

АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе Джумадиловой Сауле Жакинбековны на тему: «Современные эффективные методы укрепления грунтов для формирования надежных оснований зданий и сооружений» на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D07321 – «Строительство»

Актуальность работы. В связи с расширением границ города Алматы и дефицитом территорий, сформированных прочными крупнообломочными грунтами, для застройки все активнее используются участки, неблагоприятные в строительном и особенно в сейсмическом отношении. К таким участкам относятся территории, сложенные макропористыми, лессовыми отложениями, обводненными и водонасыщенными грунтами, которые формируют горные и предгорные районы, а также малозастроенные прилегающие территории. Эти участки часто расположены на косогорах и склонах с крутизной более 15 градусов к горизонтали, а также на плоскогорьях. Именно на такие участки выносятся строительство объектов транспортной инфраструктуры, промышленных и коммерческих объектов. Также для объектов гражданского строительства социального назначения и жилья эконом-класса предоставляются территории в периферийных зонах городов, где преобладают насыпные техногенные отложения, слабые глинистые или просадочные грунты.

Одной из ключевых проблем является строительство в сейсмоактивных районах, что создает определенные сложности при проектировании фундаментов и возведении сооружений. В таких условиях требуется проведение специализированных инженерных мероприятий для повышения надежности оснований. Мировая практика показала, что мероприятия по улучшению строительных свойств грунтов являются не только эффективным способом повышения безопасности сооружений, но и экономически выгодным решением для нулевого цикла строительства. В этом контексте технологии укрепления и стабилизации грунтов продолжают активно развиваться.

В диссертации рассматриваются современные эффективные методы укрепления грунтов для создания надежных оснований зданий и сооружений в сложных геологических условиях. В настоящее время создано и успешно применено множество технологий для укрепления и стабилизации слабых грунтов, которые используются в различных строительных проектах. Особую актуальность это приобретает в условиях сейсмоактивных зон, где надежность фундаментов является ключевым фактором безопасности.

Современные методы, такие как инъекционные технологии, использование геосинтетических материалов, технологии глубокого смешивания (DSM), позволяют значительно улучшить физико-механические свойства слабых грунтов. Это снижает вероятность деформаций и увеличивает несущую способность оснований даже в сложных инженерно-геологических условиях. Важно отметить, что совершенствование данных методов происходит не только за счет внедрения новых материалов, но и за счет развития инженерных решений,

таких как использование композитных материалов и инновационных технологий мониторинга состояния грунтовых оснований в реальном времени.

Целью диссертационной работы - проведение теоретических и экспериментальных исследований для обоснования наиболее эффективных методов упрочнения слабых глинистых, водонасыщенных и насыпных грунтов.

Объектом исследования являются слабые глинистые, песчаные, лессовые, и другие грунты с низкой несущей способностью, высокой сжимаемостью и подверженностью деформациям под действием нагрузок, используемые в качестве оснований.

Предметом исследования являются методы и технологии упрочнения слабых грунтов, применяемые для повышения их несущей способности и уменьшения деформационных свойств при возведении зданий и сооружений.

Задачи исследования:

- выделить наиболее эффективные методы упрочнения слабых грунтов с учетом особенностей региональных грунтовых условий;
- исследовать механические свойства и применение геосинтетических материалов для повышения несущей способности насыпных и слабых грунтов;
- оценить эффективность инъекционных составов (смола) и других добавок для улучшения характеристик рыхлых песков, глинистых и гравийных грунтов;
- исследовать применение метода мокрого глубинного перемешивания для укрепления лессовых и обводненных грунтов, а также эффективность армирования грунтоцементных колонн;
- обосновать эффективность методов усиления слабых грунтов на конкретных объектах с использованием современных геотехнических программ и методов конечных элементов.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

