампа. Известны исследования, в которых данная проблема частично решена применением штампов больших размеров, например для определения модуля деформации основания, усиленного вертикальными щебенистыми сваями, применены штампы площадью 7854 см² и 11310 см² [9, 120]. Тем не менее, данные примеры отражают частные случаи нестандартных испытаний, и в настоящее время отсутствует методика проведения и обработки результатов штамповых испытаний, обеспечивающая необходимую достоверность в определении характеристик армированных массивов.

Таким образом, для обеспечения достоверности определения характеристик прочности и деформируемости армированных массивов необходимо разработать критерии назначения размера штампа и методику учета армирующего эффекта испытываемого массива.

1.3.2 Численное моделирование

В геотехнических расчетах для анализа напряжённо-деформированного состояния оснований активно применяется МКЭ. Среди современных программных комплексов, специализирующихся на геотехнических расчетах МКЭ, наибольшее распространение получили *Plaxis* и *MIDAS*, различающиеся между собой интерфейсами и библиотеками структурных элементов.

Главной целью моделирования является изучение закономерностей изменения характеристик армированных грунтовых массивов грунтоцементными

элементами, включая их геометрические параметры, прочность и деформативность, что требует трёхмерной постановки задачи. Для таких задач в исследовании выбран *Midas GTS NX*, обладающий специализированными инструментами для трёхмерного моделирования, такими как:

- расширенные библиотеки интерфейса для грунтоцементных элементов;
- модели работы грунтов и грунтоцементных элементов с учетом их нелинейности;
- возможности визуализации сложных геометрических конфигураций грунтовых массивов.

При создании расчетной модели грунтового массива, армированного грунтоцементными элементами, необходимо учитывать геометрические параметры, прочностные и деформационные характеристики этих элементов. Несмотря на то, что при буросмесительном способе обеспечивается достижение предсказуемого диаметра, следует понимать, что в действительности он имеет не идеально ровную боковую поверхность, которая влияет на напряженно-деформированное состояние при работе на контакте грунтоцементного элемента и окружающего грунта. Прочностные и деформационные характеристики грунтоцементного элемента зависят от инженерно-геологических характеристик. Поскольку по глубине грунты обладают различными характеристиками, то и при глубинном перемешивании с одинаковым расходом вяжущего, грунтоцементный элемент по итогу имеет различные прочностные и деформационные характеристики.

Для создания трёхмерной модели армированного грунтового массива грунтоцементными элементами требуется указывать конкретные геометрические параметры. При буросмесительном способе обеспечивается предсказуемый диаметр грунтоцементного элемента. Однако, по глубине в зависимости от вида грунта он может немного варьироваться и поверхность на границе контакта грунтоцементного элемента и окружающего грунта не идеально ровная, а шероховатая [8]. Тем самым корректность результатов расчетов зависит от учета особенностей работы данных армированных грунтовых массивов. Учитывая

данные особенности, требуется использовать экспериментальные данные при численном моделировании.

1.4 Цель и задачи исследования

Проведенный анализ методов усиления грунтовых массивов показывает, что метод устройства оснований усиленных грунтовых массивов армированием грунтоцементными элементами, изготовленными буросмесительным способом, перспективен, актуален и обладает следующими преимуществами:

- отсутствие вибрационного воздействия от применяемого оборудования на окружающую застройку, а также ограниченность используемой территории для строительства;

- короткие сроки строительства на соответствующем этапе, благодаря использованию простых технологических процессов;

- использование ранее не задействованных для строительства земельных участков, где основание сложено глинистыми водонасыщенными грунтами.

- сравнительно низкая стоимость по сравнению с другими способами.

Однако основным препятствием для широкого внедрения данного способа является наличие определенных (нерешенных) вопросов, которые требуют дальнейшего исследования:

- проектирование усиления оснований армированием вертикальными грунтоцементными элементами зачастую осуществляется с использованием научных разработок и собственного опыта исполнения работ;

- в ряде случаев реальный опыт реализации усиления может противоречить положениям нормативных документов;

- отсутствует единый подход к расчетам армированных вертикальными грунтоцементными элементами оснований.

Эти вопросы могут оказывать существенное влияние на эффективность усиления и приводить к удорожанию строящихся зданий и сооружений. Поиск

ответов на данные вопросы имеет важное значение для развития сферы строительства зданий и сооружений, для повышения качества и эффективности устройства усиленных оснований.

Исходя из этого, целью диссертационной работы является совершенствование методики проектирования усиления глинистых оснований грунтоцементными элементами, выполненными буросмесительным способом. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующего подхода к проектированию усиления оснований грунтоцементными элементами и опыта реализации усиления с выявлением особенностей работы усиленного основания.

2. Разработать численную модель грунтового основания, армированного грунтоцементными элементами в грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е.

3. Провести экспериментальные исследования работы усиленного армированием грунтоцементными элементами грунтового массива для валидации разработанной численной модели.

4. Установить закономерности изменения сжимаемости, усиленного армированием грунтоцементными элементами грунтового массива при варьировании параметров армирования и грунтовых условий.

5. Разработать алгоритм проектирования усиления основания строящихся зданий и сооружений армированием грунтоцементными элементами, и способ контроля деформационных характеристик таких армированных массивов.

РАЗДЕЛ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ, АРМИРОВАННЫХ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ БУРОСМЕСИТЕЛЬНЫМ СПОСОБОМ

В первой разделе проведен анализ наиболее широко используемых способов формирования искусственных оснований, а также рассмотрены области их применения. В некоторых случаях, с учетом экономической целесообразности и прочих соображений, более предпочтительным оказывается использование усиленных грунтовых массивов армированием ГЦЭ, изготовленными буросмесительным способом.

Основным средством контроля технического состояния возводимого здания или сооружения на усиленном основании для обеспечения его безопасности является геотехнический мониторинг. Он включает в себя как прямые испытания грунтового массива и геодезические наблюдения за развитием осадок зданий и сооружений, так и геотехнический прогноз изменения напряженно-деформированного состояния (далее НДС) основания на всех этапах жизненного цикла рассматриваемого объекта. Выводы о соответствии фактического и проектного НДС грунтового основания формируются уже по результатам совместного анализа данных фактических наблюдений, исследований и результатов проектирования (геотехнического прогноза) [19]. В случае несоответствия фактического и прогнозного НДС в большую сторону на этапе строительства объекта, важно для обеспечения безопасности объекта своевременно обнаружить тенденции к наступлению недопустимых ситуаций, разработать, и реализовать корректирующие мероприятия, что потребует дополнительные расходов. При этом, в случае несоответствия фактического и прогнозного НДС с чрезмерным запасом прочности, возникает другая проблема. Встает вопрос о целесообразности применимого технического решения на этапе проектирования с чрезмерным запасом прочности, что негативно сказывается на общих затратах на строительство. При этом, имеющийся опыт показывает, что обе ситуации периодически возникают и в обоих случаях имеют негативные

последствия [78, 85]. Обе ситуации являются следствием отсутствия адекватной модели.

Таким образом, для получения достоверных данных геотехнического прогноза, который лежит в основе проектирования и контроля за строительством зданий и сооружений, требуется разработать адекватную численную модель основания здания, отражающую внутренние процессы его работы. С использованием адекватной численной модели возможно уточнение закономерностей изменения сжимаемости усиленного массива, принципов распределения нагрузок, и подхода к расчету и проектированию такого типа усиления в целом.

Для решения задач по разработке и валидации численной модели грунтового основания, армированного вертикальными грунтоцементными элементами необходимо решить следующие вопросы:

1. Провести анализ и систематизацию данных геотехнического мониторинга за строительством зданий на усиленных основаниях с целью выявления особенностей работы усиленного вертикальными грунтоцементными элементами основания.

2. Описать основные компоненты численной модели усиленного вертикальными грунтоцементными элементами основания, учитывающие особенности работы такого типа основания.

3. Валидировать предлагаемую численную модель путем сравнения результатов моделирования и натурных экспериментов на опытных участках.

Решение указанных вопросов позволит разработать адекватную численную модель для дальнейших исследований по качественной и количественной картине оценки работы усиленного основания при варьировании параметров усиления и грунтовых условий для уточнения закономерностей изменения сжимаемости и принципов распределения нагрузок. И в последствие, совершенствовать подход к проектированию и контролю усиленного вертикальными грунтоцементными элементами основания.

2.1 Анализ и систематизация данных геотехнического мониторинга за строительством зданий на армированных грунтоцементными элементами основаниях

Для формирования базы данных и общего представления о работе усиленного грунтового массива, собраны и систематизированы данные осадок объектов (многоэтажных зданий), где запроектировано и реализовано усиление грунтового массива методом вертикального армирования. Значения осадок получены в результате мониторинга, выполненного в строительный период.

Данные геодезических наблюдений в период строительства наглядно показывают развитие осадок армированного грунтового массива. Эти данные используют для анализа, сопоставления с прогнозируемыми значениями и прогнозом на дальнейшее развитии осадок [165]. Анализ результатов такого наблюдения позволяет оценить правильность выбранного проектного решения и определить необходимость дополнительных мероприятий [78]. Анализ этих данных позволяет оперативно принимать меры по предотвращению чрезвычайных ситуаций.

На всех объектах запроектировано вертикальное армирование грунтоцементными элементами. На примере 7-ми объектов капитального строительства, имеющих схожие между собой грунтовые условия и однотипные конструктивные решения, были выполнены анализ и систематизация данных. Ниже, в таблице 2.1 приведены результаты анализа: инженерно-геологических условий площадок строительства, проектных решений по усилению грунтового массива, прогнозных осадок с учетом усиления и фактических осадок по результатам мониторинга для каждого из объектов.

Таблица 2.1. Характеристики анализируемых объектов, на которых запроектировано и реализовано усиление основания

№ объекта	1	2	3	4	5	6	7
Наименование объекта	Жилое здание г. Барнаул	Жилое здание г. Барнаул	Жилое здание г. Барнаул	Жилое здание г. Новосибирск	Административное здание г. Новосибирск	Административное здание г. Новосибирск	Жилое здание пгт. Кольцово
Этажность	10	24	10	12	3	17	10
Тип фундамента	плитный, толщиной 0,8 м	плитный, толщиной 1,6 м	плитный, толщиной 0,8 м	плитный, толщиной 1,0 м	плитный, толщиной 1,0 м	плитный, толщиной 1,2 м	плитный, толщиной 0,8 м
Размер здания, м	15,5x44,3	27,1x31,4	17,2x84,3	111,9x18,0	105,7x54,9	76,6x40,1	28.5x63,5
Давление на основание, кПа	400	650	350	250	200	300	350
Грунтовые условия	Супеси пылеватые с прослоями суглинка и суглинка пылеватый твёрдой консистенции	Супеси пылеватые с прослоями суглинка твёрдой консистенции	Супеси пылеватые твёрдой консистенции	Супеси песчанистые твёрдой консистенции и суглинка пылеватые легкие и тяжелые мягкопластичной консистенции с прослоями текучепластичной	Супеси пластичной и текучей консистенции и суглинка легкие и тяжелые пылеватые текучепластичной и мягкопластичной консистенции	Суглинки легкие и тяжелые пылеватые от тугопластичной до текучей консистенции	Супеси пластичной и текучей консистенции пылеватые и песчанистые
Средневзвешенный модуль деформации усиливаемых грунтов, МПа	$\frac{15,4}{7,8}$	$\frac{15,4}{8,3}$	$\frac{13,1}{8,1}$	$\frac{11,6}{12,0}$	7,9	7,5	7,6
Модуль деформации несущих грунтов, МПа	7,7	6,6	13,0	11,2	8,0	37,6	29,4
Глубина сжимаемой толщи (усиливаемой), м	6,0	8,2	8,5	15,0	9,0	11,5	7,5
Уровень грунтовой воды от нижней отметки фундаментной плиты, м	7,5	10,0	11,5	5,0	1,0	0,5	1,0
Проектный модуль деформации усиливаемых грунтов, МПа	25,0	35,0	19,0	20,0	25,0	40,0	30,0
Расчетная (прогнозная) осадка здания, мм	112	124	89	85	122	101	117

При реализации данного способа усиления выполнены испытания по определению фактических значений деформационных характеристик усиленного грунтового массива. Параллельно выполнен геотехнический мониторинг осадки, возводимых зданий, после реализации усиления массива грунтов основания.

Для определения деформационных характеристик были выполнены испытания плоским штампом. Осадки фундаментов здания определены путем выполнения периодической геодезической съемки.

Полученные данные по результатам испытаний и мониторинга сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2. Характеристики анализируемых объектов после проведения испытаний и мониторинга

№ объекта	1	2	3	4	5	6	7
Наименование объекта	Жилое здание г. Барнаул	Жилое здание г. Барнаул	Жилое здание г. Барнаул	Жилое здание г. Новосибирск	Административное здание г. Новосибирск	Административное здание г. Новосибирск	Жилое здание г. Кольцово
Проектный модуль деформации усиливаемых грунтов, МПа	25,0	35,0	19,0	20,0	25,0	40,0	30,0
Фактический модуль деформации усиливаемых грунтов, МПа	30,1	44,1	23,6	22,0	26,0	41,4	31,8
Расчетная (прогнозная) осадка здания, мм	112	124	89	85	122	101	117
Фактическая осадка здания, мм	92	104	74	107	137	122	131

Анализ, полученных данных показал, что на 4-ех объектах, где основание сложено грунтами твердой консистенции в естественном состоянии, фактический модуль деформации грунтов превышает расчетный (прогнозный) в диапазоне от 20 до 26 %. При этом фактическая осадка, меньше расчетной (прогнозной), и варьируется от 19 до 22 % от расчетной.

На 3-ех объектах, где основание сложено грунтами пластичной и текучей консистенциями в естественном состоянии, фактический модуль деформации, превышает расчетный (прогнозный) в диапазоне от 3,5 до 10 %. При этом

фактическая осадка превышает расчетную (прогнозную) в диапазоне от 12 до 25 %.

Наблюдается закономерность в расхождении характеристик, полученных при однотипных испытаниях, от расчетных значений. В основании с грунтами твердой консистенции фактические значения модуля деформации отличаются в большую сторону, значения фактических осадок не превышают расчетные. В основании с грунтами пластичной и текучей консистенциями фактическое значение модуля деформации, тоже идёт в запас, но значения осадок превысили расчетные значения во всех 3-ех объектах.

Отчётливо видно, что, несмотря на достижения требуемого модуля деформации грунтов основания, значения осадок превысили требуемые.

Следует отметить, что модуль деформации определялся плоским штампом на поверхности. Штамп имеет зону влияния, в границах которой и определялся фактический модуль деформации. В этой же верхней зоне работа грунтов основания вокруг ГЦЭ и самого ГЦЭ говорит о том, что идёт совместная работа. Оценить модуль деформации всего усиленного грунтового массива затруднительно, но возможно. Получается, что необходимо уточнить работу ГЦЭ и массива грунта по глубине в зоне усиления. Анализируя реальные объекты, наглядно видны расхождения значения осадок фактических от расчетных. И в большей степени это наблюдается в грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е. ($I_L > 0,5$ д.е.). Такой результат может быть в случае, проскальзывания грунтоцементного элемента под нагрузкой в окружающем его массиве грунта ввиду повышенных деформационных характеристик элемента.

Анализ полученных данных позволяет сформулировать гипотезу: **с увеличением модуля деформации армирующих грунтоцементных элементов, расположенных в глинистых грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е., повышается доля нагрузок на нижележащие грунтовые слои и увеличивается сжимаемая толща.** Согласно сформулированной гипотезе,

армирующие элементы с более высоким модулем деформации (в сравнении с модулем деформации окружающего грунта) за счет своей меньшей податливости могут продавливаться в усиливаемом массиве, за счет чего происходит передача нагрузки на подстилающий грунт. Продавливание может осуществляться только за счет сдвиговой осадки армирующего элемента при проскальзывании по его боковой поверхности по грунту. Следовательно, чем выше консистенция глинистых грунтов, тем ниже сцепление и тем больше проскальзывание и продавливание грунтоцементных элементов в массиве.

Доказательство и детальное изучение сформулированной гипотезы позволит выделить критерии назначения расчетной схемы армированного основания, наиболее достоверно учитывающую совместную работу грунтоцементных элементов и окружающего грунта и позволяющую с большей точностью спрогнозировать осадку сооружения на усиленном основании.

Данный вопрос может быть решен применением численного моделирования, которое позволит создать численную модель грунтового основания, включающего армированный массив и грунтовую среду. Моделирование нагружения армированного массива с варьированием параметров сжимаемости, как грунтовой среды, так и самих армирующих элементов, позволит качественно и количественно оценить изменение их НДС. При этом отдельным вопросом является доказательство адекватности разработанной численной модели, что может быть выполнено путем ее валидации натурным экспериментом.

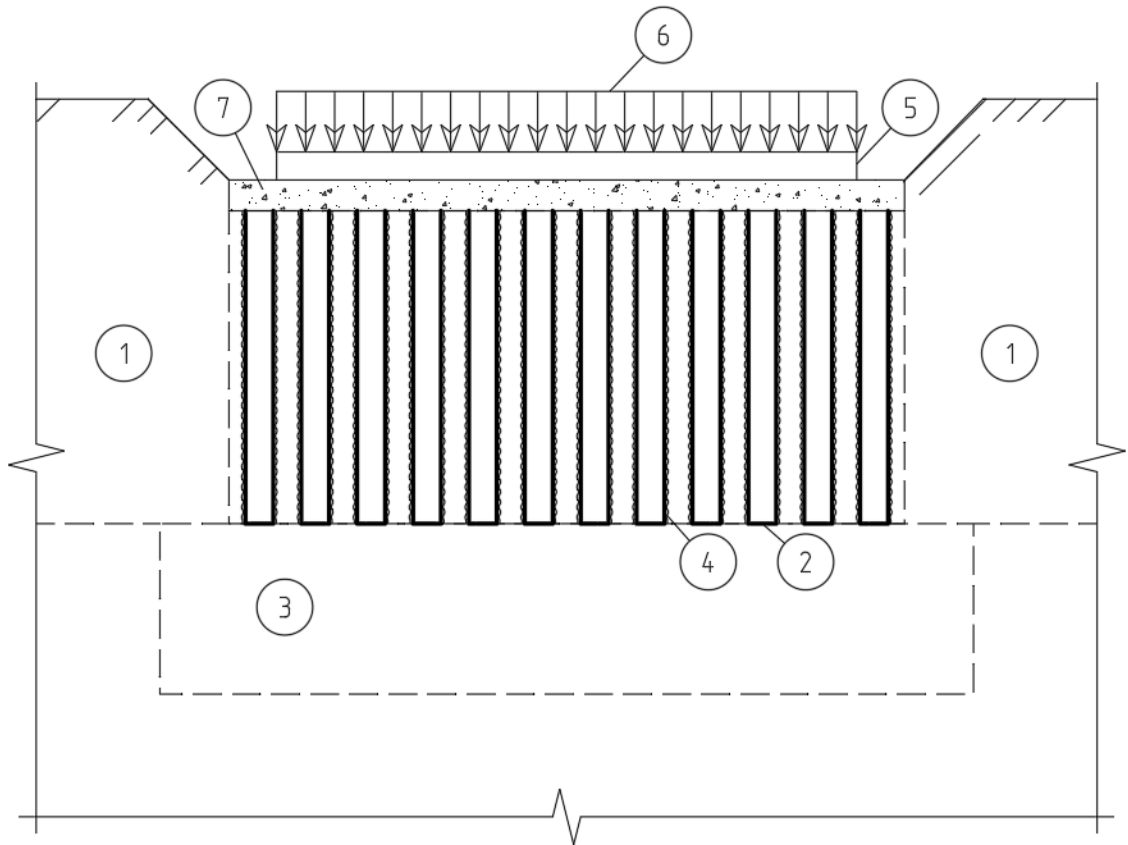
2.2 Численная модель грунтового основания, армированного вертикальными грунтоцементными элементами

Разработка адекватной численной модели армированного грунтового основания, является важной задачей. Численное моделирование позволит существенным образом снизить трудозатраты на исследование НДС армированного массива, позволяющее совершенствовать существующий подход к проектированию и контролю оснований, армированных вертикальными грунтоцементными элементами и, как следствие, повысить эффективность рассматриваемого метода усиления.

Численная модель грунтового основания, армированного вертикальными грунтоцементными элементами, должна быть многокомпонентной и иметь достаточную детализацию, т.е. включать многослойную грунтовую среду, армирующие элементы, контактные модели, модель нагрузки, модель элемента, конструкции или сооружения в целом, передающую эту нагрузку на основания и т.п.

Обеспечение достоверности численной модели достигается путем учета геометрических параметров, физических зависимостей и законов поведения основных компонентов модели. Специализированные геотехнические программные комплексы позволяют адекватно отразить поведение основных компонентов численной модели путем назначения конкретных моделей поведения материала и грунта.

Для этого создается геометрическая модель грунтового массива, включающая в себя многослойную грунтовую среду и армирующие ГЦЭ (рисунок 2.1). Каждый элемент численной модели описывается соответствующей моделью поведения.



- 1 – Грунтовый массив за пределами зоны усиления; 2 – вертикальные грунтоцементные элементы; 3 – подстилающий грунтовый массив;
 4 – контактная модель по боковой поверхности грунтоцементных элементов;
 5 – модель конструкции фундамента передающая на усиленное основания нагрузки; 6 – модель нагрузки; 7 – распределительный слой.

Рисунок 2.1 – Модель грунтового основания, армированного вертикальными грунтоцементными элементами

Поведение грунта представлялось моделью упрочняющегося грунта (*Hardening-Soil model*). Основной особенностью данной модели является зависимость модуля деформации грунта от напряжений, а также возможность различать модуль деформации грунта при нагрузке и модуль упругости при разгрузке, что важно учитывать, например, при экскавации грунта. Поведение ГЦЭ описывается моделью Кулона-Мора. Основные компоненты численной модели приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Основные компоненты численной модели

№ п/п	Обозначение	Расшифровка обозначения
Грунтовый массив (упрочняющаяся модель Кулона-Мора):		
1	c	удельное сцепление
2	φ	угол внутреннего трения
3	ψ	угол дилатансии
Основные параметры сжимаемости грунта:		
4	E_{50}^{ref}	секущий модуль деформации в стандартных дренированных трехосных испытаниях
5	E_{oed}^{ref}	касательный модуль деформации при первичном компрессионном сжатии
6	m	показатель для зависимости уровня напряжений от модуля деформации
Дополнительные параметры:		
7	E_{ur}^{ref}	модуль деформации при разгрузке/повторном нагружении
8	p^{ref}	начальное напряжение для модулей деформации ($p^{ref} = 100$ кПа)
9	K_{0nc}	коэффициент бокового давления при нормальном уплотнении
Грунтоцементные элементы (описываются моделью Мора-Кулона)		
10	E_{stb}	модуль деформации
11	ν	коэффициент Пуассона
12	c	удельное сцепление
13	φ	угол внутреннего трения

Важным аспектом создания достоверной численной модели основания, усиленного вертикальными грунтоцементными элементами, является учет особенностей его работы. Согласно проведенного выше анализа данных геотехнического мониторинга была сформулирована гипотеза, в основе которой является возможность проскальзывания грунтоцементных элементов в массиве. Данное явление учитывается в модели путем наложения дополнительного оператора, описывающего взаимодействие боковой поверхности грунтоцементного элемента с окружающим грунтом (R_{inter}). Фактически

накладывается условие снижения сцепления грунтоцементного элемента с окружающим грунтом. Опираясь на результаты отечественных и зарубежных исследований в этом вопросе [57, 58, 88, 89, 110, 124, 125, 151, 166, 175], параметр снижения сцепления, получаемый опытным путем, может сильно отличается от значений, приведенных в нормативной документации [112]. И зависит он консистенции усиливаемого грунта, от относительной шероховатости контакта и от самого способа устройства армирующего элемента.

Описанные выше требования к компонентам численной модели и условия их формирования сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Требования к компонентам численной модели и условия их формирования

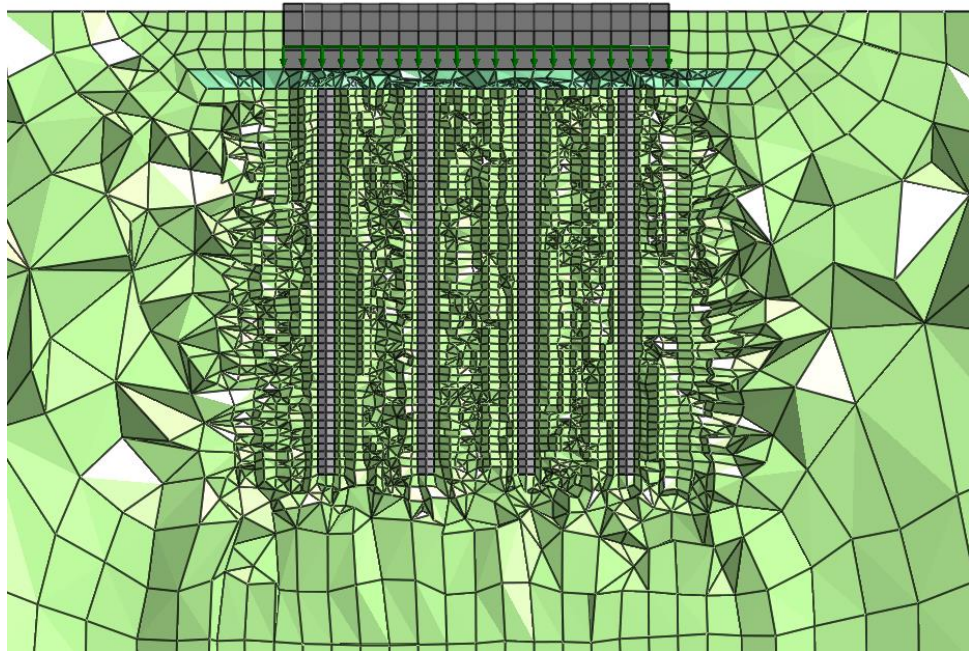
Вводные параметры	Ед. изм.	Примечание
<i>Геометрические параметры модели</i>		
Ширина расчетной области	м	Не менее глубины активной зоны, принимаемой в каждую сторону от армированного грунтового массива
Глубина расчетной области	м	До грунтовых слоев с модулем деформации не ниже 100 МПа, но не менее расчетной глубины активной зоны, или 2 глубины активной зоны
<i>Параметры нагрузки – элемент б</i>		
Нормативное значение давления под подошвой фундамента здания	кН/м (кПа)	Принимается по результатам сбора нагрузок или по результатам расчетов здания в программных комплексах
<i>Грунтовая среда – элементы 1 и 3</i>		
Толщина слоев грунтовой среды		Принимаются по результатам инженерно-геологических изысканий
Удельный вес	кН/м ³	
Коэффициент Пуассона	–	
Модуль деформации ($E_{50}^{ref}, E_{oed}^{ref}, E_{ur}^{ref}$)	МПа	
Угол внутреннего трения	градус	
Угол дилатансии	градус	
Удельное сцепление	кПа	

Окончание таблицы 2.4.

Вводные параметры	Ед. изм.	Примечание
<i>Вертикальные грунтоцементные элементы – элемент 2</i>		
Шаг расстановки грунтоцементных элементов	м	Назначается в зависимости от результатов предварительного расчета параметров прочности и сжимаемости усиленного массива для обеспечения требуемой осадки сооружения
Длина грунтоцементных элементов	м	
Диаметр грунтоцементных элементов	м	
Привязка контурного ряда грунтоцементных элементов к краю фундамента (в плане)	м	Крайний (контурный) ряд грунтоцементных элементов в плане располагается на расстоянии не менее $3d$ и не менее 1,5 м
Модуль деформации грунтоцемента (E_{stb})	МПа	Требуются дополнительные лабораторные исследования
Удельный вес грунтоцемента	кН/м ³	
Прочность на сжатие грунтоцемента (R_{stb})	МПа	
<i>Контактная модель – элемент 4</i>		
Коэффициент снижения сцепления по боковой поверхности грунтоцементного элемента (R_{inter})	-	Принимается в пределах каждого грунтового слоя в зависимости от консистенции глинистого грунта. Требуются дополнительные исследования
<i>Модель фундамента – элемент 5</i>		
Ширина фундамента сооружения	м	В зависимости от исходных данных по рассматриваемому объекту
Удельный вес	кН/м ³	
Коэффициент Пуассона	–	
Модуль упругости	МПа	
<i>Распределительный слой – элемент 7</i>		
Толщина распределительного слоя	м	Конструктивно, но не менее 0,5 м
Удельный вес	кН/м ³	Принимаются нормативные значения в зависимости от назначенного материала
Коэффициент Пуассона	–	
Модуль деформации	МПа	
Угол внутреннего трения	градус	
Угол дилатансии	градус	
Удельное сцепление	кПа	

Плоский и трехмерный вид сформированной численной модели грунтового основания, армированного вертикальными грунтоцементными элементами, приведен на рисунке 2.2.

а)



б)

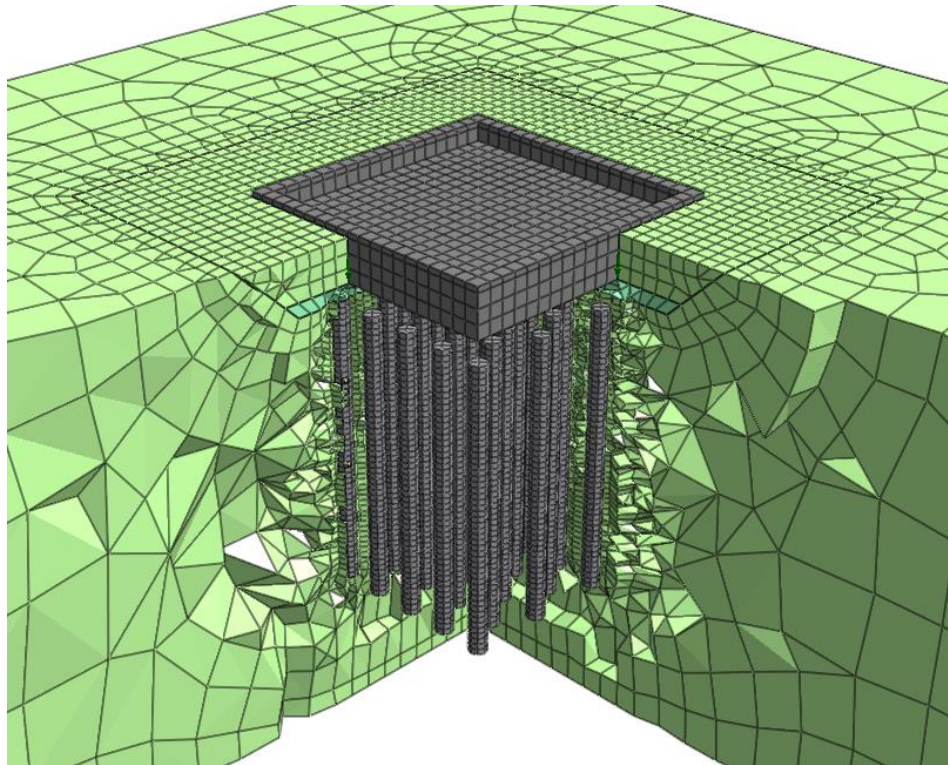


Рисунок 2.2 – Общий вид численной модели грунтового основания, армированного вертикальными грунтоцементными элементами: а – плоский; б – трехмерный

Работа по исследованию НДС усиленного основания при варьировании параметров усиления и грунтовых условий существенным образом упрощается за счет возможности численного моделирования и использованием разработанной численной модели. В этом случае исключается необходимость проведения масштабных трудоемких и затратных полевых испытаний.

Таким образом, важным вопросом является обеспечение достоверности численного моделирования, поскольку результатом этих исследований являются закономерности распределения нагрузок в усиленном массиве, закономерности его сжимаемости, особенности его взаимодействия с окружающей грунтовой средой и т.п.

Наиболее объективным способом подтверждения достоверности численной модели является ее валидация, для чего на опытной площадке необходимо провести натурные испытания с выборочным сочетанием основных параметров армирования и грунтовых условий.

2.3 Валидация численной модели грунтового основания, армированного вертикальными грунтоцементными элементами

Валидация численной модели проводилась путем сопоставления результатов численного моделирования и натурных испытаний. В качестве сопоставляемых параметров принимались перемещение усиленного грунтового массива S и сжимаемость тела грунтоцементного элемента δ при заданных параметрах внешней нагрузки на усиленный массив. Выводы о сходимости результатов численного и натурального моделирования проводились на основании статистической обработки полученных данных по критерию Фишера.

В натуральных условиях проводилось устройство нескольких участков армированного массива (усиление грунта вертикальными грунтоцементными

элементами) с последующими испытаниями этих массивов жестким штампом, имитирующим нагрузку от здания. Всего выполнено шесть участков армированного массива с различающимися параметрами усиления в одних и тех же грунтовых условиях.

В ходе натуральных испытаний дополнительно проводились исследования с целью получения таких параметров, как прочность и сжимаемость грунтоцемента, изготовленного в грунтовых условиях опытной площадки, физико-механических характеристик грунтовой среды и т.п.

После получения необходимого объема исходных данных выполнялось численное моделирование, при котором воссоздавались условия полевых испытаний с нагружением усиленного массива плоским жестким элементом (штампом).

Таким образом, валидация разработанной численной модели проводилась в четыре этапа.

1. Устройство шести участков армированного грунтового массива в полевых условиях на опытной площадке с натурными испытаниями.

2. Исследование сжимаемости грунтоцемента, изготовленного в условиях опытной площадки, а также получение количественных данных о физико-механических характеристиках грунтовых условий опытной площадки.

3. Численное моделирование шести участков армированного грунтового массива с созданием соответствующих численных моделей и с учетом полученных исходных данных.

4. Сопоставление данных натуральных испытаний и численного моделирования. Статистическая обработка полученных данных с выводами о сходимости результатов.

