

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет»**

На правах рукописи



Гришина Алла Сергеевна

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

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Пономарев Андрей Будимирович



**Пермь – 2022**

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА УСТОЙЧИВОСТИ МАССИВА ГРУНТА, УЛУЧШЕННОГО ФИБРОВЫМ АРМИРОВАНИЕМ	10
1.1. Обзор конструкций подпорных стен: традиционных и современных	10
1.2. Концепция фибрового армирования грунтовых массивов	14
1.3. Анализ основных методов расчета давления грунтов на ограждения	25
1.4. Основные выводы по главе и задачи дальнейших исследований	30
ГЛАВА 2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФИБРОАРМИРОВАННЫХ ГРУНТОВ	32
2.1. Применяемые материалы, методика исследований и планирование эксперимента	32
2.2. Результаты лабораторных исследований песчаного грунта и фибропесчаных композитов	37
2.3. Выводы по Главе 2	54
ГЛАВА 3. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАССИВА ФИБРОАРМИРОВАННОГО ГРУНТА	57
3.1. Экспериментальное исследование возможности механизированного смешивания волокон с грунтом	57
3.2. Программа модельных испытаний	62
3.4. Результаты модельных исследований	67
3.4. Оценка применимости фиброгрунта в качестве материала конусов и откосов насыпей удерживающих конструкций	75
3.5. Выводы по Главе 3	78
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЧНОСТИ ФИБРОГРУНТА И ОБОСНОВАНИЕ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ОБРАТНОЙ ЗАСЫПКИ УДЕРЖИВАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ	80

4.1. Разработка эмпирической модели прочности фиброгрунта и методики определения его прочностных характеристик	81
4.2. Аналитический расчет для верификации предложенной методики определения прочностных характеристик фиброгрунта	84
4.3. Численное моделирование удерживающей конструкции с обратной засыпкой из фиброармированного грунта и оценка ее экономической эффективности	95
4.4. Выводы по Главе 4	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	105
Приложение А. Патент на изобретение	119
Приложение Б. Диплом победителя регионального конкурса инновационных проектов по программе «Умник»	120
Приложение В. Диплом победителя конкурса-акселератора инновационных проектов «Большая разведка»	121

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Тенденции современного строительства направлены на уплотнение городской застройки, возведение сооружений в сложных инженерно-геологических условиях, в т. ч. на сложном рельефе, применение инновационных материалов и эффективных конструктивных решений при строительстве зданий и сооружений [71,72].

Следствием указанных тенденций 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 [70].

Потеря устойчивости грунта откоса или в теле земляного сооружения, вызванная нарушением его равновесия, может вызвать серьезные последствия и даже геотехнические катастрофы [47,57]. Удержание грунтов откосов в равновесии возможно при помощи специальных сооружений – подпорных стен [43], что является трудо- и материалозатратным решением. Поэтому изучение вопросов повышения устойчивости массивов грунта обратной засыпки для снижения активного давления на ограждающие конструкции является актуальной задачей.

В настоящее время в практике геотехнического строительства осуществляется активное применение армогрунтовых удерживающих конструкций, в которых грунт обратной засыпки является неотъемлемой частью конструкции. В качестве армирующих элементов выступают металлические и полимерные сетки, а также различные природные или синтетические добавки (пластмассы, тонкие стали и т.п.) [43].

Согласно СП 22.13330 «Основания зданий и сооружений» способы армирования можно классифицировать по характеру расположения элементов, по материалу элементов, а также по способу производства работ. В зависимости от расположения армирующих элементов различают вертикальное, горизонтальное, наклонное армирование, армирование ячеистыми структурами и объемно-

дисперсное армирование [64]. Первые четыре способа достаточно хорошо изучены и широко применяются как в России, так и за рубежом. В то время как поведение грунта, армированного объемно-дисперсным способом, нуждается в дополнительной оценке.

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 удерживающих конструкций.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами прочности и устойчивости удерживающих 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. Клевекко, 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, А. Diambra, D. Ding, Н. Girard, J.P. Giroud, Н. Gray, К. Hargrove, Е. Ibraim, R.M. Koerner, Н. Maher, L. Michalowiski, Н. Ohashi, S. Park, А. Paul, Н. Perrier, G. Ranjan, F. Schlosser, S. Schwerdt, J. Sobolewski, T. Uscimura, Н. Vidal, T. Yetimoglu, А. 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 удерживающих 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 армирования 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 эмпирической модели и методики 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 в рамках диссертационной работы применялись теоретические и эмпирические методы научного познания, такие как планирование и проведение эксперимента, математическое моделирование. При проведении лабораторных и модельных экспериментов использовались сертифицированное и поверенное оборудование, современные программные комплексы с автоматическим сбором и обработкой информации. 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 формулировке 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 удерживающих конструкций, формулировке 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 специализированном поверенном оборудовании с использованием автоматизированных систем измерения результатов, а также использованием сертифицированных лицензионных программных комплексов при выполнении аналитических расчетов.

**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 (120 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.

Работа выполнена автором в период обучения в очной аспирантуре и дальнейшей работы на кафедре «Строительное производство и геотехника» ПНИПУ. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю профессору, д-ру техн. наук Пономареву А.Б., а также всему коллективу кафедры «Строительное производство и геотехника» ПНИПУ за поддержку и помощь в период работы над диссертацией.

## **ГЛАВА I. АНАЛИЗ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА УСТОЙЧИВОСТИ МАССИВА ГРУНТА, УЛУЧШЕННОГО ФИБРОВЫМ АРМИРОВАНИЕМ**

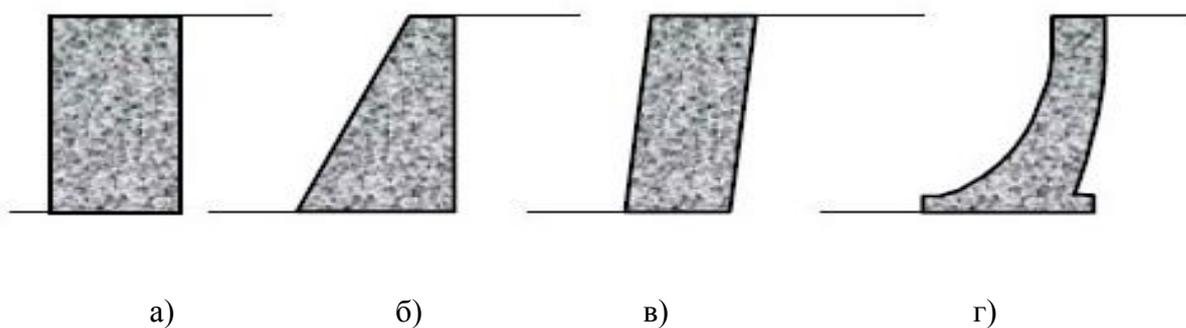
### **1.1. Обзор конструкций подпорных стен: традиционных и современных**

Уплотнение городской застройки, устройство глубоких котлованов, строительство дорог на косогорах, зданий на склонах, мостов и набережных вынуждают строителей использовать различные ограждающие конструкции.

Искусственные ограждения – подпорные стены – применяются во всех отраслях строительства: транспортном, гражданском, гидротехническом, промышленном и др. Для создания экономически эффективных и надежных удерживающих грунтовой массив конструкций требуется совершенствование расчетных методик и конструктивных решений подпорных стен [5, 74].

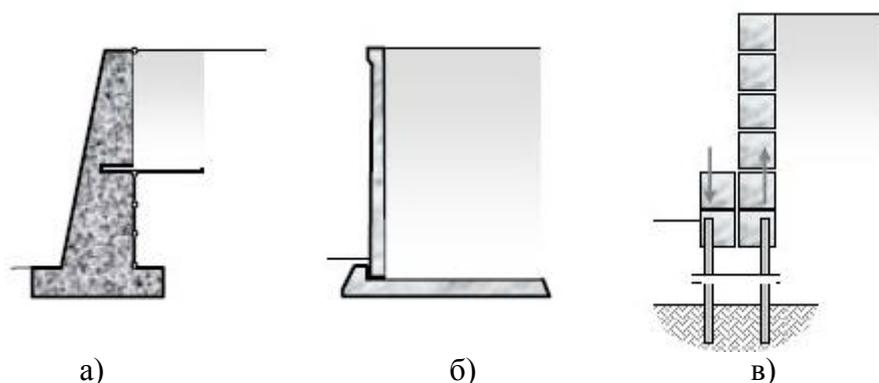
Подпорные стены могут быть классифицированы по различным признакам: по назначению, по расположению, по материалу и т.д. Рассмотрим разновидности конструкций по степени вовлечения грунта засыпки в вопросе сохранения устойчивости [75]. По степени вовлечения в работу грунта подпорные стены подразделяются на три группы: не использующие грунтовую засыпку в работу (гравитационные или массивные); частично использующие грунтовую засыпку (уголковые, тонкие, полугравитационные); полностью использующие грунтовую засыпку (армогрунтовые конструкции).

Конструкции массивных стенок (рисунок 1.1) материалоемки. В этом случае конструкция стены не предусматривает использование грунта в целях сохранения устойчивости, наоборот, он играет только отрицательную роль, так как оказывает активное давление на стенку.



**Рисунок.1.1** – Массивные подпорные стены: а) с двумя вертикальными гранями; б) с наклонной лицевой и вертикальной тыльной гранью; в) с двумя наклонными гранями; г) сложной формы

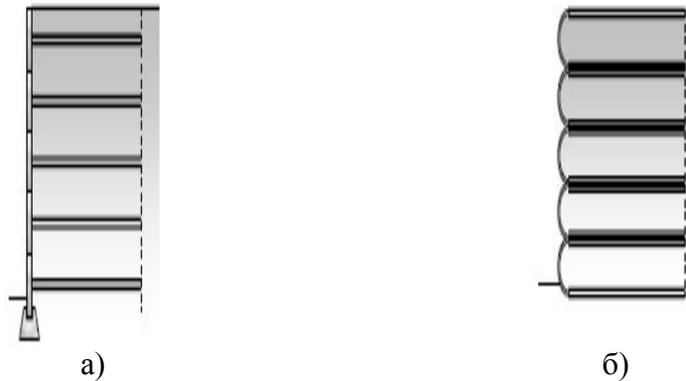
Когда в широкую практику строительства были внедрены строительные материалы, обладающие высокой прочностью, началось проектирование облегченных подпорных стен, в которых грунт засыпки оказывает давление на специальные, как правило, горизонтальные элементы (выступы, консоли, фундаментные плиты) (рисунок 1.2). Материалом облегченных подпорных стен, в основном, служит железобетон.



**Рисунок 1.2** – Облегченные подпорные стены: а) комбинированные; б) уголковые; в) тонкие

Подпорные стены из армированного грунта («армогрунтовые» подпорные стенки) – это совершенно иная конструкция по сравнению с массивными стенами (рисунок 1.3). В данном случае грунт является основным неотъемлемым элементом конструкции стенки. Устройство засыпки в этом случае подразумевает чередование уплотненного грунта и армирующих элементов (металлических сеток, геосинтетических материалов). Облицовка выполняется, как правило, из бетонных блоков или панелей, габионов, геотекстильных материалов. Первая

принципиальная концепция армогрунтовой стены принадлежит французскому инженеру-строителю Анри Видалю [26].



**Рисунок 1.3** – Подпорные стены из армированного грунта: а) с облицовкой; б) выполненные по методу обертывания

Строительство армогрунтовых конструкций, в том числе подпорных стен, стремительно набирает обороты. В строительной практике идея армирования заключается во внедрении конструктивных элементов с заданными свойствами в строительные материалы, которые не имеют этих свойств. Известен факт, что грунт характеризуется низкой прочностью на растяжение и сдвиг, относительно невысокой прочностью на сжатие по сравнению с другими конструктивными материалами, и его характеристики сильно зависят от условий окружающей среды. Поэтому армирование грунта представляет собой метод улучшения механических характеристик грунта с целью улучшения таких параметров, как прочность на сдвиг, сжимаемость, а также водопроницаемость.

Концепция армирования подсказана самой природой: корни растений улучшают прочность грунта и устойчивость природных склонов. Так, концепция армирующих волокон была признана более чем 5000 лет назад. Например, древние цивилизации в качестве армирования глиняных блоков использовали солому и сено. Существует несколько известных примеров укрепления грунта основания в древности. Например, Великая Китайская стена – ранний пример использования армирования грунта ветвями деревьев в качестве элементов, работающих на растяжение, зиккураты Вавилона – были использованы тканые коврики для чтения и т.д. [38, 91].

В современной истории стабилизации грунтов понятие и принципы армирования грунта были впервые разработаны А. Видалем. Он показал, что включение армирующих элементов в грунтовый массив увеличивает его сопротивление на сдвиг. Основанные А. Видалем в начале 60-х годов технологии армирования грунтовых насыпей получили широкое признание за последние 40 лет. С использованием концепции армирования грунтов Видаля были построены около 5000 конструкций в более чем 37 странах мира [91].

Проблеме армирования грунтов посвящено большое количество работ по всему миру, авторами которых являются Т.М. Allen, R.J. Bathurst, D.T. Bergado, N.C. Consoli, D. Dias, J. Han, K. Hatami, D. Leshchinsky, H. Liu, M.R. Madhav, J.N. Mandal, Y. Miyata, E.M. Palmeira, R.K. Rowe, S.K. Shukla, M. Tateyama, F. Tatsuoka, B.V.S. Viswanadham, C. Xu, K.H. Yang, J.G. Zornberg и другие исследователи.

В современной геотехнике России армирование грунтов стало популярным направлением исследований. Работы, связанные с изучением армогрунтовых композитов, проводятся по всей территории страны под руководством В.Ф. Бая, А.Н. Богомолова, Д.Г. Золотозубова, Т. П. Кашариной, В. И. Клевеко, А.Н. Краева, С.А. Матвеева, Р.В. Мельникова, И.Т. Мирсаяпова, Л.В. Нуждина, В. Г. Офрихтера, А.Б. Пономарева, Я.А. Прозина, Г.М. Скибина, Д.А. Татьянникова, Л.М. Тимофеевой, Е.В. Федоренко, Р.И. Шенкмана и других ученых.

Армированный грунт имеет широкую область применения, армогрунтовые конструкции могут применяться в гражданском, промышленном, гидротехническом, дорожном строительстве. К основным типам конструкций, где может применяться армирование грунта, относятся откосы и склоны, подпорные стены, береговые устои, насыпи, фундаментные подушки, основания под автомобильные дороги и т.д.

Правила проектирования армогрунтовых конструкций на сегодняшний день изложены в Европейских нормах, в Британском стандарте BS 8006 «Строительные нормы на усиление/армирование грунтов и других заполнителей». Российским нормам проектирования армогрунтовых конструкций посвящены

отраслевые дорожные методические документы (ОДМ 218.5.003-2010, ОДМ 218.3.1.001-2020, ОДМ 218.3.1.002-2020 и др.).

## **1.2. Концепция фибрового армирования грунтовых массивов**

Традиционные методы армирования грунта предполагают использование внутри грунтовой конструкции непрерывных плоских элементов (металлических полос, георешеток, геотекстиля и т.п.). Армирующие включения увеличивают сопротивление грунта сдвигу в определенном направлении. При этом вдоль границы раздела армирования и грунта может возникать плоскость наименьшего сопротивления, так как сопротивление сдвигу в месте контакта, как правило, ниже, чем в грунте. Кроме того, укладка рулонной арматуры должна производиться с обеспечением анкеровки достаточной длины и/или с использованием надлежащих креплений для исключения возможности выдергивания. Фибровое армирование позволяет увеличить прочность природного грунта одинаково во всех направлениях, не требуя дополнительной конструктивной или расчетной анкеровки в массив грунта [20]. К другим преимуществам фибрового армирования можно отнести следующие положения:

- Приготовление фиброгрунтовых смесей можно производить с помощью традиционного оборудования (например, смесителей гравитационного действия).
- Устройство фиброгрунтовых сооружений может осуществляться практически в любых погодных условиях в отличие от химических методов стабилизации грунтов. При уплотнении фиброгрунтового основания можно не беспокоиться о возможном повреждении арматуры.
- В роли фибрового армирования может выступать широкий спектр природных и искусственных материалов: корни и стебли растений, измельченные покрышки, отходы текстильной или пластмассовой промышленности. Также могут быть использованы полимерные волокна заводского изготовления [91].

Идея армирования грунта отдельными волокнами известна с античных времен. Еще древние цивилизации добавляли солому и корни растений при изготовлении кирпичей для улучшения их свойств. Однако в современной геотехнике основной акцент сделан на использование плоского армирования

(металлических полос, рулонных геосинтетических материалов). Объемно-дисперсное армирование грунта до сих пор является относительно новой технологией, которая нуждается в дополнительной оценке.

Идея фибрового армирования в геотехнике изначально подразумевала использование в качестве арматуры корней растений. Gray [88], Waldron [115], Wu и др. [116] исследовали грунт, армированный корнями растений. Авторами был сделан вывод, что благодаря природным волокнам грунтовый массив обладает более высокой прочностью на сдвиг, а склоны с растительным покровом будут более устойчивыми. Изучение армирования искусственными волокнами началось более тридцати лет назад. Исследователи проводили лабораторные испытания образцов, усиленных полимерными фибрами в условиях одноосного и трехосного сжатия, одноплоскостного среза. Было доказано, что грунт, армированный синтетическими волокнами, имеет более высокое по сравнению с природным грунтом пиковое сдвигающее напряжение, которое почти не уменьшается до конца испытания.