- разработаны установки для испытаний геосинтетических материалов на растяжение для получения параметров временной и длительной прочности при разных условиях нагружения;
- разработана методика проведения испытаний геосинтетических материалов, отражающая их работу в грунтовом основании;
- получены данные по кратковременной и длительной прочности геосинтетических материалов, используемых для упрочнения насыпных грунтов;
- получены параметры упрочненных грунтов различного состава и свойств при их упрочнении полиуретановыми смолами и другими добавками;
- получены основные физико-механические параметры грунтоцементных колонн, выполненных в грунтах региона Южного Казахстана;
- получена зависимость свойств от петрографического и физического состава и начального состояния грунтов;
- выявлена необходимость проведения подобных исследований для контроля качества упрочнения для всех участков, где рекомендуется к применению технологии глубинного перемешивания;
- разработана и изготовлена установка для модельных испытаний усиленных грунтоцементных колонн на сжатие;

– выявлены закономерности повышения несущей способности при применении различных армирующих материалов и определены условия их применения на практике.

Практическая значимость диссертации

– разработаны практические рекомендации по применению пенополиуретановых смол для упрочнения суглинков, песков и крупнообломочных грунтов, и повышения их устойчивости при разработке;

– получены данные по долговременной прочности геосинтетических материалов и изучено их поведение при ступенчатом и длительном нагружениях;

– установлено, что грунтоцементные колонны DSM проявляют анизотропные свойства в вертикальном и горизонтальном направлении и зависимость их механических параметров от влажности;

– установлено, что применение дополнительного армирования грунтоцементных колонн повышает их предел прочности на одноосное сжатие и соответственно несущую способность упрочненного массива.

В диссертации использованы следующие методы: лабораторные исследования, включающие создание установок для испытаний геосинтетических материалов и грунтоцементных колонн, а также проведение испытаний на прочность и растяжение различных образцов, таких как инъекционные составы и армированные элементы; теоретические исследования, направленные на анализ существующих методов упрочнения грунтов на основе научной литературы и нормативов, разработку методики испытаний для оценки влияния арматуры на прочность грунтоцементных колонн и обоснование роли контакта грунта с геосинтетиками для повышения несущей способности; полевые испытания для оценки эффективности инъекционных и механических методов укрепления на строительных объектах и мониторинга долговечности укрепленных грунтов; экономический анализ, предусматривающий расчет целесообразности применения различных методов укрепления с учетом затрат, сроков выполнения работ и их эффективности в эксплуатации; и компьютерное моделирование с использованием программ PLAXIS 3D и MIDAS 3D для оптимизации выбора методов упрочнения грунтов под различными нагрузками в зависимости от строительных условий.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты лабораторных и полевых исследований по подбору оптимального количества пенополиуретановой смолы в составе грунтового массива из суглинков, песков и крупнообломочных грунтов для повышения их прочности, и устойчивости;

– результаты лабораторных исследований показателя длительной прочности, характерного для геосинтетических материалов: гексагональной геосетки ТХ-170, полипропиленовой геосетки СД-40, одноосной геосетки СО-90 и нетканого геотекстиля.

– методика проведения испытаний геосинтетических материалов, отражающая их работу в грунтовом основании;

– результаты исследования по условиям формирования требуемой прочности грунтоцементных колонн в различных инженерно-геологических условиях;

– результаты исследования по возможности повышения прочности грунтоцементных колонн за счет их дополнительно армирования двутавровыми или трубными профилями, а также пространственным каркасом из арматурных стержней.

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждена использованием сертифицированного оборудования при проведении полевых и лабораторных испытаний, сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов, достаточной кратностью проведения испытаний и исследований, сопоставлением результатов испытаний с данными аналитических расчётов в PLAXIS 3D.

Личный вклад автора в науку

Заключается в постановке цели и задач исследования, проведении полевых и лабораторных испытаний, определении оптимального расхода пенополиуретановой смолы для упрочнения слабых грунтов, разработке методики упрочнения колонн DSM, а также получении новых данных по прочности и эффективности геосинтетиков в составе упрочненного грунта.