2.3.1 Методика натуральных испытаний

На первом этапе на опытной площадке выполнено шесть участков, армированного грунтового массива, для последующих испытаний. Диаметр армоэлементов – 400 мм. Шаг армирования – $3d$. Длина армирующих элементов 2,7...4,2 м. Опытный участок расположен в г. Новосибирск. Инженерно-геологические условия опытного участка представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Грунтовые условия опытной площадки

Наименование параметров грунтовой среды	Обозначение	Значения параметров
Вид грунта	-	Супесь песчанистая пылеватая
Число пластичности	I_p , %	5...7
Показатель текучести	I_L , д.е.	$I_L > 0,75$
Плотность сухого грунта	ρ_d , г/см ³	1,60...1,70
Влажность	w , д.е.	0,19...0,24
Касательный модуль деформации при первичном компрессионном сжатии	E_{oed} , МПа	8,0
Секущий модуль в стандартных дренированных трехосных испытаниях	E_{50}^{ref} , МПа	8,0
Модуль деформации при разгрузке/повторном нагружении	E_{ur}^{ref} , МПа	29,7
Удельное сцепление	C , кПа	25...26
Угол внутреннего трения	φ , градус	18...20
Угол дилатансии ($\psi = \varphi - 30^\circ$)	ψ	0
Пористость грунта	n	50...54
Коэффициент Пуассона	ν	0,30

Для изготовления ГЦЭ использованы буровая установка *Nippon Sharyo* и навесное оборудование (штанги, соединительные шланги, смеситель, обеспечивающий диаметр ГЦЭ 400 мм). Общий вид буровой установки для изготовления ГЦЭ представлен на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Общий вид буровой техники для изготовления опытных ГЦЭ
Последовательность работ по изготовлению участков армированных грунтовых массивов на первом этапе приведена ниже:

1. Разметка границ площадки и точек расположения опытных ГЦЭ на строительной площадке. Схема расстановки опытных грунтоцементных элементов на площадке приведена на рисунке 2.4.

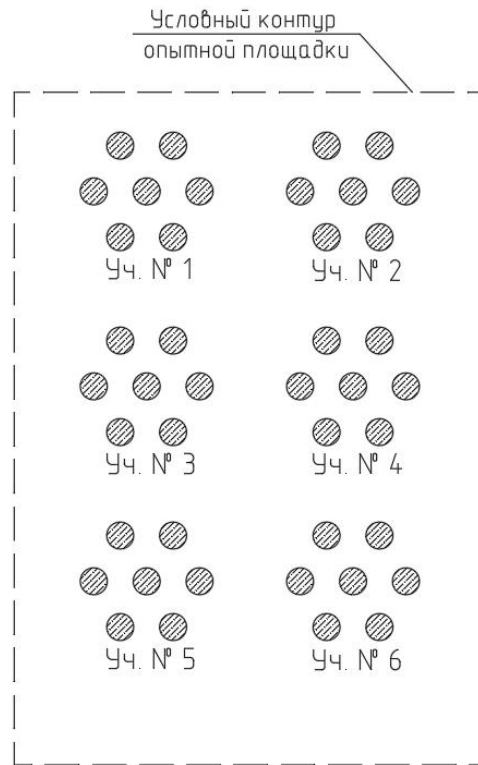


Рисунок 2.4 – Схема расположения участков армирования грунтового массива ГЦЭ на опытной площадке

2. Изготовление ГЦЭ. Выполняется погружение рабочего органа на глубину, обеспечивающую длину ГЦЭ, после с одновременной подачей раствора производится поднятие рабочего органа. На рисунке 2.5 представлен общий вид рабочего органа (смесителя) при изготовлении ГЦЭ.



Рисунок 2.5 – Общий вид рабочего органа (смесителя) при изготовлении ГЦЭ

3. Установка марок. Погружение обсадной трубы с теряемым наконечником (контрольная марка № 3) в тело незатвердевшей ГЦЭ. Общий вид обсадной трубы в теле ГЦЭ представлен на рисунке 2.6.

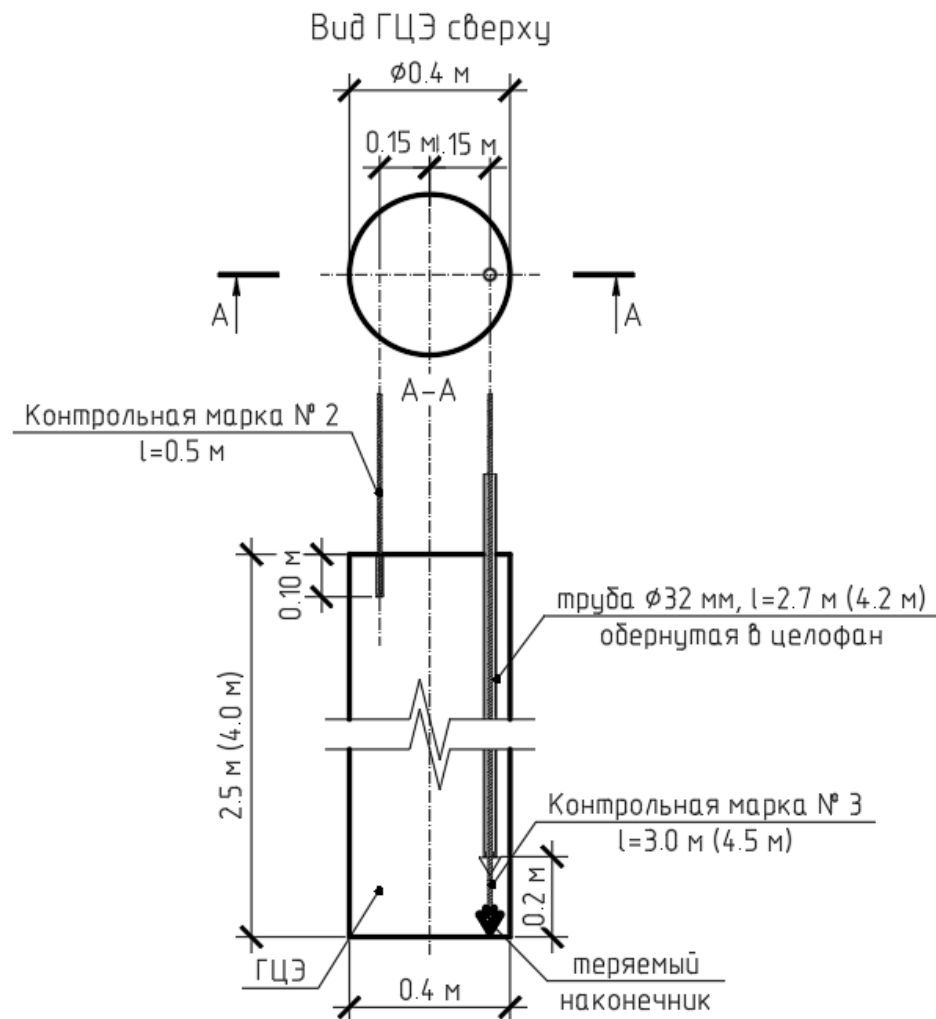


Рисунок 2.6 – Схема установки марок в теле ГЦЭ

После схватывания материала ГЦЭ, через обсадные трубы осуществлялось погружение арматуры (контрольная марка № 3) согласно схеме, представленной на рисунке 2.6. После опускания арматуры до наконечника трубы производился замер и фиксирование расстояния необходимого для сбивания наконечника и погружения арматуры в тело ГЦЭ. После сбивался наконечник, и арматура погружалась в тело ГЦЭ на 10 см от низа обсадной трубы.

Данные марки необходимы для фиксирования перемещений оголовка и низа ГЦЭ при проведении штамповых испытаний.

4. Подготовка к проведение штамповых испытаний шести участков, армированного грунтового массива:

- зачистка верха (оголовка) ГЦЭ и установка арматурного стержня (контрольная марка № 2) в тело, затвердевшего ГЦЭ, согласно схеме, представленной на рисунке 2.6;

- установка гильзы (трубы) вокруг арматурного стержня (контрольной марки № 2) согласно схеме, представленной на рисунке 2.7.

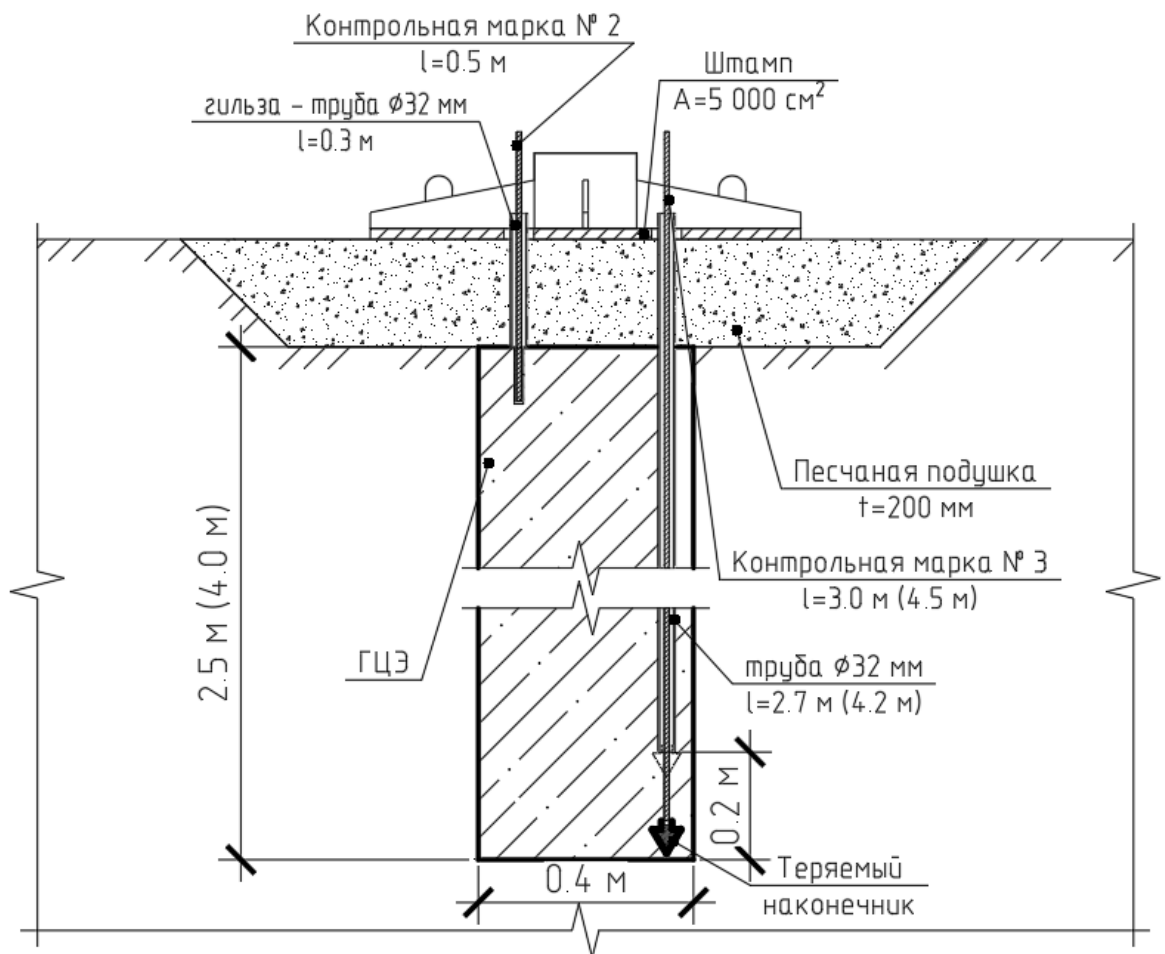


Рисунок 2.7 – Схема установки оборудования для проведения испытания - устройство песчаной подушки толщиной 200 мм над ГЦЭ с послойным уплотнением согласно схеме, представленной на рисунке 2.7.

5. Штамповые испытания шести участков армированного грунтового массива.

Плоский круглый жесткий штамп (площадью 5000 см^2) устанавливался на ГЦЭ. Для восприятия усилий от домкрата и создания нагружения штампа, устраивалась анкерная система. Данная система состоит из шнеков и балок, соединённых между собой. Между главной балкой и штампом устанавливался домкрат (ДГ-100). Усилие, передаваемое на домкрат, фиксировалось манометром, расположенным на подключенной к домкрату маслостанции. Перемещение контрольных марок фиксировалось прогибомерами «Аистова». Контрольная точка № 1 фиксировала перемещение плоского круглого жесткого штампа (для этого использовались два прогибомера). Контрольная марка № 2 фиксировала перемещение оголовка ГЦЭ. Контрольная марка № 3 фиксировала перемещение пяты ГЦЭ.

На рисунке 2.8 представлена схема установки для выполнения испытания плоским штампом.

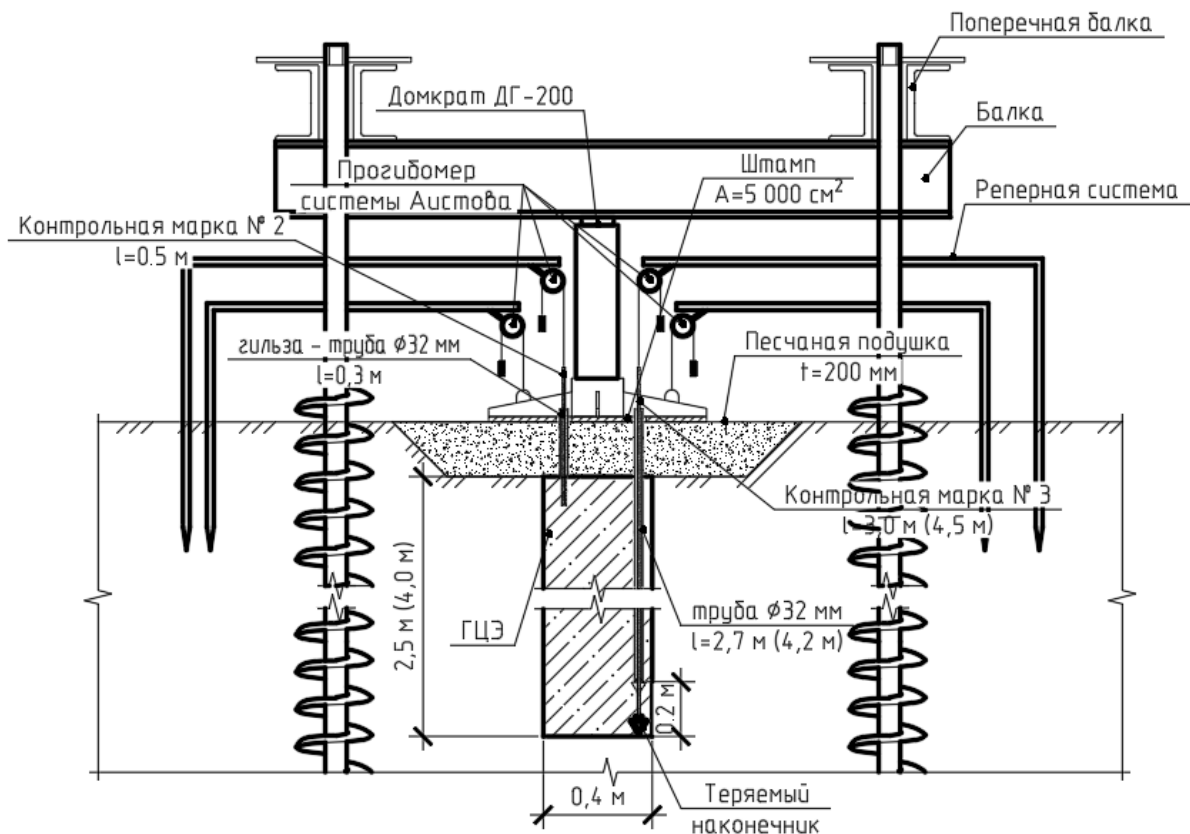


Рисунок 2.8 – Схема установки для испытания плоским штампом армированного грунтового массива

На рисунке 2.9 представлен общий вид установки для выполнения испытания плоским штампом на опытной площадке.



Рисунок 2.9 – Общий вид установки для испытания плоским штампом на опытной площадке

Нагрузка на штамп передавалась ступенями и составляла 0,05 МПа. Испытание проводилось до передачи нагрузки на штамп равной 0,5 МПа. Испытание выполнялось до условной стабилизации, равной не более 0,1 мм за последний час наблюдения, затем передавалась последующая ступень нагрузки.

По данным испытаний строился график зависимости осадки штампа от давления. Модуль деформации вычисляется в диапазоне давлений от P_0 до P_n . Модуль деформации усиленного грунтового массива вычисляется по формуле:

$$E = (1 - \nu^2) \cdot K_p \cdot K_1 \cdot D \cdot \left(\frac{\Delta P}{\Delta S}\right), \quad (2.1)$$

где E – модуль деформации усиленного грунтового массива; ν – коэффициент Пуассона, принимаемый 0,27 – для крупнообломочных грунтов; 0,30 – для песков и супесей; 0,35 – для суглинков; 0,42 – для глин. K_p – коэффициент, принимаемый в зависимости от заглубления штампа; K_1 – коэффициент,

принимаемый для жесткого круглого штампа равным 0,79; D – диаметр штампа; ΔP – приращение давления на штамп (МПа); ΔS – приращение осадки штампа, соответствующее ΔP (см).

Сжимаемость ГЦЭ оценивалась относительным сжатием тела ГЦЭ к его длине. Значения сжатия рассчитывались в соответствии с фактическими перемещениями оголовка (верха) ГЦЭ и пяти (низа) ГЦЭ.

2.3.2 Методика численного моделирования для валидации модели

Моделирование работы армированного грунтоцементными элементами массива выполнялось с использованием геотехнического программного комплекса *Midas GTS NX*.

Построение грунтовой среды и грунтоцементных элементов выполнялось на основании моделей, приведенных в п.2.2.

При построении армированного грунтового массива каждый грунтоцементный элемент моделировался как отдельно расположенный цилиндр диаметром равным диаметру смесителя, используемого при проведении полевых экспериментов – 400 мм.

Важным аспектом моделирования армированного массива является достоверное описание каждого компонента модели. Опираясь на результаты полевых и лабораторных исследований, в модели использовались параметры армирования и значения физико-механических характеристик грунтовой среды и грунтоцементных элементов, полученных опытным путем. Таким образом, при численном моделировании создавались цифровые двойники испытанных в полевых условиях участков армированного массива. В программном комплексе моделировалось их испытание штампом.

Всего при численном моделировании создавалось 6 участков с параметрами армирования аналогичными натурным экспериментам.

В таблицах 2.6 и 2.7 приведены параметры армирования и основные физико-механические характеристики компонентов модели.

Таблица 2.6 – Параметры армирования в модели

№ Участка	Диаметр ГЦЭ, мм	Шаг ГЦЭ	Длина ГЦЭ, м
1	400	3d	2,7
2			4,2
3			2,7
4			4,2
5			2,7
6			4,2

Таблица 2.7 – Основные физико-механические характеристики компонентов модели

Параметр компонентов модели		Номер участка					
		1	2	3	4	5	6
Грунтовая среда	Удельное сцепление C , кПа	25					
	Угол внутреннего трения φ , градус	19					
	Угол дилатансии ψ , градус	0					
	Модуль деформации одометрический E_{oed} , МПа	8,0					
	Модуль деформации на стадии разгрузки при повторном нагружении E_{ur}^{ref} , МПа	29,7					
	Модуль деформации по результатам трехосных испытаний E_{50}^{ref} , МПа	8,0					
	Коэффициент степенного закона нелинейно-упругой модели m	0,7					
	Начальное напряжение для модулей деформации p^{ref} , кПа	100					
	Коэффициент бокового давления при нормальном уплотнении K_{onc} , д.е.						
	Пористость грунта n , д.е.	52					
	Коэффициент Пуассона ν , д.е.	0,30					
ГЦЭ	Модуль деформации E_{stb} , МПа	95	99	138	145	205	211
	Прочность на сжатие R_{stb} , МПа	1,1	1,2	2,1	2,1	2,9	2,9

Моделирование статического нагружения армированных массивов выполнялось следующим образом: на каждом участке армированного массива над центральным ГЦЭ моделировалась песчаная подушка, мощностью 200 мм, сверху которой расположен плоский жесткий штамп круглого сечения площадью 5 000 см². Нагрузка к штампу прикладывалась ступенями по 0,1 МПа. Всего было смоделировано три ступени нагружения от 0,1 до 0,3 МПа. Также моделировалась разгрузка массива равными ступенями от 0,3 до 0,1 МПа.

Общий вид участка армированного массива в интерфейсе программного комплекса приведен на рисунке 2.10.

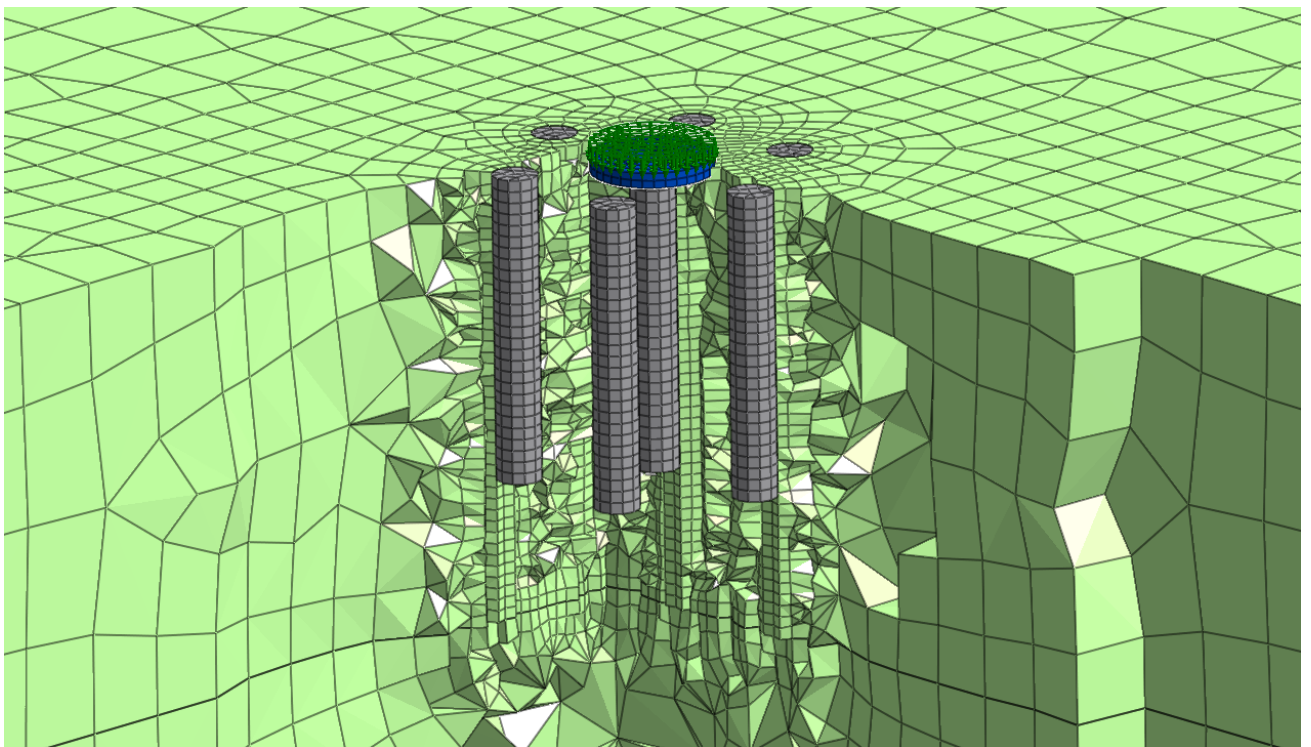


Рисунок 2.10 – Участок армированного массива в интерфейсе программного комплекса

Проведение статистической обработки данных численного моделирования и экспериментальных исследований с применением критерия Фишера позволит валидировать разработанную численную модель армированного грунтового массива и обосновать ее применение в дальнейших исследованиях.

2.3.3 Сопоставление данных натуральных испытаний и численного моделирования

Результаты натуральных экспериментов и численного моделирования, в целом, показывают схожую картину работы армированного массива. Характер развития деформаций и напряжений в армированном массиве, как на натуральных участках, так и в модели, оказался типовым. Основную нагрузку воспринимают армирующие элементы, что отражается на их сжатии и перемещении.

Проведенные экспериментальные исследования и результаты численного моделирования показывают согласованность результатов поведения армированного грунтового массива. Наблюдаемое распределение деформаций и напряжений в армированном грунтовом массиве, как в натуральных испытаниях, так и в численной модели, характеризуется сходной картиной работы этих массивов.

По результатам моделирования отмечено, что интенсивное затухание напряжений происходит на глубине 0,4...0,8 м от нижнего конца армирующих элементов. На рисунке 2.11 представлена эпюра перемещений в поперечном сечении армированного массива.

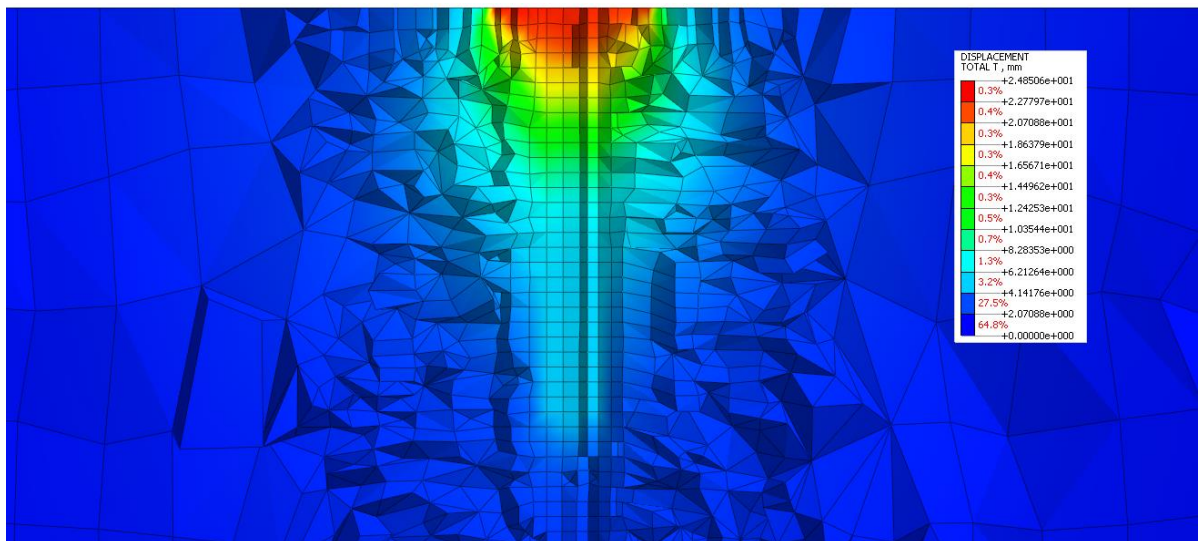


Рисунок 2.11 – Эпюра перемещений в поперечном сечении армированного массива

Основные результаты натуральных экспериментов и численного моделирования сведены в таблицу 2.8.

Таблица 2.8 – Основные результаты натуральных экспериментов и численного моделирования

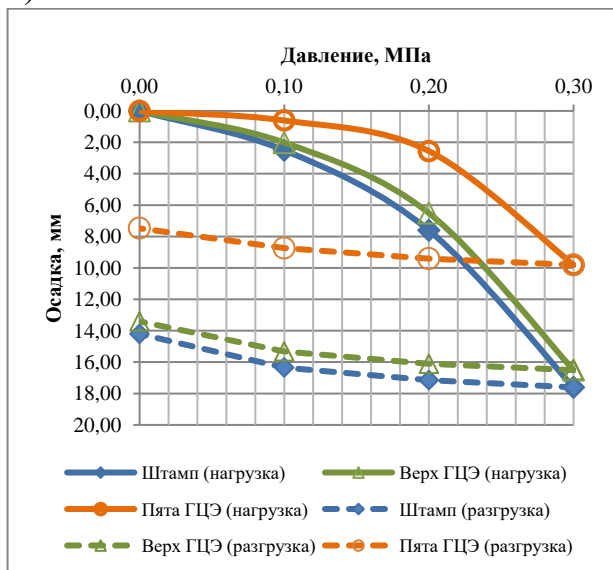
№ участка	Осадка штампа и деформация ГЦЭ по ступеням					
	0,1 МПа		0,2 МПа		0,3 МПа	
	S , мм	δ , д.е. $\cdot 10^{-3}$	S , мм	δ , д.е. $\cdot 10^{-3}$	S , мм	δ , д.е. $\cdot 10^{-3}$
1	<u>2,51</u>	<u>0,56</u>	<u>7,61</u>	<u>1,58</u>	<u>17,61</u>	<u>2,68</u>
	4,93	0,86	11,90	1,77	21,99	2,60
2	<u>3,25</u>	<u>0,60</u>	<u>7,15</u>	<u>1,14</u>	<u>12,15</u>	<u>1,92</u>
	4,18	0,69	8,83	1,48	2,31	2,31
3	<u>3,01</u>	<u>0,42</u>	<u>8,51</u>	<u>0,80</u>	<u>19,10</u>	<u>1,20</u>
	4,37	0,48	10,75	0,96	20,56	1,39
4	<u>2,91</u>	<u>0,33</u>	<u>6,31</u>	<u>0,82</u>	<u>11,01</u>	<u>1,24</u>
	3,20	0,40	6,71	0,83	11,34	1,27
5	<u>2,66</u>	<u>0,28</u>	<u>7,62</u>	<u>0,40</u>	<u>15,90</u>	<u>0,74</u>
	2,91	0,26	9,22	0,50	19,01	0,71
6	<u>2,01</u>	<u>0,15</u>	<u>5,12</u>	<u>0,56</u>	<u>9,15</u>	<u>0,95</u>
	2,97	0,27	6,50	0,55	10,82	0,79

Примечание:

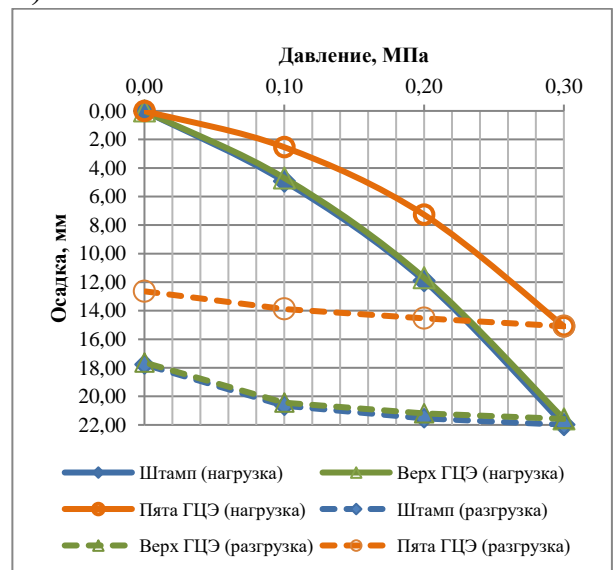
Значения представлены в виде дроби, где в числителе данные натурального эксперимента, в знаменателе данные численного моделирования

Для наглядности, результаты штамповых испытаний и моделирования представлены в виде графиков зависимости осадки от давления (рисунок 2.12). Зависимости осадок от давления приведены при нагружении и разгрузке.

