

На правах рукописи



Гришина Алла Сергеевна

**АНАЛИЗ РАБОТЫ ФИБРОАРМИРОВАННОГО ГРУНТА В КАЧЕСТВЕ
ОБРАТНОЙ ЗАСЫПКИ УДЕРЖИВАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пономарев Андрей Будимирович

Официальные оппоненты: **Тер-Мартirosян Армен Завенович**

доктор технических наук, ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет»,
профессор кафедры механики грунтов и геотехники

Мельников Роман Викторович

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Тюменский индустриальный университет», доцент
кафедры строительного производства

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»

Защита диссертации состоится «17» марта 2023 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.419.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2, конференц-зал.

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

Автореферат разослан «27» января 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Степанов Максим Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Следствием тенденции современного строительства к уплотнению городской застройки стало то, что при освоении городского пространства или при реконструкции возникает необходимость возведения сооружений на грунтовых откосах, склонах, насыпях или в непосредственной близости с глубокими котлованами.

Потеря устойчивости грунта откоса или в теле земляного сооружения, вызванная нарушением его равновесия, может вызвать серьезные последствия и даже геотехнические катастрофы. Удержание грунтов откосов в равновесии возможно при помощи специальных сооружений – подпорных стен, устройство которых является трудо- и материалозатратным решением. Поэтому изучение вопроса повышения устойчивости массива грунта обратной засыпки для снижения активного давления на удерживающие грунтовый массив конструкции является *актуальной задачей*.

Одним из возможных способов удержания равновесия грунтовых массивов является их армирование и применение армогрунтовых удерживающих конструкций. В этом случае армированная обратная засыпка является обязательной частью системы и активно включается в работу. На сегодняшний день наиболее применимыми материалами для армирования являются полимерные сетки, решетки и другие геоматериалы. Если методы и технологии усиления грунта плоскими армирующими элементами уже достаточно хорошо изучены, то объемно-дисперсное армирование, которое предполагает внедрение в массив грунта коротких волокон, равномерно распределенных по всему объему, нуждается в дополнительном анализе.

Имеющиеся к настоящему времени исследования грунтов, усиленных фибровым армированием, доказывают, что волокна, внедренные в грунт, существенно повышают его механические характеристики. Эта особенность фиброгрунта позволяет сделать вывод о его возможном применении для решения вопросов повышения устойчивости грунтовых массивов. В связи с этим актуальным является вопрос о проведении исследований и разработке рекомендаций по применению

фиброгрунтов при возведении геотехнических сооружений и использовании его в качестве обратной засыпки фундаментов и ограждающих конструкций.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами прочности и устойчивости ограждающих грунт конструкций, в т. ч. грунтоармированных, в разное время занимались такие ученые, как В.Ф. Барвашов, А.А. Бартоломей, В.Ф. Бай, А.Н. Богомоллов, В.А. Волосухин, В.П. Дыба, Д.Г. Золотозубов, В.А. Ильичев, В.Д. Казарновский, А.М. Караулов, Т.П. Кашарина, В.И. Клевеко, Г. К. Клейн, П.А. Коновалов, К.В. Королев, А.Н. Краев, Р.А. Мангушев, С.И. Маций, Р.В.Мельников, И.Т. Мирсаяпов, А.Л. Невзоров, Н.С. Никифорова, Л.В. Нуждин, В.Г. Офрихтер, А.Б. Пономарев, Я.А. Пронозин, С.И. Сахаров, Г.М. Скибин, В.В. Соколовский, А.З. Тер-Мартirosян, З.Г. Тер-Мартirosян, К. Терцаги, Л.М. Тимофеева, Р.А. Усманов, Е.В. Щербина, А. Alexiew, Н. Brandl, С. Consoli, A. Diambra, D. Ding, Н. Girard, J.P. Giroud, Н. Gray, К. Hargrove, E. Ibraim, R.M. Koerner, Н. Maher, L. Michalowiski, Н. Ohashi, S. Park, A. Paul, Н. Perrier, G. Ranjan, F. Schlosser, S. Schwerdt, J. Sobolewski, T. Uscimura, Н. Vidal, T. Yetimoglu, A. Zhao, G. Zornberg и др.

Объект исследования: несвязный грунт, армированный объемно-дисперсным способом.

Предмет исследования: физико-механические характеристики несвязного грунта, армированного синтетической фиброй.

Цель работы – оценка работы массива фиброармированного грунта и разработка методики по определению его прочностных характеристик для применения в практике проектирования геотехнических сооружений.

Задачи исследований:

1. Выполнить анализ существующих исследований о физико-механических характеристиках фиброармированных грунтов, моделях и методах расчета ограждающих конструкций.

2. Экспериментально изучить влияние объемно-дисперсного армирования на физико-механические характеристики несвязного грунта и дать рекомендации

по подбору оптимального состава фиброармированного грунта для дальнейших исследований.

3. Выполнить оценку влияния объемно-дисперсного армирования на величины критических нагрузок и горизонтальных перемещений на моделях подпорных стен при различных положениях грузового штампа и высотах стенки.

4. На основании экспериментальных данных о свойствах фиброгрунта предложить методику, позволяющую рассчитать параметры прочности грунта, армированного объемно-дисперсным способом, разработанную на основании полученной эмпирической модели фиброгрунта.

5. Оценить возможность применения метода объемно-дисперсного армирования в качестве улучшения грунтов обратной засыпки геотехнических конструкций.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Получены новые данные о влиянии полимерных волокон на механические характеристики несвязного грунта в зависимости от вида и процента армирования, на основании которых был получен патент на изобретение №2764507.

2. Получены экспериментальные зависимости работы массива фиброармированного грунта от действия вертикальной нагрузки для разных высот подпорной стенки и положений грузового штампа.

3. Разработана эмпирическая модель с целью оценки прочностных характеристик фиброгрунта для проектирования геотехнических конструкций.

Теоретическая значимость работы заключается:

1. В получении зависимостей прочностных характеристик несвязного грунта от материала и процента объемно-дисперсного армирования.

2. В получении зависимостей работы массива фиброармированного грунта от действия вертикальной нагрузки для разных высот подпорной стенки и положений грузового штампа.

3. В разработке методики и эмпирической модели для оценки прочностных характеристик фиброгрунта, отличающейся от принятой в нормативной литературе.