Апробация и внедрение научных результатов диссертационного исследования подтвердили практическую ценность разработанных методов и их успешное применение в реальных условиях. По теме диссертации были получены следующие подтверждения внедрения: Акт о практическом внедрении результатов диссертационного исследования в ТОО «АсадСервис» от 10.04.2024 г., Акт о практическом внедрении в ТОО «Geofocus» от 15.05.2024 г., а также Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс ТОО «Международной образовательной корпорации» от 24.06.2024 г. Основные положения работы доложены и обсуждены на международных семинарах:

- межвузовский научный семинар «Цифровой инжиниринг в гражданском строительстве» на базе СПбПУ (2024);
- международный семинар «Инженерные изыскания, проектирование и строительство сейсмостойких зданий и сооружений» (2024г.).

Результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих научных изданиях:

1. The use of geosynthetic materials to increase the bearing capacity of soil cushions // A Scientific Internet-Journal «Nanotechnologies in construction». 2024, 16 (4), 342-355.

2. Способы защиты фундаментов от коррозии их преимущества и недостатки // Вестник Казахской головной архитектурно-строительной академии. 2017, 3(65), 209-213.

3. Technology for strengthening soil materials using two-component polyurethane material GEOPUR // QazBSQA Хабаршысы. 2024, 1(91), 65-77.

4. Исследования влияния армирования геосинтетическими материалами на прочность грунтов в условиях трехосного сжатия и одноплоскостного среза // QazBSQA Хабаршысы. 2024, 3(93), 121-139.

5. Injection of two-component Geopur resin for strengthening sandy soils // QazBSQA Хабаршысы. 2024, 3(93), 95-107.

6. Исследование физико-механических свойств геосинтетических материалов применительно для работы в грунтовых основаниях // Вестник АО «КазНИИСА». 2023, 4(10,11,12), 78-94.

По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе: 1 статья в изданиях, индексируемых базами Scopus Web of Science; в журналах из перечня изданий Комитета по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО РК – 4 статьи; в других изданиях Республики Казахстан – 1 статья.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа изложена на 169 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 разделов и основных выводов, из них основного текста 133 страниц и 36 приложений, содержит 23 таблицы, 80 рисунков, список использованных источников из 100 наименований.

Основное содержание работы. Во введении диссертации обоснована актуальность исследования, связанная с необходимостью повышения несущей способности слабых грунтов в условиях строительства на сложных геологических участках. Сформулированы цели и задачи исследования, направленные на разработку и оптимизацию методов упрочнения грунтов для повышения их устойчивости и долговечности. Обоснована научная новизна, связанная с предложением новых подходов к упрочнению грунтов и оценке их эффективности.

В первой главе «Обзор современных методов укрепления слабых грунтов» проведён обзор литературных источников и рассмотрены существующие методы упрочнения слабых грунтов. Особое внимание уделено методам, таким как инъекция упрочняющих составов, Jet Grouting, Deep Soil Mixing, а также использование геосинтетических материалов. Описаны основные технологии их выполнения, определены преимущества, недостатки и области применения. Проанализированы существующие теоретические подходы к оценке эффективности данных методов, а также их практическая реализация в строительстве. На основе проведённого анализа выявлены основные проблемы в исследованиях, что послужило обоснованием необходимости дальнейшего изучения и оптимизации технологий упрочнения для повышения несущей способности грунтов южных регионов Казахстана.

Выводы по первой главе

1. Выполнен анализ методов упрочнения грунтов и выделены наиболее прогрессивные и эффективные методы для упрочнения слабых макропористых грунтов, водонасыщенных глинистых и песчаных, а также насыпных и других структурно неустойчивых грунтов.

2. Исследована область применения новых инъекционных материалов типа пенополиуретановых смол. Выделены положительные стороны и недостатки. Намечены области исследований для возможности их применения при упрочнении слабых макропористых, водонасыщенных и насыпных грунтов в стесненных условиях городской застройки.