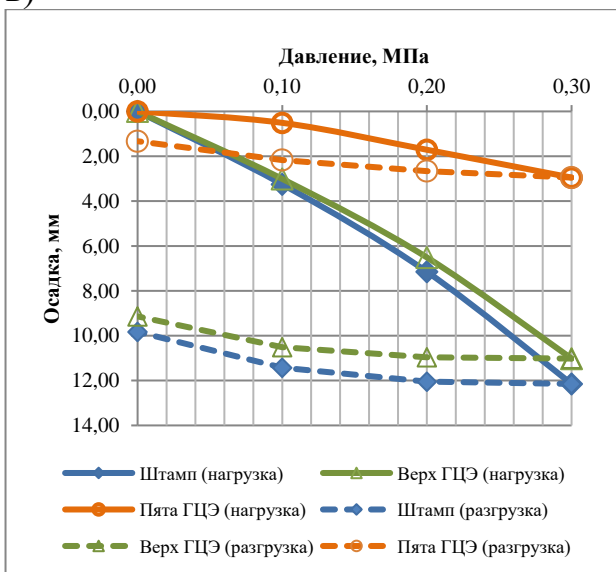
а)



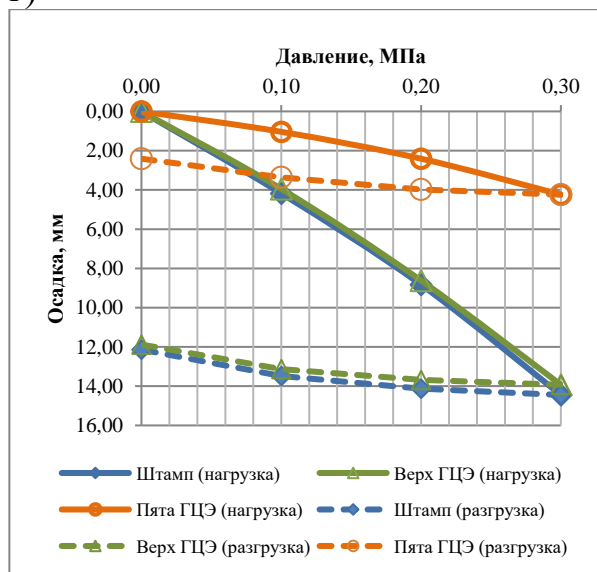
б)



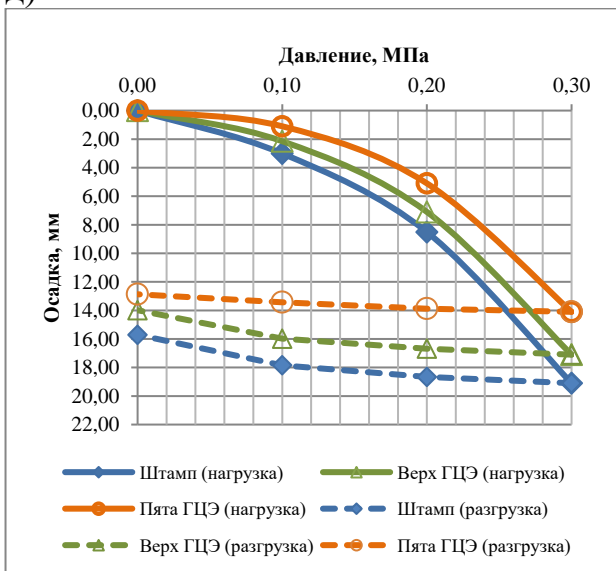
В)



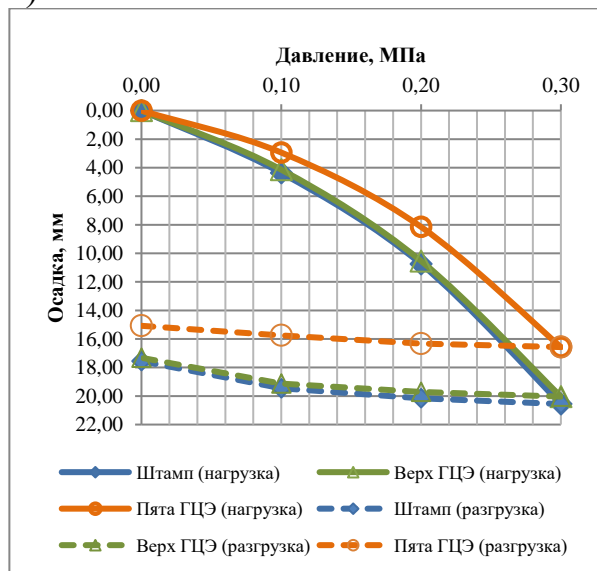
Г)



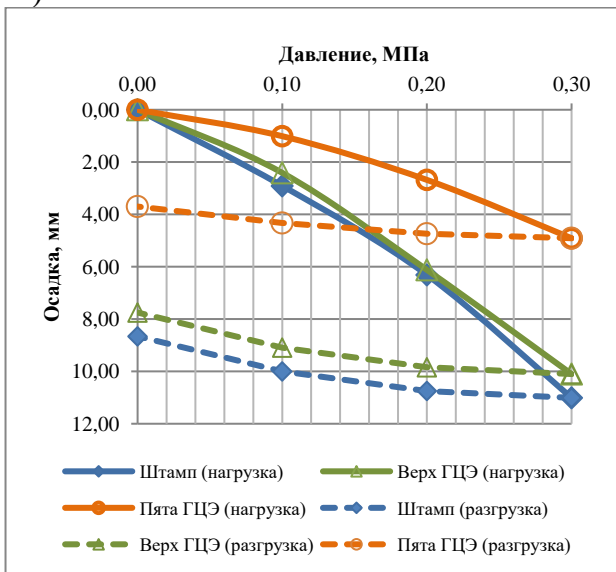
Д)



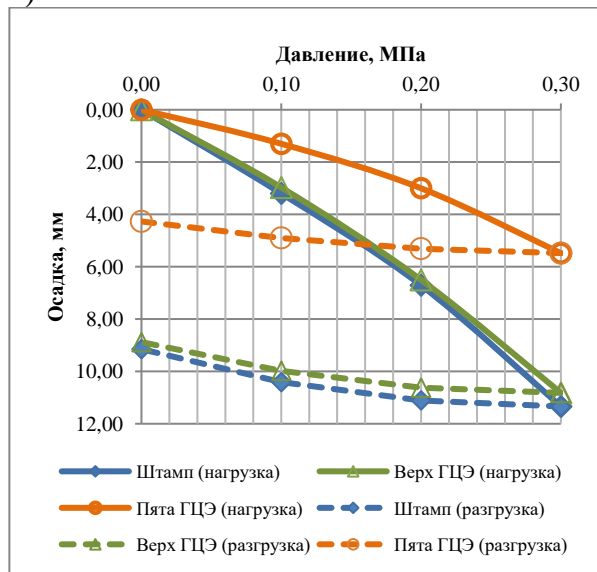
е)



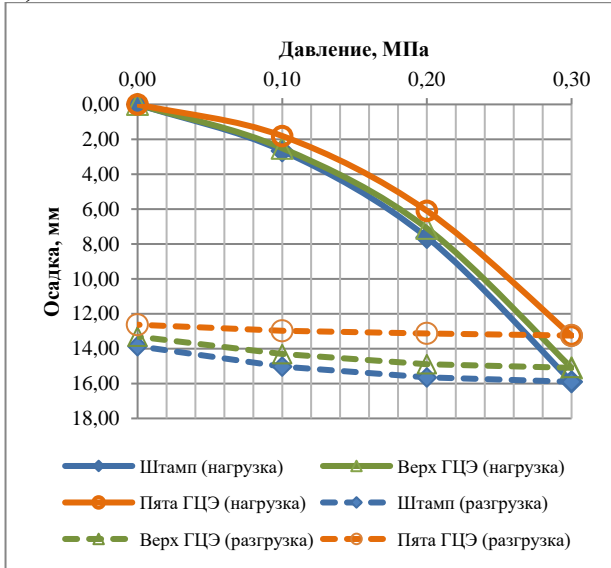
Ж)



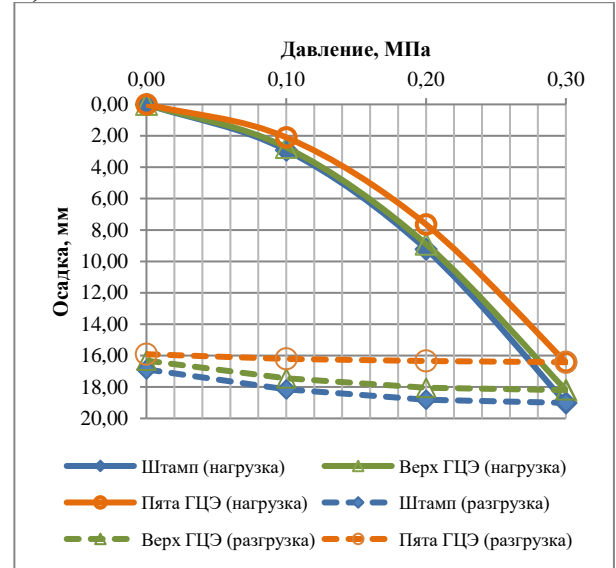
з)



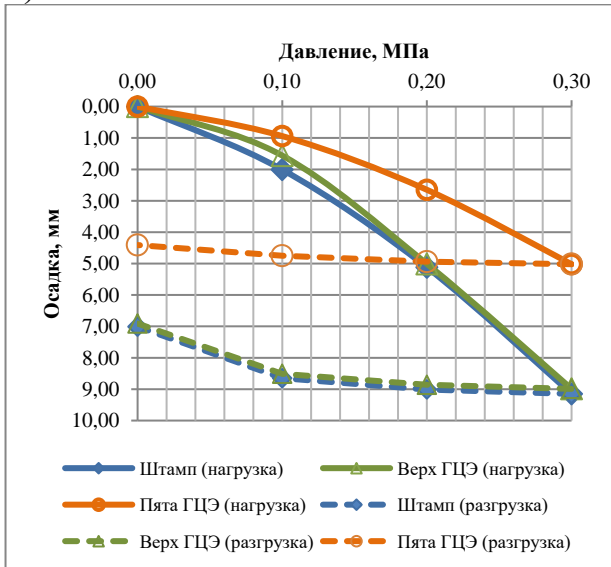
И)



К)



Л)



М)

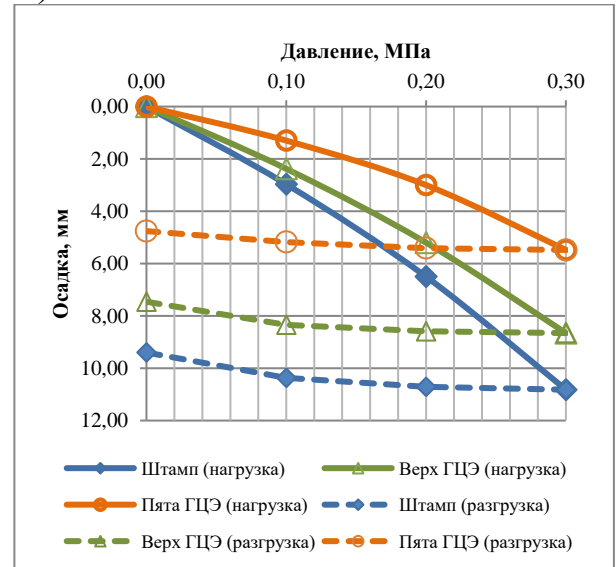
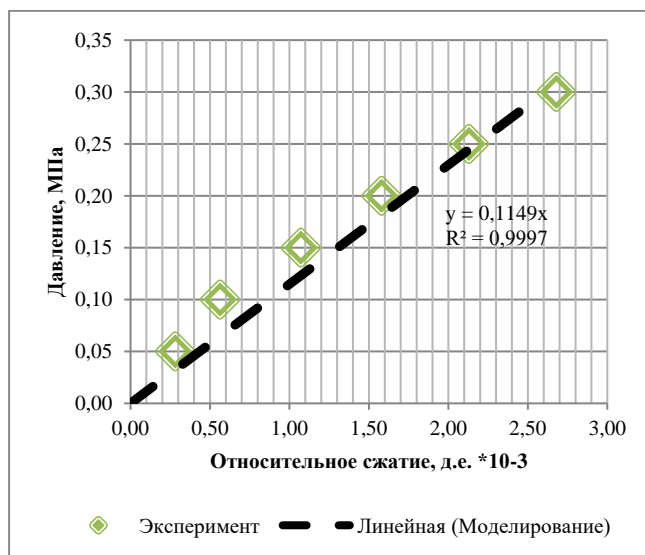


Рисунок 2.12 – Результаты испытаний усиленного массива:

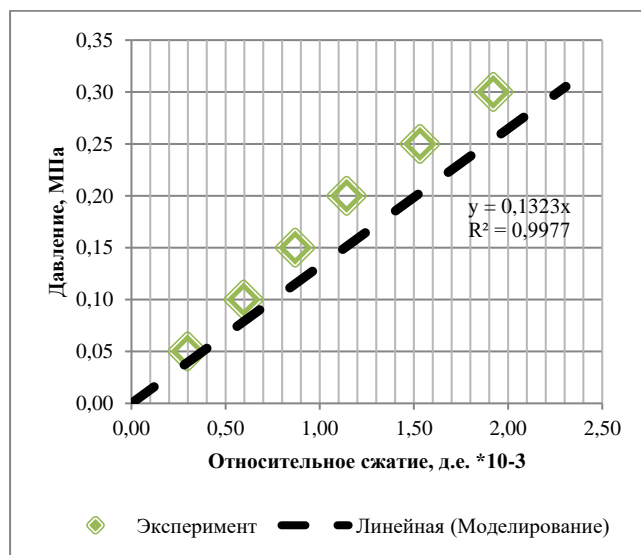
а – натуральный эксперимент на участке № 1; б – численное моделирование на участке № 1; в – натуральный эксперимент на участке № 2; г – численное моделирование на участке № 2; д – натуральный эксперимент на участке № 3; е – численное моделирование на участке № 3; ж – натуральный эксперимент на участке № 4; з – численное моделирование на участке № 4; и – натуральный эксперимент на участке № 5; к – численное моделирование на участке № 5; л – натуральный эксперимент на участке № 6; м – численное моделирование на участке № 6

Адекватность разработанной модели подтверждена сопоставлением экспериментальных и расчетных данных численного моделирования. Данное сопоставление выполнено по критерию Фишера при доверительной вероятности 95%. Валидация включала анализ зависимостей сжимаемости грунтоцементных армирующих элементов от приложенной нагрузки (рисунок 2.13).

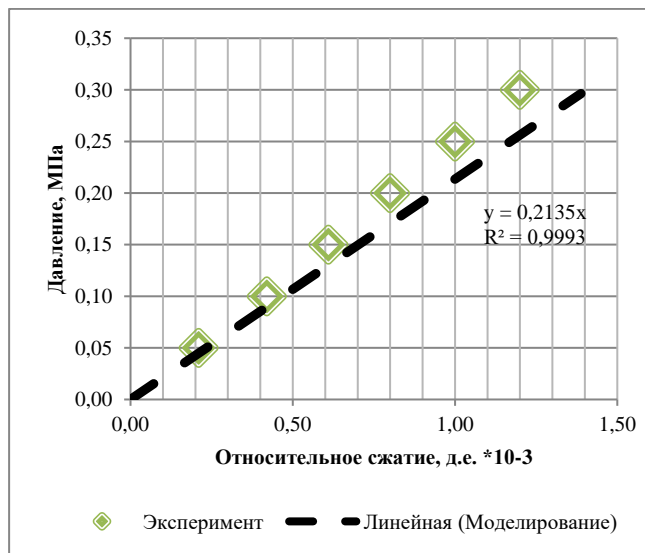
а)



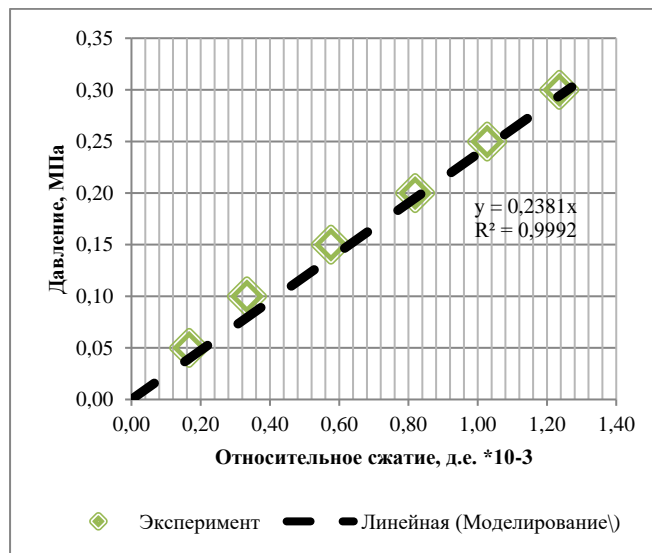
б)



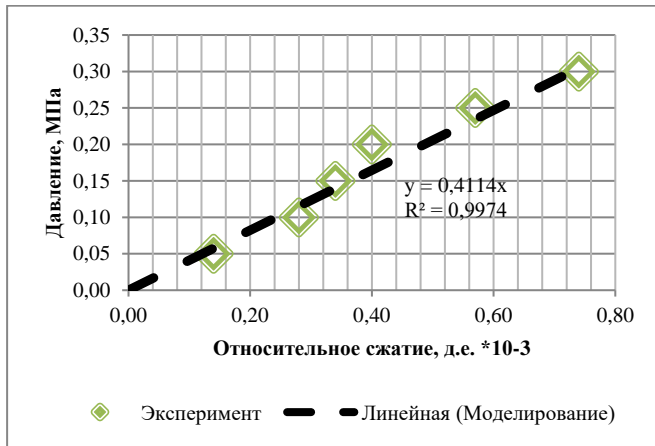
в)



г)



д)



е)

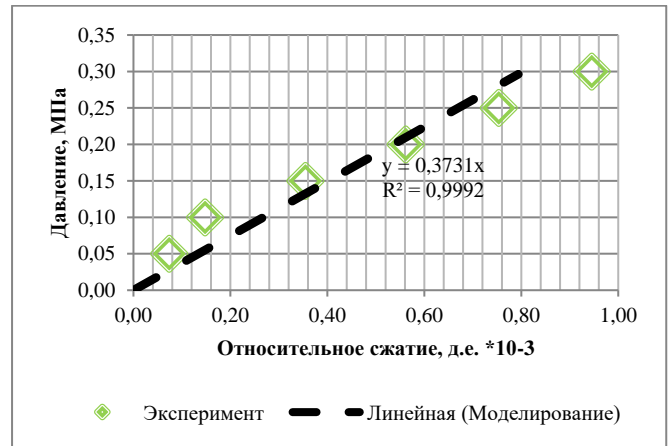


Рисунок 2.13 – Массивы значений изменения сжимаемости ГЦЭ от передаваемой на них нагрузки: а – на участке 1, б – на участке 2, в – на участке 3, г – на участке 4, д – на участке 5, е – на участке 6

Дополнительно, результаты натуральных испытаний и моделирования позволили рассмотреть вопрос совместной работы грунтоцементного элемента и окружающего грунтового массива с учетом «сцепления».

Сцепление окружающего грунтового массива и грунтоцементного элемента выражается коэффициентом совместной работы (при моделировании учитывалось в виде интерфейсных элементов – R_{inter}).

На основании проведенного исследования получена зависимость сцепления окружающего грунтового массива и ГЦЭ от модуля деформации ГЦЭ, которая представлена в виде графика и приведена на рисунке 2.14.

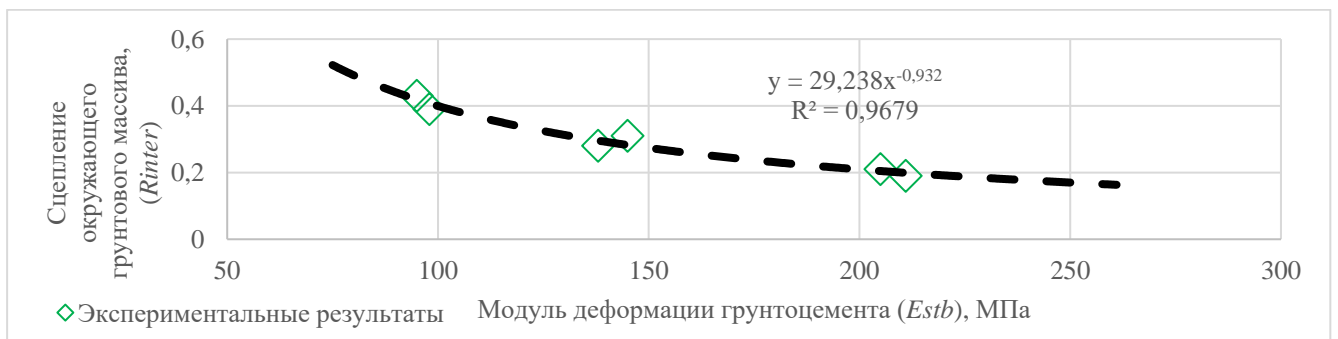


Рисунок 2.14 – Сцепление окружающего грунтового массива и ГЦЭ от модуля деформации ГЦЭ

Полученные зависимости подтверждают соответствие численной модели экспериментальным данным с уровнем доверительной вероятности 95%. Тем самым подтверждается адекватность разработанной численной модели и возможность ее использования в дальнейших исследованиях армированного грунтового массива, с получением необходимых закономерностей и уточнением принципов распределения нагрузок в массиве.

2.4 Выводы по разделу 2

1. Проведенный анализ и систематизация данных геотехнического мониторинга за строительством зданий на усиленных основаниях позволил сформировать теоретические предпосылки особенностей работы усиленного массива грунта, с учетом модуля деформации армирующих грунтоцементных элементов, а также подтвердить сформулированную гипотезу: **«С увеличением модуля деформации армирующих грунтоцементных элементов, расположенных в глинистых грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е., возможно повышение доли нагрузок на нижележащие грунтовые слои и увеличивается сжимаемая толща».**

Согласно сформулированной гипотезе, армирующие элементы с более высоким модулем деформации (в сравнении с модулем деформации окружающего грунта) за счет своей меньшей податливости могут продавливаться в усиливаемом массиве, за счет чего и происходит передача нагрузки на подстилающий грунт. Продавливание может осуществляться только за счет сдвиговой осадки армирующего элемента при проскальзывании по его боковой поверхности по грунту. Чем выше консистенция глинистых грунтов, тем ниже сцепление и тем больше проскальзывание и продавливание грунтоцементных элементов в массиве.

2. Предложена и описана численная модель усиленного основания вертикальными грунтоцементными элементами основания, сложенного глинистыми грунтами с показателем текучести более 0,5 д.е. Приведены условия формирования параметров модели, граничные условия, модели материалов параметров модели.

3. Разработана новая экспериментальная методика и оценка параметров сжимаемости грунтоцементных элементов в полевых условиях по изменению деформационных характеристик армированного грунтового массива.

4. Получена зависимость сцепления окружающего грунтового массива и грунтоцементного элемента от модуля деформации грунтоцементного элемента.

5. Экспериментально доказана адекватность разработанной численной модели путем ее валидации. В результате сопоставления данных натурных экспериментов и численного моделирования с использованием предложенной численной модели подтверждена достаточная сходимость результатов для возможности дальнейшего ее использования в исследованиях напряженно-деформированного состояния армированного грунтового основания с получением необходимых закономерностей и уточнением принципов распределения нагрузок в массиве.

РАЗДЕЛ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ, АРМИРОВАННЫХ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

3.1 Методика проведения моделирования

Исследование НДС армированного вертикальными грунтоцементными элементами грунтового массива выполняется путем численного моделирования с использованием валидированной численной модели в программном комплексе *Midas GTS NX*.

Применение валидированной численной модели позволяет решить задачи:

- по исследованию качественной и количественной картины работы армированного грунтового массива при варьировании параметров армирования и грунтовых условий для уточнения закономерностей изменения сжимаемости и принципов распределения нагрузок;

- по подтверждению теоретических предпосылок об особенностях работы усиленного массива грунта, с учетом модуля деформации армирующих грунтоцементных элементов;

- по установлению условий проскальзывания грунтоцементных элементов по боковой поверхности на контакте с грунтом, приводящего к продавливанию подстилающих грунтов армирующими элементами.

Результатом решения сформулированных задач будут являться:

1. Подтверждение или опровержение сформулированной во втором разделе гипотезы.

2. Закономерности изменения сжимаемости армированного вертикальными грунтоцементными элементами грунтового массива от параметров грунтоцементных элементов и усиливаемого грунта.

3. Условия проскальзывания грунтоцементного элемента по его боковой поверхности по грунту.

Результаты данного исследования будут использованы для совершенствования методик проектирования и контроля армирования основания вертикальными грунтоцементными элементами. Для этого с использованием валидированной численной модели выполнялось моделирование работы армированного основания.

Планирование исследования, в ходе моделирования с последующей статистической обработкой полученных результатов, выполнялось на базе программно-вычислительного комплекса *STATISTICA*.

Исследование проводилось в *два этапа*.

На первом этапе изучалось влияние ключевых параметров армирования на вертикальные деформации основания, в зависимости от передаваемой на него нагрузки и сжимаемости грунта. Полученные данные позволят оценить эффективность усиления и установить оптимальные ключевые параметры армирования для грунтов различной сжимаемости, в зависимости от условий нагружения усиленного основания.

Для этого выполнено моделирование основания фундамента армированным грунтовым массивом с различным сочетанием ключевых параметров армирования, нагрузки и сжимаемости усиливаемых грунтов. В качестве функции отклика, отражающей эффективность усиления, назначалась вертикальная деформация кровли усиленного массива, которая может быть интерпретирована, как осадка сооружения на усиленном основании.

В качестве ключевых параметров армирования выделены:

- коэффициент армирования грунтового массива α_g , прямым образом отражающий плотность расстановки грунтоцементных элементов в усиливаемом массиве. Исследуемый диапазон назначался от 0,02 до 0,10;

- модуль деформации грунтоцемента E_{stb} . Исследуемый диапазон назначался от 50 до 250 МПа.

Нагрузка назначалась на основании анализа имеющегося опыта проектирования и реализации усиления оснований многоэтажных зданий (более 40 объектов) и моделировалась таким образом, чтобы среднее давление P , передаваемое на усиленный массив, составляло от 300 до 500 кПа.

В качестве параметра сжимаемости грунта в исследовании назначен модуль деформации E_{cp} – от 5 до 13 МПа.

ГЦЭ моделируются как объемные элемента на основе модели Кулона-Мора. Грунтовая среда моделируется на базе грунтовой модели *Hardening-Soil model* на основе модели Кулона–Мора. Более подробное описание параметров моделей приведено в п. 2.2 в таблицы 2.3.

На рисунке 3.1 представлена схема проведения моделирования на *первом этапе*.

α_g	0,10					0,08					0,06					0,04					0,02						
	P	E_{stb}	50	100	150	200	250	50	100	150	200	250	50	100	150	200	250	50	100	150	200	250	50	100	150	200	250
300	5	■																									
	7						■																				
	9											■															
	11																										
	13																										■
350	5																										■
	7		■																								
	9																										
	11																										
	13																										
400	5																										
	7																										
	9																										
	11																										
	13																										
450	5																										
	7																										
	9																										
	11																										
	13																										
500	5																										
	7																										
	9																										
	11																										
	13																										

Рисунок 3.1 – Схема моделирования на *первом этапе*

Сочетание параметров определялось при планировании данного исследования по методу латинских квадратов. Статистическая обработка результатов исследования с получением закономерностей осуществлялась с использованием многофакторного анализа.

Общий вид численной модели на *первом этапе* приведен на рисунке 3.2.

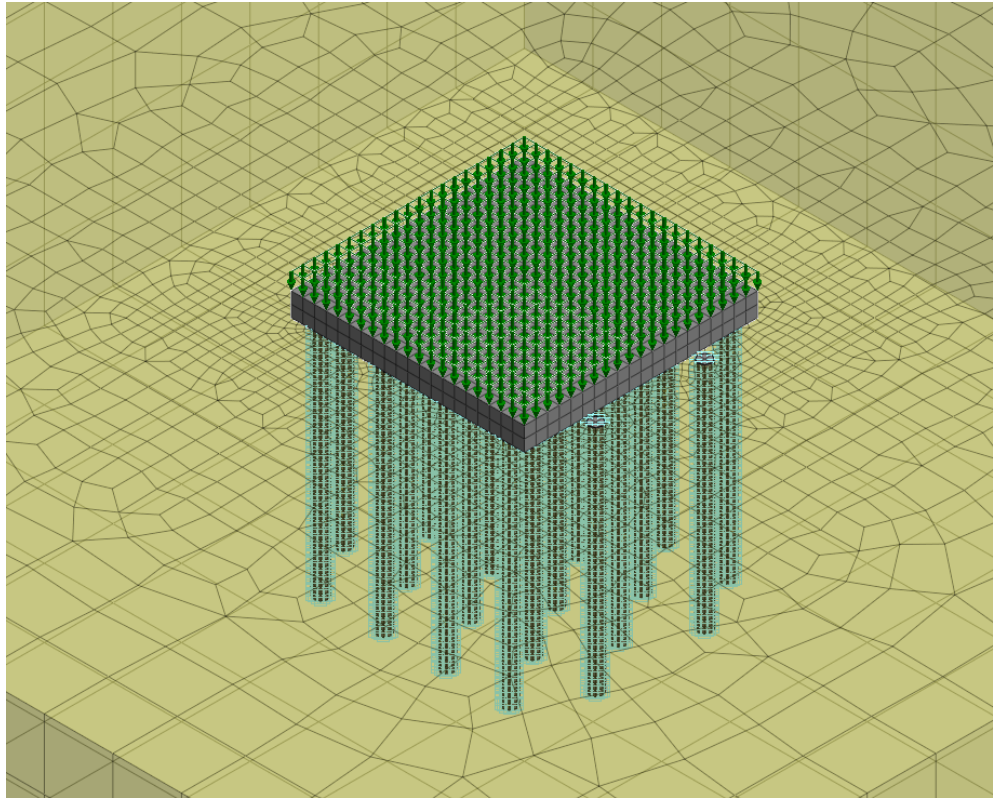


Рисунок 3.2 – Общий вид численной модели на *первом этапе*

Также на *первом этапе* исследования проверялась гипотеза, и устанавливались условия проскальзывания ГЦЭ в массиве под действием внешней нагрузки. Для этого исследовался параметр сцепления окружающего грунтового массива и грунтоцементного элемента (интерфейс элементов – R_{inter}). Благодаря чему учитывается достижение предельной прочности окружающего грунта вдоль боковой поверхности ГЦЭ. Данный критерий принят исходя из анализа результатов исследования, приведенного во втором разделе и качественного совпадения с результатами исследований НИИОСП им. Герсеванова [57, 58, 88, 89, 110], а также зарубежных исследований [151, 166]. Установлены группы уровней ключевых параметров, для которых влияние

проскальзывания оказывается существенным, что необходимо учитывать при проектировании.

На *втором этапе* изучалось изменение модуля деформации усиленного массива в зависимости от параметров армирования и грунтовых условий. Для этого формировались фрагменты усиленного массива с варьированием диаметра, шага расстановки грунтоцементных элементов, модуля деформации грунтоцемента и грунта. На таких фрагментах оценивалась сжимаемость массивов путем моделирования штамповых испытаний, как при натуральных экспериментах. По результатам таких смоделированных испытаний расчетным способом определялся модуль деформации усиленного массива, и анализировались результаты численного моделирования по части распределения напряжений в массиве.

Исследования выполнялись с привязкой к реальным инженерно-геологическим условиям. В качестве исходных грунтов рассматривались глинистые грунты с коэффициентом пористости от 0,70 до 1,0 и показателем текучести более 0,5 д.е.

Всего моделировалось 25 фрагментов усиленного массива с варьированием параметров армирования и грунтовой среды. Каждый фрагмент состоял из семи ГЦЭ. Планирование исследования и статистическая обработка результатов выполнялись, как и при *первом этапе* моделирования.

Учитывая существенное количество параметров, которые, очевидно, оказывают влияние на деформируемость армированного массива, в исследовании они были разбиты на три группы: I, II, III.

Параметр группы I отражает изменчивость грунтовых условий – выражаемых модулем деформации грунта в области усиления E_{gp} (МПа), и зависящим, главным образом, от показателя текучести (более 0,5 д.е.), коэффициента пористости грунта (от 0,70 до 1,0 д.е.).

Параметр группы II отражает соотношение диаметра d и шага расстановки ГЦЭ l (от $2,0d$ до $5,0d$) и выражается, как коэффициент армирования грунта

$$\alpha_g = \frac{\pi d^2}{l^2 2\sqrt{3}}$$

Параметр группы III отражает изменение модуля деформации ГЦЭ E_{stb} (МПа), в зависимости от расхода цемента при их изготовлении в конкретных грунтовых условиях. Модуль деформации ГЦЭ рассматривался от 50 до 250 МПа.

Каждый параметр варьировался в 5 уровнях (см. таблицу 3.1).

Таблица 3.1 – Варьирование параметров I, II и III

Параметр	Значения параметров по уровням				
	1	2	3	4	5
I	$E_{zp} = 13$ ($e=0,70\dots0,75,$ $I_L=0,5\dots0,6$)	$E_{zp} = 11$ ($e=0,75\dots0,80,$ $I_L=0,6\dots0,7$)	$E_{zp} = 9$ ($e=0,80\dots0,85,$ $I_L=0,7\dots0,8$)	$E_{zp} = 7$ ($e=0,85\dots0,95,$ $I_L=0,8\dots0,9$)	$E_{zp} = 5$ ($e=0,95\dots1,0,$ $I_L=0,9\dots1,0$)
II	$\alpha_g=0,10$	$\alpha_g=0,08$	$\alpha_g=0,06$	$\alpha_g=0,04$	$\alpha_g=0,02$
III	$E_{stb}=50$	$E_{stb}=100$	$E_{stb}=150$	$E_{stb}=200$	$E_{stb}=250$

Для обеспечения достоверности поведения ГЦЭ, в массиве при моделировании работы армированного массива, использовались результаты исследований, полученные во втором разделе. Также при моделировании учитывалось, что эффективность усиления зависит от грунтовых условий, а именно – модуль деформации ГЦЭ напрямую зависит от грунтовой среды и расхода цемента при его изготовлении.

На рисунке 3.3 приведена схема проведения моделирования на *втором этапе*.

II	III	I	1	2	3	4	5
		1	1	1			
1	2		2				
	3			3			
	4				4		
	5						5
	10						
2	1						10
	2	6					
	3		7				
	4			8			
	5					9	
3	1					14	
	2						15
	3	11					
	4		12				
	5				13		
4	1				18		
	2					19	
	3						20
	4	16					
	5			17			
5	1		22				
	2				23		
	3					24	
	4						25
	5	21					

Рисунок 3.3 – Схема проведения моделирования на *втором этапе*

Моделирование штампового испытания выполнялось следующим образом: над сваями моделировалась песчаная подушка мощностью 200 мм, на которой располагался штамп круглого сечения. Нагружение штампа выполнялось ступенями при помощи нагрузки, приложенной вертикально по оси симметрии штампа (рисунок 3.4). Нагрузка на штамп моделировалась ступенями от 0,1 до 0,6 МПа. Каждая ступень нагружения моделировалась, как отдельная расчетная стадия со снятием отчетов напряжений и деформаций в модели.

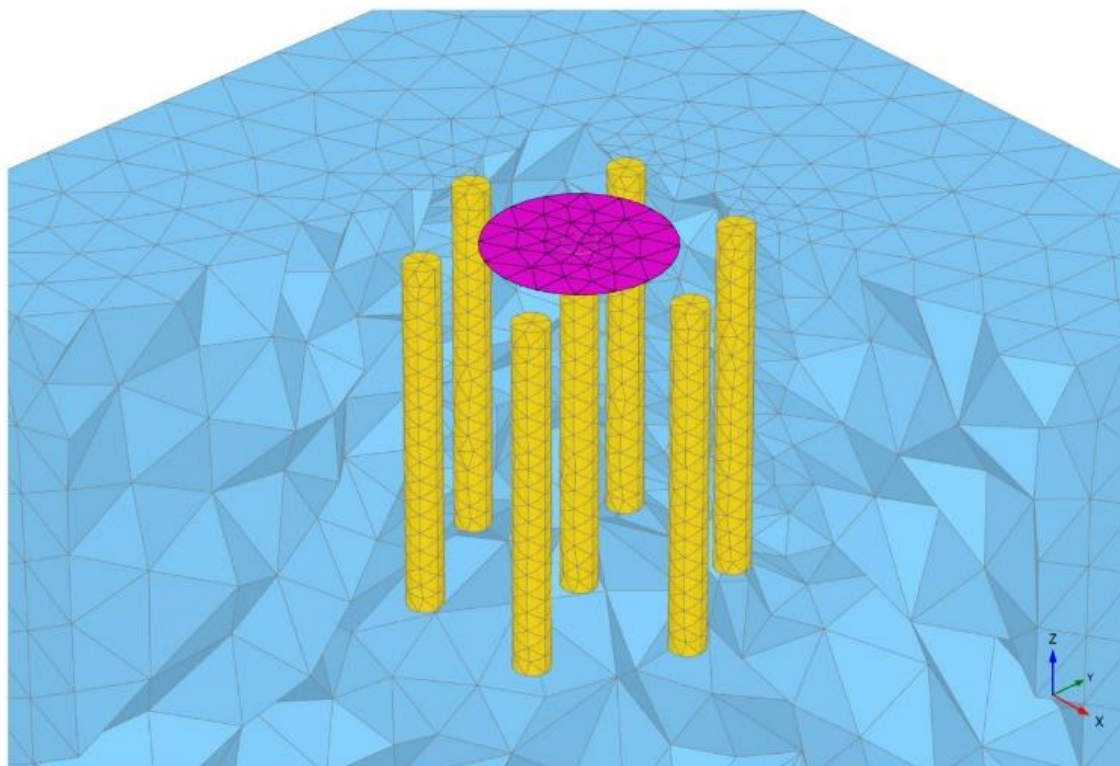


Рисунок 3.4 – Модель штампового испытания в программной среде

Результаты моделирования штамповых испытаний на *втором этапе* использовались для установления закономерностей изменения модуля деформации усиленного массива от параметров армирования и параметров грунтовой среды. Данные закономерности используются в совершенствованной методике проектирования армирования грунтов вертикальными грунтоцементными элементами.