Практическая значимость работы заключается:

1. В разработке рекомендаций для приготовления фиброгрунтовых смесей с равномерным распределением волокон в грунтовой матрице.

2. В оптимизации конструктивных решений подпорных стен при замене песчаного грунта обратной засыпки на фибропесчаный.

3. В технико-экономическом обосновании применения метода объемно-дисперсного армирования в качестве улучшения грунтов обратной засыпки геотехнических конструкций.

Результаты исследований внедрены:

– при реализации научных грантов, полученных за победу в Региональном конкурсе инновационных проектов по программе «Умник» и во Всероссийском конкурсе-акселераторе инновационных проектов «Большая разведка»;

– в учебном процессе в ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) по направлениям подготовки магистров строительного факультета.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач применялись методы планирования и проведения экспериментов, математического моделирования. Экспериментальные исследования были осуществлены с помощью сертифицированного и поверенного оборудования, современных программных комплексов. Для численных расчетов, теоретического и графического анализа результатов использовались пакеты стандартных программ. Теоретические исследования основывались на классических принципах механики грунтов и сопротивления материалов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований прочностных характеристик фиброгрунта в лабораторных условиях по подбору оптимального материала и процента фибрового армирования.

2. Результаты модельных исследований влияния объемно-дисперсного армирования на величины критических нагрузок и горизонтальных перемещений удерживающей конструкции при различных положениях грузового штампа и высотах стенки.

3. Предложенная методика для определения прочностных характеристик фиброгрунта, разработанная на основе эмпирической модели, полученной на основании результатов экспериментальных исследований.

4. Результаты оценки возможности применения метода объемно-дисперсного армирования в качестве улучшения грунтов обратной засыпки геотехнических конструкций.

Личный вклад автора состоит в формулировании выводов об оптимальном материале и проценте фибрового армирования на основании проведенных автором экспериментов, разработке эмпирического условия прочности фиброгрунта и методики оценки его прочностных характеристик, в оценке эффективности применения фиброгрунта в качестве обратной засыпки ограждающих конструкций, формулировании основных выводов по работе.

Достоверность результатов, основных выводов и рекомендаций, изложенных в диссертационной работе, базируется на использовании классических принципов механики грунтов и сопротивления материалов, подтверждена необходимым объемом лабораторных испытаний и модельных экспериментов, выполненных на поверенном оборудовании с использованием автоматизированных систем измерения результатов, а также использованием сертифицированных лицензионных программных комплексов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях в Валенсии (2012 г.), в Санкт-Петербурге (2014, 2017, 2021 гг.), в Перми (2015 г.), в Москве (2016, 2017, 2019 гг.), в Тюмени (2018 г.), а также на видеоконференции РОМГГиФ в январе 2022 г.

Публикации. Основные результаты исследований изложены в 36 научных статьях, восемь из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК, три – в МБЦ (Scopus).

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (115 наименований, в том числе 44 на иностранном языке) и трех приложений. Общий объем работы составляет 121 страницу, включая 39 рисунков, 26 таблиц.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует пунктам 8, 9 и 11 паспорта специальности 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, изложены основные положения, выносимые на защиту, личный вклад соискателя и сведения об апробации работы.

В первой главе выполнен обзор основных конструктивных решений подпорных стен, в т.ч. грунтоармированных. Выделена технология объемно-дисперсного армирования грунта, при которой короткие армирующие волокна равномерно распределены по всему объему грунтовой матрицы. Приведены основные методы расчета активного давления грунта и фиброгрунта обратной засыпки на ограждающие конструкции.

Грунт, армированный объемно-дисперсным способом (фиброгрунт) получают путем смешивания природных грунтов с синтетическими волокнами до получения гомогенной смеси. Предыдущие исследования показали, что фибровое армирование повышает прочность грунтов равномерно по всему объему и не требует обеспечения анкеровки, в отличие от линейного армирования.

Большой вклад в развитие исследований фиброармированных грунтов внесли С. Consoli, А. Diambra, D. Ding, W. Ding, Н. Gray, К. Hargrove, Е. Ibraim, J. Li, Н. Maher, L. Michalowiski, Н. Ohashi, S. Park, G. Ranjan, T. Yetimoglu, А. Zhao, G. Zornberg, А. Б. Пономарев, В. Г. Оффрихтер и др.

Согласно проведенному анализу существующих моделей для фиброгрунта может быть использована теория прочности Мора-Кулона, но предельная огибающая при этом представляет собой криволинейную или ломаную линию, характер которой меняется в зависимости от особенности работы фибры в грунте (выдергивание или растяжение волокон). Границей между участками является критическое напряжение σ_{crit} , зависящее от характеристик грунта и фибры, а также от параметров трения грунт-волокно.

Для проектирования ограждающих конструкций необходимо оценивать величину активного давления, которое оказывает грунт обратной засыпки. Для его расчета требуются реальные прочностные характеристики грунта, которые необходимо знать при разработке подходов, связанных с использованием объемно-дисперсного армирования.

Таким образом, актуальным вопросом является определение прочностных характеристик фиброгрунта и оценка его работы в ограждающих конструкциях.

Во второй главе приведены алгоритм, методика и результаты лабораторных экспериментов трехосного сжатия фиброгрунта. Определены предпочтительный материал и проценты фибрового армирования, сделаны выводы о физико-механических характеристиках различных составов грунтов, армированных объемно-дисперсным способом.

Для экспериментальных исследований были взяты два типа армирующих волокон – полипропиленовая и базальтовая фибра длиной 12 мм, выбранные на основании анализа предыдущих исследований. Процентное содержание волокон в образцах было принято 0,5% от массы сухого грунта. В качестве природного грунта был взят мелкий песок. Целью первой серии экспериментов стала оценка эффективности фибрового армирования в решении вопроса увеличения прочностных характеристик несвязного грунта, а также выбор предпочтительного материала для армирования.

На первом этапе были проведены испытания по методу трехосного сжатия по консолидированно-дренированной схеме в соответствии с ГОСТ 12248. По

результатам были построены графики зависимости относительной вертикальной деформации ε_1 , % от вертикального напряжения σ_1 , кПа (рисунок 1).