3. Исследованы современные технологии упрочнения оснований, основанные на методах без удаления грунта. Применение раскатанных элементов и метода мокрого глубинного перемешивания позволяют выполнять глубинное упрочнение путем повышения начальной плотности и повышая несущую способность устройством дополнительных армирующих элементов.

4. Выделены виды геосинтетических материалов, применение которых повысить несущую способность и уменьшит деформации насыпей и грунтовых подушек из насыпных грунтов.

5. Показано разнообразие геологических условий на примере отложений Алматы и Шымкента. Выделены основные типы грунтов, использование которых в качестве оснований зданий и сооружений без замены или упрочнения не представляется возможным. Предложены основные конструктивные схемы упрочнения слабых оснований с использованием современных методов и технологий.

Во второй главе «Метод инъекционного укрепления оснований упрочняющими составами» рассматривается метод инъекционного укрепления оснований с использованием двухкомпонентной смолы Georig. Описаны условия и программы проведения экспериментов, включая параметры свойства песчаных, связных и гравийных грунтов и выбранные методы укрепления, такие как инъекционные технологии. Приведены результаты испытаний, включая изменения физико-механических характеристик грунтов, такие как плотность, прочность на сжатие и деформационные свойства. На основе полученных данных проведён анализ влияния метода на улучшение несущей способности грунтов, а также оценка его эффективности для укрепления оснований.

Выводы по второй главе

1. Выбраны и изучены природные свойства грунтов, подлежащих закреплению по методу инъекции упрочняющих составов и составлена программа исследований.

2. Выполнено закрепление песчаных грунтов разной начальной плотности, суглинка естественного и водонасыщенного состояния и гравийного грунта разной начальной плотности. Получены данные по физическим и механическим параметрам до и после закрепления.

3. Получены данные по расходу полиуретановой смолы Georig для достижения требуемой прочности для каждого вида испытуемого грунта.

4. Исследованиями по методу инъекции упрочняющих составов получено, что в зависимости от типа грунта рекомендуются следующие составы смол: для глинистых грунтов твёрдой и полутвёрдой консистенции — Georig 082/180, для пластичных и текучих глинистых грунтов — не менее Georig 082/290, для песков — Georig 230, для гравийных грунтов — Georig 082/90.

5. Для выполнения инъекций рекомендуется использовать анкерные штанги ИВО типов R32S и R32N в зависимости от характеристик грунта. Расход материалов для упрочнения суглинков и других типов грунтов варьируется от 100 до 600 кг/м³, в зависимости от их состояния и типа.

6. Проведены полевые испытания на площадке по упрочнению суглинков и крупнообломочных грунтов на глубину до 3 метров от поверхности земли.

Отобраны контрольные образцы по длине инъекционных анкеров для оценки качества процесса упрочнения. Выполнен отбор монолитных массивов для изучения процесса инъецирования при упрочнении крупнообломочных грунтов разной начальной плотности.

В третьей главе «Обоснование укрепления методом глубинного перемешивания DSM» рассматривается метод глубинного перемешивания DSM (Deep Soil Mixing) для укрепления грунтов. Описаны свойства грунтов при применении данного метода, а также проведено определение физико-механических характеристик грунтоцементных колонн. Представлена программа лабораторных исследований, описаны методики и параметры используемого оборудования, с последующим анализом полученных результатов. В главе также уделено внимание исследованию прочности композитных колонн. В рамках исследования для армирования композитных колонн использованы стальной двутавр, труба и арматурная сталь в виде пространственного каркаса. Сформированы четыре модели для проведения испытаний. Приведены результаты упрочнения методом DSM и для сопоставления выполнен аналитический расчет моделей DSM. Приводится обоснование по эффективности применения метода глубинного перемешивания для укрепления грунтов.

Выводы по третьей главе.

1. Подготовлены опытные колонны DSM для контроля качества перемешивания, однородности состава прочности на одноосное сжатие грунтоцементных упрочняющих элементов. Контрольные образцы отбирались спустя 28 суток после предполагаемого набора прочности в горизонтальном и вертикальном направлении. Испытания проводились в естественном и водонасыщенном состоянии. Получены данные по физическим и механическим параметрам грунта до и после упрочнения.