В больших объемах метод фибрового армирования грунта впервые был применен во Франции, где была зарегистрирована торговая марка «Texsol». Технология «Texsol» подразумевала армирование грунта непосредственно перед укладкой непрерывными полиэфирными нитями, которые перемешивались с грунтом при помощи специального пневматического или механического оборудования. Метод применялся для армирования откосов и склонов, а также для усиления грунтов обратной засыпки подпорных стен [96].

Большой вклад в развитие исследований фиброармированных грунтов внесли C. Consoli, A. Diambra, D. Ding, W. Ding, H. Gray, K. Hargrove, E. Ibraim, J. Li, H. Maher, L. Michalowski, H. Ohashi, S. Park, G. Ranjan, T. Yetimoglu, A. Zhao, G. Zornberg, А. Б. Пономарев, В. Г. Офрихтер и др.

Большинство экспериментальных исследований было проведено с сыпучими грунтами. Gray и Ohashi [88] изучали механизм фибрового армирования, используя сдвиговые испытания. Волокна были по-разному ориентированы относительно плоскости сдвига. Было обнаружено, что на

сопротивление грунта сдвигу оказывает влияние содержание, ориентация и модуль упругости волокон. Al-Refeai [79] изучал влияние фибрового армирования, используя разные типы сыпучих грунтов и волокон. Было выявлено, что эффективность фибрового армирования более очевидна в мелких песках с полуокатанными частицами по сравнению с песками средней крупности с угловатыми частицами. Также было найдено, что на взаимодействие грунта и волокон оказывает влияние растяжимость фибры.

Estabragh и др. исследовали применение волокон полиэтилена и полиэстера с целью снижения процесса суффозии в пылеватых песках. Они установили, что фибровое армирование ведет к снижению коэффициента фильтрации, при этом уменьшение водопроницаемости грунта является функцией от длины и содержания волокон. Кроме того, добавление волокон в грунт способствует увеличению сопротивления грунта суффозионным процессам и критического значения гидравлического градиента [84].

Для исследования фибрового армирования грунта как возможного метода противозэрозионной защиты Falorca и др. производили наблюдения за песчаной насыпью с размерами в плане 25x3 м и высотой 0,3 метра. По длине насыпи были применены 6 типов фибрового армирования: 4 участка насыпи были армированы волокнами полипропилена длиной 75 мм с процентным содержанием волокон от 0,1% до 0,75%; 2 участка были армированы волокнами, представляющими отходы текстильной промышленности, длиной 12 мм с процентным содержанием 0,5% и 2%. Авторы делают вывод, что даже самое низкое процентное содержание полипропиленовых волокон позволяет грунту насыпи эффективно сопротивляться эрозионным процессам, которые проявляются при действии атмосферных осадков [85, 86].

Исследования, связанные с использованием фибрового армирования в связных грунтах, более ограничены. Хотя сообщалось, что фибровое армирование увеличивает сопротивление сдвигу связных грунтов, этот метод улучшения нуждается в дополнительной оценке, так как до конца неясен механизм взаимодействия грунта и фибры при нагружении. Andersland и Khattack

проводили испытания каолиновой глины, армированной волокнами целлюлозы. Сопротивление грунта сдвигу в разных лабораторных условиях (недренированных, консолидированно-дренированных, консолидированно-недренированных) увеличивалось с увеличением содержания волокна. Пластичность образцов также повышалась при увеличении процента армирования [91]. Maher и Но [99] сообщали, что случайно распределенные волокна увеличивают пиковое сопротивление одноосному сжатию, пластичность, сопротивление раскалыванию и изгибную жесткость каолиновой глины. Было обнаружено, что влияние фибрового армирования более существенно для образцов с меньшей влажностью.

Ghazavi и Roustaie показали, что добавление 3% полипропиленовых волокон (12 мм) приводит к увеличению прочности при одноосном сжатии образцов глинистого грунта до и после циклического замораживания-оттаивания на 60-160% и сокращению морозного пучения на 70% [87].

Al-Mhaidib обнаружил положительное влияние фибрового армирования на снижение явления набухания глины из Саудовской Аравии. Он исследовал в лабораторных условиях образцы глинистого грунта с различным процентным содержанием полипропиленовых волокон (0,25%, 0,5%, 0,75% и 1%). Результаты проведенных экспериментов показали, что армирование волокнами способно снизить тенденцию к набуханию склонных к этому явлению грунтов, причем эффект армирования увеличивается с увеличением количества волокон [104].

Некоторые исследователи изучали применение фибры для улучшения пластичности грунтоцемента. Consoli и соавт. сообщали, что фибровое армирование увеличивает пиковую и остаточную прочность грунтоцемента на сдвиг и снижает его хрупкость. Kaniraj и Navangi описывали подобное поведение фиброгрунта, стабилизированного цементом или золой уноса [94].

Анализ существующих исследований позволил сделать вывод, что в большинстве работ для оценки совместной работы волокон с грунтом авторами (Gray D.H., Maher M.H., Michalowski R.L., Ohashi H., Ranjan G.) предлагается рассматривать фиброармированную смесь как изотропный массив грунта с

приведенными прочностными характеристиками: эквивалентными углом внутреннего трения  $\varphi'$  и удельным сцеплением  $c'$  [21, 112].

Gray и Ohashi [88] предложили модель равновесия сил, основанную на результатах серии испытаний на сдвиг, проводимых на образцах песка с определенной ориентацией волокон. Предполагается, что вдоль плоскости среза сдвиг грунта приводит к искривлению волокна, тем самым мобилизуя его сопротивление на разрыв (см. рисунок 1.4). Согласно этой модели, увеличение прочности на сдвиг  $\Delta S$  благодаря фибровому армированию композита может быть определено из условия равновесия сил и вычислено по следующему уравнению при условии, что волокна перпендикулярны плоскости сдвига:

$$\Delta S = t(\sin \theta + \cos \theta \operatorname{tg} \varphi) \quad (1.1)$$

где  $\theta$  – угол искривления волокна,  $t$  – мобилизованная прочность на разрыв, которая определяется по формуле:

$$t = (A_f / A) \sigma_t, \quad (1.2)$$

где  $A_f$  и  $A$  – площадь волокон в зоне сдвига и общая площадь зоны сдвига соответственно,  $\sigma_t$  – напряжение, возникающее в волокне и зависящее от характеристик волокон, коэффициента трения грунт-волокно, ширины зоны сдвига и угла внутреннего трения грунта.

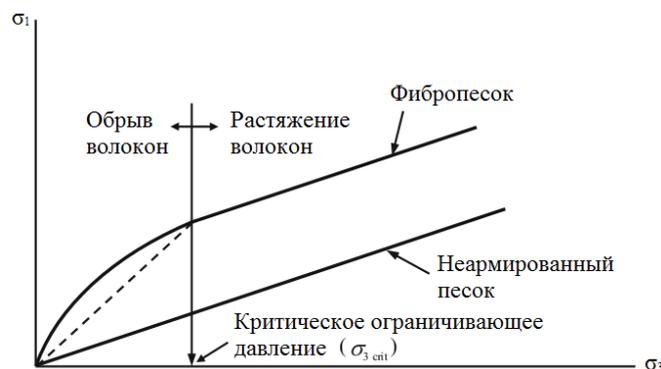


**Рисунок 1.4** – Модель гибкого эластичного волокна в зоне сдвига  
(по Gray и Ohashi, 1983)

Модель Gray и Ohashi не подходит для волокон с низким коэффициентом трения, когда разрушение вызвано выдергиванием волокон. Другой сложностью

при применении данной модели является то, что в качестве исходного параметра необходим размер зоны сдвига, который сложно измерить.

Maher и Gray [100] расширили модель случайно распределенных волокон, предложенную Gray и Ohashi, путем включения в нее статистических концепций. Они предположили, что предельная огибающая Кулона для фиброгрунта представляет собой криволинейную или ломаную линию, характер которой меняется в зависимости от некоторого критического ограничивающего давления  $\sigma_{3,crit}$  (рисунок 1.5). Если действующее давление меньше критического, то происходит выдергивание волокон, если действующее давление больше критического, то имеет место разрыв волокон.



**Рисунок 1.5** – Предельные огибающие для песка и фиброгрунта (по Maher и Gray, 1990)

Maher и Gray было получено два выражения для расчета увеличения прочности на сдвиг  $\Delta S$  вследствие применения фибрового армирования при  $\sigma_3 < \sigma_{3,crit}$  и  $\sigma_3 \geq \sigma_{3,crit}$ .

Ограничением применения модели Maher и Gray, так же как и модели равновесия сил, предложенной Gray и Ohashi, является необходимость знания величины зоны сдвига, которую сложно получить [21]. Выражение для  $\sigma_{3,crit}$  было получено эмпирически по результатам трехосных испытаний.

Ranjana и др. [108] были получены выражения для прочности на сдвиг фиброармированного грунта с использованием регрессионного анализа результатов испытаний трехосного сжатия. Испытания были проведены с несвязным грунтом, армированным дискретными, случайно распределенными

волокнами для исследования влияния характеристик волокон, характеристик грунта и всестороннего давления. Основными параметрами, влияющими на прочность грунта на сдвиг, были названы содержание волокон, соотношение размеров волокон, коэффициент трения волокно-грунт и прочность неармированного грунта на сдвиг. Эти переменные были использованы в регрессионном анализе, с помощью которого были получены уравнения для прочности фиброармированного грунта на сдвиг. Ranjan была предложена предельная огибающая с плавным переходом при определенном значении всестороннего давления (вместо резкого обрыва). Недостатком этой модели является то, что она в значительной мере не отражает механизмы фибрового армирования и опирается на простой набор результатов экспериментов. Следовательно, точность прогнозирования зависит от точности результатов испытаний, используемых автором.

Michalowski и Zhao [101] предложили методику определения разрушающего напряжения фиброгрунтовых композитов на основе энергетического подхода. Для нахождения критерия разрушения необходимы пять параметров: концентрация волокон, размеры волокон, предел текучести, угол трения на границе волокно-грунт, угол внутреннего трения грунта. Было получено два выражения для случаев растяжения и выдергивания волокон.

Описанные выше модели были определены как «композитные», потому что для определения эквивалентной прочности на сдвиг композитов применяются числовые параметры, полученные по результатам испытаний фиброармированных образцов грунта. Противоположно такому подходу Zornberg была предложена модель для оценки прочности фиброгрунта, согласно которой приведенная прочность грунта на сдвиг может быть получена по параметрам, определить которые можно, зная только характеристики неармированного грунта и армирующих волокон по отдельности [120]. Автор рассматривал армирующие волокна как отдельные элементы, которые работают на растяжение в плоскости сдвига, тем самым повышая устойчивость грунта. Основной задачей предложенного подхода является отказ от исследований фиброармированных

образцов грунта, поскольку необходимость испытаний композитов препятствует внедрению фибрового армирования в инженерную практику.

Дискретный подход однозначно вычисляет распределенное напряжение, возникающее в волокне,  $t$ , которое представляет собой растягивающую силу на единицу площади, возникающую в грунтовой массе, армированной случайно распределенными волокнами. В частности, величина распределенного напряжения, возникающего в волокне, определяется как функция характеристик отдельных волокон. Таким образом, аналогично линейному армированию, анализ предельного равновесия фиброармированного грунта однозначно может быть выполнен по растягивающим усилиям.

Эквивалентный предел сдвиговой прочности фиброгрунта,  $S_{eq}$ , может быть определен как функция от распределенного напряжения, возникающего в волокне,  $t$ , и прочности на сдвиг неармированного грунта,  $S$ :

$$S_{eq} = S + \alpha \cdot t = c' + \sigma'_n \operatorname{tg} \varphi' + \alpha \cdot t \quad (1.3)$$

где  $\alpha$  – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние ориентации волокон и мобилизацию распределенного напряжения, возникающего в волокне.

Существенным преимуществом дискретного подхода Zornberg является то, что прочность фиброгрунта будет получена до его непосредственного производства. При этом рассмотренная дискретная концепция фиброгрунта обладает удовлетворительной сходимостью с результатами экспериментальных исследований автора при расчете кажущегося удельного сцепления при армировании не более 0,5% и расходится с данными экспериментов при расчете угла внутреннего трения и удельного сцепления при больших процентах армирования [21]. В настоящее время данный подход неприменим, так как в соответствии с СП 22.13330.2016 прочностные характеристики фиброгрунтовых композитов следует определять в лабораторных условиях либо посредством натуральных испытаний. «Дискретная» модель может быть использована для предварительной оценки прочностных характеристик фиброгрунта на этапе технико-экономического обоснования.

В связи с тем, что основной эффект от внедрения случайно распределенных волокон в грунт заключается в увеличении эквивалентной прочности на сдвиг, основные области применения фиброгрунта – обеспечение устойчивости грунтовых откосов, склонов, облицовок (например, грунтовых экранов, защищающих захоронения отходов), а также устройство армированных оснований и насыпей в дорожном строительстве.

Для решения вопросов устойчивости армирование волокнами можно осуществлять совместно с армированием другими геоматериалами. Было доказано, что при использовании фиброгрунта в качестве обратной засыпки подпорных стен рулонной арматуры потребуется меньше, так как фиброгрунт обладает более высокой прочностью на сдвиг по сравнению с природным грунтом [91]. Park и Tan сделали вывод, что применение песчаного грунта, армированного полипропиленовыми волокнами длиной 60 мм, позволит снизить активное давление грунта и перемещения стенки. При использовании двух типов армирования (горизонтального и объемно-дисперсного) положительный эффект усиливается [106].

Nasr исследовал работу нагруженного массива грунта, находящегося за шпунтовой стеной, активная зона которого была усилена волокнами полипропилена и цементной пылью. Им были проведены лабораторные испытания в лотке и расчет конструкции методом конечных элементов. Результаты исследований показали, что при добавлении волокон хрупкое поведение цементно-песчаной смеси изменяется на пластичное, осадки увеличиваются. При этом с увеличением толщины армирующего слоя увеличивается несущая способность фундамента на фиброармированном основании и уменьшается величина горизонтальных смещений стенки [103].

К преимуществам объемно-дисперсного армирования также можно отнести возможность его применения для ремонта локально разрушенных откосов. Насыпь из фиброгрунта может быть выполнена любой формы, в то время как использование грунта, армированного плоскими материалами, невозможно для устройства «заплат» на склонах, так как требует заанкеривания арматуры вглубь

откоса. Фибропесчаная смесь может наноситься на оползнеопасный склон аналогично набрызг-бетону, увеличивая устойчивость конструкции, не снижая водопроницаемости [91].

Перспективным применением грунта, армированного объемно-дисперсным способом, является обеспечение дополнительной устойчивости грунтовых облицовок (например, защитных экранов полигонов ТБО). Как правило, такие сооружения проектируются с крутыми откосами, угол заложения которых превышает предельно допустимый для использования рулонного армирования. Кроме того, плоские геосинтетические материалы нуждаются в анкеровке в грунты, подстилающие облицовку, а также необходимо их крепление на вершине откоса. Фиброгрунту, напротив, не требуется заанкеривание, поэтому его использование является технически и экономически обоснованным. Также армирование грунтов волокнами способствует развитию травяного покрова, что является дополнительным противоэрозионным мероприятием для защиты откосов [91].

Положительный эффект фибрового армирования был неоднократно доказан в лабораторных условиях. К факторам, ограничивающим применение фиброгрунта в промышленных масштабах в Российской Федерации, можно отнести следующие: недостаточность нормативной базы и отсутствие технологических рекомендаций по применению данной технологии, а также сложности, возникающие при приготовлении фиброгрунтовой смеси. Разработка рекомендаций по смешиванию грунта и волокон – одна из центральных задач, которая должна быть решена для внедрения технологии в широкую геотехническую практику.

Подобно изготовлению фиброармированного бетона, целью разработки технологии производства фиброгрунта является получение конструкционного материала, представляющего смесь грунта и армирующих равномерно распределенных в грунтовой матрице волокон, обладающего улучшенными показателями физико-механических свойств, которые постоянны и изотропны по всему его объему [58]. Существующие исследования фиброгрунта мало

затрагивают технологию его производства. Известно только, что смешать грунт с фиброй можно вручную или при помощи машин и механизмов как стандартных, так и специально разработанных. При этом главной проблемой при производстве фиброгрунта являются локальные скопления комков волокон, которые препятствуют получению однородного композита [24].

Ручное смешивание является очень трудоемким и требует большого количества человеко-часов. Такой подход применим только для приготовления фиброгрунта в небольших объемах для лабораторных исследований.

Для приготовления смеси из волокон и грунта можно разработать специальные смесительные машины, основной функцией которых будет производство фиброгрунта, а также для этой цели возможно адаптировать уже существующие устройства, такие как барабанные смесители различного действия, миксеры для приготовления бетона или культиваторы [109].

В исследованиях авторов [109] сделан вывод, что механический культиватор, как правило, применяемый для рыхления почвы перед посевом, способен решить проблему перемешивания волокон и грунта на достаточно высоком уровне. В качестве рекомендации авторы предлагают ограничить время смешивания, так как при долгой работе культиватора волокна начинают наматываться на лопасти устройства и не попадают в грунтовую матрицу [22].

