

На правах рукописи



Гребенников Иван Олегович

**УСИЛЕНИЕ ГЛИНИСТЫХ ОСНОВАНИЙ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (СГУПС).

Научный руководитель: кандидат технических наук
Ломов Петр Олегович

Официальные оппоненты: **Маковецкий Олег Александрович**,
доктор технических наук, доцент,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет», профессор кафедры
«Строительные конструкции и вычислительная
механика»
Анжело Георгий Олегович,
кандидат технических наук, доцент,
национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет, доцент
кафедры «Механика грунтов и геотехники»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный архитектурно-
строительный университет»

Защита состоится «01» октября 2025 г., в 15:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 (ул. Часовая, д. 22/2, стр. 1, ауд. 329).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.mii.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Артюшенко Игорь Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 усиления оснований армированием грунтоцементными элементами зачастую осуществляется с использованием научных наработок 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 буросмесительным 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 грунтоцементными элементами 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.

Целью исследования является 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 заключается 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. Что подчеркивает значимость исследования для развития отрасли.

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 бурсмесительным способом.

Степень достоверности и апробация работы. 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 натурных 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.).

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, одного приложения и списка литературы. Работа изложена на 146 страницах, содержит 48 рисунков и 18 таблиц. Список литературы включает 181 наименование работ отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе диссертационной работы выполнен анализ существующего подхода к проектированию армирования глинистых оснований вертикальными грунтоцементными элементами (далее ГЦЭ) и опыта реализации армирования с выявлением особенностей работы усиленного массива.

Проведен анализ наиболее широко используемых методов формирования искусственных оснований, а также рассмотрены области их применения.

В большинстве случаев, с учетом технических особенностей и экономической целесообразности, более предпочтительным оказывается использование усиленных грунтовых массивов армированием ГЦЭ, изготовленными бурсмесительным способом в глинистых грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е.

В связи с этим, большой интерес представляет метод усиления грунтов армированием вертикальными ГЦЭ бурсмесительным способом, как альтернативный вариант свайного фундамента. Данный способ усиления позволяет создавать в основании зданий геотехнические массивы с относительно высокими прочностными и деформационными показателями.

Бурсмесительный способ преобразования грунта включает в себя создание ГЦЭ, 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).

Анализ отечественной нормативно-технической документации позволяет сделать вывод, что для армированных ГЦЭ массивов, являющихся основанием для фундаментов зданий и сооружений, отсутствует четкий подход к расчетам по предельным состояниям. В СП 22.13330 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 общих 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 по расчету осадок с

рассмотрением армированного массива, как условного фундамента, или использовать метод ячейки. В этом случае, несущую способность ГЦЭ по грунту оценивают, как для свай.

Еще одним вариантом расчетов по предельным состояниям является моделирование изменения напряженно-деформированного состояния армированного массива численными методами с применением специализированных геотехнических комплексов. Высокая точность расчетов с использованием метода конечных элементов, 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. Вызывает вопросы и корректная оценка нагрузки на ГЦЭ, необходимая для проверки прочности армирующих элементов и расчетов несущей способности по грунту. В сравнении со свайным типом фундаментов, армирующие элементы конструктивно не сопряжены с фундаментом здания, и, как правило, между ним и таким основанием предусматривают распределительный слой – песчаную или щебеночную подушку. В результате чего происходит перераспределение напряжений между грунтом и ГЦЭ.

Существующие подходы показывают 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, весьма актуально проведение соответствующих исследований для разработки единого подхода к расчетам армированных оснований и контроля качества при устройстве таких оснований.

В этой связи в работе сформулированы цель и задачи исследования, представленные выше.

Во втором разделе проведены анализ и систематизация данных геотехнического мониторинга за строительством зданий на усиленных глинистых основаниях с целью выявления особенностей работы усиленного вертикальными ГЦЭ основания.

На семи объектах, где было запроектировано и реализовано армирование оснований фундаментов вертикальными ГЦЭ, в период их строительства проведено длительное исследование, включающее испытания армированных массивов, геодезические наблюдения за осадками фундаментов, систематизация и анализ полученных материалов. Полученные данные позволили установить связь между развитием осадок и изменением напряженно-деформированного состояния усиленного грунтового массива.

Помимо этого, на всех объектах, на этапе усиления грунтов основания, выполнены испытания плоским штампом. Испытания выполнены с целью получения

фактических значений деформационных характеристик усиленного грунтового массива.

Анализ, полученных данных показал, что на четырёх объектах, где основание сложено глинистыми грунтами с $I_L \leq 0,5$ д.е. 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.