2. Подготовлена программа испытаний DSM колонн моделей в масштабе 1:10 с разными вариантами упрочнения ствола колонн. Для упрочнения использованы металлические профили в виде двутавра, трубы и пространственного каркаса из стержневой арматуры.

3. Подготовлены специальная установка для испытаний модели DSM на сжатие. Испытания проведены ступенчатой возрастающей нагрузкой до разрушения. Получены графические зависимости изменения деформация модели при увеличении вертикальной силы.

4. Проведены испытания контрольных образцов в приборе трехосного сжатия. Испытывались образцы диаметром 50мм. Контролируемыми параметрами являлись предел прочности на сжатие и модуль деформации.

5. Результаты испытаний пробных свай показал, что наблюдается изменение предела прочности по влажности. Наблюдается явление, связанное с перемешиванием крупного песка и местного суглинка в верхней части опытных свай. Это приводит к неоднородному составу и неодинаковой прочности по высоте ствола DSM. Результатами испытаний получены фактические значения предела прочности и выявлена анизотропия по вертикали и горизонтали в

значениях предела прочности на сжатие около 20-28% и снижение прочности при водонасыщении достигает до 10%.

6. Результаты испытаний на сжатие образцов моделей DSM показали существенное повышение несущей способности DSM по материалу. Повышение составило 100-150% от несущей способности без армирования. Недостатком выполненного физического моделирования является отсутствие бокового обжатия, характерного для работы DSM в грунтах.

В четвертой главе «Поверхностное упрочнение грунтовой подушкой, усиленной геосинтетическими материалами» описываются методика исследований и параметры используемого оборудования для изучения укрепления грунтов с применением геосинтетических материалов. Проведены лабораторные исследования, направленные на определение механических свойств, характеризующих длительную прочность геосинтетиков на растяжение для повышения несущей способности. Особое внимание уделено испытаниям взаимодействия на границе грунт-геосинтетика, включая анализ взаимодействия геосинтетика с гравийным грунтом. В завершении представлены результаты испытаний и оценена эффективности использования геосинтетических материалов для укрепления грунтовой подушки.

Выводы по четвертой главе

1. Разработаны и подготовлены установки для испытания геосинтетических материалов: георешетки, геосетки, геотекстиля и геомембран на растяжение для получения параметра длительной прочности. Установки позволяют выполнять испытания ступенчатой возрастающей нагрузкой до разрушения и постоянно действующей нагрузкой в течении длительного периода времени.

2. Разработана программа проведения испытаний для определения механических параметров для основных применяемых геосинтетических материалов.

3. Проведена модернизация сдвигового прибора для проведения исследования свойств на границе грунт-геосинтетика. Результаты получены для испытаний с гравелистым грунтом и гексагональной георешеткой на контакте в плоскости сдвига.

4. Испытания геосинтетических материалов в кинематическом режиме показало, что для всех материалов наблюдается снижение прочности при разрыве. Снижение колеблется в диапазоне от 28% до 42% для геосеток разного типа. Относительное удлинение при разрыве уменьшилось для гексагональной и двухосной георешетки на 8,6% и 30% соответственно. Для одноосной георешетки получено увеличение относительного удлинения. По геотекстилю прочность при разрыве уменьшилось на 15,7%. Относительное удлинение увеличилось на 26,5%. Полученные данные скорее всего отражают длительную прочность материалов.

5. Испытаниями на модифицированном сдвиговом приборе на примере исследований с гравелистым грунтом показано, что эффективность повышения механических свойств грунтовых подушек, упрочненных геосинтетическими материалами зависит от точности определения свойств на границе геосинтетик – грунт.