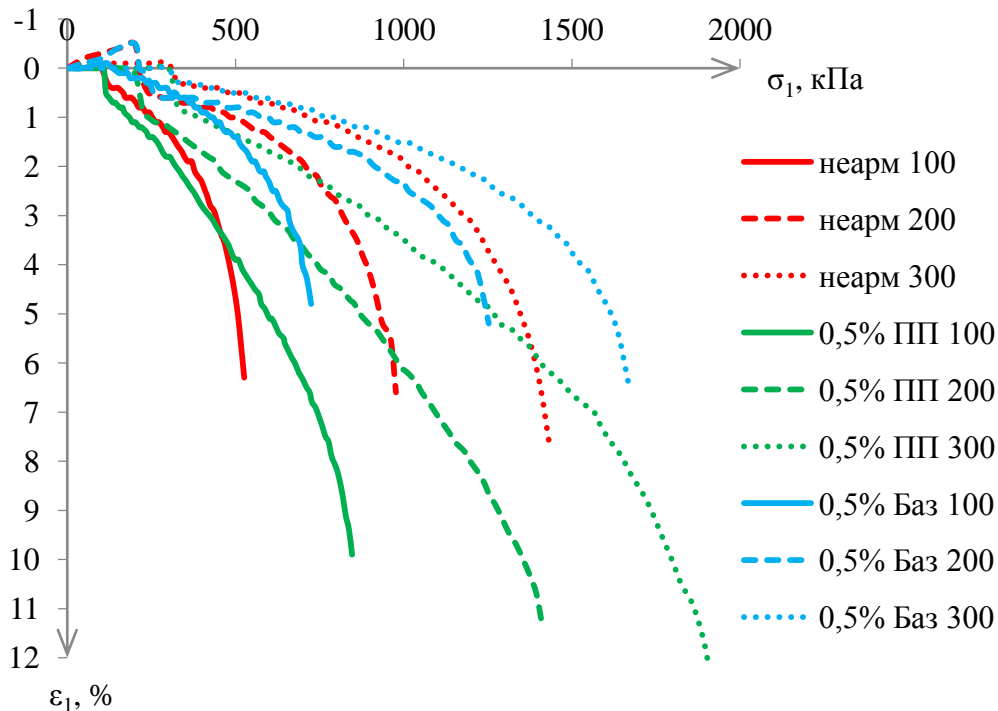


Рисунок 1 – Зависимость относительной вертикальной деформации ε_1 , % от вертикального напряжения σ_1 , кПа для неармированных образцов и армированных 0,5% полипропилена (ПП) и базальта (Баз) при $\sigma_3 = 100, 200, 300$ кПа

Анализ графиков позволяет сделать вывод, что разрушение фиброармированных образцов происходит при больших вертикальных нагрузках, чем разрушение природных грунтов. Объемно-дисперсное армирование позволило увеличить разрушающую нагрузку в 1,2-1,6 раза. При этом относительные вертикальные деформации при разрушении образцов, армированных полипропиленовой фиброй, значительно выше по сравнению с неармированными и армированными базальтом (4,8-7,6 % для песчаных образцов; 5,0-6,3 % для образцов с базальтом; 9,9-12,5 % для образцов с полипропиленом).

Необходимо отметить, что для песчаных грунтов и фиброгрунтов, армированным базальтом, характерно хрупкое разрушение, тогда как грунт, армированный полипропиленовыми волокнами, приобретает пластичные свойства, плавно накапливая деформации при увеличении нагрузки, не разрушаясь. Эта гипотеза доказывается формой образцов, которую они приобретают после испытаний: образец песчаного грунта разрушается по

характерной плоскости среза, тогда как образец с полипропиленовой фиброй принимает бочкообразную форму.

Для визуализации значений удельного сцепления и угла внутреннего трения природного грунта и фиброгрунтов, армированных базальтовой и полипропиленовой фиброй, были построены круги Мора (рисунок 2).

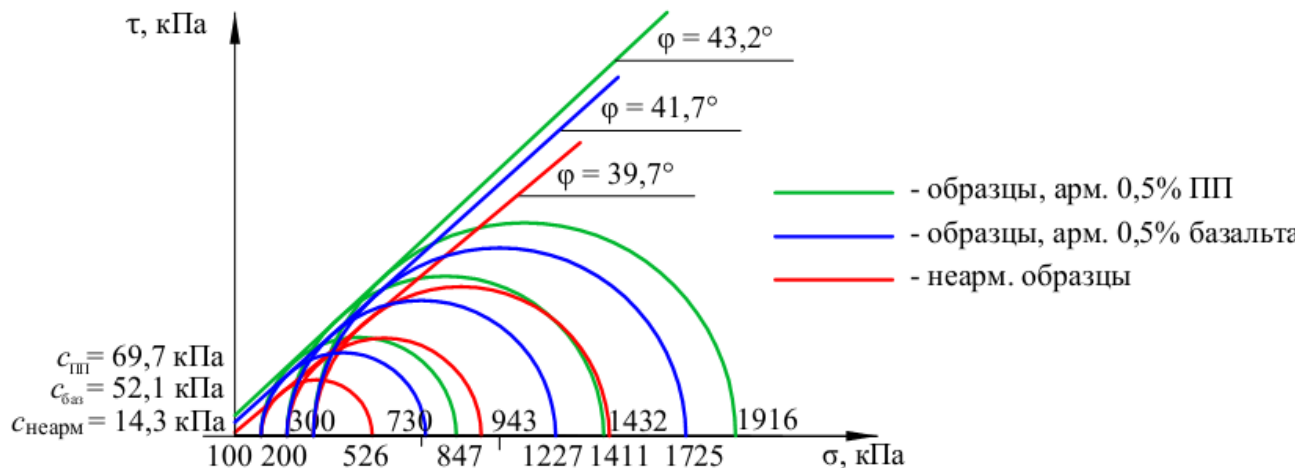


Рисунок 2 – Круги Мора, построенные по результатам испытаний трехосного сжатия

По диаграмме Мора (рисунок 2) можно видеть, что фибровое армирование позволяет существенно увеличить прочностные характеристики несвязного грунта (удельное сцепление увеличивается в 3,6-4,9 раза, угол внутреннего трения – на 5-9%). При этом большее увеличение параметров прочности наблюдается у образцов, армированных полипропиленом. Кроме того, волокна полипропилена предпочтительнее с экологической точки в связи с особенностями их производства и эксплуатации. В сравнении с базальтовой, производство полипропиленовой фибры требует в несколько раз меньших затрат энергии, а при попадании в органы дыхания человека она удаляется из них естественным путем.