3.2 Исследование работы усиленного грунтового массива (первый этап)

Результаты моделирования на *первом этапе* усиленного основания в программном комплексе показали, что большую часть напряжений в массиве под фундаментами сооружения воспринимают ГЦЭ. Характер развития напряжений и

вертикальной деформации кровли армированного массива позволил подтвердить выдвинутую гипотезу.

Как видно из рисунка 3.5 (общий вид) и рисунка 3.6 (в разрезе), перераспределение напряжений между ГЦЭ от вертикальной нагрузки происходит в верхней части усиленного массива. Большую часть напряжений под фундаментом сооружения воспринимают ГЦЭ и ввиду более высокого значения модуля деформации (в сравнении со значениями модуля деформации окружающих грунтов) происходит дальнейшее перераспределение напряжений в нижележащие грунтовые слои.

Интенсивное затухание напряжений на глубине от 1,5 до 2,0 м от пяты ГЦЭ происходит в грунтах с более низкими значениями показателя консистенции (I_L) от 0,5 до 0,8 д.е. и коэффициента пористости (e) от 0,70 до 0,85, при более высоких значениях модуля деформации (E_{sp}) от 9 МПа. При этом в более слабых грунтах с показателем консистенции (I_L) более 0,8 д.е., коэффициентом пористости (e) от 0,85 до 1,0 и модулем деформации от 5 до 7 МПа доля передаваемого от ГЦЭ давления заметно выше. В связи с этим, в таких грунтах увеличивается сжимаемая толща.

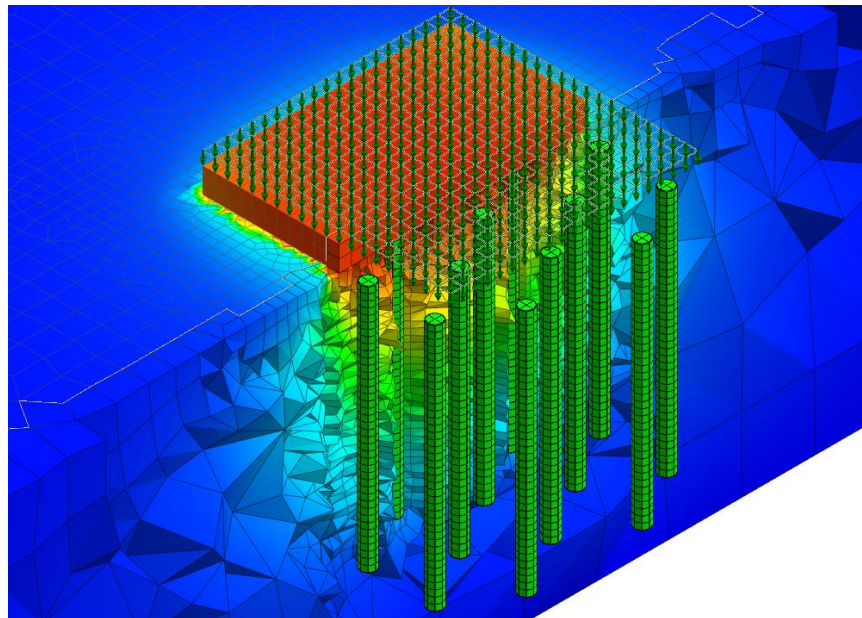


Рисунок 3.5 – Распределение вертикальных напряжений в усиленном массиве (общий вид)

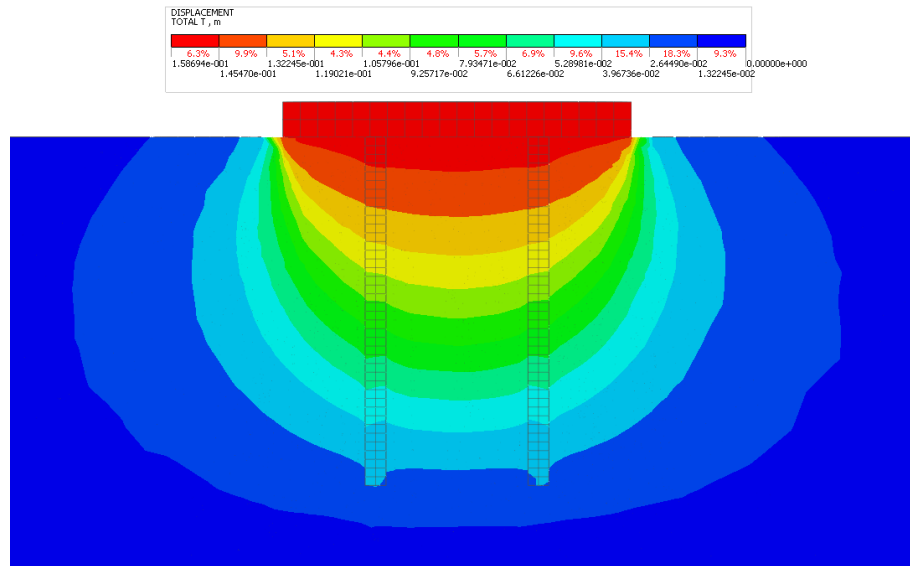


Рисунок 3.6 – Распределение вертикальных напряжений в усиленном массиве (в разрезе)

Полученные характеристики по результатам моделирования на *первом этапе* приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики по результатам моделирования на *первом этапе*

№ п/п	P , МПа	E_{zp} , МПа	α_g	E_{stb} , МПа	S_{yc} , мм	S_{zp} , мм	δ	H_z , м
1	300	5,0	0,10	50	95,1	460,5	4,8	15,5
2	300	7,0	0,08	100	37,2	328,9	8,8	15,5
3	300	9,0	0,06	150	21,2	255,8	12,1	15,5
4	300	11,0	0,04	200	27,4	209,3	7,6	15,5
5	300	13,0	0,02	250	41,4	177,1	4,3	15,5
6	350	5,0	0,08	150	61,5	614,6	10,0	17,1
7	350	7,0	0,06	200	37,0	439,0	11,9	17,1
8	350	9,0	0,04	250	35,7	341,5	9,6	17,1
9	350	11,0	0,02	50	260,0	279,4	1,1	17,1
10	350	13,0	0,10	100	26,3	236,4	9,0	17,1
11	400	5,0	0,06	250	64,7	778,8	12,0	18,6
12	400	7,0	0,04	50	362,4	556,3	1,5	18,6
13	400	9,0	0,02	100	292,0	432,7	1,5	18,6
14	400	11,0	0,10	150	26,1	354,0	13,5	18,6
15	400	13,0	0,08	200	20,4	299,5	14,7	18,6
16	450	5,0	0,04	100	360,4	950,9	2,6	20,0
17	450	7,0	0,02	150	326,0	679,2	2,1	20,0
18	450	9,0	0,10	200	29,4	528,3	18,0	20,0

Окончание таблицы 3.2.

№ п/п	P , МПа	E_{zp} , МПа	α_g	E_{stb} , МПа	S_{yc} , мм	S_{zp} , мм	δ	H_z , м
19	450	11,0	0,08	250	23,5	432,3	18,4	20,0
20	450	13,0	0,06	50	122,1	365,7	3,0	20,0
21	500	5,0	0,02	200	455,9	1125,8	2,5	21,2
22	500	7,0	0,10	250	50,2	804,1	16,0	21,2
23	500	9,0	0,08	50	170,6	625,4	3,7	21,2
24	500	11,0	0,06	100	90,8	511,7	5,6	21,2
25	500	13,0	0,04	150	75,1	433,0	5,8	21,2

Примечание: S_{yc} – осадка усиленного грунтового массива, S_{zp} – осадка грунтового массива в естественном состоянии (до усиления), δ – отношение сжимаемости грунтового массива в естественном состоянии (до усиления) к сжимаемости усиленного грунтового массива ($\varepsilon_{zp}/\varepsilon_{yc}$), H_z – сжимаемая толща.

После анализа и статистической обработки результатов численного моделирования на *первом этапе* были построены зависимости, отражающие влияние ключевых параметров армирования на изменение осадки сооружения на усиленном основании в грунтах разной сжимаемости и при различной величине нагрузки на основание.

Графическое отображение результатов экспериментов приведено на рисунках 3.7–3.10.

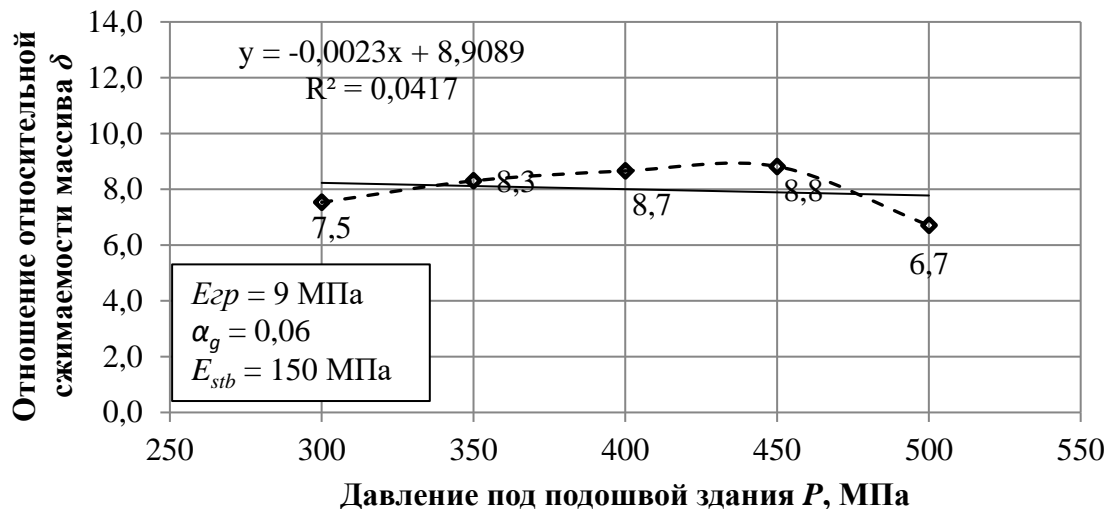


Рисунок 3.7 – График изменения отношения относительной сжимаемости от давления

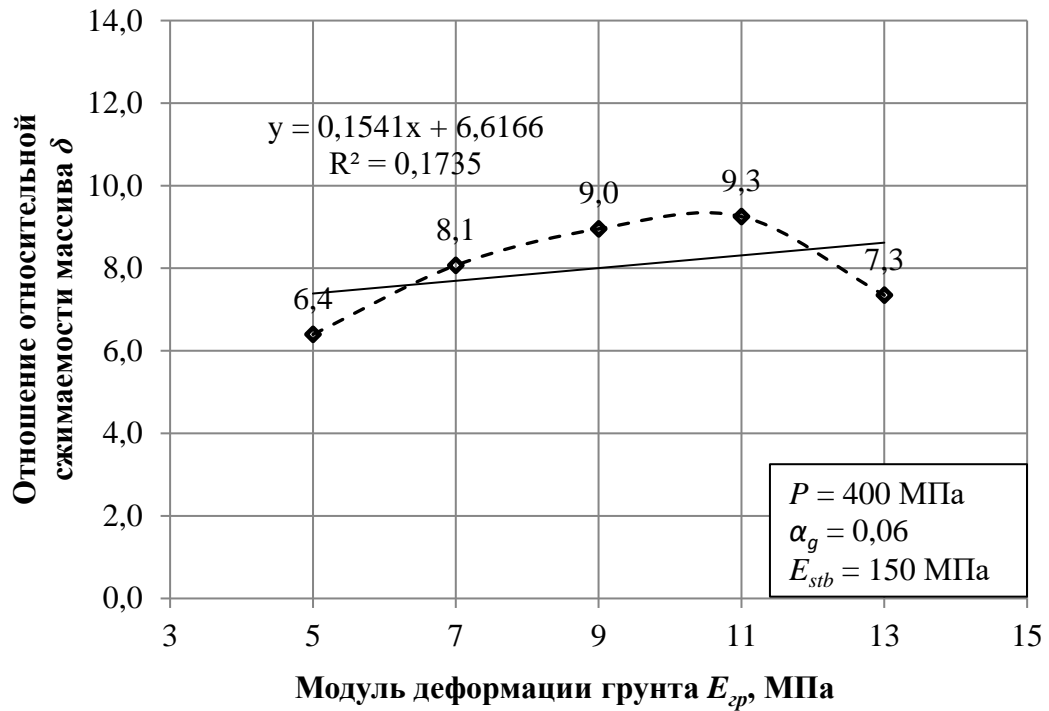


Рисунок 3.8 – График изменения отношения относительной сжимаемости от модуля деформации грунта (параметр I)

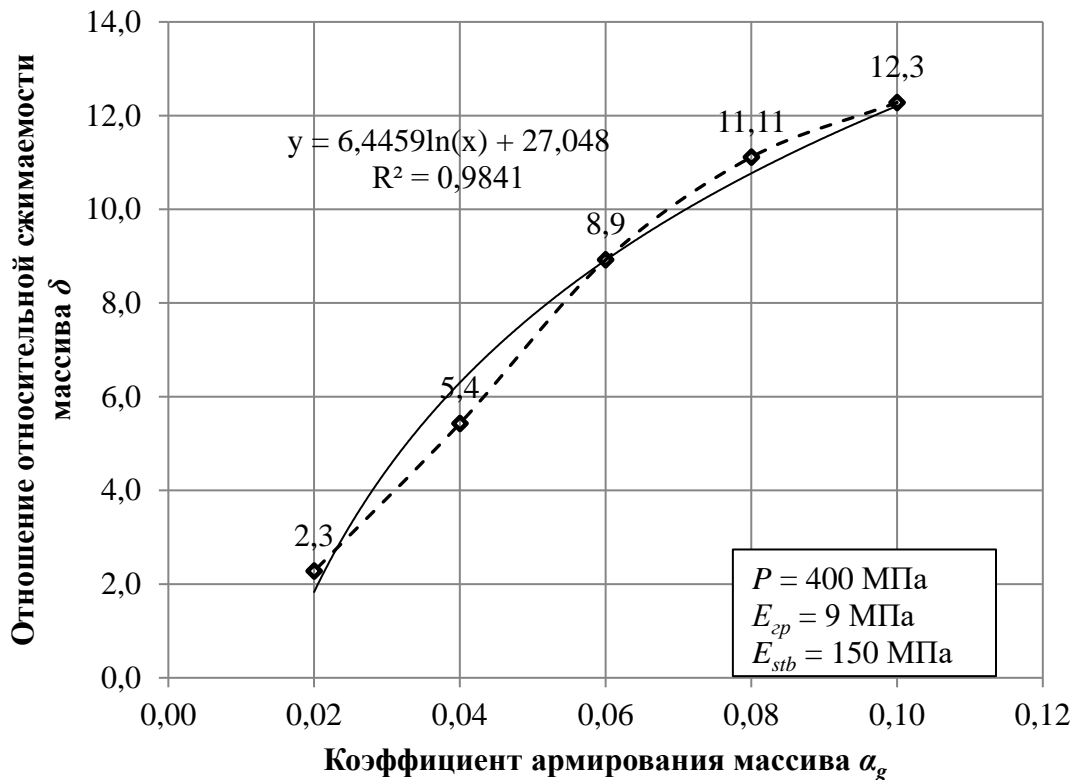


Рисунок 3.9 – График изменения отношения относительной сжимаемости от коэффициента армирования (параметр II)

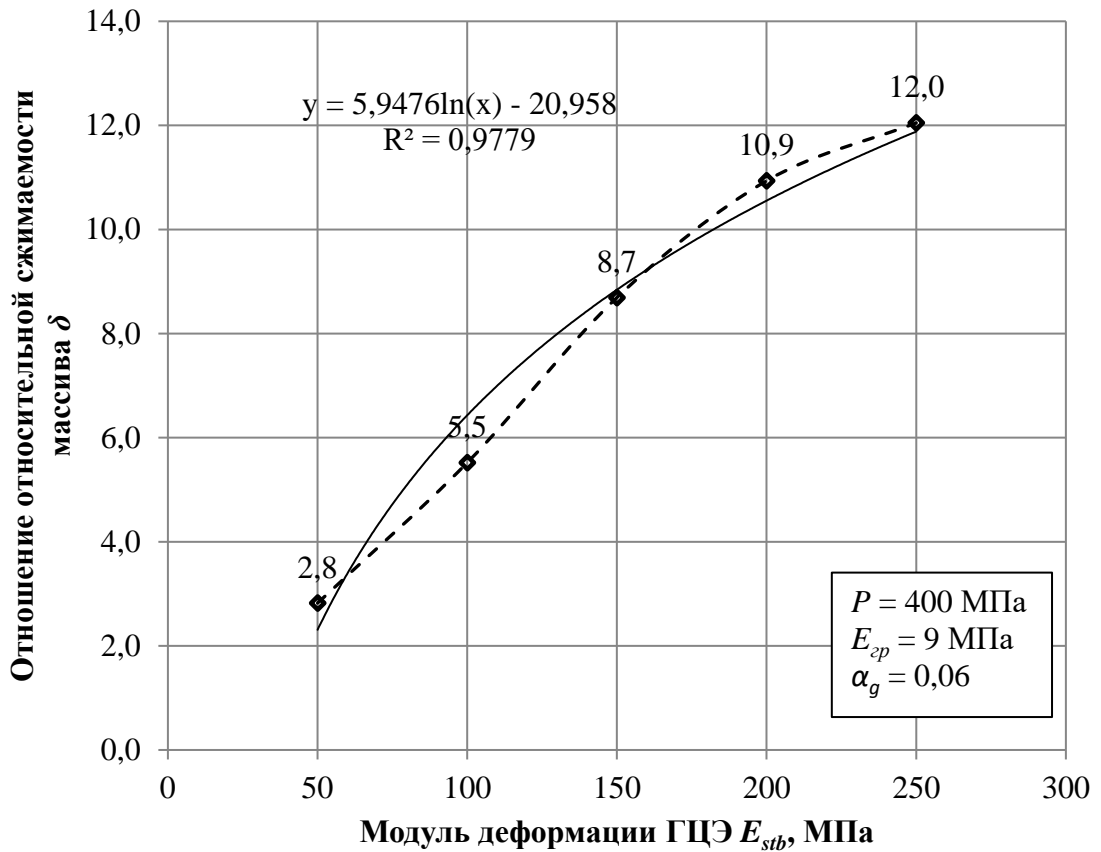


Рисунок 3.10 – График изменения отношения относительной сжимаемости от модуля деформации грунтоцементного элемента (параметр III)

Выявление значащих факторов и установление закономерностей реализовано в программно-вычислительном комплексе *STATISTICA* с использованием встроенного модуля *Design of Experiments*. Значимость факторов определяется по методике, описанной К. Хартманом, Э. Лецким и В. Шефером [134]. Для подтверждения гипотезы адекватности F -критерия (F) вычисляется значение критического F -критерия ($F_{кр}$), при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числах степеней свободы $\phi_1 = 4$ и $\phi_2 = 20$. В соответствии с таблицей 15.4 [134] составляет $F_{кр} = 2,87$. Если рассчитанное значение F более $F_{кр}$, то гипотеза об адекватности принимается, в противном случае отклоняется.

Значения F -критериев Фишера приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Значения критериев Фишера

Исследуемый фактор	Значения критерия Фишера	
	F	$F_{кр}$
Давление (P)	0,9948	2,87
Модуль деформации грунта (E_{gp})	1,7456	
Коэффициент армирования (α_g)	22,4990	
Модуль деформации грунтоцементного элемента (E_{stb})	19,2866	

В результате анализа полученных закономерностей было установлено, что основное влияние на эффективность усиления оказывают два из четырех исследуемых фактора. При проектировании особое внимание необходимо уделять коэффициенту армирования и модулю деформации грунтоцементного элемента. Влияние давления и модуля деформации грунта при прочих равных факторах является незначительным. Однако, данные факторы используются при назначении коэффициента армирования и модуля деформации грунтоцементных элементов, тем самым учитываются при проектировании. Поскольку коэффициент армирования и модуль деформации грунтоцементного элемента существенно влияют на эффективность усиления, требуется уделять особое внимание контролю качества работ при усилении.

Результаты моделирования позволили рассмотреть, уже затронутый во 2 разделе, вопрос совместной работы грунтоцементного элемента и окружающего грунтового массива (R_{inter}). На основании проведенного моделирования получены дополнительные значения и получена дополнительная зависимость сцепления окружающего грунтового массива и ГЦЭ от модуля деформации ГЦЭ, которая представлена в виде графика и приведена на рисунке 3.11. Данная зависимость подтверждает теоретические предпосылки об особенностях работы усиленного массива грунта, с учетом модуля деформации армирующих.

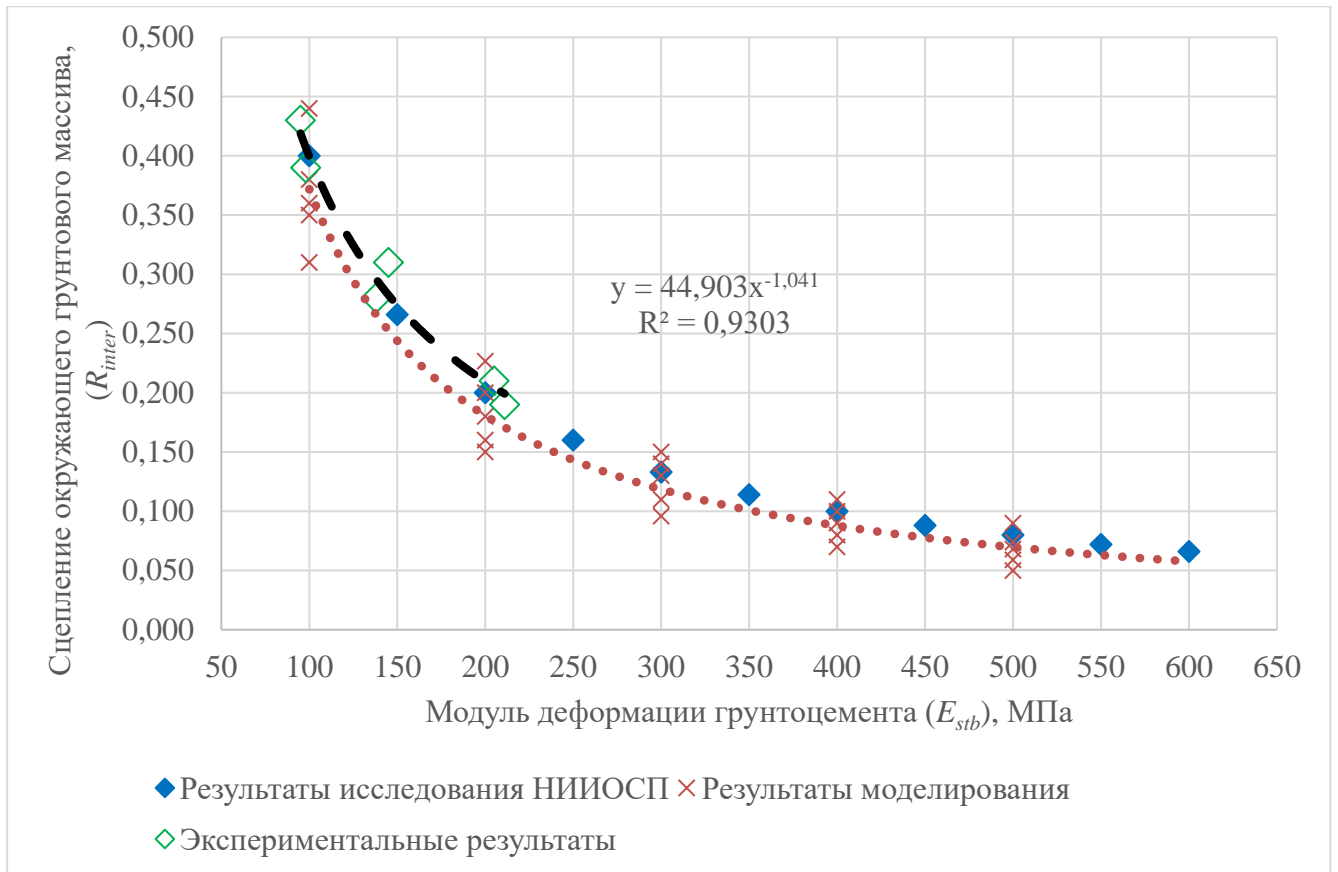


Рисунок 3.11 – Сцепление окружающего грунтового массива и ГЦЭ от модуля деформации ГЦЭ

Следует отметить, что полученные результаты исследования имеют качественное совпадение с результатами исследований НИИОСП им. Герсеванова [57, 88, 89, 103,]. При этом сцепление окружающего грунтового массива и ГЦЭ требуется учитывать согласно профильным нормативным документам [112, 113].

Полученные закономерности позволяют оценить диапазон ключевых параметров усиления основания армированием ГЦК для достижения требуемой осадки сооружения в зависимости от усиливаемых грунтов и нагрузки, передаваемой на основание, а также используются в методике проектирования, представленной в 4 разделе. Более детально влияние ключевых параметров на изменение деформационных характеристик усиленного грунтового массива оцениваются на *втором этапе* исследования.

3.3 Исследование параметров армирования на деформационные свойства усиленного массива (второй этап)

Результаты моделирования на *втором этапе* усиленного основания в программном комплексе показали, что большую часть напряжений от штампа воспринимают ГЦЭ. Перераспределение напряжений от штампа между ГЦЭ происходит в распределительном слое (подушке). Большую часть напряжений под штампом воспринимают ГЦЭ и ввиду более высокого значения модуля деформации (в сравнении со значениями модуля деформации окружающих грунтов) происходит дальнейшее перераспределение напряжений в нижележащие грунтовые слои.

Определение осадки усиленного массива определялось по контрольным точкам (по глубине), с использованием эпюр распределения вертикальных перемещений (рисунок 3.12).

Полученные значения вертикальных перемещений фрагментов армированных массивов были использованы для расчета модуля деформации, и с сопоставлением их со значениями, полученными во втором разделе.

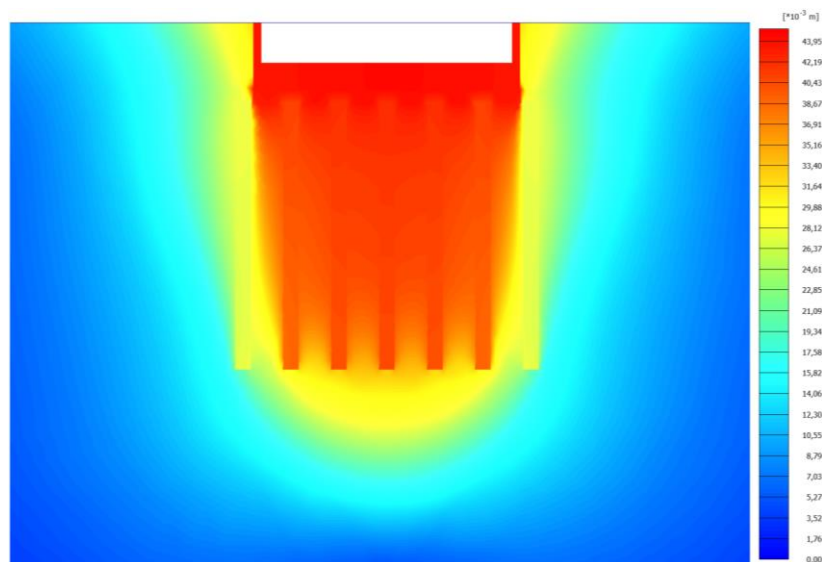


Рисунок 3.12 – Распределение вертикальных перемещений усиленного массива (в разрезе) под действием нагрузки

По результатам моделирования на *втором этапе* получены следующие характеристики, приведенные в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Характеристики по результатам моделирования на *втором этапе*

№	E_{cp} , МПа	α_g	E_{stb} , МПа	$E_{масс}$, МПа
1	5,0	0,10	50	101,7
2	7,0	0,08	100	59,6
3	9,0	0,06	150	42,7
4	11,0	0,04	200	32,6
5	13,0	0,02	250	26,4
6	5,0	0,08	150	38,3
7	7,0	0,06	200	31,2
8	9,0	0,04	250	25,9
9	11,0	0,02	50	215,8
10	13,0	0,10	100	139,5
11	5,0	0,06	250	27,2
12	7,0	0,04	50	104,7
13	9,0	0,02	100	46,0
14	11,0	0,10	150	75,2
15	13,0	0,08	200	55,9
16	5,0	0,04	100	30,5
17	7,0	0,02	150	24,8
18	9,0	0,10	200	54,4
19	11,0	0,08	250	43,2
20	13,0	0,06	50	346,4
21	5,0	0,02	200	20,8
22	7,0	0,10	250	45,5
23	9,0	0,08	50	199,5
24	11,0	0,06	100	83,3
25	13,0	0,04	150	51,5

Моделирование различных стадий нагружения армированных грунтовых массивов позволяет решить задачу по определению влияния параметров I, II и III на сжимаемость этого массива в различных грунтовых условиях. Определение степени влияния параметров I, II и III на полную осадку армированного массива и, как следствие, на его модуль деформации реализовано в программном комплексе *STATISTICA*. Для обработки результатов моделирования используется

соотношение модулей деформации окружающего грунта к модулю деформации ГЦЭ (η):

$$\eta = E_{gp} / E_{stb} \quad (3.1)$$

где η – соотношение модулей деформации армированного грунтового массива, E_{gp} – модуль деформации окружающего грунта (МПа), E_{stb} – модуль деформации ГЦЭ (МПа).

Данный параметр принят с использованием исследований О.А. Маковецкого [83]. Благодаря этому при обработке результатов, параметры I и III описываются параметром η . На рисунке 3.13 представлен график зависимости модуля деформации усиленного грунтового массива от соотношения модулей деформации.

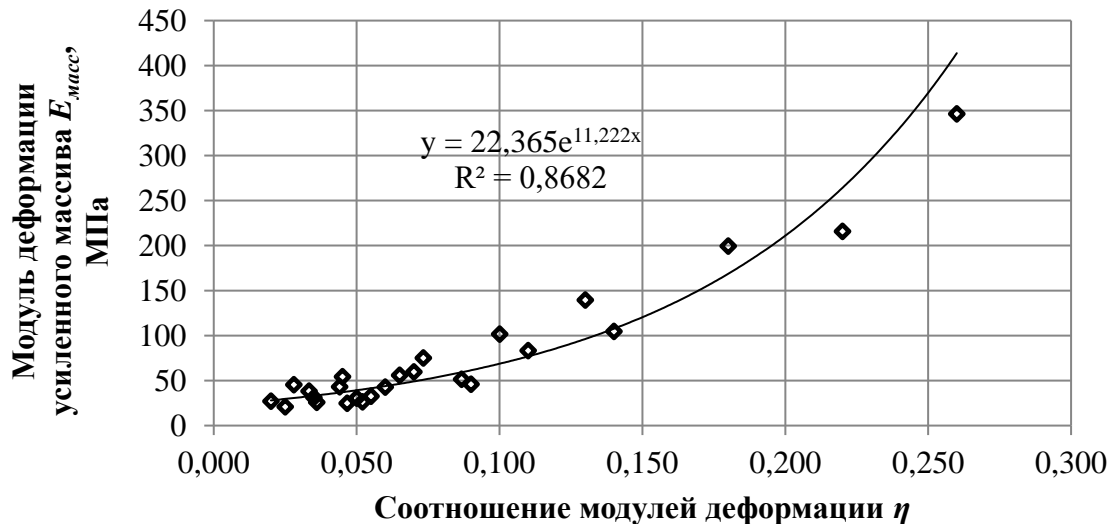


Рисунок 3.13 – График изменения модуля деформации усиленного грунтового массива от соотношения модулей деформации

После анализа и статистической обработки результатов численного моделирования на *втором этапе* были построены зависимости, отражающие влияние ключевых параметров армирования на изменение модуля деформации усиленного грунтового массива.

Графическое отображение результатов экспериментов приведено на рисунках 3.14–3.16.

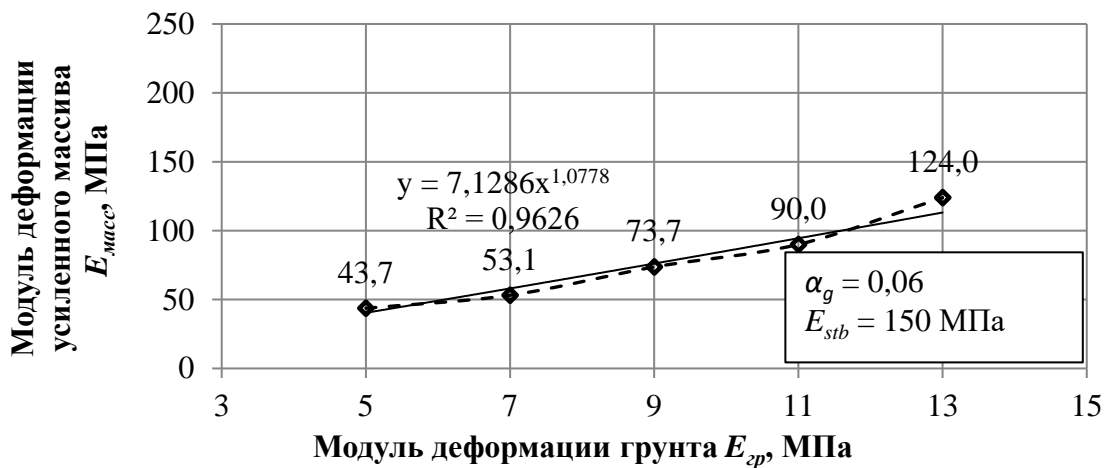


Рисунок 3.14 – График изменения модуля деформации усиленного грунтового массива от модуля деформации грунта

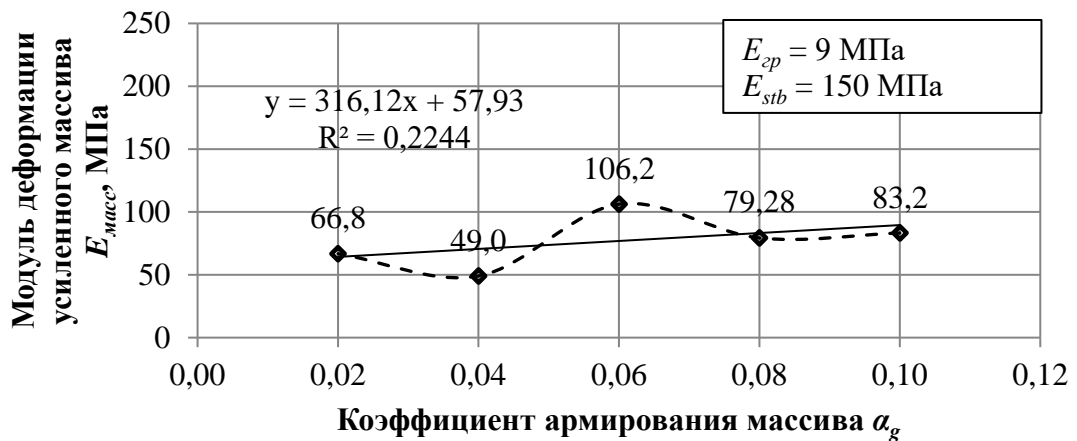


Рисунок 3.15 – График изменения модуля деформации усиленного грунтового массива от коэффициента армирования

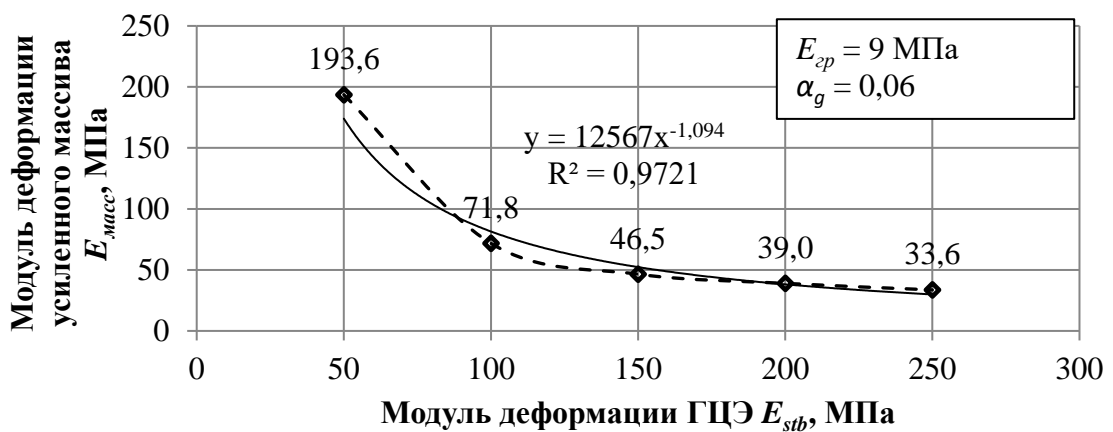


Рисунок 3.16 – График изменения модуля деформации усиленного грунтового массива от модуля деформации грунтоцементного элемента

Планирование исследования и статистическая обработка результатов выполнялись, аналогично *первому этапу* (см. п. 3.2).