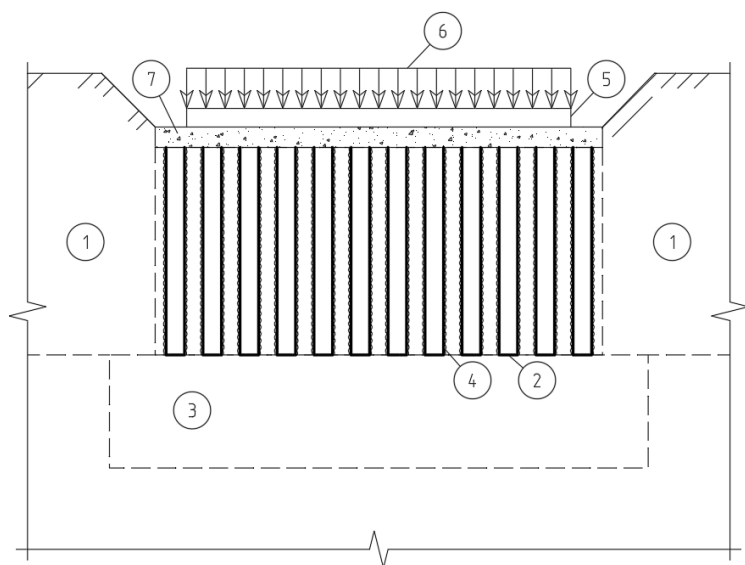
На трёх объектах, где основание сложено глинистыми грунтами с $I_L > 0,5$ д.е. в естественном состоянии, фактический модуль деформации, превышает расчетный (прогнозный) в диапазоне от 3,5 до 10 %. При этом фактическая осадка превышает расчетную (прогнозную) в диапазоне от 12 до 25 %.

Наблюдается закономерность в расхождении характеристик, полученных при однотипных испытаниях, от расчетных значений. В основании с глинистыми грунтами с $I_L \leq 0,5$ д.е. фактические значения модуля деформации отличаются в большую сторону, значения фактических осадок не превышают расчетные. В основании с глинистыми грунтами с $I_L > 0,5$ д.е. фактическое значение модуля деформации также идёт в запас, но значения осадок превышают расчетные значения на всех трёх объектах. Несмотря на достижения требуемого модуля деформации грунтов основания, значения осадок превысили требуемые.

Необходимо отметить, что модуль деформации определялся плоским штампом на уровне дневной поверхности. У штампа имеется зона 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 происходит совместная работа. Для оценки модуля деформации всего усиленного грунтового массива необходимо уточнить работу ГЦЭ и массива грунта по всей глубине зоны усиления. Анализируя объекты, наглядно видны расхождения значений фактических осадок от расчетных, которые в большей степени наблюдаются в глинистых грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е.

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., возможно повышение доли нагрузок на нижележащие грунтовые слои и увеличение сжимаемой толщи.** 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 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 ГЦЭ в массиве.

Подтверждение сформулированной гипотезы выполнено с применением численного моделирования. Создавалась численная модель грунтового основания, включающего армированный массив и грунтовую среду (рисунок 1). Моделирование нагружения армированного массива с варьированием параметров сжимаемости, как грунтовой среды, так и самих армирующих элементов, позволило качественно и количественно оценить изменение их напряженно-деформированного состояния.



- 1 – грунтовый массив за пределами зоны усиления;
 2 – вертикальные ГЦЭ; 3 – подстилающий грунтовый массив; 4 – контактная модель по боковой поверхности ГЦЭ; 5 – модель конструкции фундамента, передающая на усиленное основание нагрузку; 6 – модель нагрузки;
 7 – распределительный слой.

Рисунок 1 – Компоненты численной модели грунтового основания, армированного вертикальными ГЦЭ

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 грунтоцементные элементы. Каждый элемент численной модели описывается соответствующей моделью поведения.

Поведение грунта представлялось моделью упрочняющегося грунта (*Hardening-Soil model*). Поведение ГЦЭ описывается моделью Кулона-Мора. Основные компоненты численной модели приведены в таблице 1.

Важным аспектом создания достоверной численной модели основания, усиленного вертикальными ГЦЭ, является учет особенностей его работы.

Численная модель грунтового основания, армированного вертикальными ГЦЭ, включает в себя 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

Таблица 1 – Основные компоненты численной модели

№ п/п	Обозначение	Расшифровка обозначения
Грунтовой 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

Согласно ранее сформулированной гипотезе, необходимо учитывать проскальзывание ГЦЭ в грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е. Данное явление учитывается в модели путем наложения дополнительного оператора, описывающего взаимодействие боковой поверхности грунтоцементного элемента с окружающим грунтом (R_{inter}). Фактически накладывается условия снижения сцепления грунтоцементного элемента с окружающим грунтом. Опираясь на результаты исследований, НИИОСП им. Герсегонова, в этом вопросе параметр снижения сцепления варьируется от 0,40 до 0,066 в зависимости от вида и консистенции усиливаемого грунта.