Для дальнейших испытаний в качестве постоянного параметра был выбран тип армирующих волокон – полипропиленовая фибра. Варьируемыми параметрами стали процентное содержание волокон и степень водонасыщения.

В соответствии с технологией устройства ограждающих конструкций грунт обратной засыпки должен быть хорошо дренирующим материалом и укладываться при оптимальной влажности. Поэтому необходимо было оценить, как наличие волокон влияет на уплотнение и водопроницаемость грунта.

По результатам серии испытаний были сделаны выводы, что фибровое армирование практически не влияет на способность грунта к уплотнению. Плотность сухого грунта снижается при увеличении процента армирования в среднем на 8-10%, что объясняется более низкой плотностью волокон по сравнению с грунтом. Значение оптимальной влажности не зависит от наличия армирующих волокон.

Фибровое армирование полипропиленовыми волокнами незначительно снижает коэффициент фильтрации песчаного грунта (на 17% при процентном содержании волокон 0,25%), при этом фиброгрунт классифицируется как «водопроницаемый» и может рассматриваться как дренирующий материал.

Следующая серия экспериментов была проведена с грунтом оптимальной влажности ($\omega=8\%$) при различном процентном содержании армирующих волокон (0,25%, 0,5%, 1,0%, 1,5%). Результаты испытаний трехосного сжатия приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения прочностных характеристик образцов грунта по результатам трехосных испытаний и их изменения в результате армирования при оптимальной влажности ($\omega=8\%$)

	Параметры прочности		Относительное изменение параметров	
	φ , °	c , кПа	$\Delta\varphi$, д.ед.	Δc , д.ед.
Неармированные образцы	36,4	10,5	1	1
Армированные полипропиленом (0,25%)	41,0	32,0	1,13	3,05
Армированные полипропиленом (0,5%)	44,3	54,6	1,22	5,20
Армированные полипропиленом (1,0%)	42,5	66,6	1,17	6,34
Армированные полипропиленом (1,5%)	50,9	18,0	1,40	1,71

Следствием этого этапа испытаний стало то, что перспективными для дальнейших исследований процентами армирования песчаного грунта полипропиленовыми волокнами являются 0,25% и 0,5%. При процентах армирования 0,25% и 0,5% удельное сцепление грунта возрастает в 3 и 5 раз, а угол внутреннего трения на 13% и 22% соответственно. При армировании 1,0% характеристики грунта меняются незначительно, а расход фибры увеличивается в 2 раза. В случае армирования 1,5% фибры прочностные характеристики ухудшаются по сравнению с меньшим процентом армирования в виду невозможности равномерного распределения и гомогенизации армирующих элементов в массиве грунта.

Далее были проведены испытания трехосного сжатия образцов, армированных 0,5% полипропилена при различных коэффициентах водонасыщения ($S_r=0,3; 0,6; 0,9$). Был сделан вывод, что насыщение водой не снижает эффективности фибрового армирования. У армированных образцов увеличение влажности дает приращение прочностных характеристик - удельное сцепление увеличивается в 5,2-7,2 раза, угол внутреннего трения – на 16-22%. Таким образом, увеличение влажности грунта не будет оказывать негативного воздействия на прочность и устойчивость сооружений, построенных с использованием фиброгрунта, и не будет являться проблемой при эксплуатации.

Таким образом, в качестве материала армирующих волокон рекомендуется применять волокна полипропилена, содержание которых по массе сухого грунта не должно превышать 0,5%. Благодаря фибровому армированию был получен дренирующий материал, обладающий связностью.

В третьей главе приведена методика получения однородной фибропесчаной смеси, программа и результаты модельных испытаний, выполнена оценка применимости фиброгрунта в качестве противозэрозионного мероприятия.

Для решения задачи по приготовлению однородной смеси волокон и грунта были проведены несколько серий экспериментов, в которых песок смешивался с полипропиленовой фиброй в бетонном смесителе гравитационного действия. На основании результатов исследований была получена следующая рекомендация: необходимо использовать грунт при оптимальной влажности, а загрузку смесителя производить последовательно, в несколько этапов.

Далее были проведены модельные испытания, в которых в масштабе 1:10 моделировалась ограждающая конструкция – существующий устой моста через реку Ирень в Кунгурском районе Пермского края.

Схема испытаний приведена на рисунке 3. Модельные исследования включали четыре серии испытаний для изучения влияния различных факторов: процента армирования (0,25%, 0,5%), высоты стены ($h = 20, 25$ см), расстояния от штампа до стенки ($x = 2, 12, 22$ и 32 см). Контролируемыми параметрами были осадка штампа и горизонтальные перемещения стенки.

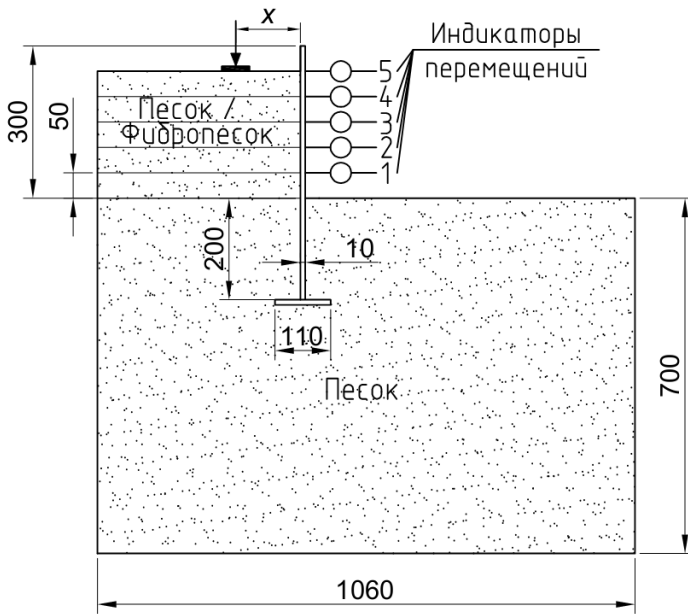


Рисунок 3 – Схема модельных испытаний

По результатам проведенных испытаний были построены графики «осадка-нагрузка» для разного процента армирования, разного расположения фундамента относительно стены x и разной высоты стенки h в диапазоне давлений 0-300 кПа (рисунок 4).