Смешивание волокон с грунтом может быть также осуществлено в смесителях гравитационного действия. В этом случае на первом этапе предлагается изготовление суспензии из грунта и воды в пропорции 1:3,5. Вторым этапом является вмешивание волокон в готовую суспензию с последующей добавкой остального грунта [109].

При применении для смешивания волокон с грунтом гравитационного смесителя с четырьмя лопастями может возникнуть проблема запутывания волокон вокруг лопастей, что потребует их постоянной чистки. При расположении барабана под большим углом от горизонтали грунт будет располагаться преимущественно на дне, а легкий вес волокон помешает им

оседать. Таким образом, для волокон будет характерно держаться на поверхности грунта, а не смешиваться с ним [109].

Таким образом, армирование дискретными случайно распределенными волокнами способно стать достойной альтернативой армированию плоскими геосинтетическими материалами и другим методам усиления грунтов. Для промышленного внедрения технологии фибрового армирования требуются крупномасштабные исследования и разработка верифицированных моделей фиброгрунтовых композитов.

### **1.3. Анализ основных методов расчета давления грунтов на ограждения**

В настоящее время внимание исследователей привлекает разработка новых конструктивных решений и методов расчета удерживающих конструкций с целью повышения экономичности и надежности сооружений такого рода.

Важнейшей характеристикой при проектировании удерживающих конструкций является величина и направление давления грунта на подпорную стенку. На основании расчета величины давления грунта осуществляется определение параметров подпорных конструкций. Горизонтальное давление будет зависеть от геометрических параметров и жесткости стенки, наличия нагрузки, а также от физических и механических характеристик грунта обратной засыпки и основания [24]. Согласно рекомендациям СП 43.133330 «Сооружения промышленных предприятий», для снижения гидростатического давления на подпорные конструкции в качестве обратной засыпки необходимо использовать грунты, обладающие высокой водопроницаемостью (песчаные или крупнообломочные) [66].

Впервые вопрос давления грунтов на ограждения был рассмотрен в конце XVIII в. Кулоном, когда им были сформулированы основные положения теории сыпучих тел. Далее происходило совершенствование методов расчета: разработка графических способов определения давления грунтов на ограждения, составление дифференциальных уравнений равновесия грунта за подпорной стенкой, разработка решений для учета сил сцепления. В середине XX в. советскими учеными Соколовским В.В. и Голушкевичем С.С. были получены строгие

решения задачи о давлении сыпучих грунтов на ограждения аналитическим и графическим методами [74].

Определением давления грунта на ограждающие конструкции экспериментально в натуральных исследованиях и на моделях занимались российские и зарубежные исследователи: А.Н. Богомолов, М. Н. Варгин, Г. А. Дуброва, А. З. Зархи, О. Калгслей, А. С. Кананян, К.В. Королев, Г. К. Клейн, Г. Маллиган, А. И. Прилежаев, П. Роу, А. М, Сахновский, И. Н. Снитко, Р. Стройер, Б. Л. Тарасов, К. Терцаги, З. В. Цагарели, Г. П. Чеботарев, В. И. Щербина, И. В. Яропольский и др.

В настоящее время вопросам давления грунтов на ограждения посвящено большое число исследовательских работ. Методы расчета активного давления можно разделить на теоретические, аналитические, эмпирические и графические.

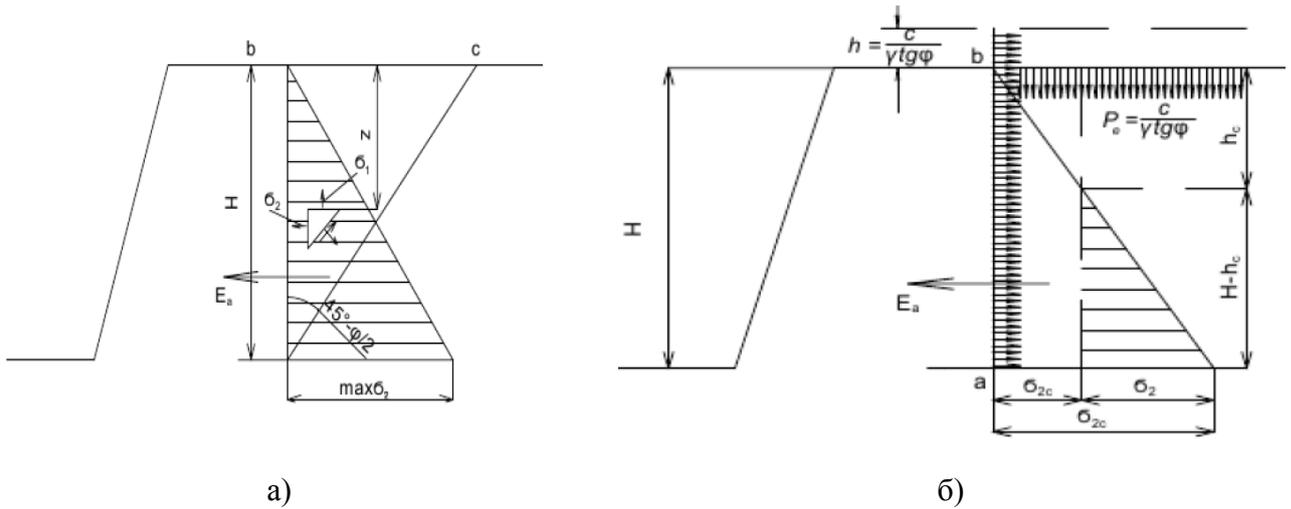
Согласно классическому методу, расчет давления грунтов на подпорные стенки ведется аналитическим методом при допущении плоских поверхностей скольжения [74]. Для случая вертикальной гладкой стенки с горизонтальной поверхностью засыпки сыпучего грунта, не обладающего сцеплением (рисунок 1.6, а), активное давление грунта вычисляется по формуле:

$$E_a = \frac{\gamma H^2}{2} \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1.4)$$

В случае, когда грунт засыпки связный (рисунок 1.4, б), активное давление уменьшается за счет действующих сил сцепления и вычисляется по формуле:

$$E_a = \frac{\gamma H^2}{2} \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) - 2cH \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) + \frac{2c^2}{\gamma} \quad (1.5)$$

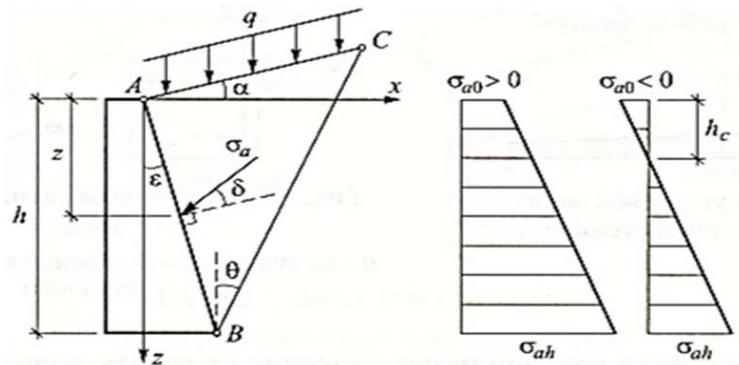
Расчет активного давления по формулам (1.4) и (1.5) ведется без учета влияния трения грунта о стенку, которое немного уменьшает боковое давление, поэтому вычисленное значение  $E_a$  дает известный запас.



**Рисунок 1.6** – Расчетная схема к определению активного давления: а) несвязного грунта; б) связного грунта

В современной справочной литературе [68] при расчете активного давления грунта применяется метод предельного равновесия, допущением которого являются прямолинейные поверхности скольжения.

Распределение активного давления по тыловой грани подпорной стенки высотой  $h$  принимается по линейному закону (рисунок 1.7).



**Рисунок 1.7** – Расчетная схема к определению активного давления [68]

Равнодействующая активного давления в этом случае определяется по формулам:

$$\text{если } \sigma_{a0} \geq 0 \quad E_a = \frac{1}{2}(\sigma_{a0} + \sigma_{ah})h; \quad (1.6)$$

$$\text{если } \sigma_{a0} < 0 \quad E_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_{ah}^2}{\sigma_{a0} - \sigma_{ah}} h; \quad (1.7)$$

Где  $\sigma_{a0} = q\lambda_{aq} - c\lambda_{ac}$ ,  $\sigma_{ah} = \gamma h\lambda_a + q\lambda_{aq} - c\lambda_{ac}$ .

Для простейшего случая, когда  $\delta = \varepsilon = \alpha = 0$ , коэффициенты активного давления определяются по формулам:

$$\lambda_a = \lambda_{aq} = tg^2 \mu; \lambda_{ac} = 2\sqrt{\lambda_a}; \mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}.$$

Строгое решение задачи о давлении грунтов на подпорные стенки было получено Соколовским В.В. путем численного интегрирования преобразованных дифференциальных уравнений, характеризующих плоское предельное состояние грунтов за подпорной стенкой с учетом условия предельного равновесия методом конечных разностей.

Величина активного давления согласно строгому решению может быть вычислена по формуле:

$$\sigma_{\varphi a} = q_0 \gamma z \quad (1.8)$$

При действии вертикальной нагрузки интенсивностью  $q$  на горизонтальную поверхность засыпки:

$$\sigma'_{\varphi a} = q_0 (\gamma z + q) \quad (1.9)$$

В формулах (1.8)-(1.9)  $q_0$  – безразмерный коэффициент, табулированный в зависимости от угла внутреннего трения  $\varphi$ , угла трения грунта о стенку  $\varphi_0$  и угла, составляемого задней гранью подпорной стенки с горизонтом  $\theta$ . Таблицы значений безразмерного коэффициента  $q_0$  получены в результате численного решения задачи о давлении грунтов на подпорные стенки [74].

Методы расчета активного давления до сих пор совершенствуются. Так в работе [7] предложено два новых подхода к расчету горизонтального давления на ограждение котлована. Первый подход заключается в том, что находится аппроксимирующая кривая к эпюре горизонтальных перемещений стенки, которые получены при моделировании котлована методом конечных элементов. Эпюрой горизонтальных перемещений загружается вертикальная балка с жесткой заделкой на упругом основании. Подбор сечений элементов ограждающей конструкции осуществляется по максимальному значению изгибающего момента, определенному из решения балки на упругом основании. В основу второго подхода лег метод расчета сил оползневого давления. По методике, подробно

описанной в [80], находится решение для любого коэффициента бокового давления грунта  $\xi_0$ , знать очертание эпюры активного давления грунта при этом не требуется.

Для расчета величины активного давления фиброгрунта  $E_a$  на подпорную стену Michalowski [102] предложил формулу:

$$E_a = \frac{\gamma h^2}{2} K_a, \quad (1.10)$$

где  $K_a$  – коэффициент активного давления грунта, который был определен в зависимости от угла внутреннего трения грунта, угла трения на контакте подпорная стена-грунт, соотношения геометрических размеров фибры и ее процентного содержания, угла трения на границе раздела грунт-волокно, изотропности материала [19].

В настоящее время с развитием современного программного обеспечения расчет удерживающих конструкций чаще всего производится методом конечных элементов, который представляет синтез методов механики грунтов, теории упругости, пластичности, строительной механики и др., позволяя минимизировать допущения и принять во внимание все факторы, влияющие на работу ограждающей конструкции.

На основании анализа существующих конструкций подпорных стен и методов расчета давления грунта на ограждающие конструкции можно сделать вывод, что для расчета и проектирования подпорных стен необходимы прочностные характеристики грунта обратной засыпки, которые определяют работу выбранной расчетной схемы. Для снижения материалоемкости ограждений необходимо уменьшение величины горизонтального давления грунта, чего можно добиться за счет увеличения удельного сцепления грунта обратной засыпки. На основании обзора можно сделать вывод, что фибровое армирование грунтов способно решить эту задачу.

#### **1.4. Основные выводы по главе и задачи дальнейших исследований**

На основании проведенного анализа нормативно-технической и периодической литературы автором были сформулированы следующие выводы:

1. Совершенствование конструктивных схем удерживающих конструкций с целью повышения экономичности и надежности остается актуальной задачей. С развитием численных методов расчета и производством новых материалов необходимо дальнейшее развитие технологий устройства и проектирования конструкций подпорных стен.

2. Армирование грунтов – прогрессивная технология, которая способна решить широкий спектр геотехнических задач, в том числе устройство армогрунтовых удерживающих конструкций. Наряду с хорошо известным методом армирования грунта рулонными материалами, для улучшения свойств природных грунтов, в частности увеличения прочности грунта на сдвиг, фибровое армирование может стать достойной альтернативой.

3. Отсутствие полномасштабных исследований и нормативных стандартов по применению фиброгрунтовых композитов ограничивает внедрение данной технологии на практике. Дальнейшее изучение свойств и особенностей работы фиброгрунта с разработкой рекомендаций по оценке его характеристик и областей применения является актуальным направлением исследовательских работ.

4. Для проектирования удерживающих конструкций необходимо оценивать величину активного давления, которое оказывает грунт обратной засыпки. Для его расчета требуются прочностные характеристики грунта, определяющие реальную работу конструкций, которые необходимо учесть при разработке подходов, связанных с использованием объемно-дисперсного армирования.

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

Для решения заданного вопроса необходимо рассмотреть следующие задачи исследования:

1. Изучить влияние объемно-дисперсного армирования на физико-механические характеристики грунта и подобрать оптимальный состав фиброгрунта.

2. Оценить работу фиброгрунта в качестве обратной засыпки удерживающих конструкций.

3. Разработать эмпирическую модель фиброгрунта и методику, позволяющую определить действительные прочностные характеристики фиброгрунта.

4. Обосновать применение метода объемно-дисперсного армирования для усиления грунтов обратной засыпки удерживающих конструкций.

## **ГЛАВА 2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФИБРОАРМИРОВАННЫХ ГРУНТОВ**

В настоящей главе рассматриваются результаты лабораторных исследований образцов грунтов, усиленных фибровым армированием, с целью оценки влияния добавления волокон на физико-механические характеристики грунта. Свойства используемых материалов, описание оборудования, методика и программа испытаний приведены в следующих разделах главы.

По результатам анализа изученности вопроса устойчивости массивов грунта, усиленных фибровым армированием, выполненного в Главе 1, были сформулированы следующие задачи экспериментальных исследований:

1. Оценить влияние фибрового армирования на параметры прочностных свойств несвязного грунта.
2. Подобрать оптимальный материал и процент армирующих волокон для дальнейших модельных исследований.
3. Получить необходимые характеристики фиброармированных грунтов для дальнейшего проведения математического моделирования.

### **2.1. Применяемые материалы, методика исследований и планирование эксперимента**

В качестве основного метода исследования влияния фибрового армирования на параметры прочности грунта были выбраны трехосные испытания в стабилометре. Испытания по схеме трехосного сжатия наиболее достоверны по сравнению с лабораторными испытаниями на одноплоскостной срез и одноосное сжатие, позволяют смоделировать природу нагружения грунта в естественных условиях, передавая как боковое обжатие, имитируя давление соседних слоев грунта, так и вертикальное давление, моделируя бытовое давление и дополнительное давление от сооружения [60]. Трехосное сжатие – метод, который рекомендован актуальной нормативной литературой для определения

механических характеристик грунта наряду с полевыми испытаниями (пп. 5. 3. 9 СП 22.13330 [64]) [41].

Фиброгрунт для испытаний представлял смесь частиц несвязного грунта и армирующих волокон. Основным материалом при подготовке образцов армированного и неармированного грунта был речной песок нарушенного сложения с плотностью частиц  $\rho_s = 2,62 \text{ г/см}^3$ , по гранулометрическому составу – мелкий однородный.

Для оценки такого параметра, как тип армирующего материала, в проведенных экспериментальных исследованиях в качестве дискретного армирования использовались два типа доступных для приобретения волокон одинаковой длины: полипропиленовая фибра и рубленое базальтовое волокно (рисунок 2.1 а, б).