Валидация численной модели проводилась путем сопоставления результатов численного моделирования и натурных испытаний на опытном полигоне (рисунок 2). В качестве сопоставляемых параметров принимались перемещение усиленного грунтового массива S и сжимаемость тела ГЦЭ δ при заданных параметрах внешней нагрузки на усиленный массив.

После получения необходимого объема исходных данных выполнялось численное моделирование, при котором воссоздавались условия полевых испытаний с нагружением



Рисунок 2 – Процесс изготовления ГЦЭ

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 опытном полигоне с натурными испытаниями (рисунок 2).

2. Исследование сжимаемости грунтоцемента, изготовленного на опытном полигоне, а также получение количественных данных о физико-механических характеристиках грунтовых условий опытного полигона (рисунок 3).

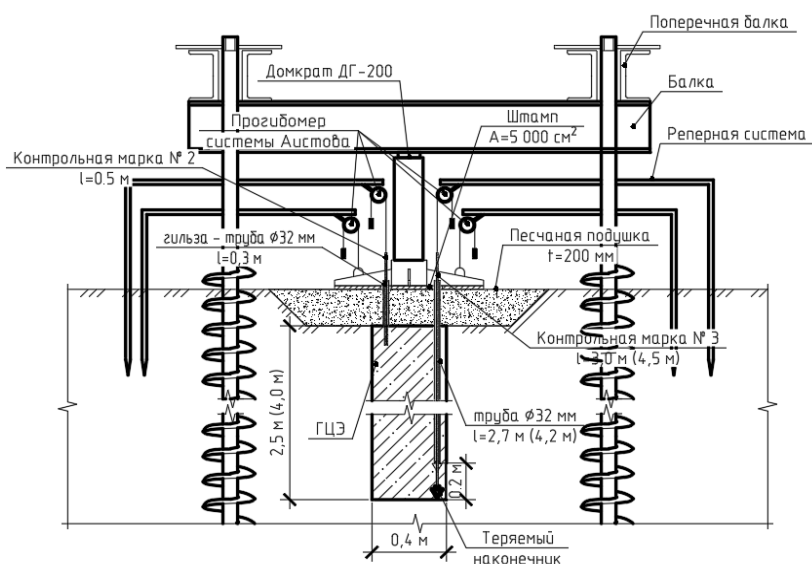


Рисунок 3 – Схема установки для испытания плоским штампом армированного грунтового массива

Моделирование статического нагружения армированных массивов выполнялось следующим образом: на каждом участке армированного массива над центральным ГЦЭ моделировалась песчаная подушка мощностью 200 мм, на которой располагался штамп круглого сечения диаметром 80 см площадью 5 000 см². Нагрузка к штампу прикладывалась ступенями по 0,1 МПа. Фиксирование перемещений оголовка и пяты ГЦЭ происходило при помощи специальных марок.

Общий вид участка армированного массива в интерфейсе программного комплекса приведен на рисунке 4.

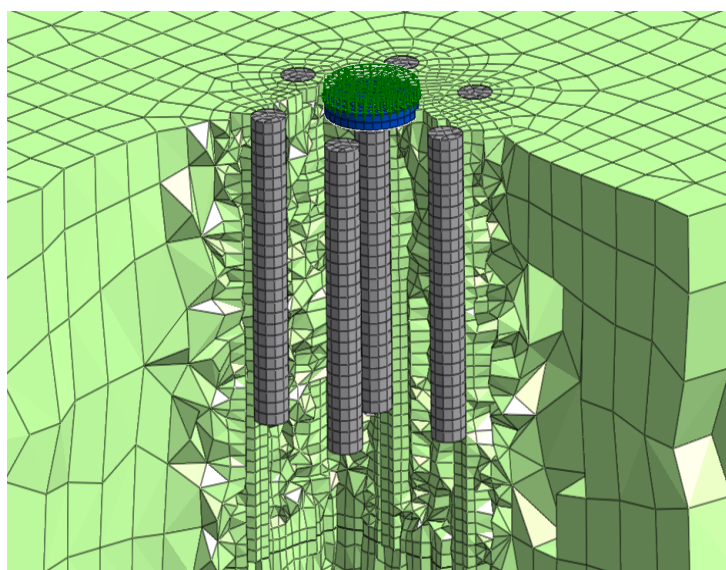


Рисунок 4 – Участок армированного массива в интерфейсе программного комплекса

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

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

Результаты натурных экспериментов и численного моделирования, в целом, показывают схожую картину работы армированного массива. Характер развития деформаций и напряжений в армированном массиве, как на натурных участках, так и в модели, оказался типовым. Основную нагрузку воспринимают армирующие элементы, что отражается на их сжатии и перемещении. Для наглядности результаты штамповых испытаний и моделирования в виде графиков представлены на рисунке 5.