После анализа и статистической обработки результатов численного моделирования была построена зависимость, отражающая влияние параметров грунтовой среды и параметров армирования на изменения деформационных характеристик усиленного грунтового массива. Данная зависимость представлена в графическом виде на рисунке 3.17. Полученная закономерность позволяет выполнять подбор параметров усиления для достижения требуемых характеристик сжимаемости армированного грунтового массива, а также используется в методике проектирования, представленной в 4 разделе.

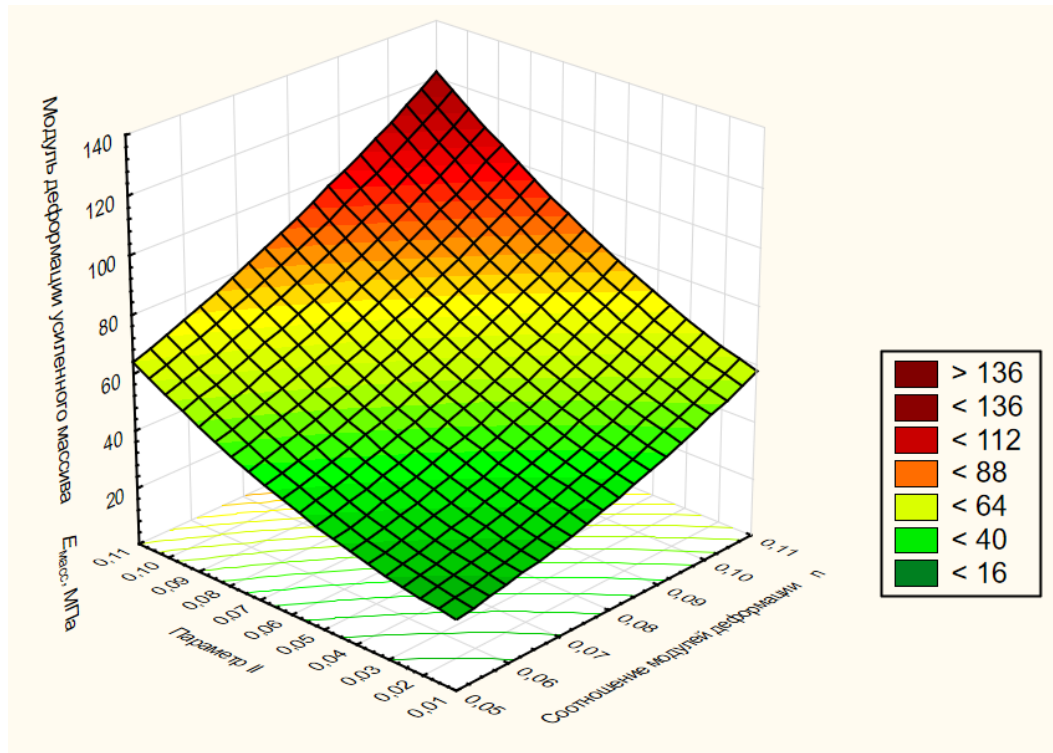


Рисунок 3.17 – Графическая зависимость, отражающая влияние параметров армирования I, II и II на модуль деформации усиленного массива

Аппроксимация массива полученных данных также позволила выявить функциональную зависимость влияния параметров грунтовой среды и параметров

армирования на изменения деформационных характеристик усиленного грунтового массива:

$$E_{\text{масс}} = A_1 - A_2\eta - A_3\alpha_g + A_4\eta^2 + A_5\eta\alpha_g + A_6\alpha_g^2, \quad (3.2)$$

где η – соотношение модулей деформации окружающего грунта к модулю деформации ГЦЭ;

α_g – коэффициент армирования грунтового массива;

$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ – коэффициенты, определенные при статистической обработке материалов численного моделирования, $A_1=23, A_2=237, A_3=129, A_4=4,7 \cdot 10^3, A_5=4,1 \cdot 10^3, A_6=2,6 \cdot 10^3$.

Применение полученной зависимости ограничивается областью проведенного исследования и допускается для определения модуля деформации усиленного массива при выполнении проектирования в глинистых грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е., при коэффициенте пористости от 0,70 до 1,0 д.е и коэффициенте армирования от 0,02 до 0,10.

3.4 Выводы по разделу 3

Проведенное исследование позволило получить данные и закономерности необходимые для дальнейшей разработки методики проектирования усиления основания армированием ГЦЭ, а именно:

1. Подтверждены теоретические предпосылки об особенностях работы усиленного массива грунта, с учетом модуля деформации армирующих грунтоцементных элементов.

2. Получены результаты исследования, имеющие качественное совпадение с результатами исследований других ученых в части сцепления окружающего грунтового массива и грунтоцементного элемента.

3. Установлены условия проскальзывания ГЦЭ по боковой поверхности на контакте с грунтом, приводящего к продавливанию подстилающих грунтов армирующими элементами.

4. Определена функциональная зависимость изменения модуля деформации, усиленного армированием вертикальными ГЦЭ грунтового массива от параметров армирования (коэффициент армирования от 0,02 до 0,10 и модуль деформации ГЦЭ от 50 до 250 МПа) и грунтовых условий (коэффициент пористости от 0,70 до 1,0 и показатель текучести более 0,5 д.е.), которая имеет вид:

$$E_{\text{масс}} = A_1 - A_2\eta - A_3\alpha_g + A_4\eta^2 + A_5\eta\alpha_g + A_6\alpha_g^2.$$

РАЗДЕЛ 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСИЛЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ ОСНОВАНИЙ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗГОТОВЛЕННЫМИ БУРОСМЕСИТЕЛЬНЫМ СПОСОБОМ

4.1 Особенности армирования грунтовых массивов буросмесительным способом

При выборе способов усиления грунтовых массивов, необходимо учитывать специфические свойства инженерно-геологических условий, учитывать требования технического задания. Также необходимо учитывать экономический фактор. Применение современных способов усиления грунтовых массивов, таких как буросмесительный, позволяет в соответствующих грунтовых условиях обеспечить требуемые характеристики от грунтового массива, и быть при этом конкурирующим с экономической точки зрения. Однако, существующая методика назначения проектных параметров грунтоцементных элементов обладает определенными обобщениями и допущениями. В результате чего, для обеспечения качества устраиваемых такими способами оснований, требуется применение современных высокоэффективных методов проектирования и контроля качества армированных грунтовых массивов на этапе реализации работ.

Начальным этапом проектирования усиления грунтов оснований является выбор способа усиления, который определяется из особенностей инженерно-геологических условий площадки строительства и конструктивных решений самого объекта строительства. Важным моментом является также оценка трудо- и материалозатрат предлагаемых способов усиления. Далее следует этап расчета характеристик грунтов с учетом выбранного способа усиления грунтового массива и конструктивных особенностей здания, что включает назначение

параметров усиления (шаг, диаметр, глубина и пр.). На заключительном этапе осуществляется контроль качества усиления.

Таким образом, повышение эффективности способа усиления грунтового массива, армированием грунтоцементными элементами, изготовленными буросмесительным способом, заключается:

- в разработке алгоритма проектирования усиления грунтового массива грунтоцементными элементами;

- в совершенствовании методики проектирования усиления глинистых оснований, армированных грунтоцементными элементами, изготовленными буросмесительным способом, в грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е.;

- в совершенствовании методики контроля деформационных характеристик глинистого основания при его усилении грунтоцементными элементами.

4.2 Проектирование усиления глинистого основания грунтоцементными элементами, изготовленными буросмесительным способом

Армирование грунтовых массивов грунтоцементными элементами буросмесительным способом представляет собой создание армированного грунтового массива, не имеющего конструктивной связи с фундаментом возводимого здания или сооружения. Формирование таких элементов осуществляется путем смешивания грунта со связующими при помощи смесителя, погружаемого в грунтовой массив. В результате чего образовывается армированный грунтовой массив с повышенными прочностными и деформационными характеристиками.

Графическое изображение алгоритма проектирования усиления грунтового массива, армированием грунтоцементными элементами, изготовленными буросмесительным способом представлено на рисунке 4.1.

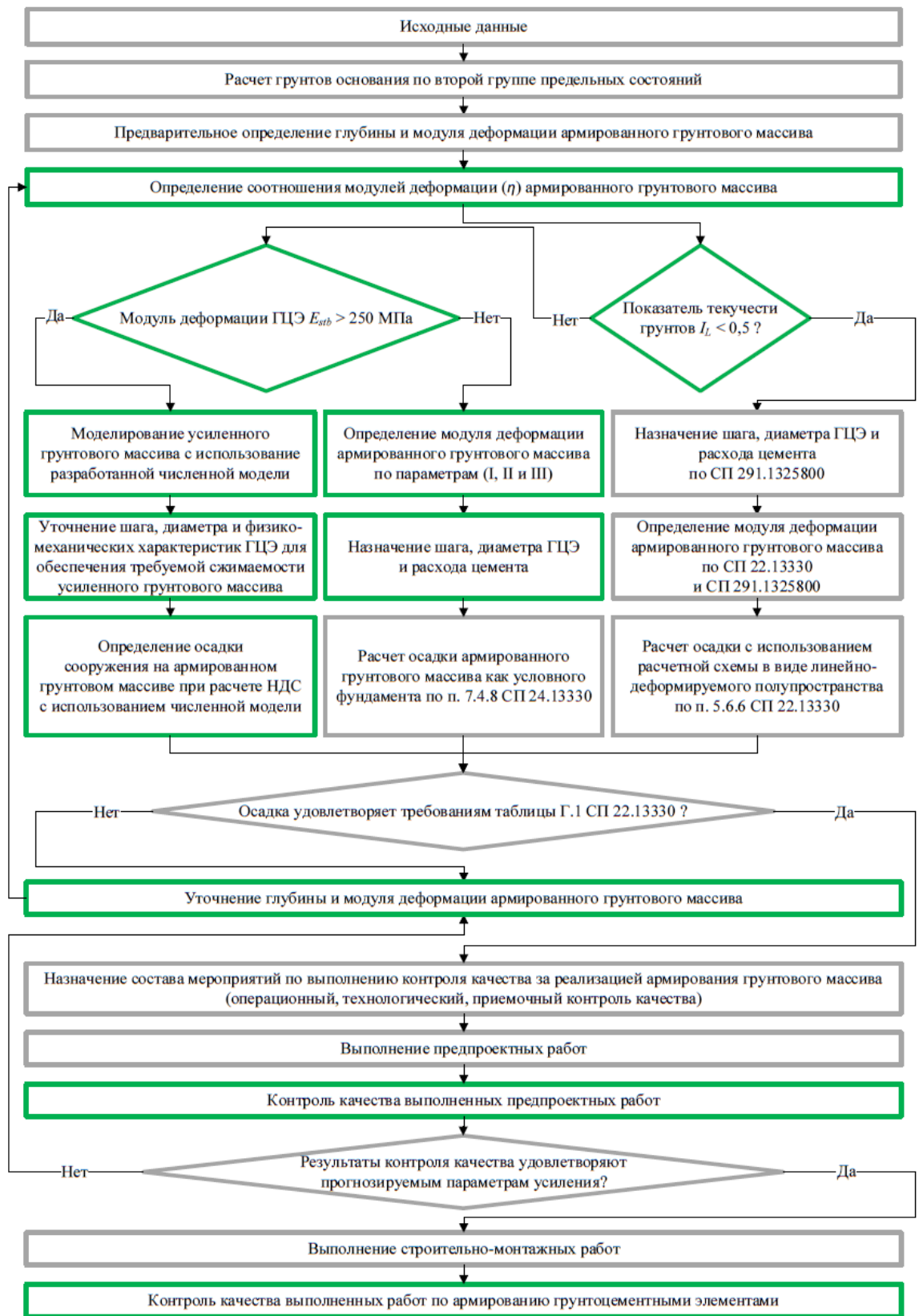


Рисунок 4.1 – Алгоритм проектирования усиления грунтов, армированием ГЦЭ

Исходными материалами для проектирования усиления являются инженерно-геологические данные площадки строительства и конструктивные решения проектируемого здания или сооружения. На основании этих данных выполняется анализ инженерно-геологических условий и предварительные расчеты армированного грунтового массива с определением требуемого модуля деформации усиленного массива и сжимаемой толщи. Модуль деформации должен обеспечить расчетную осадку здания или сооружения, которая не будет превышать предельно допустимых значений [112].

Далее с использованием эмпирических зависимостей в форме поверхности влияния (Раздел 3), определяется диаметр и шаг расстановки грунтоцементных элементов, обеспечивающие достижение проектного модуля деформации армированного грунтового массива. Диаметр и шаг определяются исходя из подобранного коэффициента армирования (α_g).

В зависимости от диаметра грунтоцементных элементов подбирается рабочий орган (смеситель), обеспечивающий создание грунтоцементных элементов требуемого диаметра.

В итоге определены такие параметры усиления, как шаг расстановки грунтоцементных элементов, глубина усиления (соответствующая сжимаемой толщ) и диаметр смесителя для устройства грунтоцементных элементов.

Далее с использованием данных, полученных в 3 разделе, в зависимости от соотношения модулей деформации (η) армированного основания, определяются требуемые прочностные и деформационные характеристики грунтоцемента в зависимости от вида грунтов и требуемых параметров усиливаемого грунтового массива. Здесь же, назначается расход цементного раствора для перемешивания грунтов основания и создания в грунтовом массиве вертикальных грунтоцементных элементов. Поскольку механические характеристики зависят от вида грунта, то используется закономерность изменения расхода цемента для

обеспечения прочности грунтоцемента от различных видов грунтов, согласно СП 291.1325800.

В случае если возникает проскальзывание ГЦЭ в грунтовом массиве, то следующим этапом выполняется расчет НДС по разработанной во 2 разделе численной модели. Задаются необходимые характеристики грунтового массива, включающего в себя: геометрические параметры усиливаемого грунтового массива и физико-механические характеристики грунтоцементных элементов и окружающего грунта. На основании выполненного расчета уточняется глубина сжимаемой толщи.

При выборе расхода цементного раствора необходимо соблюдать рецептуру (из расчета на 1 м³ изделия) с учетом обеспечения прочностных и деформационных характеристик усиленного основания. Водоцементное отношение (ВЦ) должно быть в интервале 0,5...0,7, согласно требованиям СП 291.1325800. Расход цементного раствора назначается в зависимости от требуемого модуля деформации (E_{stb}) и прочности грунтоцементного материала (R_{stb}). Допускается для уменьшения сроков схватывания цемента и для увеличения производительности работ применять химические добавки: силикат натрия и хлористый кальций. Достижение требуемых значений E_{stb} и R_{stb} следует контролировать путем проведения прямых испытаний на одноосное сжатие контрольных образцов грунтоцемента по ГОСТ 28570 [35] и ГОСТ 10180 [34], отобранных после проведения опытных работ на начальном этапе усиления, а также после выполнения полного объема работ по усилению основания. Определение модуля деформации (E_{stb}) и прочности (R_{stb}) грунтоцементного элемента необходимо для оценки качества выполненных работ по армированию грунтового массива. Полученные данные могут быть использованы для дальнейшей корректировки проектных параметров на этапе опытных работ.

Далее для армированного грунтового массива выполняется расчет по II группе предельных состояний.

$$S \leq S_{np} \quad (4.1)$$

$$\Delta S/L \leq S_{np}/L \quad (4.2)$$

где S – осадка здания или сооружения на усиленном основании (мм), S_{np} – предельное значение осадки здания или сооружения (мм) в соответствии с СП 22.13330 [112], $\Delta S/L$ – относительная разность осадок здания или сооружения, $\Delta S_{np}/L$ – предельное значение относительной разности осадок здания или сооружения в соответствии с СП 22.13330 [112].

Данный расчет с целью установления деформаций усиленного основания и определения осадки данного основания, в зависимости от исходных данных, выполняется:

- при расчете НДС по разработанной численной модели;
- по стандартной методике с использованием расчетной схемы в виде линейно-деформируемого полупространства методом послойного суммирования.
- расчет осадки армированного грунтового массива как условного фундамента с использованием зависимостей, полученных в 3 разделе.

4.2.1 Развитие методики проектирования на примере проектирования и реализации бурсмесительного способа

По усовершенствованной методике проектирования ниже приводится пример проектирования основания, армированного грунтоцементными элементами, бурсмесительным способом. В качестве примера рассматривается административное здание расположенное, по ул. Окружная в Калининском районе города Новосибирска.

В самом начале выполняется анализ исходных данных в части конфигурации здания и инженерно-геологических условий площадки объекта.

Предусматривается строительство здания научно-исследовательского института. Здание в монолитном железобетонном каркасе. Фундамент – монолитная железобетонная фундаментная плита размерами в плане 77,04x40,0 м,

толщина фундаментной плиты – 1,2 м. За относительную отметку 0,000 принята отметка чистого пола первого этажа, что соответствует абсолютной отметке 155,400 м. Отметка дна котлована 150,000 м. Среднее давление под подошвой фундаментной плиты составляет 300 кПа (нормативное значение).

В инженерно-геологическом отношении площадка строительства представлена глинистыми грунтами водонасыщенными. Всего на площадке выделено девять инженерно-геологических элементов (ИГЭ):

ИГЭ-3 - Супесь песчанистая твердая ненабухающая непросадочная незасоленная с прослоями суглинка. Грунты ИГЭ-3 имеют следующие характеристики: $\rho_s = 2,71 \text{ г/см}^3$, $\rho = 1,85 \text{ г/см}^3$, $w = 9,0 \%$, $\rho_d = 1,70 \text{ г/см}^3$, $e = 0,601 \text{ д.е.}$, $S_R = 0,41 \text{ д.е.}$, $I_p = 6,0 \%$, $I_L = 0,22 \text{ д.е.}$

ИГЭ-4 - Суглинок легкий пылеватый полутвердый ненабухающий непросадочный незасоленный с прослоями твердого. Грунты ИГЭ-4 имеют следующие характеристики: $\rho_s = 2,72 \text{ г/см}^3$, $\rho = 1,99 \text{ г/см}^3$, $w = 19,0 \%$, $\rho_d = 1,67 \text{ г/см}^3$, $e = 0,633 \text{ д.е.}$, $S_R = 0,81 \text{ д.е.}$, $I_p = 11,0 \%$, $I_L = 0,29 \text{ д.е.}$

ИГЭ-5 - Суглинок тяжелый пылеватый тугопластичный с примесью органического вещества незасоленный с прослоями полутвердого и глины. Грунты ИГЭ-5 имеют следующие характеристики: $\rho_s = 2,72 \text{ г/см}^3$, $\rho = 1,95 \text{ г/см}^3$, $w = 23,0 \%$, $\rho_d = 1,58 \text{ г/см}^3$, $e = 0,721 \text{ д.е.}$, $S_R = 0,87 \text{ д.е.}$, $I_p = 13,0 \%$, $I_L = 0,31 \text{ д.е.}$

ИГЭ-6. - Суглинок легкий пылеватый текучепластичный с примесью органического вещества незасоленный с прослоями мягкопластичного. Грунты ИГЭ-6 имеют следующие характеристики: $\rho_s = 2,72 \text{ г/см}^3$, $\rho = 1,97 \text{ г/см}^3$, $w = 26,0 \%$, $\rho_d = 1,56 \text{ г/см}^3$, $e = 0,753 \text{ д.е.}$, $S_R = 0,94 \text{ д.е.}$, $I_p = 10,0 \%$, $I_L = 0,89 \text{ д.е.}$

ИГЭ-7. - Суглинок тяжелый пылеватый мягкопластичный с примесью органического вещества незасоленный. Грунты ИГЭ-7 имеют следующие характеристики: $\rho_s = 2,72 \text{ г/см}^3$, $\rho = 1,95 \text{ г/см}^3$, $w = 28,0 \%$, $\rho_d = 1,52 \text{ г/см}^3$, $e = 0,785 \text{ д.е.}$, $S_R = 0,97 \text{ д.е.}$, $I_p = 14,0 \%$, $I_L = 0,73 \text{ д.е.}$

ИГЭ-8. - Супесь пылеватая пластичная незасоленная с прослоями текучей и песка мелкого. Грунты ИГЭ-8 имеют следующие характеристики: $\rho_s = 2,70$ г/см³, $\rho = 2,10$ г/см³, $w = 18,0$ %, $\rho_d = 1,78$ г/см³, $e = 0,545$ д.е., $S_R = 0,89$ д.е., $I_p = 4,0$ %, $I_L < 0,19$ д.е.

ИГЭ-9. - Песок мелкий водонасыщенный с прослоями песка средней крупности и супеси. Грунты ИГЭ-9 имеют следующие характеристики: $\rho_s = 2,66$ г/см³, $\rho = 2,0$ г/см³, $w = 25,0$ %, $\rho_d = 1,60$ г/см³, $e = 0,660$ д.е., $S_R = 1,00$ д.е.

ИГЭ-10. - Суглинок тяжелый пылеватый тугопластичный с примесью органического вещества с прослоями глины. Грунты ИГЭ-10 имеют следующие характеристики: $\rho_s = 2,72$ г/см³, $\rho = 2,01$ г/см³, $w = 25,0$ %, $\rho_d = 1,61$ г/см³, $e = 0,689$ д.е., $S_R = 0,99$ д.е., $I_p = 15,0$ %, $I_L < 0,48$ д.е.

ИГЭ-11. - Суглинок тяжелый пылеватый полутвердый с примесью органического вещества с прослоями глины и суглинка с прослоями гальки. Грунты ИГЭ-11 имеют следующие характеристики: $\rho_s = 2,72$ г/см³, $\rho = 2,02$ г/см³, $w = 23,0$ %, $\rho_d = 1,65$ г/см³, $e = 0,659$ д.е., $S_R = 0,95$ д.е., $I_p = 16,0$ %, $I_L < 0,36$ д.е.

В таблице 4.1 приведены физико-механические характеристик грунтов, в основании здания.

Таблица 4.1 – Физико-механические характеристики грунтов основания

Наименование характеристик		ИГЭ-3	ИГЭ-4	ИГЭ-5	ИГЭ-6	ИГЭ-7	ИГЭ-8	ИГЭ-9	ИГЭ-10	ИГЭ-11	
Плотность грунта при природной влажности, г/см ³	α	0,85	1,85	1,85	1,97	1,95	1,94	2,09	2,00	2,01	2,01
		0,95	1,85	1,85	1,96	1,94	1,93	2,07	1,98	2,00	1,99
Плотность грунта в водонасыщенном состоянии, г/см ³	α	0,85	2,07	2,07	-	-	-	-	-	-	-
		0,95	2,06	2,06	-	-	-	-	-	-	-
Удельный вес грунта при природной влажности, кН/м ³	α	0,85	18,13	18,13	19,31	19,13	18,97	20,44	19,60	19,66	19,66
		0,95	18,10	18,10	19,21	19,05	18,88	20,32	19,40	19,61	19,54
Удельный вес грунта в водонасыщенном состоянии, кН/м ³	α	0,85	20,24	20,24	-	-	-	-	-	-	-
		0,95	20,21	20,21	-	-	-	-	-	-	-
Модуль деформации при природной влажности, МПа		19,5	9,2	5,9	19,5	9,2	4,5	5,4	8,3	-	
Модуль деформации в водонасыщенном состоянии, МПа		15,1	-	-	15,1	-	-	-	-	-	
Угол внутреннего трения при природной влажности, градус	α	0,85	25	25	20	14	16	21	29	20	20
		0,95	23	23	19	13	15	20	28	19	19

Окончание таблицы 4.1.

Наименование характеристик		ИГЭ-3	ИГЭ-4	ИГЭ-5	ИГЭ-6	ИГЭ-7	ИГЭ-8	ИГЭ-9	ИГЭ-10	ИГЭ-11	
Угол внутреннего трения в водонасыщенном состоянии, градус	α	0,85	23	23	-	-	-	-	-	-	
		0,95	22	22	-	-	-	-	-	-	
Удельное сцепление при природной влажности, кПа	α	0,85	15	15	28	15	23	8	2	34	35
		0,95	14	14	27	14	22	7	1	33	33
Удельное сцепление в водонасыщенном состоянии, кПа	α	0,85	11	11	-	-	-	-	-	-	
		0,95	10	10	-	-	-	-	-	-	

Инженерно-геологический разрез площадки строительства административного здания приведен на рисунке 4.2.

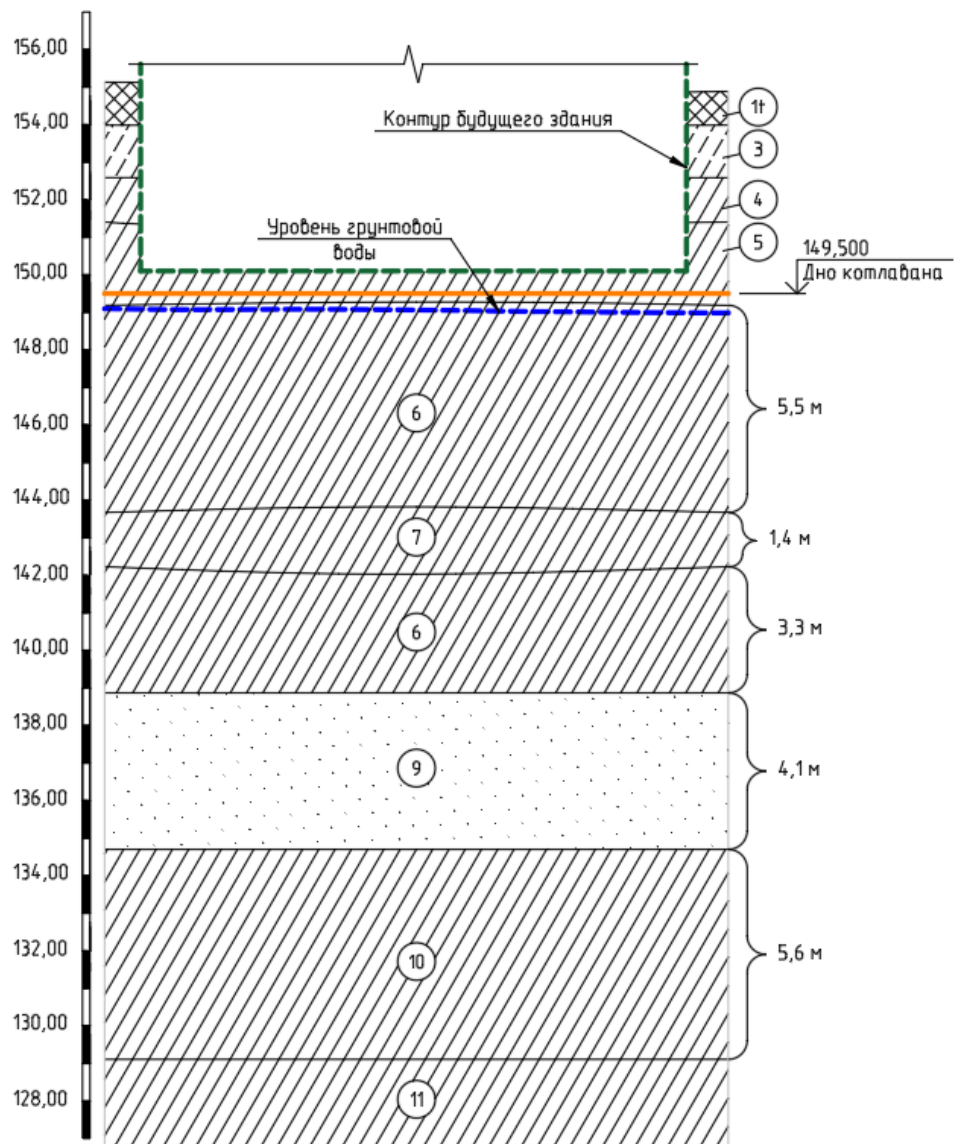


Рисунок 4.2 – Инженерно-геологический разрез

Конфигурация фундамента административного здания представлена на рисунке 4.3.

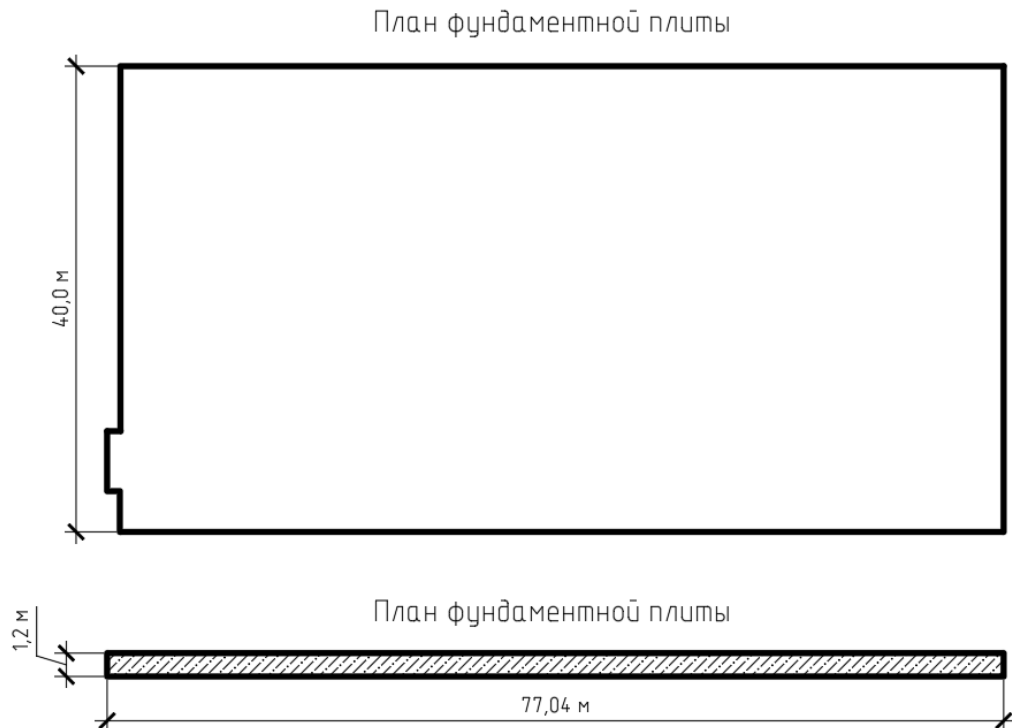


Рисунок 4.3 – Конфигурация фундамента

Прежде всего выполняется расчет по II группе предельных состояний. В таблице 4.2 приведены результаты определения расчетного сопротивления грунтов, залегающих в основании фундамента (ИГЭ-6).

Таблица 4.2 – Результаты определения расчетного сопротивления грунтов

Слой	φ_{II} , град	C_{II} , кПа	Коэффициенты			b, м	k_z	d_1 , м	γ_{II} , кН/м ³	γ'_{II} , кН/м ³	R, кПа
			M_γ	M_q	M_c						
ИГЭ-6	13	27	0,84	4,37	6,90	40,0	0,40	6,42	19,2	19,2	1377

На основании таблицы 4.2, видно, что значение расчетного сопротивления грунтов основания фундамента административного здания составляет 1377 кПа, что выше нормативного значения давления под подошвой фундамента. Следовательно, необходимость в проверке несущей способности грунтов отсутствует.