а)



б)

**Рисунок 2.1** – Армирующие волокна:  
а) полипропиленовая фибра; б) базальтовое волокно

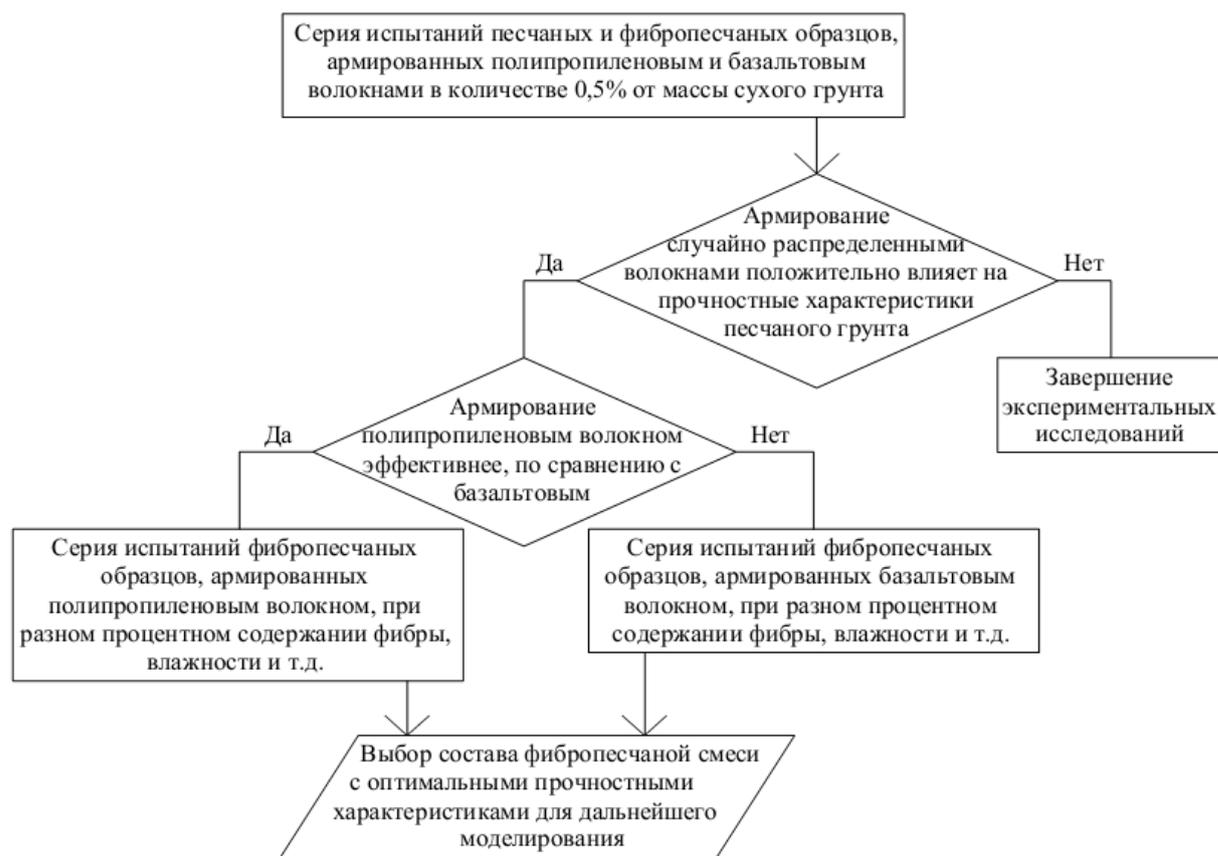
Применяемое полипропиленовое волокно используется в промышленных масштабах для дискретного армирования бетона, обладающего высокими прочностными характеристиками и повышенной трещиностойкостью вследствие уменьшения усадки [3]. С развитием идеи об армировании грунта случайно распределенными волокнами полипропиленовая фибра стала наиболее широко применимой для армирования грунтов в лабораторных исследованиях. В настоящее время волокна полипропилена используются для улучшения прочностных свойств грунтов, для сокращения усадочных деформаций и для

предотвращения химического и биологического разрушения [44]. Полипропиленовая фибра представляла собой отдельные волокна длиной 12 мм и диаметром 25-35 мкм. Плотность полипропилена 0,91 г/см<sup>3</sup>. Также производителем фибры был заявлен модуль упругости при изгибе, который составил не менее 1050 МПа и относительное удлинение фибры при разрыве, равное 23%.

Базальтовое волокно также имеет широкую область применения. В древности базальт использовали в строительстве дорог и мостовых. В дальнейшем сфера применения базальта расширилась, и материал начали использовать для производства антиабразивных покрытий и напольной плитки. На сегодняшний день продукция из базальтового волокна (ткани, сетки, маты, плиты) используются для армирования бетонов в промышленном и гражданском строительстве, для производства огнестойких строительных материалов, в качестве тепло- и звукоизоляции [4]. Базальтовое волокно имело длину 12 мм, диаметр – 9-17 мкм и модуль упругости 910-1100 МПа.

Для получения фиброармированного грунта волокна заданной массы включались в грунт, и смесь тщательно перемешивалась вручную до равномерного распределения волокон в грунтовой массе. В первой серии экспериментов процент содержания армирующих волокон был принят равным 0,5% от массы сухого грунта согласно рекомендациям, приведенным в работах [69, 70, 76, 84].

Испытания образцов песчаного грунта и фибропесчаных композитов проводились по схеме, приведенной на рисунке 2.2. Целью первого этапа исследования была проверка гипотезы о положительном влиянии армирования случайно распределенными волокнами на прочность грунта на сдвиг. При подтверждении данной гипотезы необходимо было оценить влияние волокон из разных материалов и выбрать наиболее эффективный тип армирования. Следующие серии экспериментов планировалось провести с выбранным типом волокон, варьируя процентное содержание арматуры и влажность грунта.



**Рисунок 2.2** – Алгоритм лабораторных исследований образцов песчаного грунта и фибропесчаных композитов

Для проведения испытаний трехосного сжатия было использовано оборудование ООО НПП «Геотек» (г. Пенза). В состав стабилометра входит камера, давление внутри которой создается при помощи рабочей жидкости, устройство силового нагружения с возможностью передавать нагрузку до 1 т и средства измерения (рисунок 2.3). Программа испытания, ход эксперимента и его результаты обрабатываются при помощи программного автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса «АСИС». Оборудование позволило испытать цилиндрические образцы армированного и неармированного грунта диаметром 72 мм и высотой 150 мм. Таким образом, размеры образца не противоречили условию ГОСТ 12248, что диаметр образца должен быть не менее, чем в 6 раз, больше размера включений.



**Рисунок 2.3** – Установка трехосного сжатия

Программа испытаний назначалась в соответствии с рекомендациями ГОСТ 12248. Трехосное сжатие неармированных и армированных объемно-дисперсным способом образцов проводилось по консолидировано-дренированной схеме при различных (0,1; 0,2; 0,3 МПа) значениях бокового обжатия в камере стабилометра. Образцы выдерживались до окончания фильтрационной консолидации при заданных  $\sigma_2 = \sigma_3$ . Вертикальная нагрузка была приложена в кинематическом режиме таким образом, чтобы была обеспечена постоянная скорость приращения вертикальной деформации, которая составила 0,5 мм/мин. Испытание считалось законченным, если относительная вертикальная деформация образца достигала пятнадцати процентов.

Для достоверности экспериментов соблюдался ряд параметров и факторов. Для испытаний трехосного сжатия использовался один вид песка фиксированной влажности и гранулометрического состава [2]. Для обеспечения одинакового объема и плотности насыпного грунта была точно определена масса навески как чистого песка, так и усиленного, в зависимости от объема будущего образца, удельного веса материалов и процента армирующих волокон. Подготовка образцов и сборка приборов осуществлялась в строгом соответствии с

инструкцией, предоставленной производителем оборудования. Каждая серия испытаний была проведена с шестикратной повторяемостью.

Прочностные характеристики (угол внутреннего трения  $\varphi$ , удельное сцепление  $c$ ) песчаного грунта и фибропесчаных композитов были посчитаны по методике, приведенной в ГОСТ 12248:

$$\varphi = \arctg \frac{N-1}{2\sqrt{N}}, \quad (2.1)$$

$$c = \frac{M-1}{2\sqrt{N}}, \quad (2.2)$$

где  $N$  и  $M$  вычисляются по следующим формулам:

$$N = \frac{n \sum \sigma_1 \sigma_3 - \sum \sigma_1 \sum \sigma_3}{n \sum (\sigma_3)^2 - (\sum \sigma_3)^2}, \quad (2.3)$$

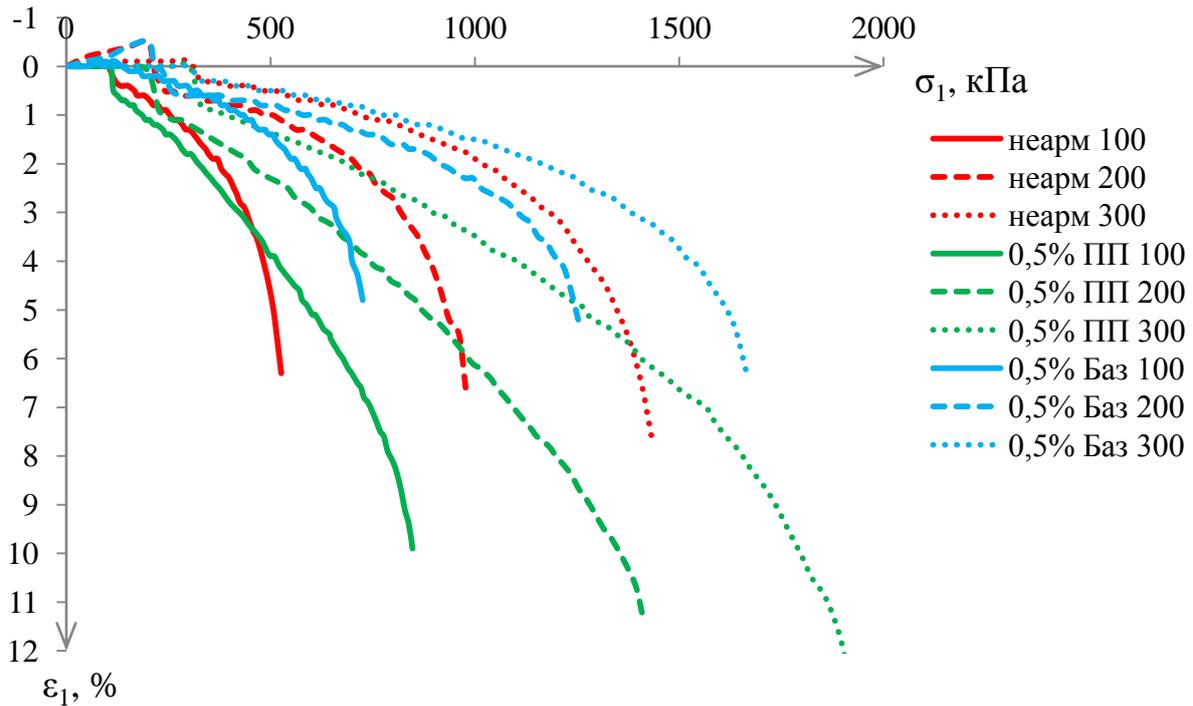
$$M = \frac{\sum \sigma_1 \sum \sigma_3^2 - \sum \sigma_3 \sum \sigma_1 \sigma_3}{n \sum (\sigma_3)^2 - (\sum \sigma_3)^2}, \quad (2.4)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – значения полных напряжений при разрушении образца;  $n$  – число испытаний.

## **2.2. Результаты лабораторных исследований песчаного грунта и фибропесчаных композитов**

### **2.2.1. Оценка влияния армирования дискретными волокнами базальта и полипропилена на прочностные характеристики песчаного грунта по результатам испытаний трехосного сжатия**

Результаты испытаний трехосного сжатия образцов несвязного грунта и грунта, армированного дискретными волокнами базальта и полипропилена, представлены в виде графиков зависимости относительной вертикальной деформации  $\varepsilon_1$ , % от вертикального напряжения  $\sigma_1$ , кПа (рисунок 2.4). Значения разрушающей нагрузки и относительной вертикальной деформации при разрушении и их изменения в результате армирования приведены в таблицах 2.1 и 2.2 соответственно.



**Рисунок 2.4** – Графики зависимости относительной вертикальной деформации  $\varepsilon_1$ , % от вертикального напряжения  $\sigma_1$ , кПа для неармированных образцов и армированных 0,5% полипропилена и базальта при  $\sigma_3 = 100, 200, 300$  кПа

Таблица 2.1 - Средние значения разрушающей нагрузки и относительной вертикальной деформации при разрушении по результатам трехосных испытаний

	$\sigma_3=100$ кПа		$\sigma_3=200$ кПа		$\sigma_3=300$ кПа	
	$\sigma_1$ , кПа	$\varepsilon_1$ , %	$\sigma_1$ , кПа	$\varepsilon_1$ , %	$\sigma_1$ , кПа	$\varepsilon_1$ , %
Неармированные образцы	526	4,8	943	6,5	1432	7,6
Армированные базальтом (0,5%)	730	5,0	1227	5,8	1725	6,3
Армированные полипропиленом (0,5%)	847	9,9	1411	11,3	1916	12,5

Таблица 2.2 - Относительное изменение разрушающей нагрузки и относительной вертикальной деформации при разрушении в результате армирования

	$\sigma_3=100$ кПа		$\sigma_3=200$ кПа		$\sigma_3=300$ кПа	
	$\Delta\sigma_1$ , д.ед	$\Delta\varepsilon_1$ , д.ед	$\Delta\sigma_1$ , д.ед	$\Delta\varepsilon_1$ , д.ед	$\Delta\sigma_1$ , д.ед	$\Delta\varepsilon_1$ , д.ед
Неармированные образцы	1	1	1	1	1	1
Армированные базальтом (0,5%)	1,39	1,04	1,30	0,89	1,20	0,83
Армированные полипропиленом (0,5%)	1,61	2,06	1,50	1,74	1,33	1,64

На основании графиков, построенных по результатам испытаний трехосного сжатия, можно сделать вывод, что при небольших значениях сжимающих напряжений фиброармированные образцы сжимаются несколько интенсивнее по сравнению с неармированными (превышение деформаций в диапазоне вертикальных нагрузок  $\sigma_1 = 0-300$  кПа не превышает 0,34 мм). Это может быть объяснено тем, что механически волокна с частицами грунта никак не связаны, а совместная работа обеспечивается только в результате обжатия. При более высоких значениях сжимающих нагрузок вертикальные деформации фиброгрунта оказываются меньше деформаций песчаных образцов. Кроме того, фибропесчаные композиты способны выдерживать большие разрушающие нагрузки (таблицы 2.1, 2.2). При этом достижение уровня 15% относительной вертикальной деформации происходит довольно резко у песчаных образцов (с  $\varepsilon_1 = 4,8-7,6$  %) и у образцов, армированных базальтом (с  $\varepsilon_1 = 5,0-6,3$  %), в то время как образцы, армированные полипропиленовой фиброй, достигают уровня деформаций  $\varepsilon_1 = 9,9-12,5$  %. Связи между песчаными частицами разрушаются уже при небольших сжимающих напряжениях, что проявляется в пластическом разрушении образцов в процессе испытания. На графиках (рисунок 2.4) при этом наблюдается резкий обрыв, свидетельствующий о жестко пластичном поведении образцов, что накладывает дополнительные ограничения при переходе от предела прочности к расчетным нагрузкам.

Значения прочностных характеристик образцов грунта, определенных по результатам трехосных испытаний, и их изменения в результате армирования полипропиленовыми и базальтовыми волокнами приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Значения прочностных характеристик образцов грунта по результатам трехосных испытаний и их изменения в результате армирования

	Параметры прочности		Относительное изменение параметров	
	$\varphi, ^\circ$	$c, \text{кПа}$	$\Delta\varphi, \text{д.ед.}$	$\Delta c, \text{д.ед.}$
Неармированные образцы	39,7	14,33	1	1
Армированные базальтом (0,5%)	41,7	52,08	1,05	3,63

	Параметры прочности		Относительное изменение параметров	
	$\varphi, ^\circ$	$c, \text{кПа}$	$\Delta\varphi, \text{д.ед.}$	$\Delta c, \text{д.ед.}$
Армированные полипропиленом (0,5%)	43,2	69,71	1,09	4,86

Из таблицы видно, что внедрение дискретных волокон полипропилена и базальта в грунт увеличивает угол внутреннего трения в 1,05-1,09 раза, удельное сцепление при этом возрастает в 3,63-4,86 раз. Увеличение прочностных характеристик является доказательством эффективности применения данного геоматериала.