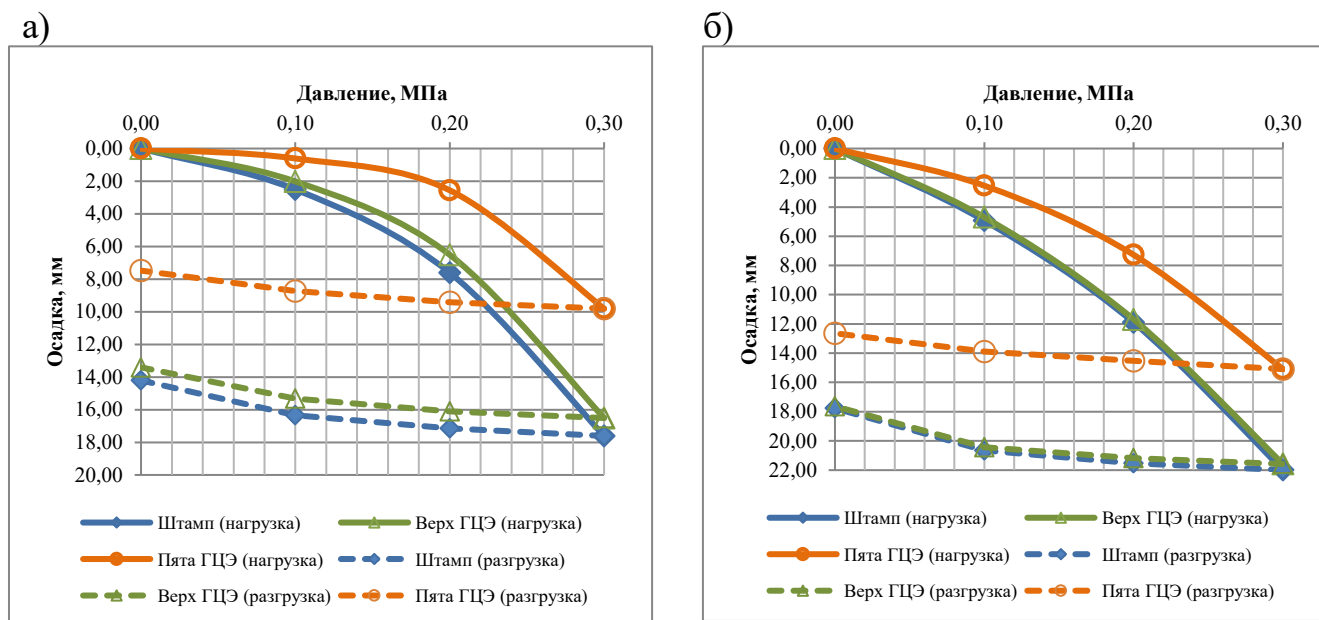


Рисунок 5 – Результаты испытаний усиленного массива:
а – натурный эксперимент; б – численное моделирование

Валидация разработанной модели и оценка соответствия данных численного моделирования и материалов натурных экспериментов на опытном полигоне выполнена сравнением критерия Фишера, определенного соотношением дисперсий соответствующих выборок, с критическим значением данного критерия, установленным при доверительной вероятности 0,95. Значения критериев Фишера, а также полученные графические зависимости сжимаемости ГЦЭ от нагрузки отображены на рисунке 6.

Значение полученного критерия Фишера для каждой зависимости ниже критического, что указывает на адекватность разработанной численной модели.

В третьем разделе с использованием численного моделирования получены закономерности изменения сжимаемости армированного вертикальными ГЦЭ грунтового массива от параметров сжимаемости ГЦЭ и

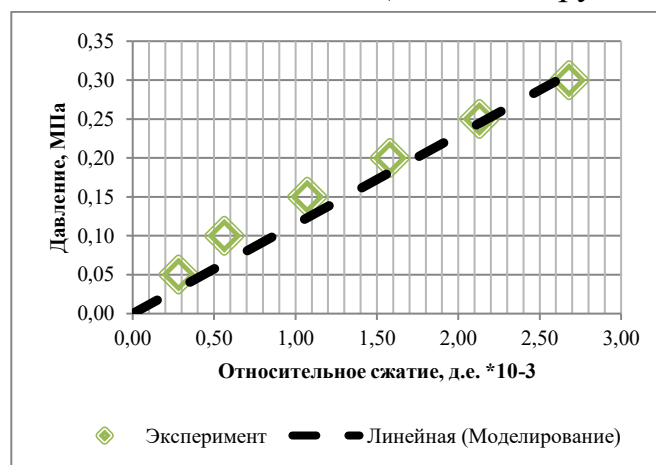


Рисунок 6 – Массив значений изменения сжимаемости ГЦЭ от передаваемой на них нагрузки на опытном участке № 1

грунта, установлены условия проскальзывания ГЦЭ по его боковой поверхности по грунту.