На следующем этапе выполняется расчет осадки грунтов основания. Осадка основания определяется в соответствии с требованиями СП 22.13330 [112] с использованием расчетной схемы в виде линейно-деформируемого полупространства методом послойного суммирования. Результаты определения осадки основания фундамента административного здания представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты определения осадки основания фундаментов административного здания

Абс. отм., м	z_i , м	$z+d$, м	γ_g кН/м ³	E_i , МПа	$\sigma_{zg i}$, кПа	$\Sigma\sigma_{zg i}$, кПа	ζ	α	$\sigma_{zp i}$, кПа	S , мм
149,500	0	5,6	19,7	19,5	110,32	106,40		1,00	300,00	6,2
149,000	0,5	6,1	19,7	19,5	9,85	116,25	0,03	1,00	300,00	6,2
148,500	1	6,6	19,7	19,5	9,85	126,10	0,05	1,00	299,98	6,2
148,000	1,5	7,1	19,7	19,5	9,85	135,95	0,08	1,00	299,94	6,2
147,500	2	7,6	19,7	19,5	9,85	145,80	0,10	1,00	299,87	6,2
147,000	2,5	8,1	19,7	19,5	9,85	155,65	0,13	1,00	299,74	6,1
146,500	3	8,6	19,7	19,5	9,85	165,50	0,15	1,00	299,55	6,1
146,000	3,5	9,1	19,7	19,5	9,85	175,35	0,18	1,00	299,29	6,1
145,500	4	9,6	19,7	19,5	9,85	185,20	0,20	1,00	298,96	6,1
145,000	4,5	10,1	19,7	19,5	9,85	195,05	0,23	1,00	298,53	6,1
144,500	5	10,6	19,7	19,5	9,85	204,90	0,25	0,99	298,01	6,1
144,000	5,5	11,1	19,7	19,5	9,85	214,75	0,28	0,99	297,39	6,1
143,500	6	11,6	19,5	9,2	9,75	224,50	0,30	0,99	296,66	12,9
143,000	6,5	12,1	19,5	9,2	9,75	234,25	0,33	0,99	295,83	12,9
142,500	7	12,6	19,5	9,2	9,75	244,00	0,35	0,98	294,88	12,8
142,000	7,5	13,1	19,7	19,5	9,85	253,85	0,38	0,98	293,82	6,0
141,500	8	13,6	19,7	19,5	9,85	263,70	0,40	0,98	292,64	6,0
141,000	8,5	14,1	19,7	19,5	9,85	273,55	0,43	0,97	291,35	6,0
140,500	9	14,6	19,7	19,5	9,85	283,40	0,45	0,97	289,95	5,9
140,000	9,5	15,1	19,7	19,5	9,85	293,25	0,48	0,96	288,43	5,9
139,500	10	15,6	19,7	19,5	9,85	303,10	0,50	0,96	286,81	5,9
139,000	10,5	16,1	19,7	19,5	9,85	312,95	0,53	0,95	285,09	5,8
138,500	11	16,6	20	5,4	10,00	322,95	0,55	0,94	283,27	21,0
138,000	11,5	17,1	20	5,4	10,00	332,95	0,58	0,94	281,35	20,8
137,500	12	17,6	20	5,4	10,00	342,95	0,60	0,93	279,34	20,7
137,000	12,5	18,1	20	5,4	10,00	352,95	0,63	0,92	277,24	20,5
136,500	13	18,6	20	5,4	10,00	362,95	0,65	0,92	275,07	20,4
136,000	13,5	19,1	20	5,4	10,00	372,95	0,68	0,91	272,82	20,2
135,500	14	19,6	20	5,4	10,00	382,95	0,70	0,90	270,50	20,0
135,000	14,5	20,1	20	5,4	10,00	392,95	0,73	0,89	268,12	19,9
134,500	15	20,6	20,1	8,3	10,05	403,00	0,75	0,89	265,68	12,8

Окончание таблицы 4.3.

Абс. отм., м	z_i , м	$z+d$, м	γ_g кН/м ³	E_i , МПа	$\sigma_{zg i}$, кПа	$\Sigma\sigma_{zg i}$, кПа	ζ	α	$\sigma_{zp i}$, кПа	S , мм
134,000	15,5	21,1	20,1	8,3	10,05	413,05	0,78	0,88	263,19	12,7
133,500	16	21,6	20,1	8,3	10,05	423,10	0,80	0,87	260,65	12,6
133,000	16,5	22,1	20,1	8,3	10,05	433,15	0,83	0,86	258,07	12,4
132,500	17	22,6	20,1	8,3	10,05	443,20	0,85	0,85	255,45	12,3
132,000	17,5	23,1	20,1	8,3	10,05	453,25	0,88	0,84	252,80	12,2
131,500	18	23,6	20,1	8,3	10,05	463,30	0,90	0,83	250,12	12,1
131,000	18,5	24,1	20,1	8,3	10,05	473,35	0,93	0,82	247,42	11,9
130,500	19	24,6	20,1	8,3	10,05	483,40	0,95	0,82	244,70	11,8
130,000	19,5	25,1	20,1	8,3	10,05	493,45	0,98	0,81	0,00	0,0
Общая осадка:									428,1	

Анализируя таблицу 4.3, видно, что глубина сжимаемой толщи составляет 19 м, а общая осадка – 428,1 мм. Согласно требованиям нормативных документов для данного типа здания предельная осадка не должна превышать 15 см, предельная относительная разность осадок не должна превышать 0,003. Следовательно, требуется усиление.

Далее на основе анализа грунтовых условий определяются возможные параметры усиления – глубина усиления (сжимаемая толща), модуль деформации армированного грунтового массива.

Сжимаемая толща основания фундаментов административного здания составляет 19 м. В нее попадают четыре инженерно-геологических элемента:

- 1) ИГЭ-6 – Суглинок легкий пылеватый текучепластичный с примесью органического вещества незасоленный с прослоями мягкопластичного.
- 2) ИГЭ-7 – Суглинок тяжелый пылеватый мягкопластичный с примесью органического вещества незасоленный
- 3) ИГЭ-9 – Песок мелкий водонасыщенный с прослоями песка средней крупности и супеси
- 4) ИГЭ-10 – Суглинок тяжелый пылеватый тугопластичный с примесью органического вещества с прослоями глины

Анализ физико-механических характеристик данных грунтов и результатов расчета осадки основания позволяет сделать вывод, что на деформативность основания в большей степени влияют грунты ИГЭ-7, ИГЭ-9 и ИГЭ-10. Вертикальная осадка расчетных слоев ИГЭ-6 в два раза меньше, чем тот же показатель у нижележащих грунтов.

Таким образом, при проектировании усиления необходимо повысить деформационные характеристики основания на глубину, соответствующую мощности ИГЭ-6, ИГЭ-7, ИГЭ-9 и ИГЭ-10, 19,0 м.

Далее с использованием данных, полученных в 3 разделе, определяется соотношение модуля деформации (η) армированного основания по формуле (3.1):

$$\eta = E_{zp} / E_{stb}$$

С учетом инженерно-геологический условий площадки определение осадки требуется выполнять по расчету армированного грунтового массива как условного фундамента в соответствии с требованиями СП 24.13330, т.к. показатель текучести грунтов $I_L > 0,5$ д.е. и подбираемый модуль деформации грунтоцементного элемента $E_{stb} = 200$ МПа. Для определения модуля деформации армированного грунтового массива используются зависимости параметров I, II и III (рисунок 3.17, Раздел 3) или определяется по формуле 3.1.

$$23 - 237 \cdot 0,03 - 129 \cdot 0,09 + 4,7 \cdot 10^3 \cdot 0,03^2 + 4,1 \cdot 10^3 \cdot 0,03 \cdot 0,09 + \\ + 2,6 \cdot 10^3 \cdot 0,09^2 = 40,6 \text{ МПа}$$

$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ – коэффициенты, определенные при статистической обработке материалов численного моделирования, $A_1=23, A_2=237, A_3=129, A_4=4,7 \cdot 10^3, A_5=4,1 \cdot 10^3, A_6=2,6 \cdot 10^3$.

Далее вычисляем шаг ГЦЭ в зависимости от диаметра ГЦЭ по формуле:

$$l = \sqrt{\frac{\pi \cdot d^2}{\alpha_g \cdot 2\sqrt{3}}} \quad (4.4)$$

где l – шаг ГЦЭ (м), d – диаметр ГЦЭ (м), α_g – коэффициент армирования грунтового массива.

Далее назначается шаг (полученный шаг (l) по формуле 4.4 округляется в меньшую сторону кратным 0,1 м), диаметр ГЦЭ (d) и расход цемента.

Шаг расстановки ГЦЭ

ГЦЭ рекомендуется при плитном типе фундамента располагать в плане с равным шагом l в шахматном порядке равным 2,2 м (рисунок 4.4).

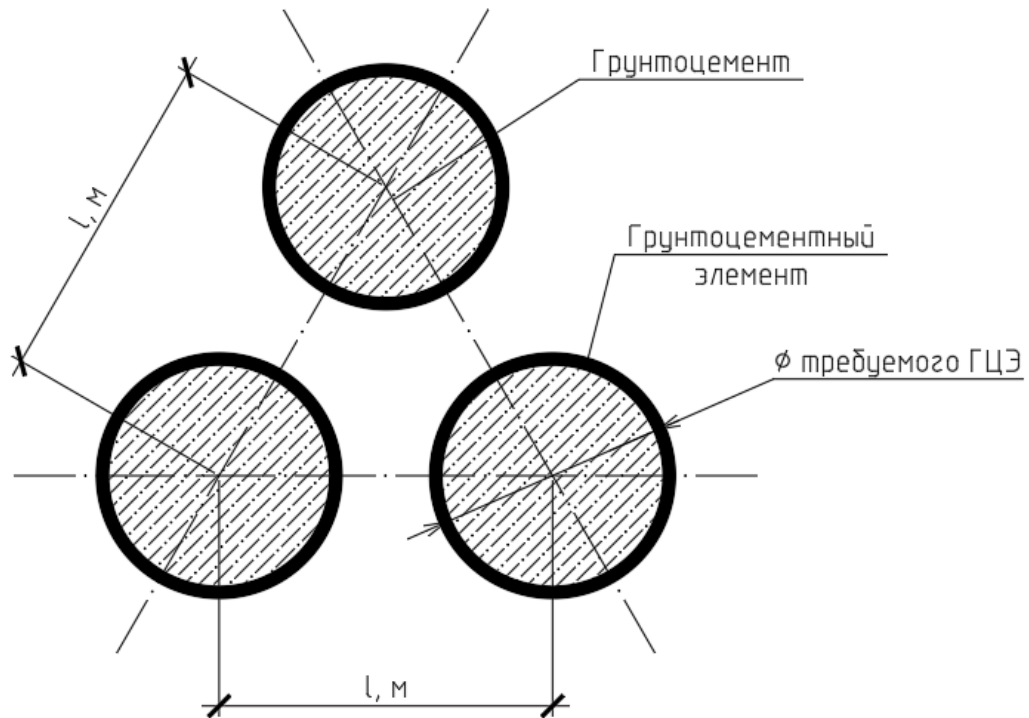


Рисунок 4.4 – Схематичный план расположения ГЦЭ

Назначаемый шаг расстановки ГЦЭ проверяется в ходе опытных работ путем определения деформационных параметров усиленного массива и при необходимости корректируется.

Диаметр ГЦЭ.

Диаметр ГЦЭ назначается $d = 700$ мм.

Глубина ГЦЭ.

Схематичный разрез ГЦЭ при усилении грунтов представлен на рисунке 4.5.

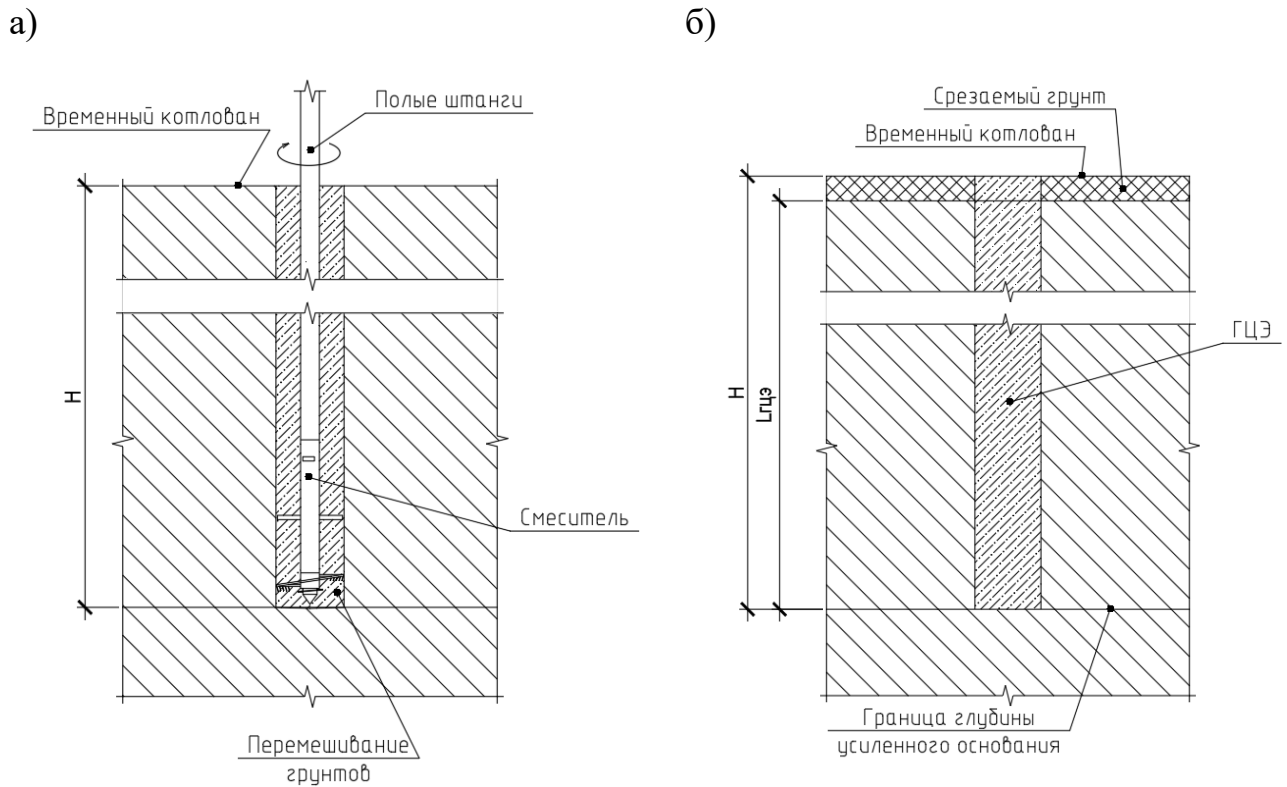


Рисунок 4.5 – Схематичный разрез ГЦЭ:

a – при его изготовлении; *б* – после его изготовления

Материал связующего и его расход для изготовления ГЦЭ.

При производстве работ по армированию грунтового массива необходимо соблюдать следующую рецептуру изготовления грунтоцемента (из расчета на 1 м³) с учетом обеспечения прочностных и деформационных характеристик армированного грунтового массива.

Сцепление материала ГЦЭ c_{stb} определено, с использованием положений п. 5.1.10 СП 291.1325800.

Угол внутреннего трения материала ГЦЭ φ_{stb} определен по таблице 5.2 п. 5.1.10 СП 291.1325800 [115].

Результат расчета осадки основания фундамента административного здания показал, что осадка армированного грунтового массива составит 13,8 см, относительная разность осадок составит 0,001...0,0012, что меньше предельно допустимой осадки – 15,0 см, и предельно допустимой разности осадок 0,003.

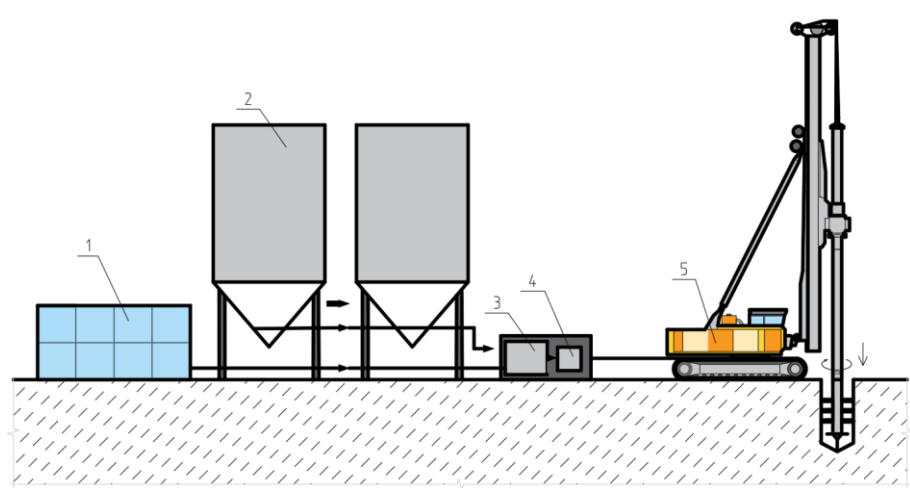
Окончательные параметры усиления принимаются следующими: мощность усиления - 19 м; шаг расстановки грунтоцементных элементов - 2,1 м; тип и диаметр рабочего органа - смеситель с лопастями диаметром 700 мм; общее количество скважин - 1 112 шт.; усиливаемые грунты - ИГЭ-6, ИГЭ-7, ИГЭ-9 и ИГЭ-10; материал, применяемый при смешивании грунтов - портландцемент (ПЦ 500), с водоцементным отношением 0,7; расчетная осадка - 14,4 см.

4.3 Оборудование для армирования грунтовых массивов буросмесительным способом

Сущность процесса устройства армированного грунтового массива при помощи буросмесительного способа состоит в измельчении грунта без извлечения его на поверхность путём погружения навесного оборудования (штанги, растворные рукава, смеситель) и перемешивания грунта с вяжущим, подаваемым через навесное оборудование. При вращении в горизонтальной плоскости смесителя выполняется перемешивание грунта с вяжущим. Подача вяжущего осуществляется как при погружении смесителя, так и при поднятии. В результате чего формируется грунтоцементный элемент с заданными прочностными и деформационными характеристиками, регулируемые содержанием вяжущего (цемента). Согласно СП 291.1325800 [115], данный способ изготовления грунтоцементных элементов допускается применять в любых грунтах (глинистых, песчаных, лессовых, илах и т.д.), за исключением сапропелей. Возможность применения в специфических грунтовых условиях устанавливается предварительными лабораторными исследованиями.

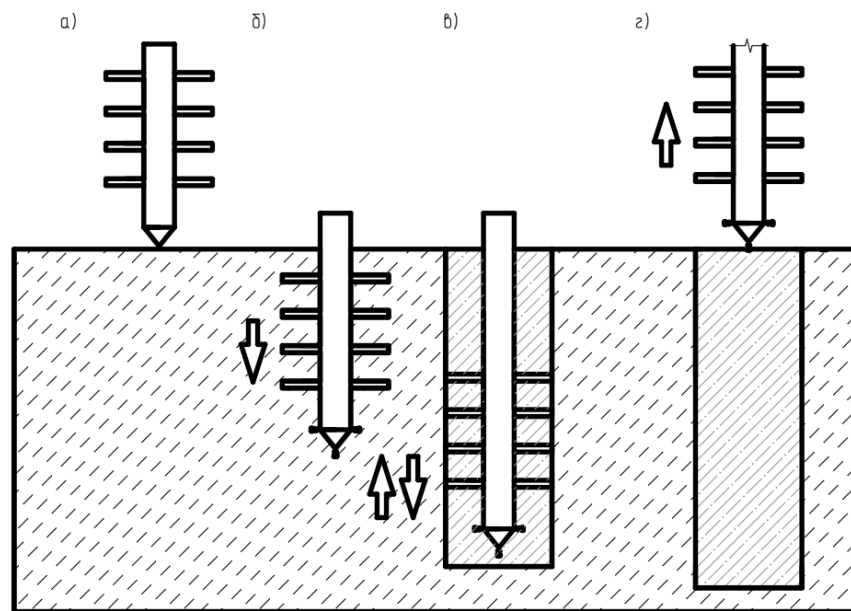
Технологическая схема армирования грунтового массива буросмесительным способом представлена на рисунке 4.6.

а)



1 – ёмкость для воды; 2 – ёмкости для вяжущего и добавок;
3 – растворосмеситель; 4 – насос; 5 – буровая установка

б)



а – установка бурового оборудования в рабочее положение;

б – погружение в грунт смесителя до проектной отметки вращательным бурением и нагнетание цементного раствора через смеситель для смешивания с грунтом; *в* – повторные циклы погружения и извлечения смесителя;

г – извлечение смесителя на поверхность

Рисунок 4.6 – Схема устройства усиленных грунтовых оснований

При усилении грунтов основания бурсмесительным способом в качестве навесного оборудования используется специальный рабочий орган (смеситель),

рисунок 4.7, обеспечивающий изготовление грунтоцементных элементов необходимого диаметра.

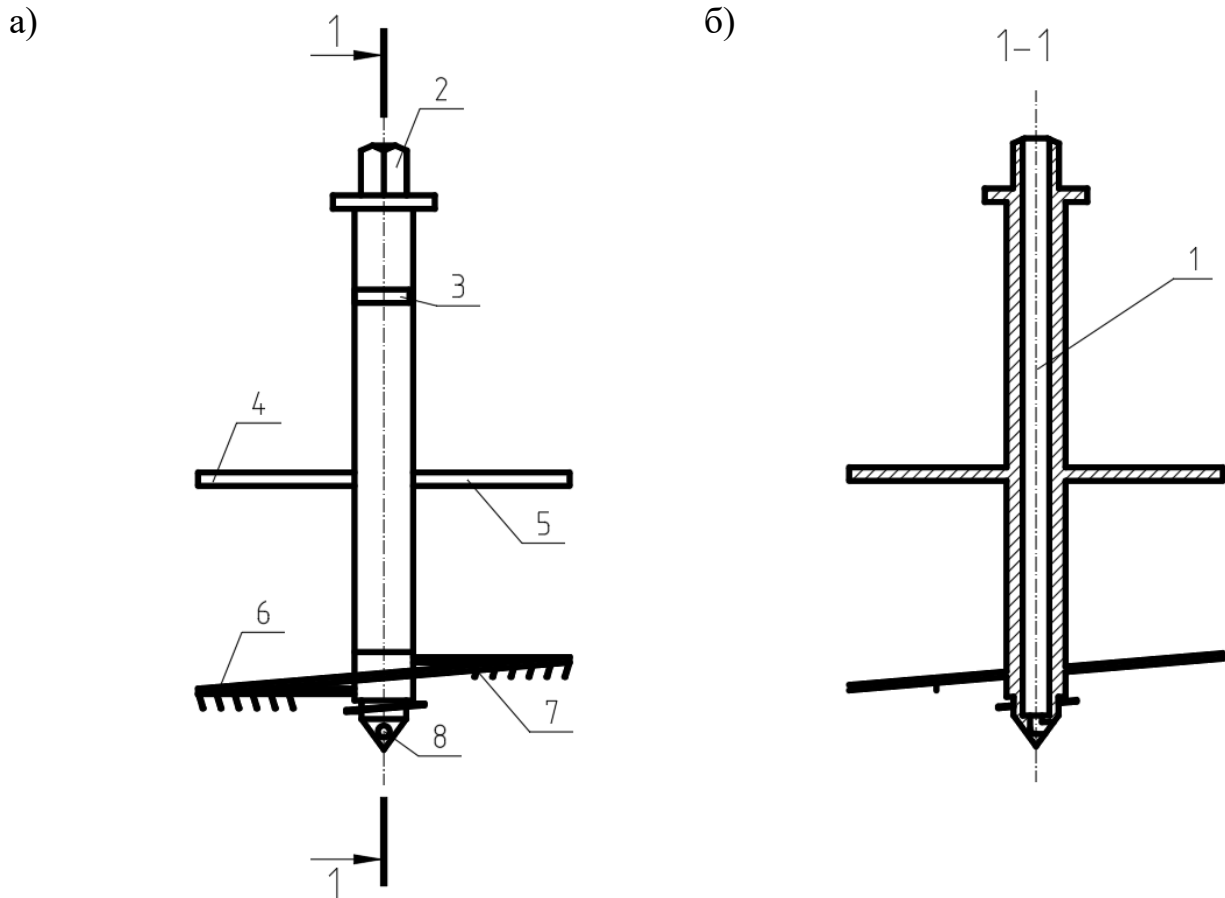


Рисунок 4.7 – Конструкция смесителя (*а* – общий вид; *б* – продольный разрез):

1 – полый вал; 2 – хвостовик; 3–7 – смешивающая лопасть; 8 – выходное отверстие для подачи раствора

Для устройства грунтоцементных элементов используется смеситель, состоящий из полый штанги с выходным отверстием, с перпендикулярно расположенными к штанге лопастями. Отверстие, расположенное на конце штанги, используется для подачи раствора. Лопасты выполняют перемешивание грунта при вращении штанг, обеспечивая однородное смешивание грунта с раствором.

Раствор под давлением поступает через полый вал по мере погружения и извлечения смесителя из грунтового массива.

4.4 Контроль качества устройства глинистых оснований, армированных грунтоцементными элементами

Важным вопросом при устройстве армированных оснований является достоверная оценка качества усиления. Основные вопросы контроля качества устройства грунтоцементных элементов отражены в СП 291.1325800 [115] и СП 45.13330 [116]. Основным критерием, согласно нормативным документам, является достижение проектной прочности на одноосное сжатие материала грунтоцементного элемента, его геометрические характеристики и однородность материала. Для обеспечения этого критерия требуется в момент производства работ осуществлять операционный контроль, который включает в себя проверку:

- водоцементного отношения и расхода вяжущего;
- давления и скорости его подачи;
- скорости вращения и количества погружений и поднятий смесителя (для буросмесительного способа);
- крутящего момента и силы вдавливания;
- фактического расхода раствора в объеме образованного грунтоцементного элемента.

Исследования, проводимые в области контроля качества устройства грунтоцементных элементов, показывают, что контроль геометрических параметров при буросмесительном способе бывает затруднен [85]. Например, это осложнено при работах в обводненных неустойчивых грунтах, если речь идёт про откопку грунтоцементных элементов, для замера их диаметров. И для более качественной оценки, как отмечалось ранее, необходимы опытные работы с целью уточнения запроектированных параметров грунтоцементных элементов.

Основной акцент при контроле качества делается на сами грунтоцементные элементы, при этом важной деформационной характеристикой усиленного основания является модуль деформации усиленного массива грунта, который

может контролироваться с использованием методик ГОСТ 20276.1 и ГОСТ 5686, по свайным и штамповым испытаниям. Однако, согласно данным нормативных документов, максимально регламентированная площадь плоского штампа для проведения подобных испытаний составляет 5000 см². В свою очередь, грунтоцементные элементы, выполняемые по описанным выше способам, имеют значения диаметров от 0,5 до 1,5 м и более. Если проводить штамповые испытания для данных диаметров грунтоцементных элементов, то фактически получаем несущую способность грунтоцементного элемента по грунту и её сжимаемость, а не модуль деформации усиленного грунтового массива. Для грунтовых оснований, армированных грунтоцементными элементами большого диаметра для оценки интегрального модуля деформации, требуется применение штампов больших размеров, что влечет за собой, во-первых, отступления от существующих ГОСТов, во-вторых, потребует использования масштабных нагрузочных систем. Фактически, роль такого штампа может выполнять фундаментная плита здания, и контроль качества будет основан на геодезических наблюдениях при строительстве здания. Но такой подход к контролю качества носит в себе определенные риски и требует комплексного подхода к проводимому геотехническому мониторингу. Помимо наблюдений за деформациями зданий и сооружений на таких усиленных основаниях необходимо производить фиксацию отклонений контролируемых параметров и устанавливать причины их возникновения, осуществлять прогноз развития дальнейших деформаций, и при необходимости, своевременно выполнять корректировку напряженно-деформированного состояния основания на протяжении всего жизненного цикла и при возведении зданий и сооружений [78, 119].

Недостатком указанного способа является использование ограниченного набора плоских жестких штампов, регламентированных нормативной документацией [33], с площадями подошвы штампов от 600 до 5000 см² или с соответствующими значениями диаметров от 27,7 до 79,8 см, что даёт

погрешность при определении значения модуля деформации основания, если происходит отклонение диаметра армирующего элемента от диаметра штампа [9, 33, 99, 100].

4.4.1 Способ контроля деформационных характеристик армированных массивов грунтоцементными элементами глинистого грунта

Способ контроля деформационных характеристик армированных массивов вертикальными армирующими элементами (грунтоцементными элементами) реализуется следующим образом:

Для проведения штампового испытания ограничивается участок массива армированного грунта, включающий центральный армирующий элемент с окружающими армирующими элементами по одному ряду с каждой стороны.

Затем измеряется шаг армирующих элементов участка массива армированного грунта и определяется среднее арифметическое значение шага армирования (l). На рисунке 4.8 представлен фрагмент схемы грунтоцементных элементов, расположенных в шахматном порядке.

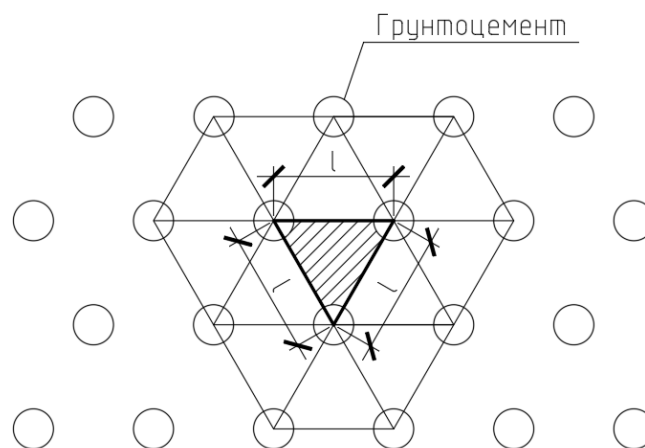


Рисунок 4.8 – Фрагмент схемы расположения грунтоцементных элементов

Далее определяется диаметр зоны воздействия центрального армирующего элемента участка массива армированного грунта (для шахматной сетки армирующих элементов) (см. Balaam N. P., Booker, J. R. [144]) по формуле:

$$d_e = 1,05 \cdot l, \quad (4.5)$$

где l – среднее арифметическое значение шага армирования участка массива армированного грунта (см).

Затем вычисляется площадь зоны воздействия центрального армирующего элемента участка массива армированного грунта по формуле:

$$A_e = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4}, \quad (4.6)$$

Для проведения штампового испытания подбирают штамп, площадь ($A_{ш}$) которого приближена к площади зоны воздействия центрального армирующего элемента участка массива армированного грунта (A_e).

Далее вокруг центрального армирующего элемента проводят выемку массива грунта, на глубину не менее 50 см и диаметром, соответствующим диаметру принятого штампа, в пределах глубины выемки подрезают армирующий элемент и горизонтально выравнивают срез армирующего элемента. После этого в выемке устраивают щебёночную подушку толщиной не менее 40 см из щебня фракции 5–20 мм для перераспределения нагрузки от штампа между армирующим элементом и окружающим грунтом. Далее проводят штамповое испытание принятым штампом. Нагрузку передают сверху на образец с помощью штампа. Испытания ведут согласно ГОСТ 20276.1 [33]. Обработку результатов производят как для компрессионного сжатия грунта с определением значения модуля деформации усиленного массива ($E_{масс}$) по формуле 4.5, приведенной п. 2.3.1.

Затем определяют корректирующий коэффициент (k) к результатам штамповых испытаний, необходимый ввиду несоблюдения площади принятого штампа ($A_{ш}$) к площади зоны воздействия центрального армирующего элемента типового участка массива армированного грунта (A_e) по формуле:

$$k = A_e / A_{ш}, \quad (4.7)$$

где $A_{ш}$ – площадь штампа при штамповом испытании (см^2), A_e – площадь зоны воздействия центрального армирующего элемента типового участка массива армированного грунта (см^2).

После этого определяют достоверное значение модуля деформации усиленного массива ($E_{ф ар}$), определяемое по результатам штамповых испытаний по формуле:

$$E_{ф ар} = kE_{ш}, \quad (4.8)$$

где k – корректирующий коэффициент, определяемый по формуле (4.7), $E_{ш}$ – значение модуля деформации усиленного массива, полученное по результатам штампового испытания (МПа).

Предлагаемое техническое решение позволяет обеспечивать повышение достоверности и точности контроля деформационных характеристик армированных грунтов вертикальными армирующими грунтоцементными элементами.

Однако, недостатком указанного способа является то, что с помощью штампового испытания возможно получить деформационные характеристики армированного грунтового массива лишь в пределах зоны влияния штампа, что не является достаточным для достоверности контроля деформационных характеристик армированного грунта.

4.4.2 Способ контроля деформационных характеристик армированных массивов грунтоцементными элементами на любой глубине армированного грунтового массива

Способ контроля деформационных характеристик армированных массивов вертикальными армирующими элементами (грунтоцементными элементами) реализуется следующим образом:

В армированном грунте выполняется скважина путем сквозного бурения вертикального грунтоцементного элемента колонковым способом, со сплошным отбором керна для последующего изготовления образцов и определения модуля деформации ($E_{stb,i}$) материала грунтоцементного элемента на каждый метр глубины вертикального грунтоцементного элемента. Сквозное бурение скважины следует выполнять в возрасте вертикального грунтоцементного элемента не менее 56 сут. [115, 89]. колонком диаметром от 44 до 150 мм. Отбор, транспортирование и хранение керна выполняется в соответствии с ГОСТ 12071 [37]. После выполнения сквозного бурения скважины керны торцуются и подготавливаются образцы цилиндрической формы непосредственно для испытаний. На каждый метр длины керна изготавливается по три образца. Диаметр образцов должен соответствовать внутреннему диаметру колонка, высота - от 0,8 до 2,0 диаметра. Каждому образцу присваивается индекс, отражающий глубину армирования, в пределах которой изготовлен образец. Фрагмент схемы расположения вертикальных грунтоцементных элементов представлен на рисунке 4.9. Разрез фрагмента армированного массива грунта вертикальными грунтоцементными элементами представлен на рисунке 4.10.