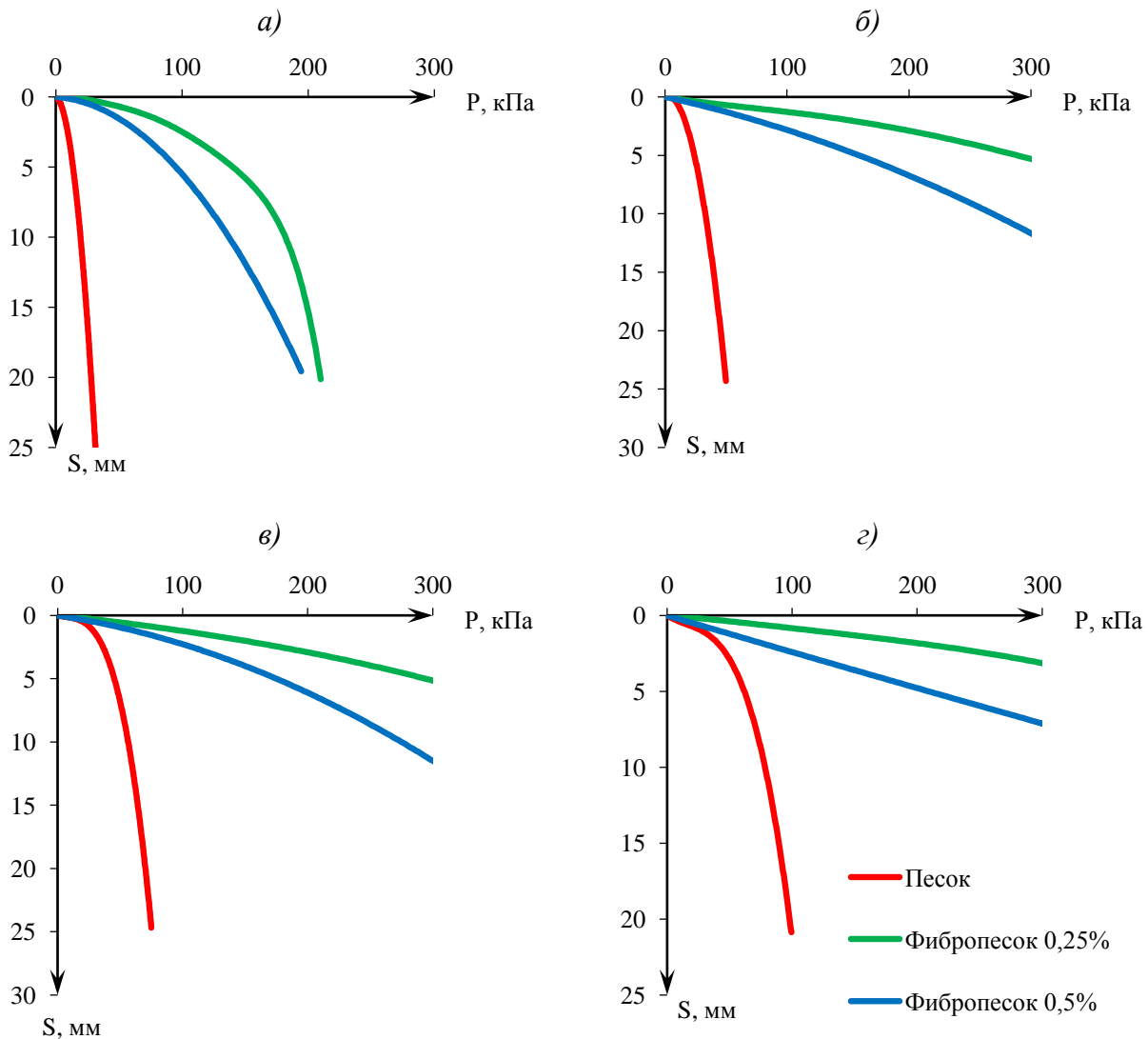


Рисунок 4 – Графики зависимости осадки от нагрузки для разных материалов обратной засыпки при высоте стенки $h = 20$ см при расстоянии от штампа до стенки x : а) $x = 2$ см; б) $x = 12$ см; в) $x = 22$ см; г) $x = 32$ см

Из рисунка 4 видно, что фибровое армирование позволило увеличить в 3,3-12,5 раза критическую нагрузку, которая определялась как пиковое значение нагрузки, после которого произошло разрушение, или максимальное значение нагрузки в конце испытания. Анализ графиков «осадка-нагрузка» показал, что увеличивать процент армирования с 0,25% до 0,5% нерационально. Значение критической нагрузки при большем проценте армирования не превосходило значения, полученного для меньшего процента армирования, что может быть объяснено худшей перемешиваемостью частиц грунта с 0,5% волокон, замеченной при исследовании технологии приготовления фиброгрунта.

В таблице 2 приведены значения горизонтальных перемещений верхней точки опорной стенки (индикатор 5, рисунок 3) для разных материалов засыпки при критической нагрузке, полученной для песка, а также коэффициента Δ ($\Delta = \frac{\delta_n}{\delta_{0,25\%(0,5\%)}}$), показывающего снижение горизонтальных перемещений при использовании фиброгрунтовой засыпки.

Таблица 2 – Значения горизонтальных перемещений модели опорной стенки при критической нагрузке, определенной для песка

Высота стенки H , см	Расстояние от фундамента до стенки x , см	P , кПа	Горизонтальные перемещения δ т. 5, мм			$\Delta = \frac{\delta_n}{\delta_{0,25\%(0,5\%)}}$	
			Песок, δ_n	Фиброгрунт 0,25%, $\delta_{0,25\%}$	Фиброгрунт 0,5%, $\delta_{0,5\%}$	0,25%	0,5%
25	2	23	9,84	0,37	0,23	26,6	42,8
	12	38	11,12	0,13	0,14	85,5	79,4
	22	64	10,75	0,13	0,07	82,7	153,6
	32	100	4,41	0,10	0,11	44,1	40,1
20	2	32	12,35	0,35	0,61	35,3	20,2
	12	50	11,83	0,18	0,29	65,7	40,8
	22	75	6,94	0,07	0,30	99,1	23,1
	32	112	1,1	0,05	0,25	22,0	4,4

Из таблицы 2 видно, что горизонтальные перемещения стенки с обратной засыпкой из фибропеска существенно сокращаются и не превышают 0,7 мм при нагрузках, при которой стенка с песчаной обратной засыпкой потеряла устойчивость. Для этих нагрузок удалось добиться снижения горизонтальных перемещений в среднем в 50 раз.