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 позволили оценить эффективность усиления и установить оптимальные ключевые параметры армирования для грунтов различной сжимаемости в зависимости от условий нагружения усиленного основания. Сочетание параметров на первом и втором этапах определялись при планировании данного исследования по методу латинских квадратов. Статистическая обработка результатов исследования с получением

закономерностей осуществлялась с использованием многофакторного анализа.

На рисунке 7 представлена схема проведения моделирования на *первом этапе* с ключевыми параметрами армирования.

В результате анализа полученных закономерностей было установлено, что основное влияние на эффективность усиления оказывают два из четырех исследуемых фактора. При проектировании особое влияние необходимо уделять коэффициенту армирования и модулю деформации

α_g		0,10					0,08					0,06					0,04					0,02					
		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	
P	$\frac{F_{ст}}{F_{г}}$	5																									
	7																										
	9																										
	11																										
	13																										
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 7 – Схема моделирования на *первом этапе*

грунтоцементного элемента. Влияние давления и модуля деформации грунта при прочих равных факторах является незначительным.

Результаты моделирования также позволили рассмотреть уже затронутый во втором разделе, вопрос совместной работы грунтоцементного элемента и окружающего грунтового массива (интерфейс элементов R_{inter}). На основании проведенного моделирования получены значения и зависимость сцепления окружающего грунтового массива и грунтоцементного элемента от модуля деформации грунтоцементного элемента. Зависимость сцепления окружающего грунтового массива и грунтоцементного элемента от модуля деформации грунтоцементного элемента представлена в виде графика и приведена на рисунке 8.

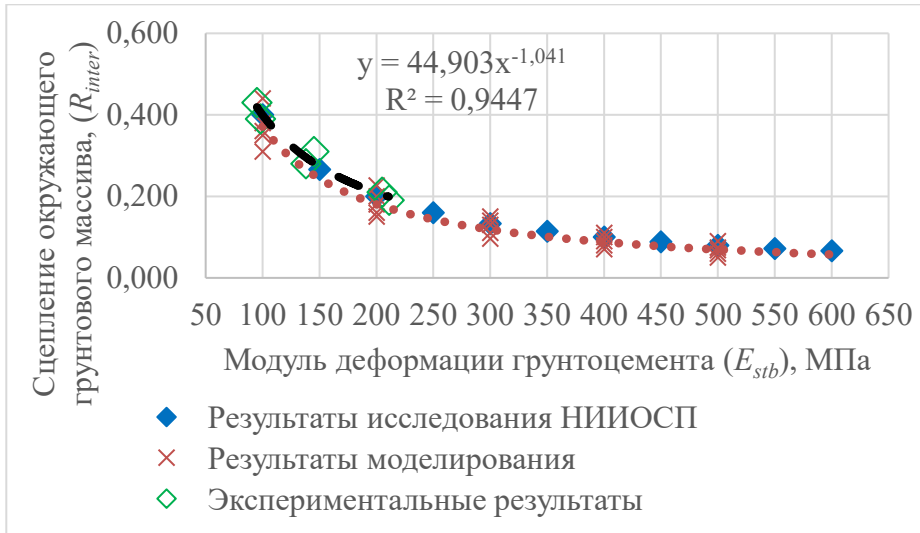


Рисунок 8 – Сцепление окружающего грунтового массива и ГЦЭ от модуля деформации ГЦЭ

диаметра, шага расстановки грунтоцементных элементов, модуля деформации грунтоцемента и грунта. На таких фрагментах оценивалась сжимаемость массивов путем моделирования штамповых испытаний, как при натурных экспериментах. По результатам таких смоделированных испытаний расчетным способом определялся модуль деформации усиленного массива, и анализировались результаты численного моделирования по части распределения напряжений в массиве.

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

Параметр группы I отражает изменчивость грунтовых условий – выражаемых модулем деформации грунта в области усиления E_{cp} (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 2).

Таблица 2 – Варьирование параметров I, II и III

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

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

Схема проведения моделирования на *втором этапе* отражена на рисунке 9.