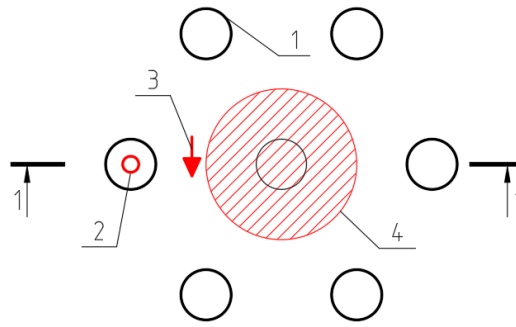
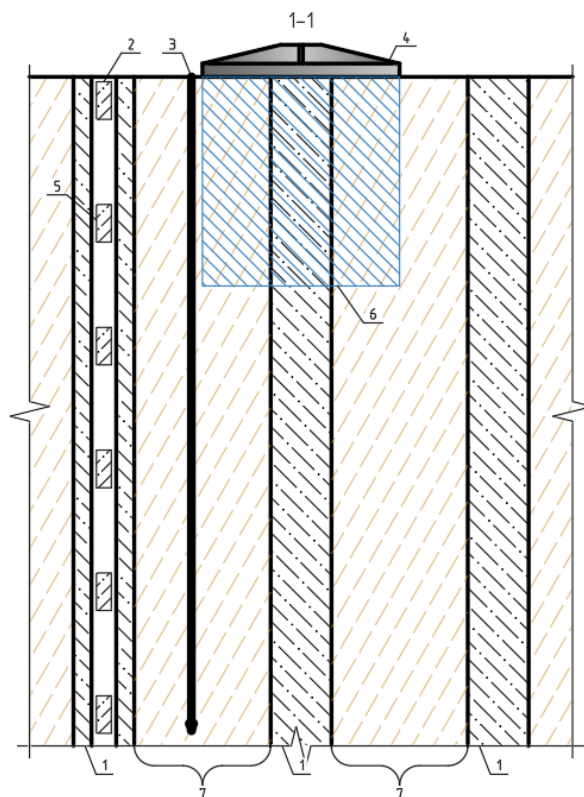


Рисунок 4.9 – Фрагмент схемы расположения вертикальных грунтоцементных элементов: 1 – вертикальные армирующие элементы; 2 – скважина от сквозного бурения; 3 – точка статического зондирования грунтов; 4 – штамп



1 – вертикальные армирующие элементы; 2 – скважина от сквозного бурения; 3 – точка статического зондирования грунтов; 4 – штамп; 5 – керн, отобранный во время сквозного бурения для определения модуля деформации армирующего элемента; 6 – зона влияния штампа; 7 – грунт вокруг армирующих элементов
Рисунок 4.10 – Разрез фрагмента армированного массива грунта вертикальными грунтоцементными элементами

Испытания на одноосное сжатие образцов проводят согласно ГОСТ 12248.2 [38] и ГОСТ 24452 [39] с определением модуля деформации ($E_{stb,i}$). В результате испытаний образцов устанавливаются значения модуля деформации материала армирующего вертикального грунтоцементного элемента в пределах каждого метра его длины. Во время испытания образцы нагружаются ступенями, равными 5% от разрушающей нагрузки с измерением в процессе нагружения осевых деформаций.

По итогам испытания составляется диаграмма «напряжение – продольная относительная упругомгновенная деформация». В результате чего вычисляется модуль деформации $E_{stb,i}$ образцов, отобранных с i -ой глубины грунтоцементного элемента, по формуле:

$$E_{stb,i} = \frac{\sigma_{1,i}}{\varepsilon_{1y,i}}, \quad (4.9)$$

где $\sigma_1 = \frac{P_1}{F}$ – приращение напряжения от условного нуля до уровня внешней нагрузки, равной 30 % от разрушающей; P_1 – соответствующее приращение внешней нагрузки (кН); F – площадь поперечного сечения образца (m^2); ε_{1y} – приращение упругомгновенной относительной продольной деформации образца (д.е.), соответствующее уровню нагрузки $P_1 = 0,3 \cdot P_p$, где P_p – ожидаемое значение разрушающей нагрузки (кН), и измеренное в начале каждой ступени ее приложения.

Затем выполняется полевое испытание грунта в точке вокруг армирующих грунтоцементных элементов статическим зондированием и определяют модуль деформации грунта, расположенного между армирующими грунтоцементными элементами в пределах каждого метра глубины армирования ($E_{гi}$).

Статическое зондирование грунтов выполняется по ГОСТ 19912 [40] на всю глубину армирования грунта с применением зонда второго типа. Обработку данных статического зондирования производят с определением модуля

деформации грунта (E_{Gi}) в пределах каждого i -го метра глубины армирования [99].

Следующим этапом выполняется испытание плоским штампом с определением штампового модуля деформации армированного грунтового массива ($E_{ш}$) в пределах зоны влияния штампа за счет совместной работы вертикального армирующего элемента и окружающего его грунта.

Штамповое испытание армированного грунта выполняется с использованием методики ГОСТ 20276.1 [33]. Общая схема установки, при выполнении испытания плоским штампом представлена на рисунке 4.11.

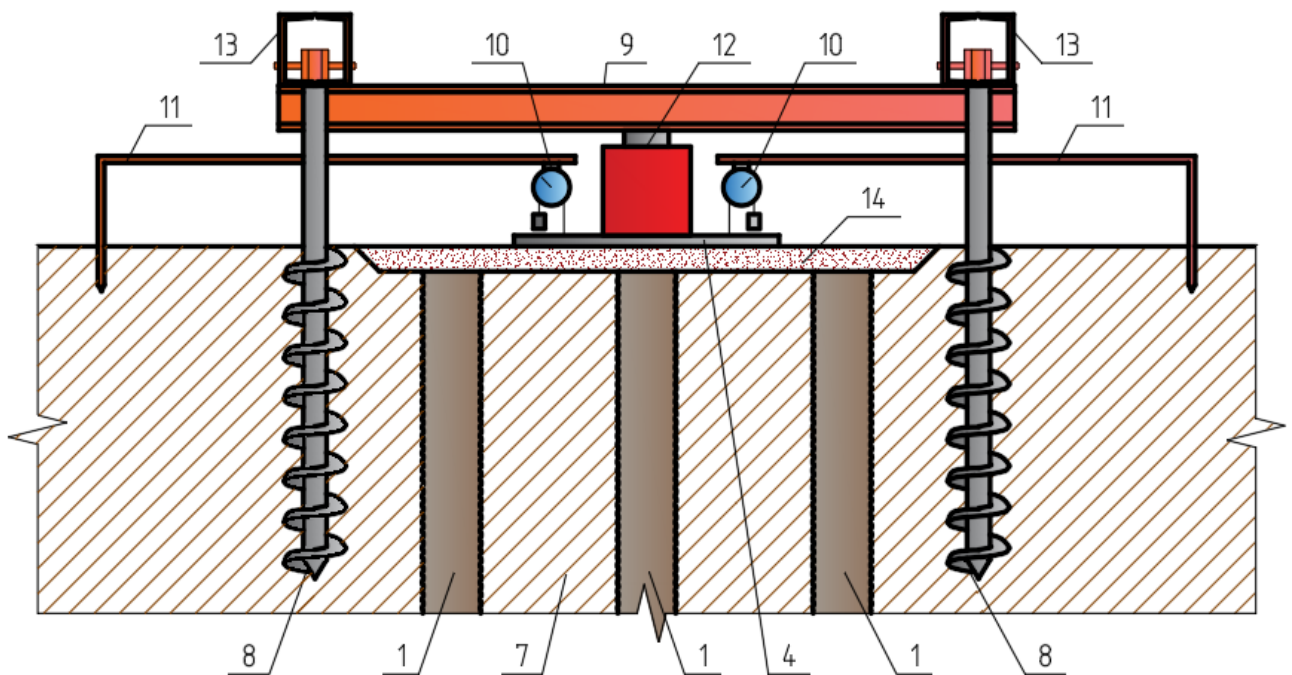


Рисунок 4.11 – Общая схема установки, при выполнении испытания плоским штампом: 1 – вертикальные армирующие элементы; 4 – штамп; 7 – грунт вокруг армирующих элементов; 8 – анкер; 9 – продольная балка; 10 – прогибомер системы Аистова; 11 – реперная система; 12 – домкрат; 13 – поперечная балка; 14 – песчано-гравийная подушка

Штамповое испытание проводится способом, описанным в п. 4.4.1 диссертационной работы.

Максимальная нагрузка при штамповом испытании должна быть установлена с учетом предполагаемого фактического давления в основании фундамента, которое равно сумме давлений от нагрузки сооружения и собственного веса грунта в насыщенном водой состоянии. Ступени нагружения на штамп должны обеспечивать создание давления под подошвой штампа равного 1/10 от максимальной нагрузки. Каждая ступень выдерживается до условной стабилизации.

По результатам штамповых испытаний строят график вертикальных перемещений от давления под подошвой штампа. Модуль деформации определяется в интервале давлений от P_0 до P_n . Испытания армированного грунтового массива выполняются с поверхности земли.

Модуль деформации армированного грунтового массива вычисляется стандартной методики, приведенной в [33].

Затем определяют корреляционный коэффициент K_f по формуле:

$$K_f = E_{арш}/E_{арп}, \quad (4.10)$$

где $E_{арп}$ – расчетный модуль деформации армированного грунтового массива [112],

$$E_{арп} = (E_{stb,1} \cdot \alpha + E_{г,1} \cdot (1 - \alpha)), \quad (4.11)$$

где $E_{stb,1}$ – модуль деформации материала вертикального армирующего грунтоцементного элемента, отобранного в пределах глубины влияния штампа, $E_{г,1}$ – модуль деформации грунта вокруг армирующих грунтоцементных элементов в пределах глубины влияния штампа, α – коэффициент армирования, характеризующий объемную долю армирующих элементов в массиве грунта, а модуль деформации армированного грунта на i -ой (любой) глубине армированного грунтового массива $E_{арп,i}$ определяют по формуле:

$$E_{арп,i} = K_f (E_{ai} \cdot \alpha + E_{гi} \cdot (1 - \alpha)) \quad (4.12)$$

где K_f – корреляционный коэффициент, $E_{a,i}$ – модуль деформации грунтоцементного элемента на i -ой глубине армирования (МПа), $E_{г,i}$ – модуль

деформации грунта на i -ой глубине армирования, определяемый по результатам статического зондирования (МПа).

Данное техническое решение позволяет обеспечивать повышение достоверности и точности контроля деформационных характеристик армированных грунтов вертикальными армирующими грунтоцементными элементами на любой глубине армированного грунтового массива.

4.5 Эффективность усиления глинистых основания грунтоцементными элементами, изготовленных бурсмесительным способом

Для оценки эффективности метода армирования массива грунта выполнен технико-экономический анализ сравнением альтернативными способами армирования грунтовых массивов, а также с бурсмесительным способом, рассчитанным по стандартной методике и по усовершенствованной методике. Все рассматриваемые варианты армирования грунтовых массивов обеспечивают сопоставимую осадку.

Расчеты выполнены в программном комплексе «Гранд-смета». В качестве сравниваемых показателей выбраны сметная стоимость строительных работ, в том числе прямые затраты (материалы, машины и механизмы, фонд оплаты труда), накладные расходы, сметная прибыль.

Технико-экономическое сравнение выполнено на примере устройства армированного грунтового массива для административного здания, расположенного по ул. Окружной в г. Новосибирске. Ниже в таблице 4.4 представлены пять вариантов устройства армированного грунтового массива.

Таблица 4.4 – Характеристики армированного грунтового массива

№ п/п	Параметры усиления	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
1	Способ усиления	буросмесительный способ	буросмесительный способ*	струйная цементация	сваи задавливаемые	бурунабивные сваи
2	Мощность усиления, м	19	19	19	24	30
3	Тип рабочего органа	смеситель с лопастями диаметром 700 мм	смеситель с лопастями диаметром 700 мм	монитор с диаметром сопла 1,5 и 3,0 мм	составные сваи	сваи круглого сечения 800 мм
4	Материал армоэлементов	грунтоцемент	грунтоцемент	грунтоцемент	железобетонные сваи	железобетонные сваи

Примечание: буросмесительный способ – рассчитан по стандартной методике, буросмесительный способ* – рассчитан по усовершенствованной методике.

Как видно из таблицы выше в качестве устройства армированного грунтового массива рассмотрены пять вариантов: буросмесительный способ (рассчитанный по стандартной методике), буросмесительный способ* (рассчитанный по усовершенствованной методике) струйная цементация, задавливание железобетонных свай, бурунабивные сваи. Тот или иной способ армирования имеет преимущества и недостатки. В любое ли время года возможна ли реализация работ, сроки производства работ, динамическое воздействие на окружающую застройку, экологичность, технологические возможности подрядных организаций, зависящие от территориального расположения объекта строительства. Все эти вопросы возникают при выборе оптимального варианта усиления основания. Ключевым фактором для выбора способа усиления для Заказчика, является финансовая составляющая и сроки выполнения работ, как проектных, так и работ по устройству армированного грунтового массива.

Для сравнения для каждого из вариантов армирования грунтового массива выполнялся сметный расчет ресурсно-индексным методом. Данный метод предусматривается методикой определения сметной стоимости строительства на территории Российской Федерации (приказ Министерства строительства и

жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 4 августа 2020 г. № 421/пр в редакции приказа от 07.07.2022 года №557/пр).

Стоимость строительства определена ресурсно-индексным методом в программном комплексе ГРАНД-Смета по ФСНБ-2022 (с Изм. 1–13), включенным в федеральный реестр сметных нормативов (приказ Минстроя России от 30 декабря 2021 г. № 1046/пр).

Технико-экономическое сравнение вариантов армирования грунтового массива в текущем уровне цен приведено в таблице 4.5. Диаграммы приведены на рисунках 4.12, 4.13 и 4.14.

Таблица 4.5 – Элементы сметной стоимости четырех вариантов устройства грунтового массива в текущем уровне цен

Вариант	ПЗ				НР	СП	Всего (без НДС)
	ОТ	ЭМ	ОТМ	МТ			
1. Буросмесительный способ	3 314 121,9	5 929 894,5	3 143 092,8	10 154 077,7	7 554 941,2	3 842 042,7	33 938 170,8
2. Буросмесительный способ*	3 301 435,4	5 918,754,3	3 138 335,7	8 154 077,7	7 143 845,4	3 719 946,5	31 376 395,0
3. Струйная цементация	1 359 304,8	13 510 266,0	2 271 844,8	16 366 460,0	3 413 280,6	1 604 968,1	38 526 124,4
4. Сваи задавливаемые	2 366 397,9	18 510 566,7	6 366 025,4	26 608 699,0	10 216 935,2	5 195 791,8	69 264 416,0
5. Сваи буронабивные	6 859 515,0	14 778 185,2	6 397 668,3	10 724 282,1	15 510 904,5	7 888 024,1	62 158 579,1

Примечание – в таблице применены следующие сокращения: ПЗ – прямые затраты; ОТ – оплата труда рабочих; ЭМ – эксплуатация машин; ОТМ – оплата труда машинистов; МТ – материалы; НР – накладные расходы; СП – сметная прибыль; НДС – налог на добавленную стоимость.

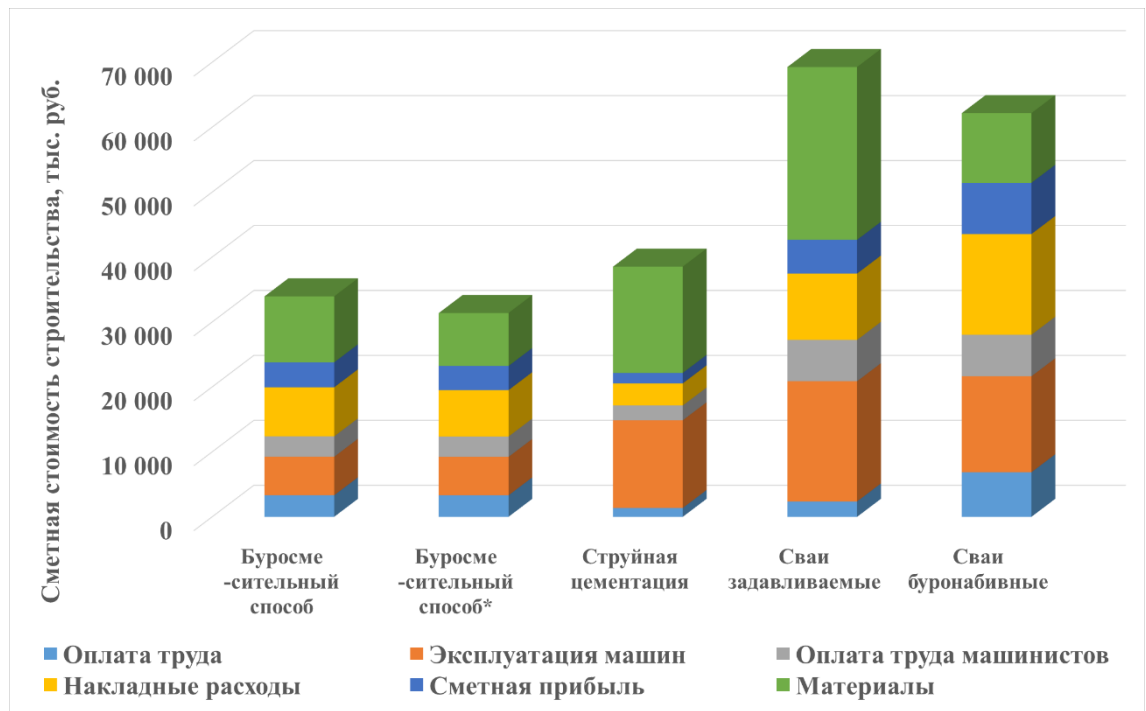


Рисунок 4.12 – Диаграмма элементов, формирующих сметную стоимость по вариантам

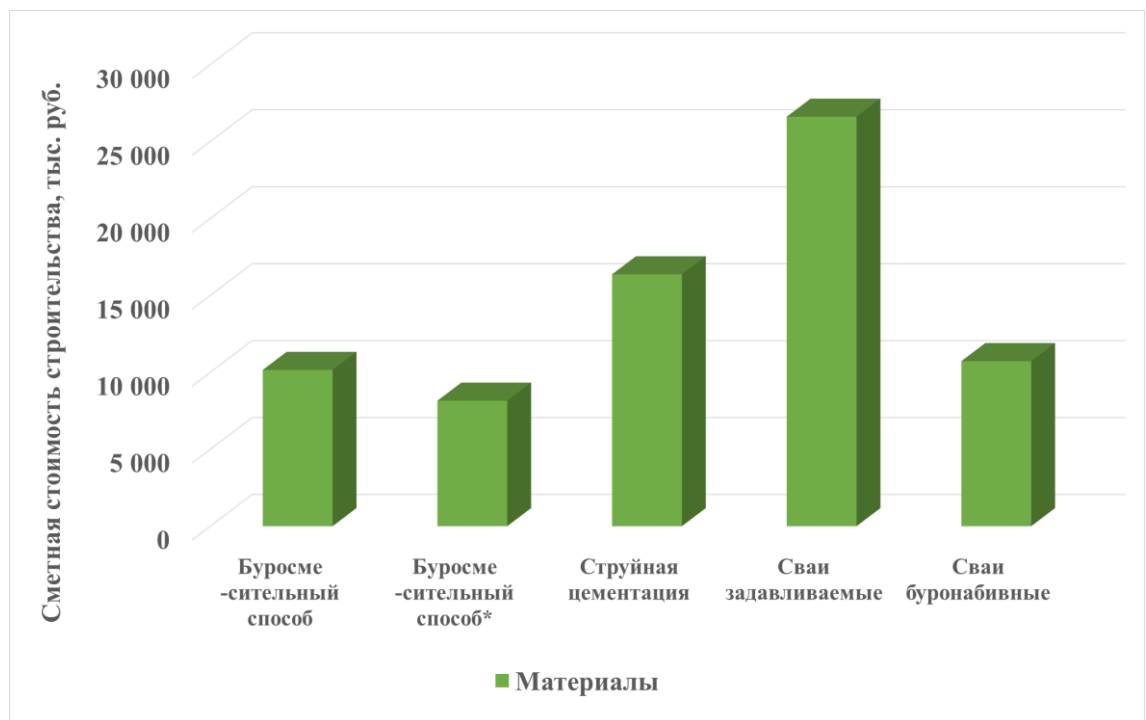


Рисунок 4.13 – Сравнение стоимости затрат на материалы

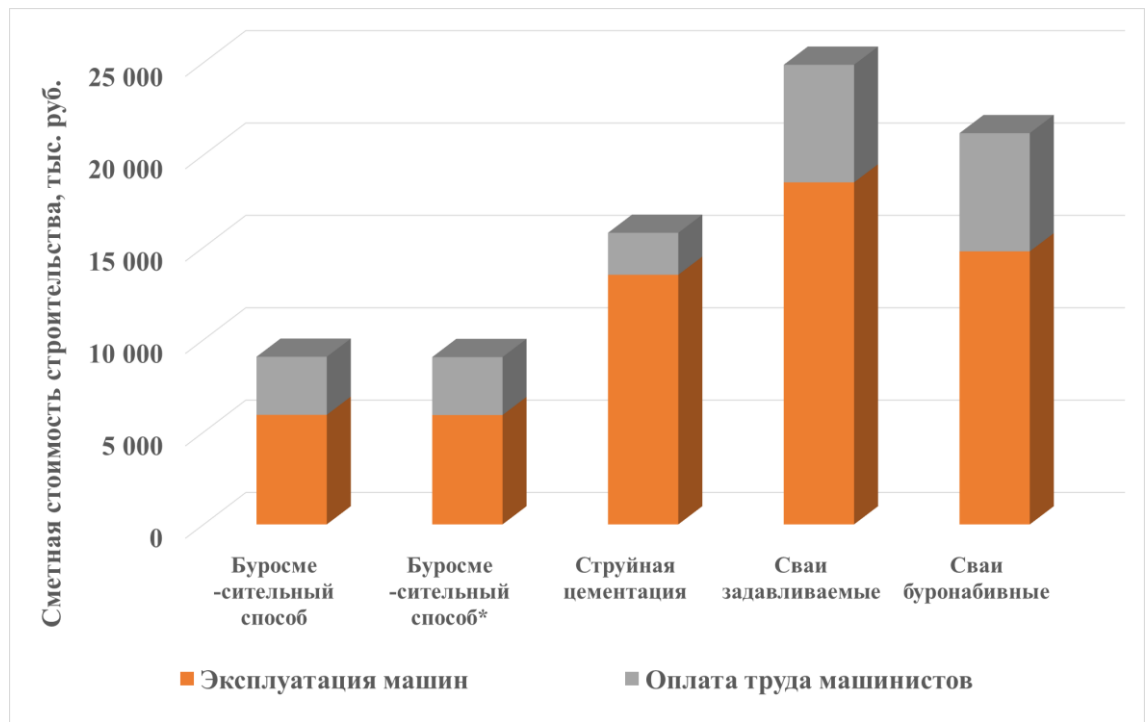


Рисунок 4.14 – Сравнение стоимости затрат эксплуатацию машин и оплату труда машинистов

На основании выполненного технико-экономического сравнения можно увидеть, что вариант усиления грунтов армированием грунтоцементными элементами, изготовленными буромесительным способом (рассчитанный, как по стандартной методике, так и по усовершенствованной) является наиболее экономичным, его стоимость составляет в текущем уровне цен 33 938 170,8 руб. (по стандартной методике) и 31 376 395,0 руб. (по усовершенствованной методике). Близким по стоимости оказался вариант со струйной цементацией и составил в текущем уровне цен 38 526 124,4 руб. Варианты с задавливанием железобетонных свай и с устройством буронабивных свай оказались наиболее затратными.

Из диаграмм, приведенных на рисунках 4.12–4.14, видно, что в различных вариантах усиления армированием грунтового массива, элементы, формирующие сметную стоимость, неодинаковы. При применении усиления грунтового массива армированием грунтоцементными элементами, выполненными буромесительным способом, как и в струйной цементации, основным

материалом, является раствор, используемый в качестве связующего, однако, затраты в первом варианте в текущем уровне цен на материалы составляют 10 154 077,7 руб. (рассчитанный, как по стандартной методике), 8 154 077,7 руб. (рассчитанный, как по усовершенствованной методике), а во втором 16 366 460,0 руб. Это связано с тем, что при усилении струйной цементацией важным требованием является выход грунтоцементной пульпы на поверхность и составляет 30%...100% от объёма закачанного цементного раствора при усилении. Сметная стоимость буросмесительного способа от струйной цементации ниже на 13...23 % (в зависимости от выбранного метода расчёта).

На основании выполненного технико-экономического расчета определены сроки реализации работ по каждому из вариантов и приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Продолжительность работ по каждому из вариантов

№ п/п	Вариант	Срок производства работ
1	Буросмесительный способ	62 дня
2	Буросмесительный способ*	60 дней
3	Струйная цементация	70 дней
4	Сваи задавливаемые	118 дней
5	Бутонабивные сваи	95 дней

Стоит отметить, что благодаря применения усовершенствованной методики проектирования усиления основания армированием ГЦЭ буросмесительным способом на данном объекте (пример проектирования приведен в п. 4.2.1), удалось получить как экономический эффект за счет снижения стоимости работ и сроков строительства, так и повышение эффективности в части уменьшения сроков проектирования.

4.6 Выводы по разделу 4

В результате проведенных исследований, представленных в настоящем разделе, основные выводы можно сформулировать следующим образом:

1) Разработан и реализован алгоритм проектирования усиления глинистых оснований строящихся зданий и сооружений армированием грунтоцементными элементами, и способ контроля деформационных характеристик при его усилении армированием грунтоцементными элементами.

2) Усовершенствована методика проектирования глинистых оснований, усиленных грунтоцементными элементами, изготовленными бурсмесительным способом, в грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е.

3) Разработан и реализован способ контроля деформационных характеристик основания при его усилении армированием грунтоцементными элементами. Данный способ повышает достоверность и точность контроля деформационных характеристик армированных грунтов вертикальными грунтоцементными армирующими элементами на любой глубине армированного массива. На разработанные изобретения получены два патента РФ: Патент № 2809481 «Способ контроля деформационных характеристик армированного вертикальными элементами слабого грунта» и Патент № 2829041 «Способ определения деформируемости основания из армированного вертикальными элементами слабого грунта».

4) Выполнено обоснование экономической эффективности бурсмесительного способа армирования грунтового массива. Применение усовершенствованной методики проектирования позволило получить снижение затрат на выполнение армирования грунтового массива в размере 23 % по сравнению с наиболее близким альтернативным способом устройства армированного грунтового основания.

5) Усовершенствованная методика проектирования и контроль качества основания, усиленного армированием грунтоцементными элементами, выполненными буросмесительным способом внедрены при проектировании и строительстве зданий в г. Новосибирске и г. Барнауле. Копии актов внедрения результатов исследования приведены в приложении А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационного исследования была достигнута поставленная цель и получены следующие итоги, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Выполнен анализ существующего подхода к проектированию армирования оснований вертикальными грунтоцементными элементами и опыта реализации армирования, выявлены особенности работы усиленного грунтового массива в глинистых грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е.

2. Проведен анализ и систематизация данных геотехнического мониторинга за строительством зданий на усиленных основаниях, который позволил сформировать теоретические предпосылки особенностей работы усиленного массива грунта, с учетом модуля деформации армирующих грунтоцементных элементов, а также подтвердить сформулированную гипотезу: «С увеличением модуля деформации армирующих грунтоцементных элементов, расположенных в глинистых грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е., повышается доля нагрузок на нижележащие грунтовые слои и увеличивается сжимаемая толща».

3. Разработана численная модель усиленного основания вертикальными грунтоцементными элементами основания, сложенного глинистыми грунтами с показателем текучести более 0,5 д.е. Приведены условия формирования параметров модели, граничные условия, модели материалов параметров модели. Экспериментально доказана адекватность разработанной численной модели путем ее валидации.

4. Определена функциональная зависимость (2) изменения модуля деформации, усиленного армированием вертикальными грунтоцементными элементами грунтового массива от параметров армирования (коэффициент армирования от 0,02 до 0,10 и модуль деформации грунтоцементных элементов от 50 до 250 МПа) и грунтовых условий (коэффициент пористости от 0,70 до 1,0 и

показатель текучести более 0,5 д.е.), Установлены условия проскальзывания грунтоцементных элементов по боковой поверхности на контакте с грунтом, приводящего к продавливанию подстилающих грунтов армирующими элементами.

5. Разработан алгоритм и усовершенствована методика проектирования глинистых оснований, усиленных грунтоцементными элементами, изготовленными бурсмесительным способом, в грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е.;

6. Разработан и запатентован эффективный способ контроля деформационных характеристик, усиленного армированием грунтоцементными элементами основания.

7. Выполнено обоснование экономической эффективности бурсмесительного способа армирования грунтового массива. По результатам диссертационного исследования рекомендуется для глинистых грунтов с показателем текучести более 0,5 д.е. применение совершенствованной методики проектирования, которая позволяет получить снижение затрат на выполнение армирования грунтового массива в размере 23 % по сравнению с наиболее близким альтернативным способом устройства армированного грунтового основания.

8. Перспективой дальнейшей разработки темы исследования является развитие методики проектирования армированных массивов ГЦЭ с целью возможности её применения на участках с различными инженерно-геологическими условиями, валидация результатов моделирования с результатами статических испытаний армированных грунтовых массивов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Аббасов, П. А. Влияние уплотнения забоя скважины на несущую способность буронабивных свай / П. А. Аббасов, Н. В. Лифар // Перспективы развития и опыт внедрения новых строит. материалов и конструкций на Дальнем Востоке. – Владивосток, 1981. – С. 13–14.

2 Абелев, М.Ю. Геотехнические исследования площадок строительства, сложенных слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами / М.Ю. Абелев, К.М. Абелев // Геотехника. – 2010. – №6. – С. 30–33.

3 Абелев, М.Ю. Деформации сооружений в сложных инженерно-геологических условиях / М.Ю. Абелев. – М.: Стройиздат, 1982. – 49 с.

4 Абелев, М.Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах / М.Ю. Абелев. – М.: Стройиздат, 1983. – 248 с.

5 Абрамова, Т. Т. Преобразование свойств структурно-неустойчивых грунтов с помощью буросмесительной технологии / Т. Т. Абрамова // Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии : Сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 26–27 апреля 2021 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2021. – С. 7–10. – EDN WWYXJI.

6 Авторское свидетельство № 97017 А1 СССР, МПК E02D 3/12. Способ закрепления грунтов : № 446730 : заявл. 26.01.1952 : опубл. 01.01.1954 / В. В. Аскалонов. – EDN VMZHAI.

7 Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Изд. Наука, 1976. – 278 с.

8 Алмакаева, А. С. Осадка свайных фундаментов с учётом особенностей формирования напряженно-деформированного состояния на их контакте с

грунтовым массивом: дис. Канд. техн. наук /Алмакаева Анастасия Сергеевна. – Москва, 2024. – 237 с.

9 Анжело, Г. О. Взаимодействие щебеночной сваи с окружающим грунтом и ростверком (плитой) при статической и вибрационной нагрузках: дис. – М.: Анжело Георгий Олегович, 2020.

10 Антонов, В. М. Экспериментальные исследования армированных оснований: монография / В. М. Антонов. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 80 с.

11 Антонов, В. М. Влияние армирования на несущую способность и деформативность оснований, подверженных циклическим нагрузкам / В. М. Антонов, В. В. Леденев, И. А. Аль-Накди // Строительная механика и конструкции. – 2022. – № 2(33). – С. 145–157. – DOI 10.36622/VSTU.2022.33.2.013. – EDN QVVSIR.

12 Артющенко, И. А. Усиление основания земляного полотна вертикальными столбами из щебня на участках с многолетнемерзлыми грунтами: специальность 05.23.02 "Основания и фундаменты, подземные сооружения" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Артющенко Игорь Александрович, 2020. – 175 с. – EDN EYPZMB.

13 Ашпиз, Е. С. Пути усиления основной площадки земляного полотна / Е. С. Ашпиз // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 6. – С. 55–56.

14 Багдасаров, Ю. А. Армирование оснований фундаментов грунтовыми сваями в раскатанных скважинах / Ю. А. Багдасаров, А.Н. Саурин // Реконструкции исторических городов и геотехническое строительство. – СПб.; М., 2003. – Т. 2 – С. 29–33.

15 Барвашов, В. Ф. Сооружения из армированного грунта: обзор /В. Ф. Барвашов, Д. А. Воронель. – М.: ВПИИИС, 1984. – 68 с.

16 Барвашов, В. А. Методы оценки несущей способности свай при действии вертикальной нагрузки / В. А. Барвашов, Н. Б. Экимян // Инж.-теорет. основы стр-ва: обзор / ВНИИИС. – М., 1986. – Вып. 2. – С. 68.

17 Бартоломей, А.А. Оценка надежности системы «основание-фундамент-здание» / А.А. Бартоломей, О.А. Маковецкий // Сбор. науч. тр. VIII Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике. – Екатеринбург: Уро РАН, 2001 г. –С.77.

18 Бартоломей, А. А. Определение зон деформаций, возникающих в грунте от забивки свай / А. А. Бартоломей, Н. Е. Рукавишникова, Б. С. Юшков // Основания и фундаменты в геологических условиях Урала. – Пермь, 1984. – С. 3–6.

19 Бартоломей, А. А. Прогноз осадок свайных фундаментов /А. А. Бартоломей, И. М. Омельчак, Б. С. Юшков. – М.: Стройиздат, 1994. – 384 с.

20 Бартоломей, А.А. Экспериментальные и теоретические основы прогноза осадок ленточных свайных фундаментов и их практические приложения: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.23.02/ Бартоломей Анатолий Александрович; МИСИ – Москва,1977. – 352 с.

21 Бартоломей, А.А. Основы расчёта свайных фундаментов по предельно допустимым осадкам. Москва. 1982. 223 с.

22 Бахолдин, Б. В. Экспериментальные и теоретические исследования процесса взаимодействия грунта с забивными сваями и создание на их основе практических методов расчета свай: дис. доктора техн. наук / Бахолдин Борис Васильевич. – Москва, 1986. – 472 с.

23 Бобылев, Л. М. Набивные сваи / Л. М. Бобылев // Строит. газ. – 1998. – № 42. – С. 8.

24 Бирюков, А. Л. Деформации в грунтах при погружении свай / А. Л. Бирюков. – М.: Стройиздат, 1967. – 247 с.

25 Богов, С. Г. Проблемы устройства свайных оснований в городской застройке в условиях слабых грунтов // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2004. – № 8. – С. 119–128.

26 Богов, С.Г. Исследование прочностных свойств грунтов, закреплённых цементными растворами по струйной технологии. Некоторый опыт строительства на слабых грунтах. / С.Г. Богов «Реконструкция городов и геотехническое строительство». -М.,2000 г. – №2. – URL: <http://geores.narod.ru/mag/2000n3/15/15.htm> (дата обращения 15.09.2015).

27 Богомолов, В. А. Метод высоконапорной инъекции связных грунтов при устройстве и усилении оснований и фундаментов: дис. канд. техн. наук / Богомолов В. А. – Екатеринбург, 2002. – 120 с.

28 Болондина, И. Л. Определение несущей способности свайных фундаментов с помощью номограмм / И. Л. Болондина, Б. С. Юшков // Повышение эффективности и качества устройства оснований и фундаментов в условиях Нечерноземной зоны РСФСР: Студ. науч. конф.: тез. докл. – Владимир, 1986. – С. 61–62.

29 Бройд И.И. Струйная геотехнология: Учебное пособие. - М.: Ассоциации строительных вузов, 2004. - 448 с.

30 Голубков, В. Н. Несущая способность свайных оснований / В. Н. Голубков. – М.: Машгиз. – 1950. – 144 с.

31 Гончаров, Б. В. О сопротивлении грунта при вдавливании свай / Б. В. Гончаров // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1966. – №6. – С. 26–31.