Помимо графиков зависимости деформаций от напряжений результаты трехосных испытаний могут быть представлены с использованием инвариантов напряженного состояния грунтовой среды. В условиях трехосного сжатия, когда  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ , наиболее простой формой записи инвариантов напряжений являются среднее напряжение  $p$  и девиатор  $q$  [8,9,111]:

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3} + \sigma_3; \quad (2.5)$$

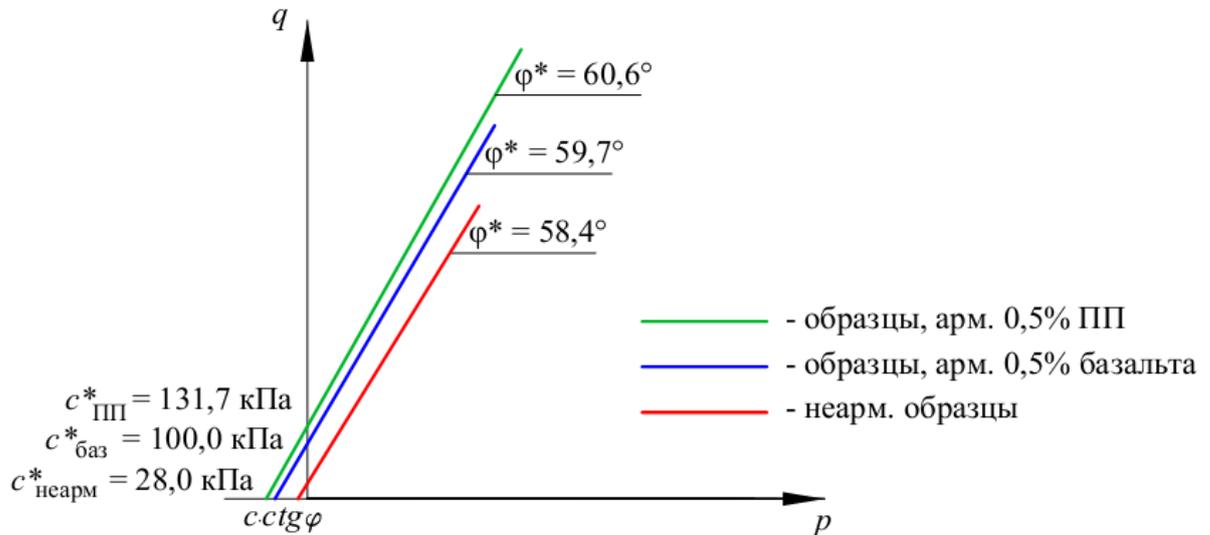
$$q = \sigma_1 - \sigma_3. \quad (2.6)$$

В этом случае предельная прямая наклонена к оси абсцисс под углом  $\varphi^*$  и отсекает на оси ординат отрезок  $c^*$ , значения которых могут быть определены из диаграммы Мора по правилам геометрии как:

$$\operatorname{tg} \varphi^* = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}; \quad (2.7)$$

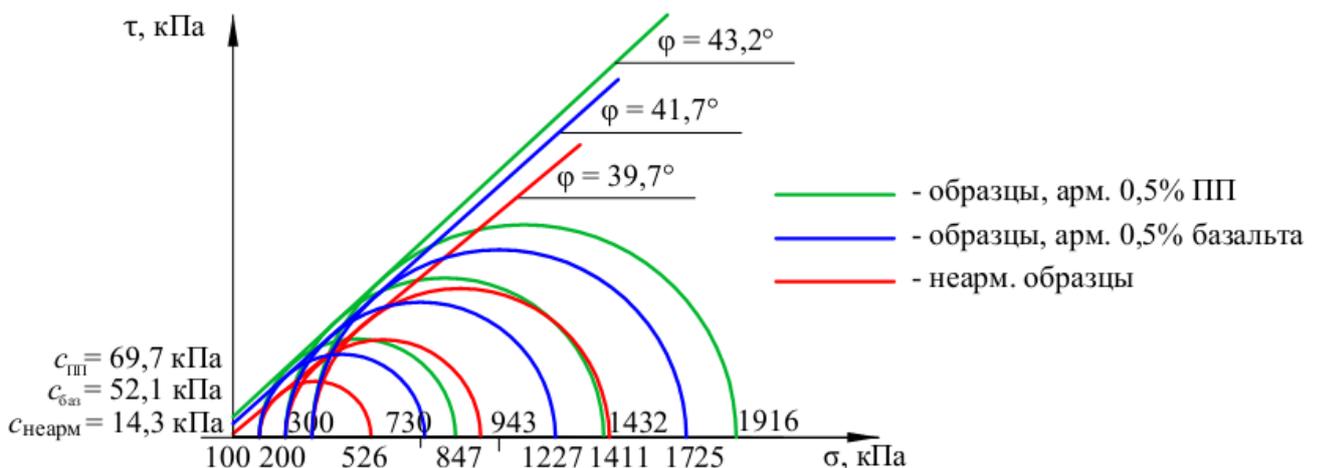
$$c^* = \frac{6c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}. \quad (2.8)$$

Графики, построенные в инвариантах напряжений  $p$  и  $q$ , представлены на рисунке 2.5.



**Рисунок 2.5** – Результаты испытаний трехосного сжатия песчаных и фибропесчаных образцов, армированных базальтом и полипропиленом в инвариантах  $p$  и  $q$

На рисунке 2.6 приведены диаграммы Мора-Кулона, построенные по результатам трехосных испытаний песчаных и фибропесчаных образцов, усиленных волокнами базальта и полипропилена в количестве 0,5% от массы сухого грунта.



**Рисунок 2.6** – Диаграмма Мора, построенная по результатам испытаний трехосного сжатия песчаных и фибропесчаных образцов, армированных базальтом и полипропиленом

По диаграммам и значениям в таблице 2.3 отчетливо видно, что благодаря армированию увеличиваются прочностные характеристики грунта - удельное

сцепление  $c$  (в 3,6-4,9 раза) и угол внутреннего трения  $\varphi$  (на 5-9%). В результате совместной работы волокон и частиц грунта увеличивается внутренняя адгезия фибропесчаного композита. Несвязный грунт приобретает прочностную характеристику, свойственную только связным грунтам - удельное сцепление.

Характер разрушения армированных и неармированных образцов также различается. На рисунке 2.7 отчетливо видна плоскость среза, по которой разрушается песчаный образец («скол»), тогда как разрушение фибропесчаного образца происходит в виде «бочки». Волокна арматуры, равномерно распределяясь в грунтовой матрице, препятствуют локализации напряжений и образованию характерной плоскости среза.



а)



б)

**Рисунок 2.7** – Формы разрушения образцов грунта после трехосных испытаний:

- а) разрушение неармированного образца по поверхности среза;
- б) разрушение армированного образца в форме бочки

По результатам первой серии испытаний можно сделать вывод, что объемно-дисперсное армирование может значительно улучшить прочностные характеристики песчаного грунта (увеличение удельного сцепления  $c$  в среднем 4,3 раза, угла внутреннего трения  $\varphi$  – 7 %). Если сравнивать два материала армирования, то армирование полипропиленовой фиброй позволяет получить более высокие значения прочностных характеристик грунта по сравнению с армированием базальтом. Внедрение коротких волокон при надлежащем перемешивании обеспечивает изотропное увеличение прочности грунтового

композита без плоскостей наименьшего сопротивления, что подтверждается формой образца после испытания. Значение разрушающей нагрузки при добавлении волокон также увеличивается, особенно существенно для образцов, армированных полипропиленовой фиброй.

Проанализировав полученные результаты первой серии испытаний, было принято решение продолжать экспериментальные исследования. В качестве постоянного параметра был выбран тип армирующих волокон – полипропиленовая фибра, показавшая самые интересные результаты на первом этапе исследований. Варьируемыми параметрами следующего этапа исследований стали процентное содержание волокон и влажность грунта.

Выбор полипропиленовой фибры также обусловлен особенностями производства и эксплуатации волокон с экологической точки зрения. Отличительной особенностью производства базальтового волокна являются высокие энергозатраты. Производство базальтовых волокон заключается в плавке горных пород при температуре около 1500°C с последующим формированием тонких волокон с помощью центрифуги, фильер и потоков воздуха. Кроме того, обязательной последующей технологической операцией, во избежание слипания минеральных волокон, является нанесение на волокна полимерных водоотталкивающих добавок и пластификаторов. Как правило, процесс проводят при 180-220°C для полимеризации покрытий [73]. При этом количество органической добавки в соответствии с ГОСТ 4640-2011 Вата минеральная. Технические условия составляет 1,5-2,0 масс. % [18].

Таким образом, производство минеральных, в том числе и базальтовых волокон, изначально опасно с экологической точки зрения по следующим показателям: высокие энергозатраты и сопровождающие такое производство выбросы топочных оксидов азота; применение в производстве опасных полимерных композиций, иногда на основе фенолформальдегидных смол.

В процессе эксплуатации к этим проблемам добавляется опасность минеральных волокон для органов дыхания, пыль от которых, попадая в легкие и задерживаясь там, может стать причиной онкологических заболеваний. Степень

риска зависит от размера и формы волокон. Наибольшую опасность имеют частицы толщиной менее 3 и длиной более 5 микрон [51].

С точки зрения долговечности базальтовые волокна могут находиться в грунте практически бесконечно, но наличие на их поверхности полимерного покрытия неизбежно сопровождается вымыванием в грунт продуктов разложения опасных фенолформальдегидных смол.

В сравнении с базальтовыми волокнами производство полипропиленовых требует в несколько раз меньших энергозатрат и соответственно практически не сопровождается образованием топочных оксидов азота [53].

По механическим характеристикам и долговечности полипропиленовые волокна близки к базальтовым, но при их попадании в органы дыхания происходит их естественное удаление без капсулирования.

Относительно разложения полипропилена в природных условиях существует устойчивое мнение, что полипропилен разлагается примерно за 100 лет. Если для зданий и сооружений установлен срок эксплуатации в 100 лет и на основании этого ставится требование к сопоставимому сроку службы материалов, то логично предположить, что для грунта предпочтителен не бесконечный срок, как у базальта, а сопоставимый с временем эксплуатации. Поэтому использование полипропиленовых волокон, которые по завершении эксплуатации грунтового массива естественным образом ассимилируют, представляется более обоснованным, чем использование базальтовых волокон, которые при эксплуатации и реконструкции грунтового основания могут рассеиваться и поражать легкие обслуживающего персонала. Если сооружение нуждается в разборке до окончания его срока службы, то отделение полипропиленовых волокон от грунта возможно осуществить при помощи рассеивания в сухом состоянии.

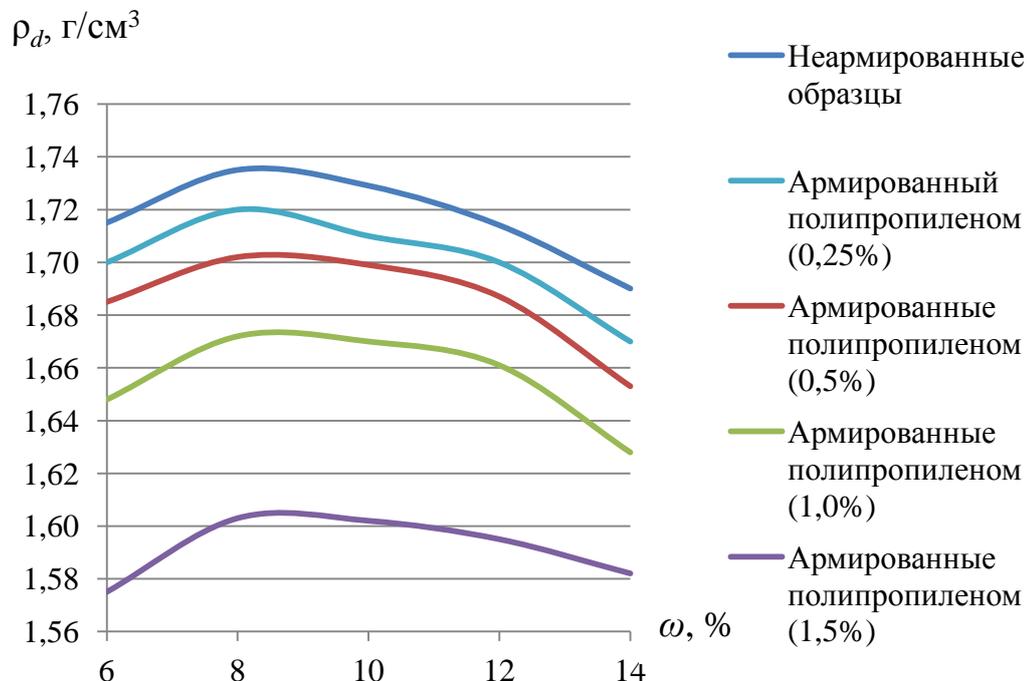
### **2.2.2. Анализ влияния армирования объемно-дисперсным способом на уплотняемость грунта**

В данной работе исследуется эффективность использования грунта, армированного объемно-дисперсным способом, для обратной засыпки

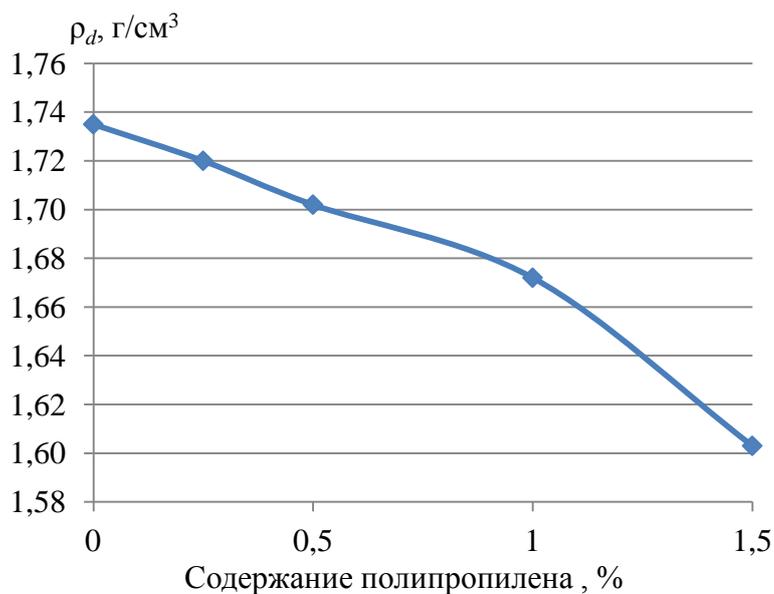
удерживающих конструкций. Согласно технологическим рекомендациям при земляных работах влажность грунта засыпки должна обеспечивать возможность достижения требуемой плотности, при этом требуемая плотность должна достигаться при наименьших затратах труда. Кроме того, существующие методики приготовления фибропесчаных композитов предполагают смешивание волокон с влажным грунтом для получения однородности смеси [24].

Для решения задачи определения оптимальной влажности песчаного грунта и фибропесчаного композита и оценки влияния дискретного армирования на уплотняемость грунта были проведены испытания на приборе стандартного уплотнения по ГОСТ 22733-2002 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности [15].

Испытания проводились с неармированным грунтом и грунтом, армированным различным процентным содержанием полипропиленовой фибры. Процент армирования был принят равным 0,25%, 0,5%, 1% и 1,5% от массы сухого грунта. Результаты исследований приведены на рисунках 2.8 и 2.9.



**Рисунок 2.8** – Результаты испытаний стандартного уплотнения песчаных и фибропесчаных образцов



**Рисунок 2.9** – График зависимости максимальной плотности сухого грунта от процента армирования

Результаты проведенных испытаний показывают, что при увеличении процентного содержания волокон максимальная плотность сухого грунта снижается на 1-8%. Незначительное уменьшение плотности является следствием снижения удельного веса твердых частиц фибропесчаной смеси из-за низкой плотности армирующих волокон, а также может быть объяснено тем, что наличие полипропиленовой фибры несколько снижает способность грунта к уплотнению. Оптимальная влажность составила 8 % для применяемого песка вне зависимости от того, были в нем армирующие волокна или нет.

Следующие исследования характеристик неармированного песка и песка, армированного объемно-дисперсным способом, проводились с грунтом оптимальной влажности.

### **2.2.3. Анализ влияния армирования объемно-дисперсным способом на фильтрационные характеристики грунта**

В соответствии с нормативными документами обратная засыпка удерживающих конструкций должна осуществляться хорошо дренирующим материалом для снижения гидростатического давления. Поэтому необходимо оценить, как наличие волокон влияет на водопроницаемость грунта.

Водопроницаемость фиброгрунта определялась по ГОСТ 25584-2016 Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации [17] с помощью фильтрационного прибора СОЮЗДОРНИИ при переменном градиенте напора (в нестационарном режиме фильтрации). Навески фиброгрунта с различным содержанием волокон полипропилена были уложены в трубку прибора при оптимальной влажности с коэффициентом уплотнения 0,95. Результаты определения коэффициента фильтрации приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Значения коэффициентов фильтрации песка и фибропесчаных композитов

	Коэффициент фильтрации $K_f$ , см/с	Коэффициент фильтрации при температуре 10°C $K_f^{10}$ , м/сут	Снижение $K_{10}$ , %	Разновидность грунта по водопроницаемости по ГОСТ 25100-20
Неармированные образцы	0,0030	2,60		водопроницаемый
Армированные полипропиленом (0,25%)	0,0025	2,17	17%	водопроницаемый
Армированные полипропиленом (0,5%)	0,0022	1,89	27%	водопроницаемый
Армированные полипропиленом (1,0%)	0,0019	1,65	36%	водопроницаемый
Армированные полипропиленом (1,5%)	0,0017	1,53	45%	водопроницаемый

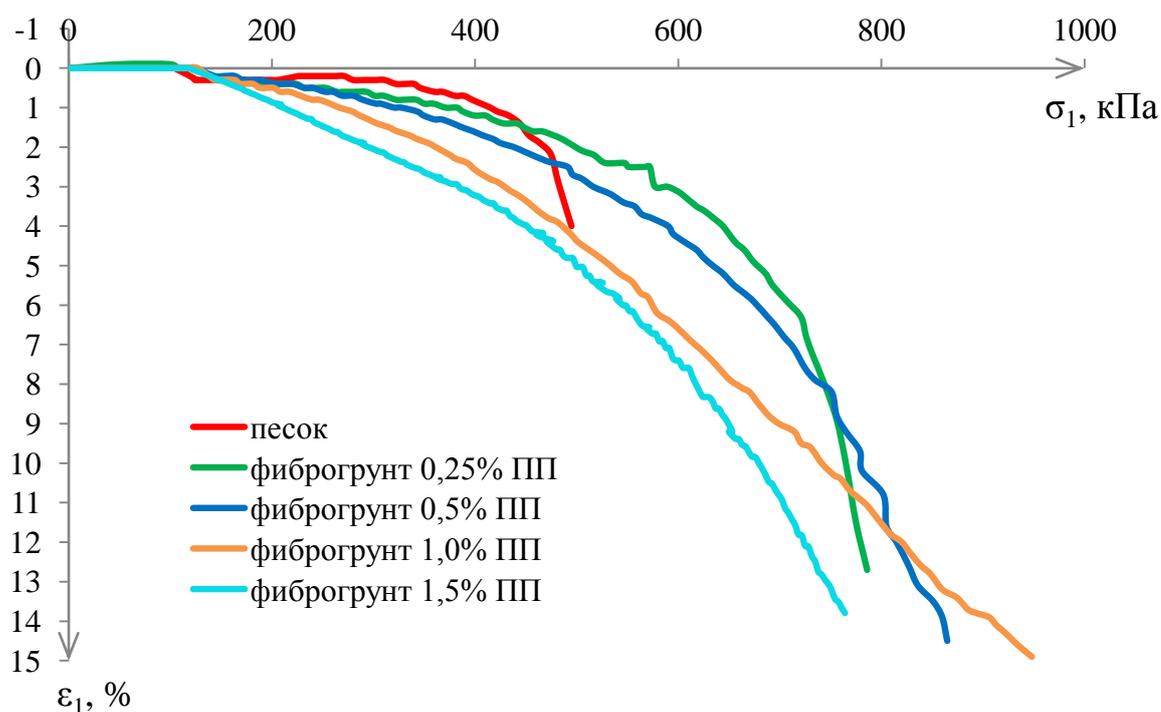
Согласно данным, приведенным в таблице 2.4, наличие волокон снижает водопроницаемость песчаного грунта. При минимальном проценте армирования (0,25%) коэффициент фильтрации уменьшается на 17%. При увеличении процента до 1,5 наблюдается снижение коэффициента фильтрации на 45%. При этом фиброгрунт остается (согласно ГОСТ 25100 Грунты. Классификация [16]) водопроницаемым ( $0,3 < K_f \leq 3$  м/сут) и может быть применен в качестве грунта обратной засыпки.