		I	1	2	3	4	5
1	1		1				
	2			2			
	3				3		
	4					4	
	5						5
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 9 – Схема проведения моделирования

симметрии штампа (рисунок 10). 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.

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 того, чтобы выполнить обработку результатов моделирования, используется (η) соотношение модулей деформации модуля деформации окружающего грунта к модулю деформации ГЦЭ:

С использованием полученных в разделе 2 закономерностей механических характеристик ГЦЭ от исходного грунта было смоделировано 25 фрагментов армированного массива. Каждый фрагмент состоял из семи ГЦЭ. Эффект от каждого параметра оценивался модулем деформации армированного массива. В связи с чем для каждого фрагмента моделировалось штамповое испытание как при натуральных испытаниях на опытном полигоне.

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

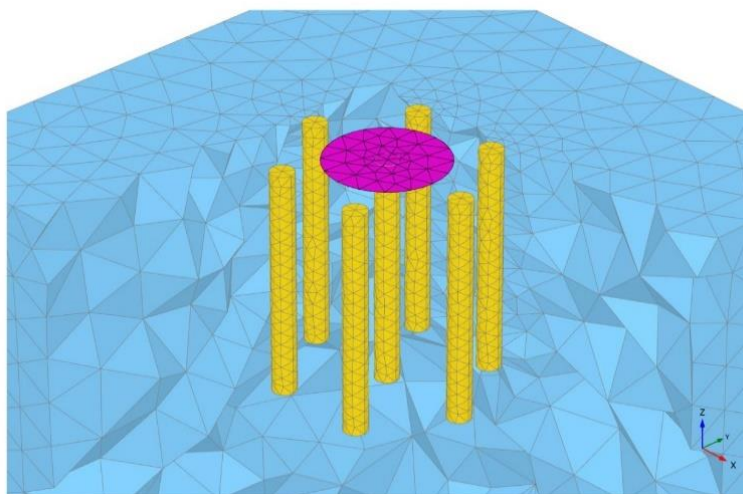


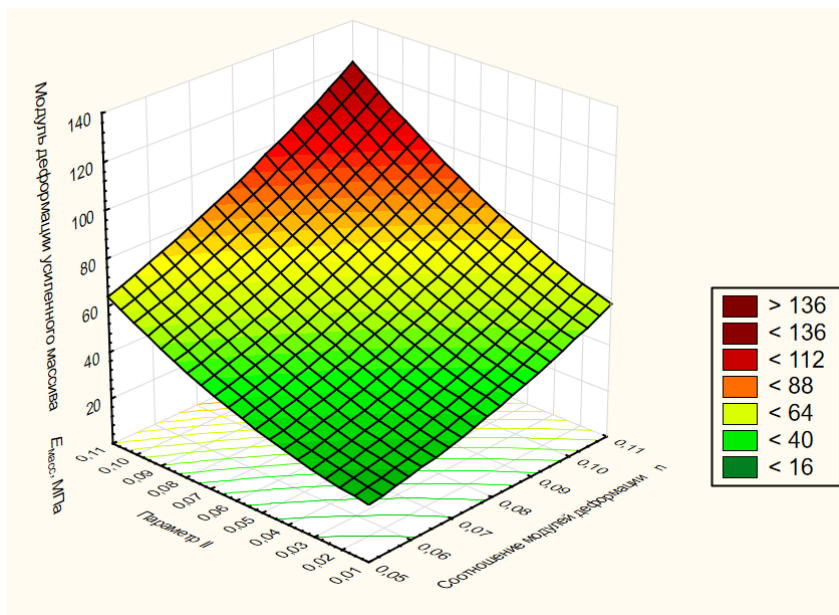
Рисунок 10 – Модель штампового испытания в программной среде

$$\eta = E_{zp} / E_{stb} \quad (1)$$

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

Данный параметр принят с использованием исследований О.А. Маковецкого. Благодаря этому при обработке результатов, параметры I и III описываются параметром η .

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 11.

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.

Аппроксимация массива полученных данных также позволила выявить

Рисунок 11 – Графическая зависимость, отражающая влияние параметров армирования I, II и III на модуль деформации усиленного массива

функциональную зависимость влияния параметров грунтовой среды и параметров армирования на изменения деформационных характеристик усиленного грунтового массива:

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

где η – соотношение модулей деформации окружающего грунта к модулю деформации грунтоцементного элемента); 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 данной 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.

В четвертом разделе диссертационной работы разработана методика проектирования основания, армированного ГЦЭ, изготовленными буросмесительным способом, в грунтах с показателем текучести более 0,5 д.е., которая составлена в виде алгоритма (рисунок 12).