По результатам сравнительного анализа горизонтальных перемещений

стенки с обратными засыпками из фиброгрунта 0,25% и 0,5% при критической нагрузке, полученной для фибропеска, был подтвержден вывод, сделанный ранее, что увеличение процента армирования до 0,5% отрицательно сказывается на снижении горизонтальных перемещений подпорной стенки. При применении фиброгрунта с содержанием волокон 0,25% горизонтальные перемещения меньше в 1,4-4,2 раза перемещений стенки с фиброгрунтовой засыпкой 0,5% (кроме случая $x=2$ см, $h=25$ см).

Следующим этапом исследований стала оценка противоэрозионной стойкости откосов насыпей из фиброгрунта. Для этого была изучена их сопротивляемость временным потокам атмосферных вод, так как конусы и откосы насыпей удерживающих конструкций часто подвергаются размыву и другим формам эрозии.

Для исследования сопротивляемости покрытий из фиброгрунта различным природным факторам на экспериментальной площадке в естественных условиях были сооружены две модели покрытия насыпей – песчаное и фибропесчаное с процентом армирования 0,25%. Наблюдение осуществлялось в течение трех месяцев в летний период. Продолжительные атмосферные осадки вызвали вымывание частиц грунта с поверхности неармированной насыпи с образованием промоин, также наблюдалась эрозия откосов насыпи (рисунок 5, а). При этом обильные дожди за весь период наблюдения не нарушили целостность покрытия насыпи с применением фиброгрунта (рисунок 5, б).

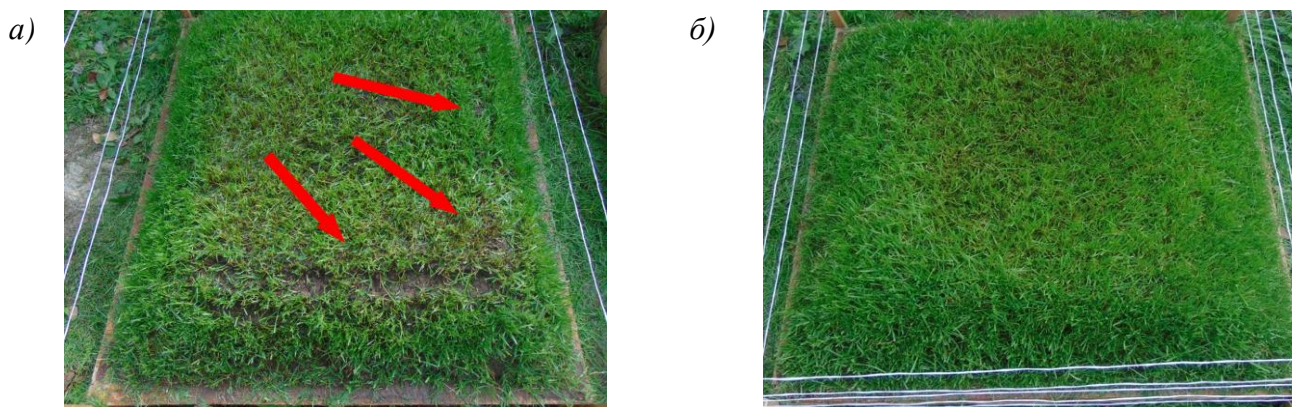


Рисунок 5 – Образцы покрытий насыпей после трех месяцев наблюдения:

а) с неармированным покрытием с указанием эрозионных процессов; б) с фиброармированным покрытием

Таким образом, фибровое армирование положительно влияет на сопротивление грунта эрозионным процессам и может быть рассмотрено как один из возможных вариантов усиления откосов насыпей наряду с методами, уже утвержденными в ОДМ 218.2.078-2016 «Методические рекомендации по выбору конструкции укрепления откосов земляного полотна автомобильных дорог общего пользования».

В четвертой главе предложена и верифицирована эмпирическая модель прочности, на основании которой автором была предложена методика определения действительных прочностных характеристик фиброгрунта, решена задача по оптимизации геометрии обратной засыпки в случае применения фиброгрунта и выполнено технико-экономическое обоснование.

На основании проведенных экспериментальных исследований методом трехосного сжатия для грунта, армированного 0,25% волокон полипропилена, была получена предельная огибающая кругов Мора (рисунок 6), для которой был подобран полином третьей степени вида:

$$\tau = 0,000006\sigma^3 - 0,0032\sigma^2 + 1,43\sigma \quad (1)$$

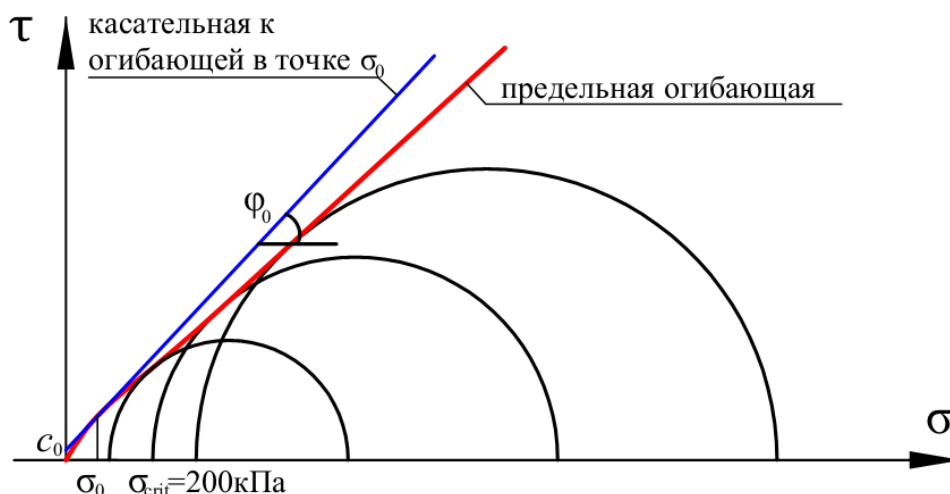


Рисунок 6 – Предлагаемый вид предельной огибающей для фиброгрунта и методика определения параметров прочности c и ϕ фиброгрунта

Так как взаимодействие волокон с грунтом осуществляется за счет обжатия, предполагается, что параметры прочности будут являться функцией от нагрузки, которая приложена к грунту, а эквивалентные параметры модели для фиброгрунта (c' и ϕ') предлагается определять по уравнению касательной,