#### 2.2.4. Оценка влияния процента полипропиленовых волокон на прочностные характеристики песчаного грунта

Следующим этапом исследований стали испытания трехосного сжатия песчаных образцов и фибропесчаных композитов с различным содержанием

полипропиленовых волокон при оптимальной влажности грунта ( $w=8\%$ ), определенной ранее. Испытания проводились по методике ГОСТ 12248, приведенной выше.

Результаты испытаний трехосного сжатия образцов несвязного грунта и грунта, армированного полипропиленовой фиброй, представлены в виде графиков зависимости относительной вертикальной деформации  $\varepsilon_1$ , % от вертикального напряжения  $\sigma_1$ , кПа (рисунок 2.10,  $\sigma_3 = 100$  кПа). Надо отметить, что армированные образцы не удалось довести до разрушения при критерии окончания испытания  $\varepsilon_1 = 15\%$ . Значения вертикальной нагрузки и относительной вертикальной деформации в момент окончания испытания и их изменения в результате армирования приведены в таблицах 2.5 и 2.6 соответственно.



**Рисунок 2.10** – Графики зависимости относительной вертикальной деформации  $\varepsilon_1$ , % от вертикального напряжения  $\sigma_1$ , кПа для неармированных образцов и армированных 0,25%, 0,5%, 1,0% и 1,5% полипропилена при  $\sigma_3 = 100$  кПа

Таблица 2.5 – Средние значения нагрузки и относительной вертикальной деформации в момент окончания испытания при оптимальной влажности ( $w=8\%$ )

	$\sigma_3=100\text{кПа}$		$\sigma_3=200\text{кПа}$		$\sigma_3=300\text{кПа}$	
	$\sigma_1$ , кПа	$\varepsilon_1$ , %	$\sigma_1$ , кПа	$\varepsilon_1$ , %	$\sigma_1$ , кПа	$\varepsilon_1$ , %
Неармированные образцы	448	5,2	945	4,7	1233	7,1

	$\sigma_3=100\text{кПа}$		$\sigma_3=200\text{кПа}$		$\sigma_3=300\text{кПа}$	
	$\sigma_1$ , кПа	$\varepsilon_1$ , %	$\sigma_1$ , кПа	$\varepsilon_1$ , %	$\sigma_1$ , кПа	$\varepsilon_1$ , %
Армированные полипропиленом (0,25%)	639	15,0	1090	15,0	1606	15,0
Армированные полипропиленом (0,5%)	698	15,0	1221	15,0	1616	15,0
Армированные полипропиленом (1,0%)	948	15,0	1215	15,0	1981	15,0
Армированные полипропиленом (1,5%)	875	15,0	1717	15,0	2457	15,0

Таблица 2.6 – Относительное изменение нагрузки и относительной вертикальной деформации в момент окончания испытания в результате армирования при оптимальной влажности ( $\omega=8\%$ )

	$\sigma_3=100\text{кПа}$		$\sigma_3=200\text{кПа}$		$\sigma_3=300\text{кПа}$	
	$\Delta\sigma_1$ , д.ед	$\Delta\varepsilon_1$ , д.ед	$\Delta\sigma_1$ , д.ед	$\Delta\varepsilon_1$ , д.ед	$\Delta\sigma_1$ , д.ед	$\Delta\varepsilon_1$ , д.ед
Неармированные образцы	1	1	1	1	1	1
Армированные полипропиленом (0,25%)	1,43	2,88	1,15	3,19	1,30	2,11
Армированные полипропиленом (0,5%)	1,56	2,88	1,29	3,19	1,31	2,11
Армированные полипропиленом (1,0%)	2,12	2,88	1,29	3,19	1,61	2,11
Армированные полипропиленом (1,5%)	1,95	2,88	1,82	3,19	1,99	2,11

Анализируя графики на рисунке 2.10, можно сделать вывод, что чем выше процент объемно-дисперсного армирования, тем больше диапазон давлений, на котором зависимость между напряжениями и деформациями практически линейна. Так, для грунта, армированного 1,5% полипропилена, участок линейной деформируемости распространяется вплоть до  $\sigma_1=500\text{кПа}$ . Также при увеличении процентного содержания волокон прослеживается и увеличение нагрузки, при которой достигается значение относительной вертикальной деформации  $\varepsilon_1 = 15\%$ , повышается несущая способность материала. Графики испытаний неармированных образцов принимают вид кривых разрушения в форме «скола», который происходит при малых значениях вертикальных деформаций. Кривые разрушения фиброармированных образцов, наоборот, принимают форму «бочки», при которой грунту характерно пластичное поведение с плавным накоплением

деформаций вплоть до достижения предельного уровня деформаций 15%, установленного программой испытаний.

Значения прочностных характеристик образцов грунта, определенных по результатам трехосных испытаний, и их изменения в результате армирования разным процентом полипропиленовых волокон приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - 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	
	$\varphi$ , °	$c$ , кПа	$\Delta\varphi$ , д.ед.	$\Delta c$ , 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

По результатам испытаний отслеживается существенный рост удельного сцепления  $c$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  у образцов, армированных 0,25%–1% волокон полипропилена. Чем больше процентное содержание волокон, тем больше площадь контакта армирующей фибры с частицами грунта. Фибра, работающая на растяжение, способствует повышению сопротивления грунта сдвигу. Но этот эффект имеет предел. Так, при большом проценте армирования волокна начинают комковаться в грунте, препятствуя равномерному распределению и образуя плоскости с меньшим сопротивлением. Подтверждением этому являются результаты испытаний образцов с 1,5% армированием, у которых отмечено снижение характеристик по сравнению с меньшим процентом армирования.

Характер разрушения образцов при оптимальной влажности после испытания аналогичен первой экспериментальной серии – «скол» для

неармированных образцов и «бочка» для армированных. Наличие волокон в зоне сдвига препятствует локализации деформаций и способствует приобретению песчаным грунтом пластичных свойств, благодаря чему меняется и форма разрушения образцов.

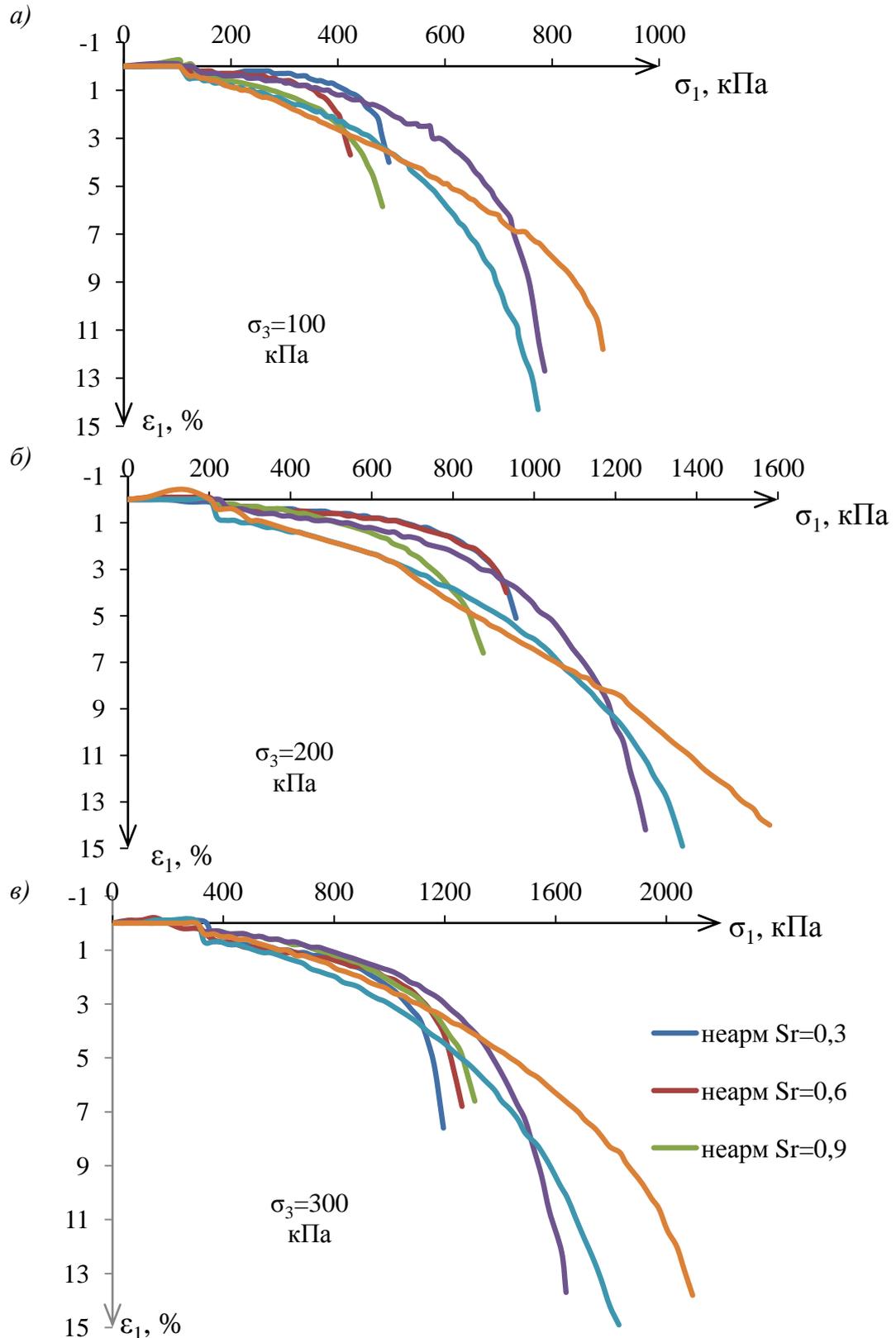
На основании результатов первого этапа исследований в качестве оптимального объемно-дисперсного армирования было выбрано армирование полипропиленовыми волокнами в количестве 0,25% и 0,5% от массы сухого грунта. При увеличении процента армирования до 1% расход фибры возрастает в два раза, при этом существенного изменения характеристик достичь не удалось, поэтому такой вариант армирования экономически не целесообразен. При армировании 1,5 % величина удельного сцепления резко снижается по сравнению с меньшим процентом армирования ввиду неравномерного распределения и комкования армирующих элементов в массиве грунта.

#### **2.2.5. Оценка влияния степени водонасыщения грунта на прочностные характеристики фибропесчаных композитов**

Следующим этапом исследований стали испытания трехосного сжатия образцов различной степени водонасыщения для оценки изменения прочностных свойств песчаных образцов и фибропесчаных композитов в случае их водонасыщения водой. Испытания проводились по методике ГОСТ 12248, приведенной выше. В соответствии с ГОСТ 25100 «Грунты. Классификация» были подготовлены образцы с коэффициентами водонасыщения  $S_r=0,3$  (маловлажные),  $S_r=0,6$  (влажные),  $S_r=0,9$  (водонасыщенные). Процент армирования составил 0,5%, определенный в предыдущей серии опытов как один из оптимальных.

Результаты испытаний трехосного сжатия образцов несвязного грунта и грунта, армированного 0,5% волокон полипропилена, различной степени водонасыщения представлены в виде графиков зависимости относительной вертикальной деформации  $\epsilon_1$ , % от вертикального напряжения  $\sigma_1$ , кПа (рисунок 2.11). Значения разрушающей нагрузки и относительной вертикальной

деформации при разрушении и их изменения в результате армирования приведены в таблицах 2.8 и 2.9 соответственно.



**Рисунок 2.11** – Графики зависимости относительной вертикальной деформации  $\varepsilon$ , % от вертикального напряжения  $\sigma_1$ , кПа для неармированных образцов и армированных 0,5% полипропилена, различной степени водонасыщения:  
а)  $\sigma_3 = 100$  кПа, б)  $\sigma_3 = 200$  кПа, в)  $\sigma_3 = 300$  кПа

Таблица 2.8 – Средние значения разрушающей нагрузки и относительной вертикальной деформации при разрушении по результатам трехосных испытаний образцов различной степени водонасыщения

	Коэффициент водонасыщения, $S_r$	$\sigma_3=100\text{кПа}$		$\sigma_3=200\text{кПа}$		$\sigma_3=300\text{кПа}$	
		$\sigma_1$ , кПа	$\epsilon_1$ , %	$\sigma_1$ , кПа	$\epsilon_1$ , %	$\sigma_1$ , кПа	$\epsilon_1$ , %
Неармированные образцы	0,3	448	5,2	945	4,7	1233	7,1
	0,6	423	3,7	932	4,0	1262	6,8
	0,9	483	5,9	881	6,0	1308	6,6
Армированные полипропиленом (0,5%)	0,3	698	11,7	1221	13,4	1616	14,2
	0,6	774	14,3	1365	14,9	1829	14,9
	0,9	895	11,8	1580	14,0	2095	13,8

Таблица 2.9 – Относительное изменение разрушающей нагрузки и относительной вертикальной деформации при разрушении в результате армирования образцов различной степени водонасыщения

	Коэффициент водонасыщения, $S_r$	$\sigma_3=100\text{кПа}$		$\sigma_3=200\text{кПа}$		$\sigma_3=300\text{кПа}$	
		$\Delta\sigma_1$ , д.ед	$\Delta\epsilon_1$ , д.ед	$\Delta\sigma_1$ , д.ед	$\Delta\epsilon_1$ , д.ед	$\Delta\sigma_1$ , д.ед	$\Delta\epsilon_1$ , д.ед
Неармированные образцы	0,3	1	1	1	1	1	1
	0,6	1	1	1	1	1	1
	0,9	1	1	1	1	1	1
Армированные полипропиленом (0,5%)	0,3	1,56	2,24	1,29	2,85	1,31	2,0
	0,6	1,83	3,86	1,46	3,73	1,45	2,19
	0,9	1,85	2,0	1,79	2,33	1,60	2,09

По графикам и таблицам видно, что увеличение влажности фибропесчаных образцов не оказывает негативного воздействия на свойства композита. Напротив, с увеличением коэффициента водонасыщения увеличивается и величина разрушающей нагрузки, и значение относительной вертикальной деформации в момент разрушения. При этом зависимость «напряжения-деформации»

практически линейна при значительном диапазоне вертикальных давлений и хорошо аппроксимируется прямой.

Значения прочностных характеристик образцов грунта, определенных по результатам трехосных испытаний, и их изменения в результате армирования для образцов различной степени водонасыщения приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Значения прочностных характеристик образцов грунта по результатам трехосных испытаний и их изменения в результате армирования образцов различной степени водонасыщения

	Коэффициент водонасыщения, $S_r$	Параметры прочности		Относительное изменение параметров	
		$\varphi$ , °	$c$ , кПа	$\Delta\varphi$ , д.ед.	$\Delta c$ , д.ед.
Неармированные образцы	0,3	36,4	10,5	1	1
	0,6	38,0	8,1	1	1
	0,9	37,6	9,2	1	1
Армированные полипропиленом (0,5%)	0,3	44,3	54,6	1,22	5,2
	0,6	43,9	58,3	1,16	7,2
	0,9	44,6	56,0	1,19	6,1

Из таблицы 2.10 видно, что насыщение водой не снижает эффективности фибрового армирования. Прочностные характеристики армированного грунта значительно выше по сравнению с неармированным даже при увеличении влажности. Взаимодействие частиц грунта, воды и армирующих волокон способствует увеличению кажущегося удельного сцепления с несвязного грунта в среднем в 6 раз и угла внутреннего трения  $\varphi$  в среднем на 19%.

Следовательно, периодическое замачивание грунта не будет оказывать негативного воздействия на прочность и устойчивость сооружений, построенных с использованием фиброармированного песка, а дополнительное водонасыщение не будет являться проблемой при эксплуатации.