На начальном этапе проектирования необходимы исходные данные об инженерно-геологических условиях и конструктивных решениях будущего здания или сооружения в объеме, соответствующем требованиям по проектированию оснований фундаментов зданий и сооружений.

На основании выполненного анализа инженерно-геологических условий площадки и результатов предварительного расчета по второй группе предельных состояний определяется глубина усиления и модуль деформации усиленного грунтового массива, при которых расчетная осадка сооружения не будет превышать предельно допустимых значений, установленных СП 22.13330.

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 толщине) и диаметр смесителя для устройства грунтоцементных элементов.

Далее с использованием данных, полученных в 3 разделе, в зависимости от соотношения модулей деформации армированного грунтового массива, 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.

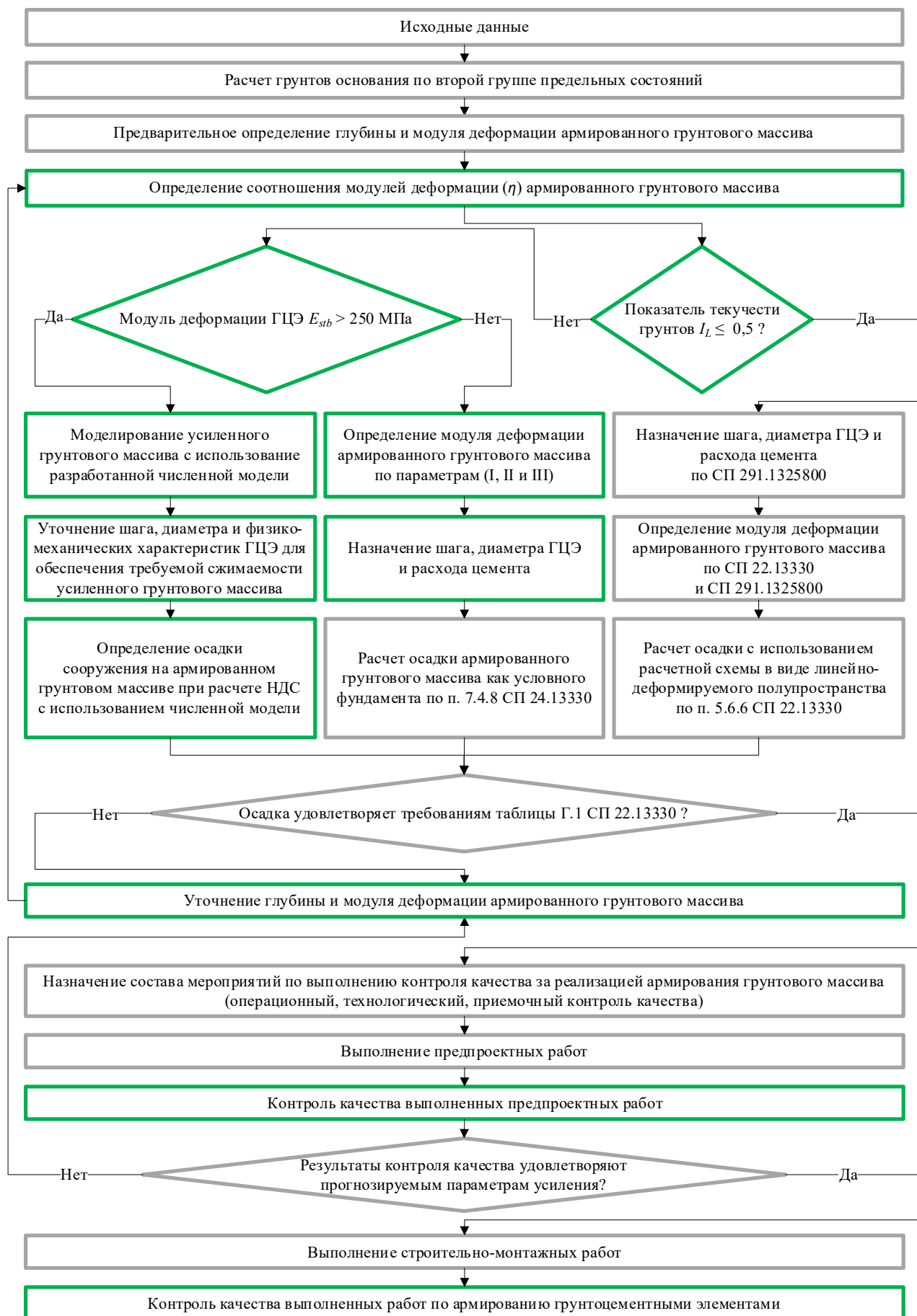


Рисунок 12 – Алгоритм проектирования усиления грунтов, армированием ГЦЭ

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 усиляемого грунтового массива и физико-механические характеристики грунтоцементных элементов и окружающего грунта. На основании выполненного расчета уточняется глубина сжимаемой толщи.