В пятой главе «Рекомендации по расчету и проектирования упрочненных оснований» представлены расчеты методом конечных элементов в программном комплексе MIDAS GTS NX на примерах строительных площадках г. Алматы и г. Шымкента. Также были представлены результаты программного расчета напряженного и деформированного состояния основания до и после упрочнения, включающие оценку напряжений по подошве фундамента и анализ деформаций основания здания. Эти расчеты подтвердили снижение деформаций и повышение несущей способности при упрочнении грунтового основания, что положительно сказывается на устойчивости и долговечности конструкции.

Выводы по пятой главе

1. Пример расчета упрочнения слабого основания по г. Алматы показали, что без усиления основания максимальные осадки фундаментов превышают предельно допустимые значения (осадка фундаментов Блоков 1-10 составляет 17,04-20,22 см, а деформация паркинга – 18,5 см), а несущая способность грунта неудовлетворительна.

2. Коэффициент использования несущей способности грунта под подошвой фундамента составил 132,9%, что выше нормы. Для усиления предложен комбинированный метод, включающий гравийную подушку (0,6-1,2 м) и глубинное перемешивание (DSM) Ø1000-1200 мм, длиной 4-9,5 м.

3. После упрочнения осадка уменьшена до 3,4-4,56 см, что соответствует нормативам.

4. Пример расчета упрочнения слабого основания по г. Шымкент, показали, что без усиления основания для Блока А максимальная осадка фундаментной плиты составила 43,06 см, а относительная разность осадок – 0,0032, что превышает предельные значения по СП РК 5.01-102-2013 (22,5 см и 0,0030 соответственно).

5. После упрочнения основания грунтоцементными сваями DSM Ø1000 мм (14 м, 820 шт.), максимальная осадка уменьшилась до 17,76 см, а относительная разность осадок — до 0,0021, что соответствует нормативам. Усилия в сваях не превышают предельно допустимую нагрузку ($1384,2 \text{ кН} < 1396,8 \text{ кН}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Большая часть интенсивно застраиваемой территории южного Казахстана расположена на грунтах со специфическими свойствами. К ним относятся просадочные, лессовые, набухающие и переувлажненные слабые грунты. Из строительной практики известно, что при строительстве зданий в таких условиях требуются мероприятия по упрочнению грунтов оснований.

2. Для закрепления грунтов в стеснённых условиях городской застройки рекомендуется к применению инъекционная технология. Это связано с использованием компактного оборудования и достаточной эффективностью процесса упрочнения. Рекомендуются к применению следующие двухкомпонентные полиуретановые составы Georig: для твёрдых и полутвёрдых глин – Georig 082/180, для пластичных и текучих – Georig 082/290, для песков – Georig 230, для гравийных грунтов – Georig 082/90. Для инъекций используются анкерные штанги ИВО: тип R32S – для гравийных грунтов, тип R32N – для

глинистых и песчаных. Расход Геориг составляет: для твёрдых суглинков – 100 кг/м³, тугопластичных – 300 кг/м³, мягкопластичных – 600 кг/м³; для песков – 100 кг/м³, гравийных грунтов – 150-200 кг/м³, твёрдых глинистых – 180-200 кг/м³.

3. Получено, что средняя плотность упрочненного грунта в целом уменьшается. Это объясняется тем, что после введения смолы Геориг происходит ее расширение и увеличение объема. Начальная плотность уменьшается и составляет 1,28т/м³ с глубины 0,9 и до 1,48т/м³ на глубине 4,2м. Считаем, что чем ближе к поверхности, тем меньше природное давление и тем больше вероятность разуплотнения грунта при вспенивании материалом Геориг. Установлено, что при введении материала Геориг происходит структурирование текстуры грунта, и он переходит из класса дисперсных в класс полускальных грунтов. Прочность структурированного грунта повышается и характеризуется пределом прочности на одноосное сжатие R. Исследованиями установлено, что значение R по глубине меняется от 1,94МПа на глубине 0,9м до 4,57МПа на глубине 4,2м. Эти данные свидетельствуют о достаточном наборе прочности вследствие инъецирования.