### 2.3. Выводы по Главе 2

По результатам этапа лабораторных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Объемно-дисперсное армирование песчаного грунта положительно влияет на его механические характеристики, а именно: повышает его параметры прочности, частично придавая песку свойства связных грунтов. В числовом эквиваленте это проявляется в значительном увеличении удельного сцепления  $c$  и угла внутреннего трения  $\varphi$ .

2. Фибропесок приобретает пластичные свойства, плавно накапливая деформации при увеличении нагрузки, не разрушаясь. Наглядно это можно проследить по кривым зависимости деформаций от напряжений, построенным по результатам трехосных испытаний, и по форме разрушения образцов после испытаний. Для неармированного образца характерно разрушение в форме «скола», для неармированного – в форме «бочки». Фибровое армирование, равномерно распределяясь в грунтовой матрице, препятствует локализации напряжений и образованию характерной плоскости среза.

3. Предпочтительным типом фибрового армирования являются волокна полипропилена. Смешивание песчаного грунта с полипропиленовой фиброй позволяет увеличить значения разрушающей нагрузки и относительной вертикальной деформации при разрушении. Армирование полипропиленовыми волокнами способствует большему увеличению угла внутреннего трения  $\varphi$  и удельного сцепления  $c$  песчаного грунта по сравнению с армированием базальтовыми волокнами (удельное сцепление увеличивается в 5 раз при армировании 0,5% полипропилена и в 4 раза при армировании 0,5% базальтовой фибры). Кроме того, выбор волокон полипропилена связан с особенностью их производства и эксплуатации. В сравнении с базальтовыми волокнами производство полипропиленовых волокон требует в несколько раз меньших затрат энергии, а при их попадании в органы дыхания происходит их естественное удаление без капсулирования.

4. 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.

5. Включение в качестве объемно-дисперсного армирования полипропиленовой фибры 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. Величина оптимальной влажности остается постоянной вне зависимости от наличия или отсутствия волокон.

6. 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 ввиду невозможности равномерного распределения и комкования армирующих элементов в массиве грунта.

7. Насыщение водой не снижает эффективности фибрового армирования (удельное сцепление увеличивается в 5,2-7,2 раза, угол внутреннего трения на 16-22%). Увеличение влажности грунта не будет оказывать негативного воздействия на прочность и устойчивость сооружений, построенных с использованием фиброармированного песка, а дополнительное водонасыщение не будет являться проблемой при эксплуатации.

### **ГЛАВА 3. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАССИВА ФИБРОАРМИРОВАННОГО ГРУНТА**

В настоящей главе рассматриваются результаты лабораторных исследований модели подпорной стены с обратной засыпкой из песка и фиброармированного грунта, а также натурных исследований моделей насыпей из фиброгрунта. Свойства используемых материалов, описание оборудования, методика и программа испытаний приведены в последующих разделах главы.

Для оценки влияния наличия равномерно распределенных волокон, находящихся в активной зоне, на поведение ограждающей конструкции, а также для подтверждения данных лабораторных исследований, приведенных в Главе 2, были сформулированы следующие задачи модельных исследований:

1. Предложить технологию механизированного смешивания волокон с грунтом для получения однородной смеси.

2. Оценить влияние фибрового армирования на величину критической нагрузки, приложенной к обратной засыпке, при различных расположениях штампа и высоте стенки.

3. Оценить влияние фибрового армирования на горизонтальные перемещения модели подпорной конструкции при различных расположениях штампа и высоте стенки.

4. Сделать выводы по оптимальному проценту армирования.

5. Оценить сопротивляемость покрытий насыпей из фиброгрунта атмосферным воздействиям.

#### **3.1. Экспериментальное исследование возможности механизированного смешивания волокон с грунтом**

Для модельных испытаний необходимо было подготовить достаточное количество фиброгрунта. Поэтому важным этапом исследования стала разработка технологических рекомендаций для приготовления фиброгрунтовых смесей с учетом анализа существующих технологических подходов.

Для исследования возможности применения стандартных устройств для смешивания волокон с грунтом был применен бетоносмеситель гравитационного

действия НСМ650 (рисунок 3.1). Смеситель оснащен барабаном емкостью 180 л, скорость вращения которого составляет 29,5 оборотов в минуту [22].



**Рисунок 3.1** – Общий вид смесителя

Для приготовления смеси были взяты материалы, примененные на первых этапах исследования – мелкий песок постоянного гранулометрического состава и влажности и полипропиленовая фибра длиной 12 мм. Процент армирования смеси был выбран также по результатам лабораторных исследований и составил 0,25 и 0,5%. В качестве варьируемых параметров в технологическом эксперименте были рассмотрены влажность грунта, процент армирования, наполненность барабана и время перемешивания.

Контроль качества фиброгрунтовой смеси осуществлялся визуально и по методике, применяемой для контроля равномерности распределения фибр в бетонной смеси [10]. Согласно этой методике, отбирались пробы фиброгрунтовой смеси массой 300-500 г, объем которых зависел от геометрических параметров и процентного содержания волокон и определялся по формуле:

$$V_{np} = 50 \frac{l_{\phi} \cdot d_{\phi}^2}{\mu_{\phi}}, \quad (3.1)$$

где  $\mu_{\phi}$  – содержание фибры в смеси,  $l_{\phi}$  – длина фибры,  $d_{\phi}$  – диаметр фибры.

Фиброгрунтовая проба взвешивалась и помещалась на сита с размерами ячейки 5 и 2 мм. Далее осуществлялась промывка смеси и извлечение волокон, которые высушивались и взвешивались.

Объемное содержание фибры в грунте (%) определялось по формуле:

$$\mu_{\phi} = 100 \frac{m_{\phi} \cdot \gamma_{\phi_{\text{гр}}}}{m_{\phi_{\text{гр}}} \cdot \gamma_{\phi}}, \quad (3.2)$$

где  $m_{\phi}$  – масса фибры в пробе,  $m_{\phi_{\text{гр}}}$  – масса фиброгрунтовой смеси,  $\gamma_{\phi}$  – объемная масса фибры,  $\gamma_{\phi_{\text{гр}}}$  – объемная масса фиброгрунтовой смеси.

Далее определялось среднее содержание фибры ( $\mu_{\phi_{\text{ср}}}$ ) как среднее арифметическое объемных содержаний волокон в каждой отобранной пробе.

Для оценки равномерности распределения фибры в грунте был рассчитан коэффициент вариации содержания волокон:

$$V = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{\phi_{\text{ср}}} - \mu_{\phi})^2}{n-1}}}{\mu_{\phi_{\text{ср}}}} \quad (3.3)$$

При коэффициенте  $V < 10\%$  равномерность распределения фибры в грунте считалась высокой, при  $10\% \leq V < 15\%$  – удовлетворительной [10].

Первый опыт по смешиванию грунта и фибры был проведен с сухим песчаным грунтом в объеме 12 л и волокнами полипропилена в количестве 0,25% от массы сухого грунта. Смешивание в миксере длилось 10 минут. По прошествии времени волокна не перемешались с грунтом, на поверхности образовались отдельные комки фибры. Так как фиброгрунтовая смесь не была однородной даже визуально, проверка равномерности распределения волокон по формулам 3.1-3.3 не производилась. В результате был сделан вывод о невозможности смешивания волокон грунтов в сухом состоянии.

Далее в песчаный грунт была добавлена вода до оптимальной влажности ( $w=8\%$ ). Содержание волокон и масса грунта остались постоянными. Визуальный контроль смеси осуществлялся каждые 2 минуты. Фибра равномерно перемешалась с грунтом спустя 6 минут (рисунок 3.2). Из полученной смеси были отобраны три пробы для контроля равномерности распределения фибры. В результате был получен коэффициент вариации  $V = 4,3\%$ , что говорит о высокой однородности смеси.



**Рисунок 3.2** – Образец фиброгрунта, полученный в результате механизированного смешивания

Далее эксперимент был проведен также с грунтом оптимальной влажности, при этом коэффициент армирования был принят равным 0,5%. С целью тщательного контроля качества получаемой смеси барабан останавливался каждые две минуты для визуальной оценки смеси. Спустя десять минут процесс смешивания был остановлен. В полученной фиброгрунтовой смеси остались неразмешанные комки волокон, отделившиеся от грунта. Коэффициент вариации в этом случае составил 13,1%, что говорит об удовлетворительной равномерности распределения фибры. Следовательно, при содержании волокон в грунте, равном 0,5%, фибра образует локальные скопления в виде комков. В этом случае однородность смеси, а значит и изотропия свойств, вызывают сомнения.

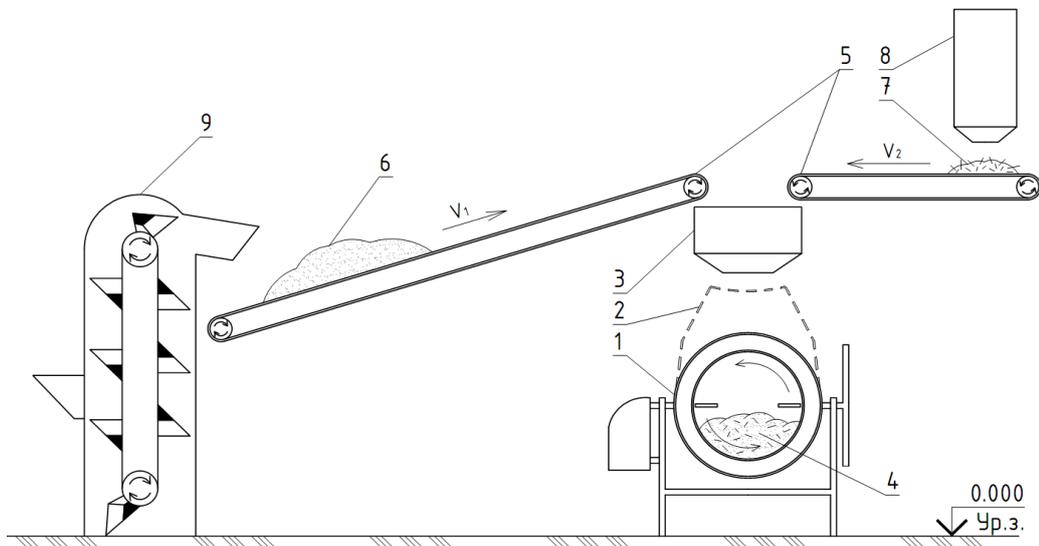
Следующим этапом эксперимента стало приготовление фиброгрунтовой смеси с коэффициентом армирования, равным 0,25%, при этом объем материалов был увеличен в два раза. Через 10 минут была получена визуально однородная смесь. Коэффициент вариации составил 5,2%. Увеличение степени заполненности смесителя увеличило время перемешивания (в 1,7 раза), но не повлияло на качество смеси.

При одновременном заполнении барабана 60 л песка и 0,25% волокон через 20 минут в фиброгрунтовой смеси присутствовали комки. Рассчитанное значение коэффициента равномерности распределения составило  $V = 11,9\%$ .

Следовательно, загрузка миксера порционно, а не всем объемом материалов сразу, предпочтительней, так как позволяет получить смесь с более равномерным распределением волокон.

При смешивании волокон и песчаного грунта с влажностью, превышающей оптимальную ( $w=15\%$ ), была отмечена локализованная концентрация и комкование волокон. Это позволило сделать вывод о том, что переувлажнение грунта при приготовлении фибропесчаной смеси недопустимо.

Для внедрения метода фибрового армирования в практику строительства необходимы смесители с высокой производительностью, оснащенные барабанами большой емкости. Для снижения трудоемкости и повышения качества смеси возможно использование установок с оборудованием для подачи и разделения волокон, а также внедрение конвейерного производства. Один из возможных вариантов конвейерного производства, предложенный автором, представлен на рисунке 3.3.



**Рисунок 3.3** – Схема предлагаемой установки для приготовления фиброгрунтовой смеси:

1 – смеситель в рабочем положении; 2 – смеситель при загрузке; 3 – лоток для подачи материалов; 4 – фиброгрунтовая смесь; 5 – конвейеры; 6 – песок; 7 – рассеянные волокна; 8 – установка для рассеивания и подачи волокон; 9 – вертикальный ковшовый элеватор;  $V_1$  – скорость подачи условной единицы объема песка;  $V_2$  – общая скорость подачи условной единицы объема фибры

Таким образом, на основании результатов экспериментальных исследований можно сформулировать следующие рекомендации по производству

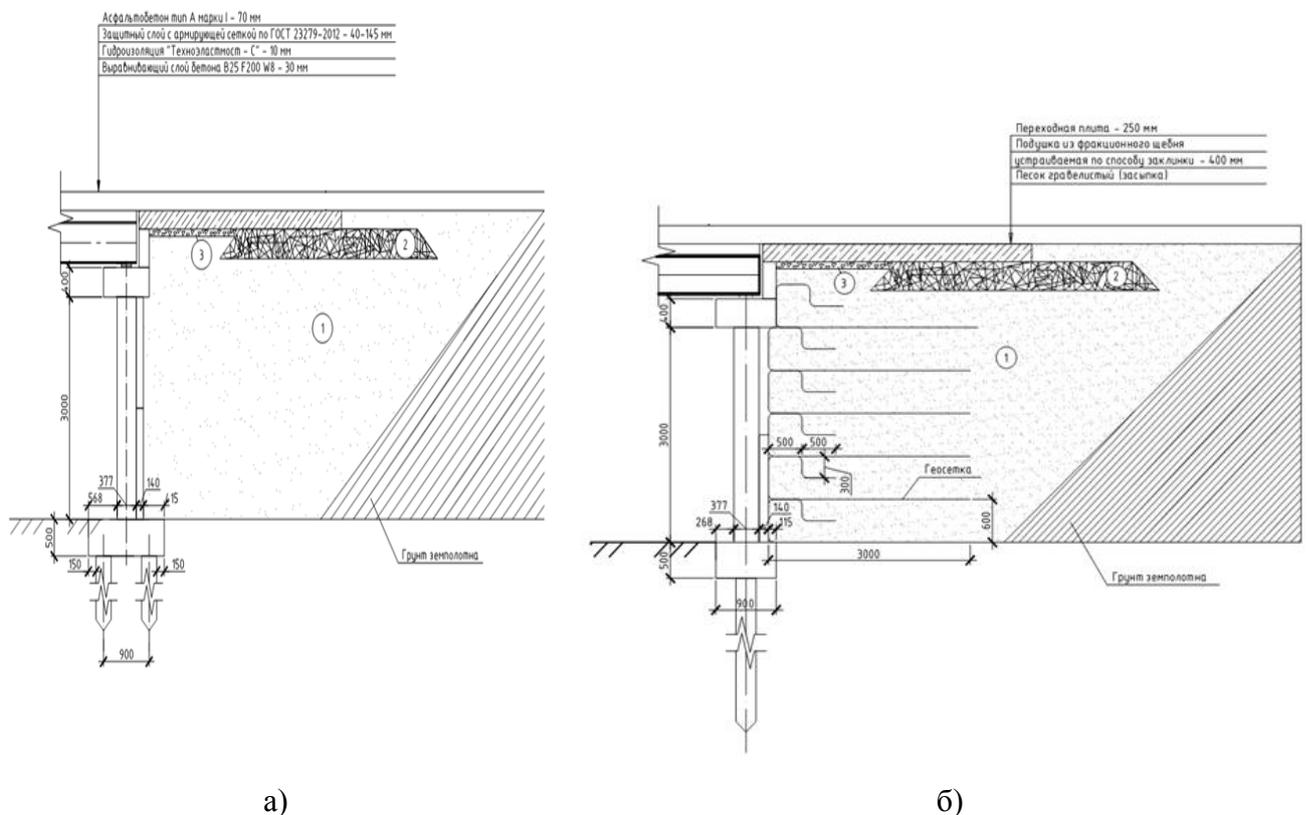
фиброгрунтовых смесей в промышленных объемах: производство фиброгрунта осуществлять в смесителях гравитационного действия, при этом грунт использовать оптимальной влажности, а загрузку барабана смесителя осуществлять в несколько этапов.

### 3.2. Программа модельных испытаний

Для оценки работы фиброармированного грунта в качестве обратной засыпки удерживающих конструкций и вывода эмпирических зависимостей воздействия различных факторов на поведение подпорных стен были проведены модельные испытания.

В качестве моделируемой конструкции был рассмотрен существующий устой моста через реку Ирень в Кунгурском районе Пермского края (рисунок 3.4).

Существующая конструкция устоя была модернизирована исследователями [61] путем применения рулонных геосинтетических материалов, в результате чего была принята однорядная расстановка свай и уменьшены размеры ростверка.

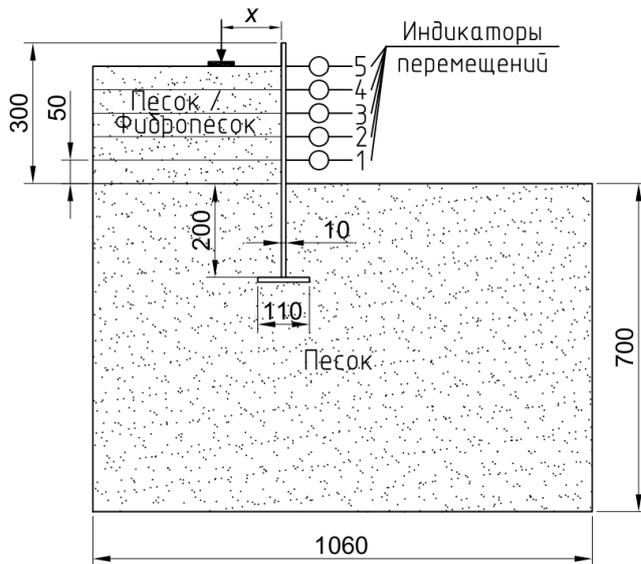


**Рисунок 3.4** – Разрез конструкции устоя моста через реку Ирень в Кунгурском районе Пермского края: а) существующее решение, б) предложенное решение [61].