построенной к предельной огибающей, в точке, соответствующей нормальному сжимающему напряжению σ_0 в массиве фиброгрунта:

$$\tau = f(\sigma_0) + f'(\sigma_0) \cdot (\sigma - \sigma_0), \quad (2)$$

где σ_0 – действующее сжимающее напряжение; $f(\sigma_0)$ – значение функции предельной огибающей (1) в точке σ_0 ; $f'(\sigma_0)$ – значение производной функции предельной огибающей (1) в точке σ_0 , равное тангенсу эквивалентного угла внутреннего трения φ' :

$$\operatorname{tg} \varphi' = f'(\sigma_0) = 0,000018\sigma_0^2 - 0,0064\sigma_0 + 1,43. \quad (3)$$

Значение эквивалентного удельного сцепления определяется в данном случае как:

$$c' = f(\sigma_0) - f'(\sigma_0) \cdot \sigma_0. \quad (4)$$

При сжимающих напряжениях σ более 200 кПа график аппроксимируется прямой, и прочностные характеристики рекомендуется определять по результатам трехосных испытаний (таблица 1): $c' = 32$ кПа, $\varphi' = 41^\circ$.

Для проверки предложенной эмпирической модели фиброгрунта была подобрана методика расчета горизонтальных перемещений стенки, которые являлись контролируемым параметром в модельных испытаниях. В основу расчета горизонтальных перемещений подпорной стенки легло уравнение изгиба балки на упругом основании. Алгоритм расчета по методу начальных параметров был предложен академиком А.Н. Крыловым.

Расчет начинался с нахождения коэффициентов активного давления грунта λ_a , λ_{aq} , λ_{ac} и построения эпюры активного давления на тыловую грань подпорной стенки. Далее определялись значения момента M_h и поперечной силы Q_h на уровне поверхности грунта. Стенка разбивалась на n интервалов длиной l каждый, определялось отношение жесткостей грунта и балки. Далее рассчитывались значения гиперболо-тригонометрических функций влияния A , B , C , D Крылова А.Н. и составлялась система уравнений. Из решения системы уравнений определялись неизвестные начальные параметры и прогибы стенки как перемещения точек балки. По полученным значениям перемещений строилась

линия тренда, по уравнению касательной к которой определялось горизонтальное перемещение подпорной стенки.

Для оценки правильности предложенной аналитической методики были рассчитаны горизонтальные перемещения для песчаной обратной засыпки. Был сделан вывод об удовлетворительной сходимости результатов аналитического расчета с результатами модельных испытаний (отклонения составили 2,5-18,5%).

В дальнейшем был выполнен расчет для фибропеска, исходными данными для которого стали прочностные характеристики, рассчитанные по предложенной методике. Отклонения значений горизонтальных перемещений подпорной стены с обратной засыпкой из фиброгрунта, полученных по данным модельных испытаний и по аналитическому расчету, составили 2-29%. Это позволило сделать вывод об адекватности предложенной методики определения прочностных характеристик фиброгрунта с процентным содержанием волокон 0,25%.

Для прикладных расчетов прочностных характеристик фиброармированного грунта по предложенной методике была составлена программа для ЭВМ на языке Visual basic. Прикладная программа представляет собой пользовательскую форму, в которую вводятся исходные данные: значение равномерно распределенной нагрузки на поверхности, а также высота засыпки. Выходными параметрами являются удельное сцепление c (кПа) и угол внутреннего трения φ ($^{\circ}$) фиброгрунта.

Для подтверждения эффективности применения предложенного способа армирования для грунта обратной засыпки было выполнено численное моделирование устоя моста, рассмотренного в третьей главе диссертации, и его сравнение с устоем с горизонтально армированной обратной засыпкой. Объемно-дисперсное армирование, в отличие от горизонтального, не требует анкеровки, поэтому геометрия обратной засыпки выбиралась из конструктивных требований, приведенных в нормативной литературе. Для построения расчетной модели был взят типовый проект устоя моста, конструктивные решения которого были оптимизированы.

По результатам расчета был сделан вывод, что прочность двух вариантов конструкций устоя моста обеспечена, и они оба могут быть применены на практике. При приблизительно равных контролируемых расчетных параметрах (изгибающем моменте, вертикальных перемещениях) площадь сечения обратной засыпки из фиброгрунта почти в 2 раза меньше, чем при использовании горизонтального армирования вследствие отсутствия необходимости анкеровки. Поэтому при армировании грунта обратной засыпки фиброй объемы земляных работ, следовательно, и трудоемкость, существенно сокращаются.

Выполненные технико-экономические расчеты показали, что стоимость возведения устоя моста с обратной засыпкой из фиброгрунта ниже стоимости типового решения и варианта с армированием горизонтальными прослойками на 16% и 14 % соответственно. Трудоемкость устройства устоя с фибропесчаной засыпкой на 26% ниже трудоемкости устройства устоя по типовому проекту и на 13% ниже трудоемкости устройства устоя с горизонтальным армированием засыпки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассмотрен способ армирования грунта обратной засыпки удерживающих конструкций отдельными равномерно распределенными по объему волокнами, который на основании выполненных исследований показал свою эффективность для решения данной геотехнической задачи, а именно:

1. В качестве материала армирующих волокон рекомендуется применять волокна полипропилена. Установлено, что содержание полипропиленовой фибры по массе сухого грунта не должно превышать 0,5%. При проценте армирования 0,25% удельное сцепление грунта возрастает в 3 раза, а угол внутреннего трения на 13%. При проценте армирования более 0,5 снижается способность фибры к перемешиванию, что ведет к локальной концентрации волокон и снижению эффективности армирования. На основе экспериментальных исследований установлено, что армирование базальтовыми волокнами менее эффективно по сравнению с полипропиленом. Кроме того, производство базальтовых волокон энергозатратно и сопровождается выбросами топочных оксидов азота, а в

процессе эксплуатации пыль от минеральных волокон может оказывать существенное влияние на органы дыхания.

2. Экспериментально доказано, что при применении фиброармированной обратной засыпки удерживающих конструкций увеличивается значение критической нагрузки, которую способно выдержать сооружение без потери устойчивости, а также уменьшаются значения горизонтальных перемещений стенки. В среднем при замене неармированного грунта на фиброармированный значение критической нагрузки увеличивается в 8 раз. Снижение горизонтальных перемещений при нагрузке, при которой стенка с песчаной обратной засыпкой теряла устойчивость, составило в среднем 50 раз. Увеличение процента армирования с 0,25 до 0,5 нецелесообразно, так как показатели эффективности меняются незначительно, а расход материалов возрастает в два раза.