32 ГОСТ 25100–2020 Грунты. Классификация. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 41 с.

33 ГОСТ 20276.1–2020 Грунты. Методы испытания штампом. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 18 с.

34 ГОСТ 10180–2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 35 с.

35 ГОСТ 28570–2019 Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 15 с.

36 ГОСТ 5686–2020 Грунты. Методы полевых испытаний сваями. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 51 с.

37 ГОСТ 12071–2014 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 12 с.

38 ГОСТ 12248.2–2020 Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 11 с.

39 ГОСТ 24452–2023 Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – Москва: Российский институт стандартизации, 2024. – 16 с.

40 ГОСТ 19912–2012 Грунты. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 23 с.

41 Готман, Н. З. Расчет и проектирование усиления плитного фундамента грунтоцементными сваями / Н. З. Готман, М. Н. Сафиуллин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8. – № 4. – С. 64–73. – DOI 10.15593/2224–9826/2017.4.07.

42 Готман, Н. З. Расчет свайно-плитных фундаментов из забивных свай с учетом образования карстового провала: дис. доктора техн. наук / Готман Наталья Залмановна. – Москва, 2004. – 348 с.

43 Готман, А. Л. Безростверковые свайные фундаменты промышленных зданий и сооружений и общая методология их расчета: дис. доктора техн. наук / Готман Альфред Леонидович. – Уфа, 1995. – 445 с.

44 Гребенников, И. О. Особенности проектирования усиления грунтовых

оснований зданий и сооружений армированием грунтоцементными колоннами / И. О. Гребенников // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2(61). – С. 123–130. – DOI 10.52170/1815–9265_2022_61_123. – EDN OJYJNU.

45 Григорян, А.А. Несущая способность свай в просадочных грунтах: дис. доктора техн. наук / Григорян Анаида Александровна. – Москва, 1973. – 328 с.

46 Грязнова, Е. М. Разработка методов расчета свайных фундаментов с учетом прочностных свойств грунтов и взаимодействия свай: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.02 / Грязнова Елена Михайловна. – М., 1989. – 16 с.

47 Далматов, Б. И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б. И. Далматов, Ф. К. Лапшин, Ю. В. Россихин. – Л.: Стройиздат, 1975. – 240 с.

48 Джантемиров, Х.А. Опыт усиления основания сооружения с помощью струйной геотехнологии/ Х.А. Джантемиров, А.А. Долев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2006. – №1. – С.16-19.

49 Джоунс, К.Д. Сооружения из армированного грунта / К. Д. Джоунс; Перевод с англ. В. С. Забавина; Под ред. В. Г. Мельника. - Москва: Стройиздат, 1989. - 279,[2] с.: ил.; 21 см.; ISBN 5-274-00475-X: 3 р. 70 к.

50 Дзагов, А. М. К расчету сопротивления грунта по боковой поверхности буронабивных свай / А. М. Дзагов // Современные проблемы фундаментостроения: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Волгоград, 2001 г. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСН, 2001. – С. 91–92.

51 Дидух, Б. И. Изменение напряженно-деформированного состояния грунта при внедрении сваи / Б. И. Дидух, Ж. А. Ямонше // 18 Междунар. конф. «Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов», посвящ. 90-летию со дня рождения акад. В. В. Новожилова, СПб, 16–20 мая 2000 г. – СПб. : Изд-во СПбГУ. 2000. – Т. 1. – С. 41.

52 Динь Хоанг Нам. Взаимодействия длинных свай с грунтом в свайном фундаменте. Канд.дисс. МГСУ, Москва, 2006 г.

53 Дорошкевич Н.М., Знаменский В.В., Кудинов В.И. Инженерные методы расчета свайных фундаментов при различных схемах нагружения // Вестник МГСУ. №1. 2006. С. 119–132.

54 Жинкин, Г.Н. Теоретические основы и практическое применение электрохимического способа обработки глинистых грунтов: дис. доктора техн. наук / Жинкин Георгий Николаевич. – Ленинград, 1964. – 328 с.

55 Засорин, М.С. Обоснование технологических параметров струйной цементации глинистых грунтов в подземном строительстве. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 25.00.22./ Засорин Михаил Сергеевич; МАДИ–М.:2011. – 210 с.

56 Зехниев, Ф. Ф. Преобразование грунтовых оснований с применением технологии глубинного перемешивания грунта / Ф. Ф. Зехниев, Д. А. Внуков, А. И. Корпач // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 116–125. – DOI 10.15593/2224–9826/2017.4.12. – EDN YLDATQ.

57 Ибрагимов, М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В. Цементация грунтов инъекцией растворов в строительстве. АСВ, 2017.

58 Исаев, О.Н., Шарафутдинов Р.Ф. Исследования сопротивления грунта сдвигу по контактной поверхности конструкций // ОФМГ. 2020. № 2. С. 23-29.

59 Камбефор, А. Инъекция грунтов. Принципы и методы /А. Камбефор. – М.: Энергия, 1971. – 336 с.

60 Караулов, А.М. Несущая способность оснований осесимметричных фундаментов зданий и сооружений. Автореферат диссертации на соиск. уч. степ. доктора. техн. наук. СПбГАСУ, С - Петербург. 2008.

61 Караулов, А.М. Практический метод расчета вертикально армированного основания ленточных и отдельностоящих фундаментов транспортных сооружений // Вестник ТГАСУ. 2012. № 2. С. 183–190.

62 Караулов, А.М. Решение одномерной задачи уплотнения вертикально армированного основания // Тр. НГАСУ. – 1998. – № 3(3). – С. 29–33.

63 Киричек, Ю. А. Методы устройства искусственных оснований из грунтоцемента под фундаменты мелкого заложения / Ю. А. Киричек, Г. В. Комиссаров // Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture. – 2014. – № 7(196). – С. 15–19. – EDN TNXKOZ.

64 Колос, А. Ф. Противодинамическая стабилизация железнодорожного земляного полотна путем цементации грунтов основной площадки: дис. канд. техн. наук. / Колос Алексей Федорович. – СПб., 2000. – 163 с.

65 Конюшков, В. В. Несущая способность по материалу наклонных буроинъекционных свай // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2007. – №. 12. – С. 88–92.

66 Королев, К.В. Несущая способность оснований в стабилизированном и нестабилизированном состоянии: дис. доктора техн. наук / Королев Константин Валерьевич. – Санкт-Петербург, 2015. – 326 с.

67 Королев, К. В. Инженерная методика расчета вертикально армированных оснований / К. В. Королев, А. М. Караулов, Д. С. Галтер // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – № 9(705). – С. 101–108.

68 Кох, В. А. Создание навесного оборудования для устройства набивных свай в водонасыщенных грунтах методом уплотнения: дис. канд. техн. наук / Кох Виктор Александрович. – Новосибирск, 1990. – 151 с.

69 Крицкий, М. Я. Использование метода напорных инъекций для упрочнения грунтов в транспортном строительстве / М. Я. Крицкий, В. Ф. Скоркин, А. Л. Ланис // Тр. науч.-техн. конф. «Строительство и эксплуатация

транспортных сооружений в районах развития опасных геологических процессов», 7–9 окт. 2003 г. – М., 2003. – С. 46–47.

70 Крутов, В.И. Расчет армированных массивов. /В.И. Крутов, И.К. Попсуенко //Труды института НИИОСП. Вып.70. – М.: Стройиздат. – 1980. – С.15-24.

71 Кузнецов, А. В. Буровые сваи как технологический фактор влияния на окружающую застройку / А. В. Кузнецов // Теоретические и практические проблемы геотехники: межвуз. темат. сб. тр. / М-во образования Рос. Федерации, С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2005. – С. 39–44.

72 Купчикова, Н. В. Исследование напряжённно-деформированного состояния свайных фундаментов с концевыми и поверхностными уширениями в структурно-неустойчивых основаниях : специальность 05.23.02 "Основания и фундаменты, подземные сооружения": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Купчикова Наталья Викторовна. – Москва, 2010. – 200 с. – EDN QEZGJJ.

73 Купчикова, Н. В. Системный подход в концепции формообразования свайных фундаментов с уширениями / Н. В. Купчикова // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, № 12(111). – С. 1361–1368. – DOI 10.22227/1997–0935.2017.12.1361–1368. – EDN YMEBWJ.

74 Ланис, А. Л. Устройство оснований методом раскатки скважин с инъекированием твердеющего раствора / А. Л. Ланис, А. М. Попов, П. О. Ломов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – № 7(703). – С. 29–38. – EDN ZTHYZJ.

75 Ланис, А. Л. и др. Определение несущей способности набивной сваи по грунту, выполненной в раскатанной скважине //Известия Высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – №. 9. – С. 31.

76 Ланис, А. Л. Армирование эксплуатируемых высоких насыпей с инъецированием твердеющих растворов: дис. доктора техн. наук /Ланис Алексей Леонидович. – Москва, 2019. – 409 с.

77 Ломов, П. О. К вопросу определения грунтовых параметров, оказывающих влияние на диаметр раскатанной скважины / П. О. Ломов, А. Л. Ланис // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 3. – С. 92–97.

78 Ломов, П. О. и др. Геотехнический мониторинг при возведении многоэтажных зданий //Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2020. – №. 4 (55). – С. 86–93.

79 Ломов, П. О. Усиление грунтов основания фундаментов транспортных сооружений армированием грунтоцементным раствором в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов / П. О. Ломов, И. О. Гребенников // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. – 2022. – № 4(7). – С. 103–110. – DOI 10.52170/2712–9195_2022_4_103. – EDN VKDOKA.

80 Ломов, П. О. Оценка деформационных характеристик армированных грунтовых массивов вертикальными грунтоцементными элементами / П. О. Ломов, А.Л. Ланис, И. О. Гребенников // Известия вузов. Строительство. – 2023. – № 3. – С. 22–37. – DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-22-37.

81 Ломов, П. О. Совершенствование метода устройства основания путем усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах: дис. канд. техн. наук /Ломов Петр Олегович. – Новосибирск, 2016. – 167 с.

82 Лукпанов, Р., Енкебайев, С., & Цыгулев, Д. (2021). Assessment of the bearing capacity of piles in soil, determined by static and dynamic load tests. *Engineering Journal of Satbayev University*, 143(2), 252–260. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i2.33>

83 Маковецкий, О.А. Расчет и конструирование искусственного основания «структурный геотехнический массив: дис. доктора техн. наук / Маковецкий Олег Александрович. – Москва, 2021. – 363 с.

84 Малинин, А. Г. Контроль качества работ по струйной цементации грунтов в соответствии с действующими нормативными документами / А. Г. Малинин, И. А. Салмин // Фундаменты. – 2021. – № 1(3). – С. 51–57. – EDN UEOFRB.

85 Малинин, А. Г. О необходимости корректировки СП 291.1325800.2017 "Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования" / А. Г. Малинин // Жилищное строительство. – 2019. – № 9. – С. 11–16. – DOI 10.31659/0044-4472-2019-9-11-16.

86 Малинин, А. Г. Влияние технологических параметров струйной цементации на прочность и диаметр грунтоцементных колонн / А. Г. Малинин, И. Л. Гладков, А. А. Жемчугов // Метро и тоннели. – 2012. – № 5. – С. 24–25.

87 Мангушев, Р.А. Принципы формирования застройки с учетом разнотипности зданий и напластования грунтов, определяющих выбор фундаментов: дис. доктора техн. наук / Мангушев Рашид Абдуллович. – Санкт-Петербург, 1993. – 403 с.

88 Методические рекомендации по геотехническим мероприятиям инженерной защиты территории от проявления карстово-суффозионных процессов, АО «НИЦ «Строительство», НИИОСП им. Н. М. Герсеева, Минстрой России, 2017.

89 Методические рекомендации по укреплению грунтов методами струйной цементации, глубинным перемешиванием, инъекции растворами на основе микроцементов, манжетной инъекцией в режиме гидроразрывов, АО «НИЦ «Строительство», НИИОСП им. Н. М. Герсеева, Минстрой России, 2020.

90 Мирсаяпов, И. Т. Расчетная модель несущей способности и осадок грунтового основания, армированного вертикальными и горизонтальными

элементами / И. Т. Мирсаяпов, Р. А. Шарафутдинов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 3(37). – С. 179–187. – EDN WMWNYL.

91 Никифорова, Н.С. Закономерности деформирования оснований зданий вблизи глубоких котлованов и защитные мероприятия: дис. доктора техн. наук / Никифорова Надежда Сергеевна. – Москва, 2008. – 324 с.

92 Нуждин, Л.В., Скворцов Е.П., Теслицки В.В. Усиление грунтовых оснований армированием вертикальными бетонными и железобетонными стержнями // Збірник наукових праць, Будівельни конструкцій", №59. кн. 2, Київ: НДІБК, 2003. - С. 58–62.

93 Нуждин, Л.В., Теслицкий В.В., Нуждин М.Л. Расчет вертикально армированного грунтового основания // Сборник трудов научно-технической конференции. С-Петербург, 2010, с. 143–147.

94 Нуждин, М.Л. Экспериментальные исследования усиления грунтового основания свайных фундаментов армированием жесткими включениями // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. Т.10, №3. С. 5–15. DOI:10.15593/2224–9826/2019.3.01.

95 Нуждин, Л. В. Армирование грунтов основания вертикальными стержнями / Л. В. Нуждин, А. А. Кузнецов // Тр. междунар. семинара по механике грунтов, фундаментостроению и транспортным сооружениям. – М., 2000.– С. 204–206.

96 Нуждин, Л. В. Усиление грунтового основания вертикальным армированием и высоконапорным инъецированием / Л. В. Нуждин, М. Л. Нуждин // Усиление оснований и фундаментов : Сборник докладов. Труды VIII Петрухинских чтений, Москва, 25 мая 2023 года. – Москва: АО «НИЦ «Строительство», 2024. – С. 47–103. – DOI 10.37538/2713–1149-2024-47-103. – EDN XRQLOQ.

97 Натхо, Д. Ч. Оценка эффективности применения грунтоцементных свай при закреплении слабых грунтовых оснований зданий и сооружений / Д. Ч. Натхо, А. А. Поленов, А. Д. Дронова // Молодежь и XXI век - 2022: Материалы 12-й Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах, Курск, 17–18 февраля 2022 года / Отв. редактор М.С. Разумов. Том 3. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 287–291. – EDN PJWEQV.

98 Овчинников, С. А. Упрочнение земляного полотна железных дорог объемным многоэлементным армированием: дис. канд. техн. наук /Овчинников Станислав Александрович. – Новосибирск, 2014. – 162 с.

99 Патент № 2809481 Российская Федерация, МПК G01N 33/24 (2006.01). Способ контроля деформационных характеристик армированного вертикальными элементами слабого грунта / Ломов П. О., Разуваев Д. А., Гребенников И. О., Корогодов И. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2023110085; заявл. 19.04.2023; опубл. 12.12.2023, Бюл. № 35. – 19 с.

100 Патент № 2829041 Российская Федерация, МПК G01N 33/24 (2006.01). Способ определения деформируемости основания из армированного вертикальными элементами слабого грунта / Ломов П. О., Гребенников И. О., Искра А. С., Корогодов И. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2023132574; заявл. 05.12.2023; опубл. 22.10.2024, Бюл. № 30. – 14 с.

101 Полищук, А. И. Совершенствование методов проектирования фундаментов реконструируемых зданий на пылевато-глинистых и искусственных грунтах: дис. доктора техн. наук /Полищук Анатолий Иванович. – Томск, 1996. – 405 с.

102 Пономарёв, А.Б. Экспериментально-теоретические основы прогноза осадок и несущей способности фундаментов из свай распорных конструкций: дис. доктора техн. наук / Пономарев Андрей Будимирович. – Пермь, 1999. – 476 с.

103 Пособие по производству работ при устройстве оснований и фундаментов (к СНиП 3.02.01-83). НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, М. 1986.

104 Разводовский, Д.Е Оценка влияния усиления фундаментов зданий по технологии струйной цементации на их осадку/ Д.Е. Разводовский, А.А. Чепурнова // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №10. – С.64-72.

105 Распоряжение Правительства РФ от 31 октября 2022 г. № 3268-р «Об утверждении Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г.»

106 Разработка СТУ на проектирование земляного полотна, укрепительных и защитных сооружений с применением армогрунтовых и сетчатых конструкций в сложных инженерно-геологических условиях / В. В. Виноградов, Е. С. Ашпиз, Ю. К. Фроловский, А. А. Зайцев // VII Науч.-техн. конф. с междунар. участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна и искусственных сооружений». – М., 2010. – С. 9–15.

107 Саурин, А. Н. Набивные сваи в раскатанных скважинах – перспективное основание для устройства фундаментов в сложных грунтовых и построечных условиях / А. Н. Саурин // Тр. междунар. семинара по механике грунтов, фундаментостр. и трансп. сооруж. – М., 2000. – С. 236–239.

108 Семкин, В. В., Шапошников А. В., Ибрагимов М. Н. Методические рекомендации" Методы контроля качества искусственных оснований из закрепленных грунтов". – 2020. (НИИОСП им. Н.М. Герсеванова).

109 Семкин, В. В., Шапошников А. В., Ибрагимов М. Н. Методическое пособие по укреплению грунтов методами струйной цементации, глубинным перемешиванием, инъекции растворами на основе микроцементов, манжетной инъекцией в режиме гидроразрывов. – 2020. (НИИОСП).

110 Сидоров, В.В., Тер-Мартirosян А.З., Алмакаева А.С. Графоаналитический метод расчета сваи в однослойном массиве с учетом проскальзывания // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 10. С. 96–104. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.10.96–104.

111 Скрылев, Г. Е. Особенности использования метода струйной цементации для укрепления грунтов основания при строительстве объектов трассы "формулы-1" на Имеретинской низменности / Г. Е. Скрылев, А. Е. Монастырский, В. Ю. Тимофеев // *Геотехника*. – 2012. – № 6. – С. 22–26.

112 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», – М.: 2016.

113 СП 24.13330.2021 «СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты», – М.: 2022.

114 СП 50-01-2004 «Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений», – М.: 2005.

115 СП 291.1325800.2017 «Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования», – М.: 2017.

116 СП 45.13330.2017 «Земляные сооружения, основания и фундаменты», – М.: 2017.

117 Степанищев, К. Ю. Проблемы применения методов проектирования оснований, армированных железобетонными элементами / К. Ю. Степанищев, В. В. Сидоров // *Жилищное строительство*. – 2021. – № 3. – С. 13–18. – DOI 10.31659/0044-4472-2021-3-13-18. – EDN LCUSYB.

118 Татаринов, С. В. Особенности устройства буронабивных свай при подаче бетона под давлением / С. В. Татаринов, А. И. Осокин, А. В. Сбитнев // *Пром. и гражд. стр-во*. – М.: Изд-во ПГС, 2006. С. 65–66.

119 Тер-Мартirosян, З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Соболев Е. С. Анализ данных геотехнического мониторинга плитных фундаментов большой площади // *Геотехника*. – 2012. – № 4. – С. 28–34.

120 Тер-Мартirosян, З. Г. Опыт преобразования слабых водонасыщенных грунтов сваями конечной жесткости / З. Г. Тер-Мартirosян, А. З. Тер-

Мартирисян, В. В. Сидоров // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, № 3(114). – С. 271–281. – DOI 10.22227/1997–0935.2018.3.271–281. – EDN YWQSBA.

121 Тер-Мартирисян, А.З. Взаимодействие фундаментов зданий и сооружений с водонасыщенным основанием при учете нелинейных и реологических свойств грунтов. Дисс... док. техн. наук. Москва. 2016. 324 с.

122 Тер-Мартирисян, З.Г. Механика грунтов. М.: АСВ. 2009. 552 с.

123 Тер-Мартирисян, З.Г., Акулецкий А.С. Взаимодействие сваи большой длины с окружающим многослойным и подстилающим грунтами // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 168–175.

124 Тер-Мартирисян, А.З., Сидоров В.В., Алмакаева А.С. Особенности и сложности определения прочности на контакте грунтового и конструкционного материалов // *Геотехника*. 2019. Том 11. № 4. С. 30–40. DOI: 10.25296/2221–5514-2019-11-4-30–40.

125 Тер-Мартирисян, А.З., Сидоров В.В., Алмакаева А.С. Графоаналитический метод расчета сваи в многослойном массиве с учетом отрыва и проскальзывания сваи по грунту // *Жилищное строительство*. 2023. № 11. С. 37–43.

126 Тер-Мартирисян, З.Г. Напряженно-деформированное состояние массивов многофазных грунтов в прикладных задачах геомеханики и строительства. Дисс... док. техн. наук. Москва. 1976. 386 с.

127 Тунг, Н. Т. Усиление структурно неустойчивых грунтов щебеночными сваями / Н. Т. Тунг // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2018. – Т. 8, № 4(27). – С. 128-138. – EDN YWAKZV.

128 Улицкий, В.М. Технология реконструкции фундаментов на слабых грунтах: дис. доктора техн. наук / Улицкий Владимир Михайлович. – Санкт-Петербург, 1993. – 316 с.

129 Улицкий, В. М. Гид по геотехнике. Путеводитель по основаниям, фундаментам и подземным сооружениям / В. М. Улицкий, А. Г. Шашкин, К. Г. Шашкин. – СПб: ПИ Геореконструкция. – 2012. – 288 с.

130 Уплотнение просадочных грунтов станками ударно-канатного бурения БС–1 / Ю. М. Абелев, В. Г. Галицкий, В. И. Крутов и др. – М.: Стройиздат, 1966. – 23 с

131 Федоровский, В.Г., Безволев С.Г. Метод расчета свайных полей и других, вертикально армированных грунтовых массивов // Ж. Основания, фундаменты и механика грунтов №3, М.: Стройиздат, 1994. -С.11-15.

132 Федоровский, В.Г., Безволев С.Г., Дунаев О.М. Методика расчета фундаментных плит на нелинейно-деформируемом во времени основании//Нелинейная механика грунтов: Тр. IV Рос. конф. - С-Петербург, 1993.-Т1.С.81-86.

133 Флорин, В.А. Основы механики грунтов. – Ленинград; Москва: Госстройиздат. [Ленингр. отделение], 1959–1961. – 2 т.

134 Хартман, К. Планирование экспериментов в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. – М. : Мир, 1977. – 552 с.

135 Цой, В. И. Исследование рабочего процесса уширения скважин непрерывного действия для устройства буронабивных свай: дис. канд. техн. наук / Цой В. И. – Л., 1980. – 164 с.

136 Цытович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1983. – 288 с.

137 Черняков, А. В. Струйная цементация грунтов при строительстве в условиях плотной городской застройки / А. В. Черняков // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 3(58). – С. 10–14. – EDN ОСРIFZ.

138 Шарафутдинов, Р. Ф. Прогноз осадок буронабивных одиночных свай с учетом упругопластического поведения грунта / Р. Ф. Шарафутдинов, Д. Е.

Разводовский, Д. С. Закатов // *Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий* : Материалы III Всероссийской конференции с международным участием, Пермь, 29–31 мая 2024 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2024. – С. 260-272. – EDN VYUOPV.

139 Шенкман, Р. И. Метод расчета осадок фундаментов на основании, улучшенном с использованием вертикальных грунтовых элементов в оболочке из геосинтетических материалов / Р. И. Шенкман, А. Б. Пономарев // *Construction and Geotechnics*. – 2020. – Т. 11, № 3. – С. 64–76. – DOI 10.15593/2224–9826/2020.3.06. – EDN SMAAYY.

140 Шепитько, Т. В. Влияние конструктивно-технологических особенностей насыпи и шага расстановки вертикальных столбов из щебня на устойчивость сооружения / Т. В. Шепитько, И. А. Артюшенко, Е. А. Курчаткин // *Наука и техника транспорта*. – 2023. – № 3. – С. 11–17. – EDN SKBEJK.

141 Шепитько, Т.В. Армирование грунтов основания вертикальными столбами из щебня в криолитозоне / Шепитько Т.В., Артюшенко И.А., Долгов П.Г.- Текст : непосредственный // *Мир транспорта*, 2019. – 17(4). - С. 68–78.

142 Ямонше, Ж. А. С. Взаимодействие сваи с окружающим грунтом: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.00.20 / Ямонше Жюль Анше Саньон. – М., 2001. – 19 с.

143 Abbey S. J., Ngambi S., Ngekpe B. E. Understanding the performance of deep mixed column improved soils-a review // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. – 2015. – Т. 6. – №. 3. – С. 97-117.

144 Balaam N. P., Booker J. R. Analysis of rigid rafts supported by granular piles // *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. – 1981. – Т. 5. – №. 4. – С. 379-403.

145 Bearing capacity of strip foundations in horizontal-vertical reinforced soils / Hou Juan, Zhang Meng-xi, Dai Zhi-heng, Li Jia-zheng, Zeng Feng-fan // Geotextiles and Geomembranes. – 2017. – No 1. – P. 29–34.

146 Bergado D. T. et al. Deep soil mixing used to reduce embankment settlement //Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement. – 1999. – T. 3. – №. 4. – C. 145–162.

147 Bishop, A. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes.- Geotechnique. 1955, vol.5, №1. - p.7-17.

148 Caraşca O. Soil improvement by mixing: techniques and performances //Energy Procedia. – 2016. – T. 85. – C. 85-92.

149 Carlo Viggiani, Alessandro Mandolini, Gianpiero Russo. Piles and Pile Foundations. CRC Press, 2012. 296 p.

150 DOBRY, R. and TANG-TAT NG, A. (1992), "DISCRETE MODELLING OF STRESS-STRAIN BEHAVIOUR OF GRANULAR MEDIA AT SMALL AND LARGE STRAINS", Engineering Computations, Vol. 9 No. 2, pp. 129-143. <https://doi.org/10.1108/eb023853>

151 Eid H.T., Amarasinghe R.S., Rabie K.H. и Wijewickreme D. Residual Shear Strength of Fine-Grained Soils and Soil–Solid Interfaces at Low Effective Normal Stresses // Canadian Geotechnical Journal. Vol. 52. 2015. pp. 198–210.

152 Esu, F. Numerical design. Analysis for piles in sands / F. Esu, M. Ottaviani // Journal of the geotechnical engineering division, ASCE. – 1975. – P. 693–695.

153 Giroud J. P. et al. Stability of geosynthetic-soil layered systems on slopes /Geosynthetics International. – 1995. – T. 2. – №. 6. – C. 1115–1148.

154 Gopal Madabhushi, Jonathan Knappett, Stuart Haigh. Design and Pile Foundation in Liquefiable Soils. CRC Press, 2009. 232 p.

155 Henn, Raymond W. Practical guide to grouting of underground structures. American Society of Civil Engineers, 1996, 200 p.

156 Jahiro T., Joshida H. Wichi K. The development and application of Japanese grouting system // Waterpower and dam construction, 1975, № 2.

157 Kasuya, T. and Yanase, A. (1968) Anomalous Transport Phenomena in Eu Chalcogenide Alloys. Reviews of Modern Physics, 40, 684–695.
<http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.40.684>

158 Karol Reuben H. Chemical grouting and soil stabilization. American Society of Civil Engineers, 2003, 536 p.

159 Koerner R. M. Effect of particle characteristics on soil strength // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. – 1970. – T. 96. – №. 4. – C. 1221–1234.

160 Lanis, A. L. Deformation properties of a subgrade in structures reinforced with full displacement piles / A. Lanis, D. Razuvaev, P. Lomov // MATEC Web of Conferences. X International Scientific and Technical Conference «Polytransport Systems». – 2018. – Volume 216. – 01006. – DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201821601006>.

161 Large-scale tests of pile-supported earth platform with and without geogrid / Haofeng Xing, Zhen Zhang, Huabei Liu, Hua Wei // Geotextiles and Geomembranes. – 2014. – No 6. – P. 586–598.

162 Leemon, C. R. Single piles and pile groups under lateral loading / C. R. Leemon, W. F. Van Impe // Rotterdam, 2001. – 463 p.

163 Levacher, D. R. On the behaviour of opened tubular driven piles in sand / D. R. Levacher // Proc. 6th Budapest conf. Soil mechanics and foundation. – Budapest, 1984. – P. 381–388.

164 Load transfer mechanism and deformation of reinforced piled embankments / Diego F. Fagundes, Márcio S.S. Almeida, Luc Thorel, Matthieu Blanc // Geotextiles and Geomembranes. – 2017. – No 2. – P. 1–10.

165 Lomov, P. Monitoring the deformation parameters of reinforced soil masses / P. Lomov, A. Lanis, I. Grebennikov // E3S Web of Conferences 460. – 10031. –

2023. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346010031>.

166 Mohammadi A., Ebadi T., Eslami A. Shear strength behavior of crude oil contaminated sand-concrete interface // *Geomechanics and Engineering*. 2017. Vol. 12. № 2. pp. 211-221.

167 Mohan D., Jain G., Humar V. Load bearing capacity of piles // *Geotechnique* vol. XII, №1, 1963.

168 Moseley M.P. Ground improvement. London, 2004, 440 p.

169 Nishida, V. Determination of stresses around compaction pile / V. Nishida // *Proc. of 5int conf. Soil Mech. and foudnation*. – P., 1961. – Eng. V. II. – P. 123–127.

170 Noto, S., Hita, N., Terashi, M., 1983. On practice and problem on deep soil improvement. *JGS Tsuchi-to-Kiso* 31 (7), 73–80 (in Japanese).

171 Palmeira E. M. Soil–geosynthetic interaction: Modelling and analysis // *Geotextiles and geomembranes*. – 2009. – T. 27. – №. 5. – C. 368–390.

172 Puppala A. J., Madhyannapu R. S., Nazarian S. Full-scale field studies to evaluate deep soil mixing in stabilizing expansive soils // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2022. – T. 148. – №. 1. – C. 04021163.

173 Randolph, M. F. The effect of pile type on design parameters driven piles / M. F. Randolph, I. S. Steinfeld, C. P. Wroth // *Proc. of the 7th conf. on soil Mechanic and Foundation*. – Eng.: Brighton, 1979. – Vol. 2. – P. 107–114.

174 Reese, L. C. Design and construction of dilled shafts / L. C. Reese // *Geotechnical engineering division*. – 1978. – Vol. 104. – P. 91–116.

175 Salnyi I.S., Pronozin Ya.A., Karaulov A.M Interaction of drill-injection piles with the surrounding soil // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Vol. 104. No. 4. Article number 10407.

176 Schnaid, F., Winter, D., Silva, A. E. F., Alexiew, D., & Küster, V. (2017). Geotextile encased columns (GEC) used as pressure-relief system. Instrumented bridge abutment case study on soft soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(3), 227–236.

177 Shamsheer Prakash, Hari D. Sharma. Pile foundation in engineering practice. John Wiley and Sons, Inc, 1990. 768 p.

178 Smith, I. Plugging of pipe piles / I. Smith, P. To, S.M. Willson // Num. Meth. Offshore piling.: 3rd Int. Conf. – P., 1986. – P. 53–73.

179 Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Akuletsky A. S. Interaction of large piles with a multilayer soil mass, taking into account hardening and softening // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021, Vol. 17, Is. 2, p. 67-75.

180 Terzaghi K. Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage. Deuticke, Vienna, 1925.

181 Wei Dong Guo. Theory and Practice of Pile Foundations. CRC Press, 2019. 576 p.

Приложение А – Акты о внедрении результатов исследований



ООО «Предприятие «ЭЛТЕКС»
Россия, 630020, г. Новосибирск
ул. Окружная, 29в
ИНН/КПП 5410108110/541001001

тел.: (383)274-48-01
факс: (383)274-48-02
e-mail: eltex@eltex-co.ru

Исх. № 137
от 12 ноября 2024г.

А К Т

об использовании результатов диссертационного исследования
аспиранта ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей
сообщения» Гребенникова Ивана Олеговича

Настоящим Актом подтверждается, что Общество с ограниченной ответственностью «Предприятие «Элтекс», при строительстве объекта: «Научно-исследовательский институт с подземной автостоянкой и локальным источником теплоснабжения по ул. Окружная в Калининском районе г. Новосибирска», были использовали результаты исследований аспиранта ФГБОУ ВО Сибирского государственного университета путей сообщения Гребенникова Ивана Олеговича, а именно методика проектирования и способ контроля качества усиления грунтового основания армированием вертикальными грунтоцементными элементами.

Принятые решения, основанные на научных исследованиях Гребенникова И.О., позволили получить экономический эффект за счет снижения материальных и трудовых затрат.

Директор ООО «Предприятие «Элтекс»





алтай
граждан
проект

ООО "ПИ "Алтайгражданпроект"
656015, г. Барнаул, ул. Деловая, 7
тел. (3852) 36-37-96, факс 36-38-08
mail@agr22.ru www.agr22.ru

А К Т

об использовании результатов диссертационного исследования
аспиранта ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей
сообщения» Гребенникова Ивана Олеговича

Настоящим Актом подтверждаем, что Общество с ограниченной ответственностью «ПИ «Алтайгражданпроект» в период с 2022 по 2024 г., при проектировании жилых домов в городе Барнауле, использовало результаты научных исследований аспиранта ФГБОУ ВО Сибирского государственного университета путей сообщения Гребенникова Ивана Олеговича по части усиления грунтов основания фундаментов вертикальными грунтоцементными элементами.

Внедренные результаты научных исследований Гребенникова И.О. позволили получить существенный экономический эффект за счет снижения материальных и трудовых затрат при устройстве фундаментов зданий.

Генеральный директор

В.П. Колотов

Общество с ограниченной ответственностью
«Партнёр»

Россия, 630009,
г. Новосибирск, ул. Обская, д. 50, оф. 10
тел. 266-38-85
факс 266-38-15
e-mail: psfond@psfond.ru

ИНН/КПП 5405447928/540501001
р/сч 40702810344050032592
Сибирский Банк (ПАО) Сбербанк,
г. Новосибирск
к/сч 30101810500000000641
БИК 045004641

13 «Ноября» 2024г.

А К Т

об использовании результатов диссертационного исследования
аспиранта ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей
сообщения» Гребенникова Ивана Олеговича

Настоящим Актом подтверждаем, что ООО «Партнер», при реконструкция школы по ул. Авиастроителей, 16 в Дзержинском районе г. Новосибирска, были использованы результаты научных исследований аспиранта ФГБОУ ВО Сибирского государственного университета путей сообщения Гребенникова Ивана Олеговича, а именно методика проектирования и способ контроля качества усиления грунтового основания армированием вертикальными грунтоцементными элементами.

Внедренные результаты научных исследований Гребенникова И.О. позволили получить существенный экономический эффект за счет снижения материальных и трудовых затрат.

Директор ООО «Партнер»

Кылосова О.Д.