Следующим этапом является выполнение расчета напряженно-деформированного состояния с использованием разработанной во 2 разделе численной модели. Задаются необходимые характеристики грунтового массива, включающего в себя: геометрические параметры усиляемого грунтового массива и физико-механические характеристики ГЦЭ и окружающего грунта. Для этого используются материалы раздела 2. На основании выполненного расчета уточняется глубина сжимаемой толщи и уточняется модуль деформации, усиленного армированием грунтоцементными элементами грунтового массива.

При выборе расхода цементного раствора необходимо соблюдать рецептуру (из расчета на 1 м³ изделия) с учетом обеспечения прочностных и деформационных характеристик усиленного основания. Основным критерием для назначения расхода цементного раствора является его модуль деформации (E_{stb}) и прочность 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 после проведения опытных работ на начальном этапе усиления, а также после выполнения полного объема работ по усилению основания.

Для контроля деформационных характеристик армированного грунтового массива, в рамках настоящего исследования, разработан и реализован способ контроля деформационных характеристик основания при его усилении армированием ГЦЭ. На разработанные способы получены два патента РФ. Согласно разработанного



способа, для проведения штампового испытания подбирают штамп, площадь (A_u) которого приближена к площади зоны воздействия центрального армирующего элемента участка массива армированного грунта (A_e), рисунок 13.

Рисунок 13 – Общий вид штампового испытания армированного основания (площадь штампа 38 000 см²)

Для оценки эффективности метода

армирования массива грунта выполнен технико-экономический анализ сравнением альтернативными способами армирования грунтовых массивов, а также с буросмесительным способом, рассчитанным по стандартной методике и по усовершенствованной методике, на примере административного здания в г. Новосибирске (рисунок 14). Результаты, проделанной работы, так же использованы при проектировании усиления основания, армированного ГЦЭ, изготовленными по буросмесительному способу, на данном объекте.

Оценка экономической эффективности применения разработанной методики определялась на основе сопоставления стоимости затрат на реализацию различных способов устройства основания и свайных фундаментов административного здания. На основании выполненного технико-экономического сравнения можно увидеть, что вариант усиления грунтов армированием грунтоцементными элементами буросмесительным 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.

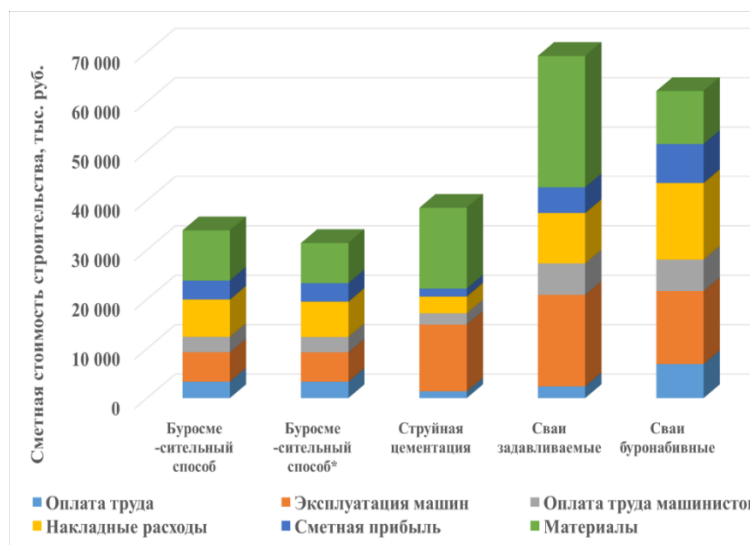


Рисунок 14 – Сметная стоимость вариантов армирования грунтового массива

При применении усиления грунтового массива армированием грунтоцементными элементами, выполненными буросмесительным 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).

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 буросмесительным 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 буросмесительного способа армирования грунтового массива. По результатам диссертационного исследования рекомендуется для глинистых грунтов с показателем текучести более 0,5 д.е. применение усовершенствованной 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 работ, опубликованных автором по теме диссертации

а) в рецензируемых научных изданиях

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

2. 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.

б) в изданиях, индексируемых в международных базах данных

3. 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>.

в) в других изданиях

4. 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.

г) патенты на изобретения

5. 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.

6. 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.

Гребенников Иван Олегович

**УСИЛЕНИЕ ГЛИНИСТЫХ ОСНОВАНИЙ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «03» июля 2025 г.

1,0 печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 4025

Издательство ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191 тел. (383) 328-03-81. e-mail: bvuv@mail.ru