3. Была предложена методика, позволяющая рассчитать параметры прочности грунта, армированного объемно-дисперсным способом, разработанная на основании полученной эмпирической модели фиброгрунта, согласно которой прочностные характеристики фиброгрунта являются функцией от нагрузки, которая оказывается на грунт засыпки. Была получена нелинейная предельная огибающая, уточняющая условие прочности Кулона-Мора для фиброгрунта с процентом армирования 0,25, которая была описана полиномом третьего порядка. Предложенная модель, верифицированная аналитическим путем, показала удовлетворительную сходимость (в пределах 6-29%). Для прикладных расчетов была создана программа, рассчитывающая параметры прочности фиброгрунта c' и φ' на основании данных о приложенной на призму обрушения нагрузке и высоте стены.

4. Экспериментально установлено, что предложенный способ армирования может успешно применяться при устройстве обратной засыпки подпорных стен. Сравнение локальных сметных расчетов на устройство трех вариантов конструктивных решений ограждающих конструкций позволило сделать вывод, что расходы на устройство устоя с фиброармированной обратной засыпкой на 16% ниже по сравнению с типовым проектом и на 14% ниже по сравнению с

вариантом горизонтального армирования грунта обратной засыпки, трудоемкость работ сокращается на 26 и 13% соответственно.

5. Экспериментально доказано, что фибровое армирование грунта откосов и конусов насыпей может стать одним из способов борьбы с эрозией и вариантом усиления конструкции земляного полотна. На основании наблюдений за моделями насыпей были сделаны выводы, что наличие фибрового армирования в корневой зоне газона благоприятно влияет на сопротивление эрозионным процессам, возникающим под воздействием временных потоков атмосферных вод, при этом не препятствуя росту травы.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования: полномасштабные исследования других возможных областей применения фиброгрунта: фибропесчаных фундаментных подушек, фиброгрунтовых оснований натуральных покрытий и т.д.; изучение механизма взаимодействия волокон фибры со связным грунтом.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных

в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. Пономарев, А. Б. Применение фиброармированного песка в качестве основания зданий и сооружений / А. Б. Пономарев, А. С. Кузнецова, В. Г. Офрихтер // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. - 2013. - Вып. 30(49). - С. 101-107.

2. Богомолов, А. Н. Анализ влияния различных типов армирования на деформационные характеристики глинистого грунта / А. Н. Богомолов, А. Б. Пономарев, А. В. Мащенко, А. С. Кузнецова // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия: Политематическая [Электронный ресурс]. - 2014. - Вып. 4(35)- 9 с. - Режим доступа:

[http://vestnik.vgasu.ru/attachments/11BogomolovPonomarevMashchenkoKuznetsova-2014_4\(35\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/11BogomolovPonomarevMashchenkoKuznetsova-2014_4(35).pdf). - Загл. с экрана.

3. **Кузнецова, А. С.** Лабораторные исследования прочностных характеристик фиброармированного песка различной степени водонасыщения / **А. С. Кузнецова**, А. Б. Пономарев // Вестник гражданских инженеров. - 2014. - № 6(47). - С. 127-132.

4. **Гришина, А. С.** Результаты исследований прочностных характеристик глинистых грунтов, армированных различными геосинтетическими материалами / **А. С. Гришина**, А. В. Мащенко, А. Б. Пономарев // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. - 2015. - № 4(20). - С. 9-21.

5. Колесова, А. С. Анализ эффективности применения фиброармированного песка при устройстве насыпей автомобильных дорог и обратной засыпки подпорных стен / **А. С. Колесова**, Ю. М. Шаньгина, **А. С. Гришина** // Геотехника. - 2016. - № 4. - С. 10-15.

6. **Гришина, А. С.** Анализ прогностических моделей определения прочности фиброгрунта на сдвиг / **А. С. Гришина**, А. Б. Пономарев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. - 2017. - Т. 8, № 3. - С. 106-112.

7. **Гришина, А. С.** Оценка эффективности работы подпорной стены с обратной засыпкой из фиброармированного грунта по модельным испытаниям / **А. С. Гришина**, Р. С. Смирнов, А. Б. Пономарев // Вестник гражданских инженеров. - 2017. - № 2(61). - С. 126-132.

8. Анферов, Е. П. Исследование возможного применения волокнистых отходов в качестве армирующих волокон для создания эффективных геотехнических конструкций / **Е. П. Анферов**, **А. С. Гришина**, Р. С. Смирнов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. - 2018. - № 1(29). - С. 168-177.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международной реферативной базе Scopus:

1. **Grishina, A. S.** Analysis of efficiency of fiber reinforced sand as a backfill of retaining walls / **A. S. Grishina**, А. В. Ponomaryov // Challenges and Innovations in Geotechnics : proc. of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conf., Astana,

Kazakhstan, August 5-7, 2016 / Kazakhstan Geotechn. Soc, ed. A. Zhussupbekov. - Boka Raton; New York; London: Taylor & Francis Group; Leiden: CRC Press/Balkema, 2016. - P. 233-236.

2. **Grishina, A. S.** Assessment of operation of fiber-reinforced soil located behind retaining wall / A. S. Grishina, A. B. Ponomaryov // Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations: proc. of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations (GFAC 2019), Saint Petersburg, Russia, 6-8 Febr. 2019 / Taylor & Francis Group Ltd. - Boka Raton; New York; London: Taylor & Francis Group; Leiden: CRC Press/Balkema, 2019. - P. 82-85. - (Proceedings in Earth and geosciences; Vol. 2).

3. Obsharova, A. V. Effect of the fiber reinforcement on the mechanical properties of clay soils, including properties under conditions of seasonal freezing and thawing / A. V. Obsharova, **A. S. Grishina** // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. - Vol. 1928. - Art. 012067. - P. 1-7.

Объекты интеллектуальной деятельности:

1. Патент 2764507 РФ, МПК Е 01 С 9/08, Е 01 С 3/04. Конструкция дорожной одежды с армированием волокнистыми материалами / **А. С. Гришина**, М. С. Косиков; опубл. 18.01.2022 г. Бюл. № 2.