4. Применение технологии мокрого глубинного перемешивания для упрочнения грунтов основания в регионах Казахстана является пионерным процессом и поэтому определение физико-механических параметров упрочняющих элементов является обязательным и необходимым для качественной оценки фактической несущей способности упрочненных массивов. Для проведения испытаний подготовлены опытные грунтоцементные колонны, из которых отобраны образцы по высоте до 2-х метров от устья колонн в горизонтальном и вертикальном направлении. В связи с тем, что уровень грунтовых вод на объекте располагается в непосредственной близости от начала сваи, область для отбора образцов была ограничена началом этого уровня. Испытания по определению предела прочности проводились в приборах одноосного в естественном и выдержанном в воде состоянии.

5. Анализ испытаний показал, что в свае №1 предел прочности зависит от влажности, что подчеркивает необходимость её учета при оценке механических характеристик. В верхней части сваи №2 наблюдается перемешивание крупного песка, что объясняет отсутствие изменений предельной прочности при разной влажности. Увеличение содержания песка не влияет на прочностные характеристики при водонасыщении. По данным №3 сваи можно заметить, что природный уровень грунтовых вод оказывает влияние на прочность грунтоцемента.

6. КазГАСА и КазНИИСА провели исследования грунтоцементных колонн на опытных строительных площадках, отбирая образцы с глубины 2-3 метра для испытаний в приборах одноосного и трёхосного сжатия. Результаты показали анизотропию прочности на 20-28% и снижение прочности при водонасыщении до 10%.

7. Лабораторные исследования на моделях колонн в масштабе 1:10 с различными типами армирования продемонстрировали значительное повышение несущей способности материала. Повышение составило 100-150% от несущей способности без армирования. Недостатком выполненного

физического моделирования является отсутствие бокового обжатия, характерного для работы DSM в грунтах. Исследования по испытанию моделей колонн с учетом бокового обжатия в настоящее время продолжаются.

8. Достоверность результатов лабораторных исследований подтверждена аналитическими расчетами в ПК PLAXIS 3D. В расчетах использованы параметры, сопоставимые с параметрами и размерами колонн, используемых в физических моделях. Результаты расчетов подтвердили эффективность применения армирования грунтоцементных колонн более жесткими материалами. Получены данные по уменьшению деформаций и повышению несущей способности колонн DSM.

9. Исходя из результатов проведенных испытаний, сложно сделать однозначные выводы из-за ограниченного количества образцов, доступных для анализа. Для полноценного понимания поведения грунтоцемента в подобных инженерно-геологических условиях необходимо провести дополнительные испытания. Это позволит получить более обширные данные и более точно оценить характеристики материала, что в свою очередь способствует разработке более эффективных решений и обеспечению усиления основания.

10. Испытания геосинтетических материалов в кинематическом режиме приложения растягивающей нагрузки показало, что для всех материалов наблюдается снижение прочности при разрыве. Снижение колеблется в диапазоне от 28% до 42% для георешеток и геосеток разного типа. Относительное удлинение при разрыве уменьшилось для гексагональной и двухосной георешетки на 8,6% и 30% соответственно. Для одноосной георешетки получено увеличение относительного удлинения. По геотекстилю прочность при разрыве уменьшилось на 15,7%. Относительное удлинение увеличилось на 26,5%. Полученные данные отражают прочность материалов при длительно действующей растягивающей нагрузке.

12. Испытаниями на модифицированном сдвиговом приборе на примере исследований с гравелистым грунтом показано, что эффективность повышения механических свойств грунтовых подушек, упрочненных геосинтетическими материалами зависит от точности определения свойств на границе геосинтетик – грунт. Такие исследования должны быть продолжены с другими видами грунтов.

13. Данные, представленные в диссертации, отражают результаты применения рассматриваемых методов укрепления грунтов только в статических условиях. Влияние сейсмического воздействия на упрочненное основание может выявить факторы, которые внесут коррективы в работоспособность упрочненных грунтовых массивов в целом. Эти факторы подлежат изучению в следующих наших исследованиях и использованы в рекомендациях для реальных проектов.