1 – песок гравелистый; 2 – щебеночная подушка; 3 – щебень

В рамках настоящего исследования предлагается замена рулонных геосинтетических материалов на объемно-дисперсное армирование грунта обратной засыпки.

Схема модельных испытаний приведена на рисунке 3.5. Испытания модели подпорной стены были реализованы на лабораторном оборудовании ООО НПП «Геотек» (рисунок 3.6), представляющем собой стенд для испытаний моделей фундаментов. Стенд выполнен в виде плоского лотка со стенками из оргстекла, обеспечивающими возможность наблюдения за испытываемыми конструкциями. Ширина лотка 1000 мм, длина – 1200 мм, глубина – 156 мм, общая высота стенда - 2100 мм [29]. Испытательный стенд предназначен для моделирования работы строительных конструкций в условиях плоской и осесимметричной деформации.



**Рисунок 3.5** – Схема модельных испытаний



**Рисунок 3.6** – Испытательный стенд:  
1, 2 – передняя и задняя стенка стенда;  
3 – металлическая решетка;  
4 – опорные шайбы

Модель удерживающий грунт конструкции – подпорной стенки – была выполнена из фанеры высотой 500 мм и толщиной 20 мм. Дополнительная жесткость стенки обеспечивалась при помощи металлических уголков, на

которые крепились уплотняющий материал для установки стенки в стенд без образования зазоров между подпорной конструкцией и лотком. В масштабе эксперимента 1:10 жесткость конструкции была соизмерима с жесткостью тонкой бетонной стены толщиной 200 мм [43].

Измеряемым параметром в модельных экспериментах были вертикальные деформации грунта засыпки и горизонтальные деформации стенки [24]. Вертикальная нагрузка на штамп передавалась в статическом режиме ступенями. Величины вертикальных перемещений в зависимости от приложенной нагрузки записывались автоматически с помощью измерительного комплекса Геотек-АСИС, что позволило получить показания с большой частотой и точностью. Горизонтальные перемещения измерялись вручную путем снятия отсчетов с пяти индикаторов часового типа, зафиксированных на жесткой раме и расположенных на расстоянии 5 см друг от друга по всей высоте стенки (рисунок 3.7).



**Рисунок 3.7** – Конструкция для измерения горизонтальных перемещений

В качестве обратной засыпки в модельных экспериментах применялся однородный мелкий песок с насыпной плотностью 1,64 г/см<sup>3</sup>, а также фиброгрунт, полученный путем армирования вышеупомянутого песка случайно распределенными волокнами полипропилена длиной 12 мм. Оба материала обратной засыпки применялись при оптимальной влажности ( $w=8\%$ ). Процентное содержание армирующих волокон составило 0,25% и 0,5% по массе сухого грунта. Процент армирования был выбран, исходя из результатов испытаний трехосного сжатия. Фиброгрунт готовился при помощи смесительного

оборудования гравитационного действия согласно разработанной авторами методике.

Модельные исследования включали три серии испытаний для изучения влияния различных факторов. Первая серия экспериментов включала испытания нагруженного массива песчаного грунта, находящегося за подпорной стеной, при расположении фундамента относительно стены на расстоянии  $x = 2, 12, 22$  и  $32$  см. Первые два положения штампа располагались в пределах призмы обрушения песчаной засыпки ( $h \cdot \operatorname{tg}(45^\circ - \varphi/2)$ ), а другие два – за ее пределами.

В следующей серии экспериментов обратная засыпка из песка была заменена на фиброгрунт с процентным содержанием волокон 0,25% и 0,5%. Другие условия испытаний при этом не изменялись. Отсыпка грунта производилась слоями по 5 см с уплотнением каждого слоя ручной трамбовкой с послойным контролем плотности.

При проведении испытаний возможны погрешности, вызванные различными факторами, влияние которых сложно учесть. К таким факторам можно отнести неоднородность грунта основания, разную степень уплотнения, отклонение модели фундамента от проектного положения и другие. Поэтому для получения достоверных данных эксперименты должны быть проведены с определенной повторяемостью. Минимально необходимое количество испытаний было определено по методике М.Н. Гольдштейна [11]:

$$N = \frac{m \times W^2 \times K_w}{\varepsilon^2 \times \bar{S}^2} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{2m}} \right)^2, \quad (3.4)$$

где  $m$  - число предварительных испытаний;  $W$  – разность между наибольшим и наименьшим значением осадки, мм;  $K_w$  - безразмерный коэффициент, зависящий от надежности и количества испытаний, определяется таблично;  $\varepsilon$  - доверительный интервал;  $\bar{S}$  - среднеарифметическое значение величины осадок модели, мм:

$$\bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i, \quad (3.5)$$

где  $S_i$  - значение величины осадки штампа.

Для расчета числа опытов перед началом экспериментов на собранном стенде была проведена серия предварительных испытаний. Серия включала 3 опыта по нагружению песчаной обратной засыпки при расположении штампа на расстоянии  $x = 22$  см от модели стенки. В расчет были взяты значения осадки штампа при вертикальной нагрузке, равной 50 кПа. Результаты расчета приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Расчет минимально необходимого числа опытов

№ п/п.	$S_i$ , мм	$\bar{S}$	$W$	$m$	$K_w$	$\varepsilon$	$N$
1	18,11	18,30	0,69	3	2,13	0,1	1,80
2	18,74						
3	18,05						

Путем округления расчетного значения минимального количества испытаний до целого числа получили 2. Но при доверительной вероятности  $P=0,95$  и доверительном интервале (погрешности)  $\varepsilon = 0,1$ , минимальное количество необходимых опытов должно быть не менее 3. Таким образом, каждое испытание было проведено с трехкратной повторяемостью. Всего было проведено 72 модельных испытания. Программа экспериментальных исследований приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Программа модельных испытаний

Материал засыпки	Высота стенки $H$ , см	Расстояние от фундамента до стенки $x$ , см	Количество опытов
Песок	25	2	3
		12	3
		22	3
		32	3
	20	2	3
		12	3
		22	3
		32	3
Фибропесок 0,25%	25	2	3
		12	3
		22	3
		32	3

Материал засыпки	Высота стенки $H$ , см	Расстояние от фундамента до стенки $x$ , см	Количество опытов
	20	2	3
		12	3
		22	3
		32	3
Фибропесок 0,5%	25	2	3
		12	3
		22	3
		32	3
	20	2	3
		12	3
		22	3
		32	3

Нагружение производилось в соответствии с ГОСТ 20276-2012 Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. Нагрузка на основание передавалась ступенями 25 кПа с последующим ожиданием стабилизации вертикальной деформации, условием которой являлось приращение осадки не более 0,1 мм за 30 минут [14]. Испытание завершалось при выполнении одного из двух условий: при исчерпании хода шагового двигателя или нагрузки 300 кПа.

### 3.4. Результаты модельных исследований

Первой задачей экспериментальных исследований модели подпорной стены являлось сравнение значений критической нагрузки для армированной обратной засыпки со значениями критической нагрузки для неармированной.

На рисунке 3.8 приведено фото испытываемой конструкции в процессе нагружения. По результатам проведенных испытаний были построены графики зависимости осадки штампа от нагрузки для разного процента армирования, разного расположения фундамента относительно стены  $x$  и разной высоты стенки  $H$  в диапазоне давлений 0-300 кПа. Экспериментальные кривые стали исходным материалом для оценки работы фиброгрунта в качестве обратной засыпки подпорной стенки и определения оптимального процента армирования. Зависимости осадок штампа от нагрузки для различных материалов засыпки

приведены на рисунках 3.9 – 3.10.



Рисунок 3.8 – Фото обратной засыпки в процессе нагружения

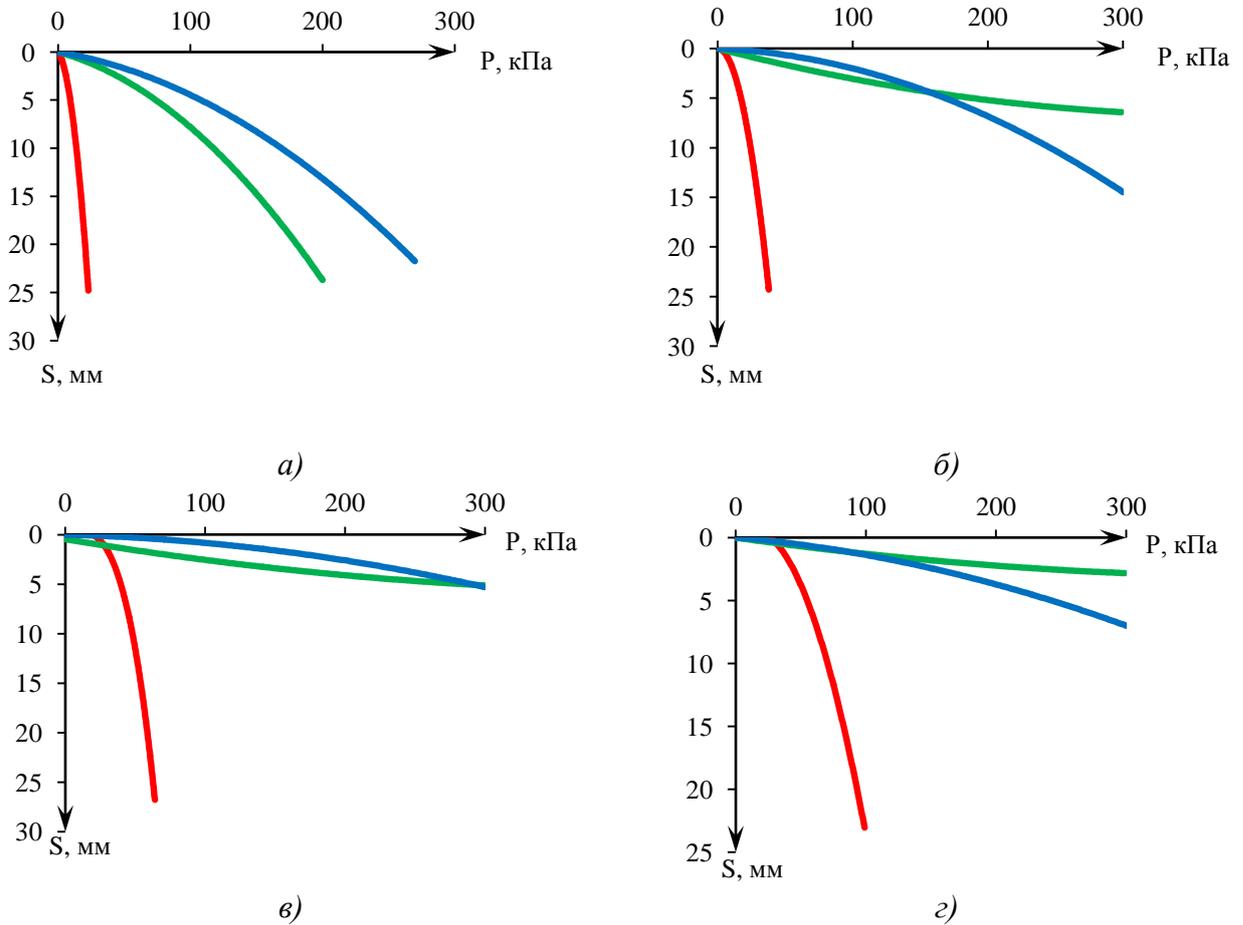
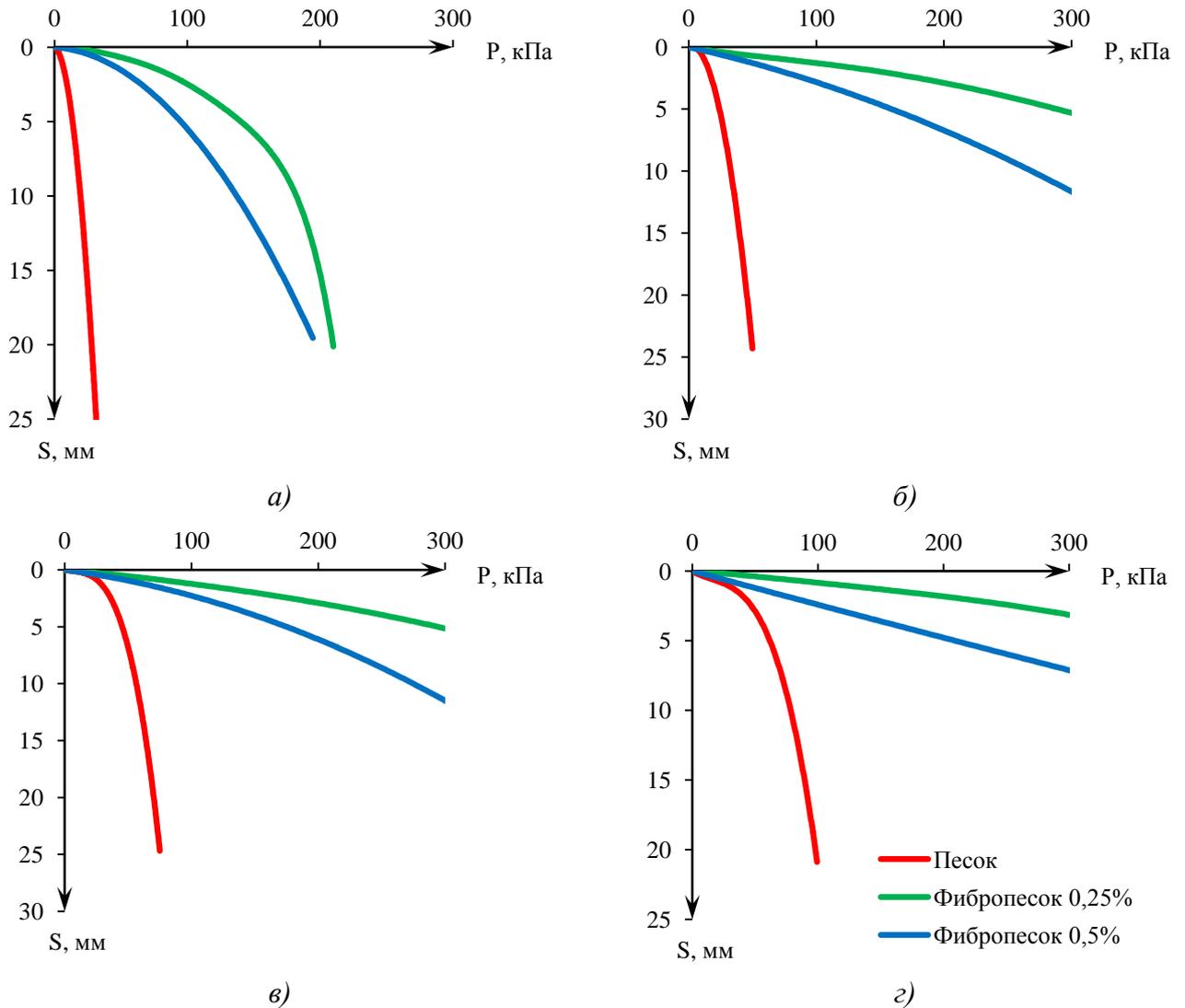


Рисунок 3.9 – Графики зависимости осадки от нагрузки для разных материалов обратной засыпки при высоте стены  $H=25$  см при расстоянии от штампа до стенки  $x$ : а)  $x = 2$  см; б)  $x = 12$  см; в)  $x = 22$  см; г)  $x = 32$  см



**Рисунок 3.10** – Графики зависимости осадки от нагрузки для разных материалов обратной засыпки при высоте стены  $H=20$  см при расстоянии от штампа до стенки  $x$ :  
 а)  $x = 2$  см; б)  $x = 12$  см; в)  $x = 22$  см; г)  $x = 32$  см

В соответствии с графиками, приведенными на рисунках 3.9-3.10, в массиве песчаного грунта обратной засыпки грунта имели место пластические деформации. В то время как при фиброармированной засыпке фаза сдвигов наступала только при расположении штампа вблизи стенки и гораздо больших нагрузках (в среднем при 100 кПа для армированной засыпки при расстоянии штампа от стенки  $x = 2$  см), тогда как для случая неармированной засыпки пластические деформации появились в самом начале нагружения.

Характер поведения фиброгрунтовых обратных засыпок и неармированной засыпки значительно различается. Графики зависимости осадок от приложенного давления для фибропеска имеют более протяженный участок линейной

деформируемости по сравнению с классическим графиком механики грунтов, на котором фаза упругих деформаций распространяется только на самый начальный участок нагружения. Данное наблюдение позволит рассматривать фиброгрунт как линейно-деформируемый материал в увеличенном диапазоне нагрузок.

Сравнение диаграмм «осадка-нагрузка» для разных процентов армирования позволило сделать вывод о нерациональности увеличения процента армирования с 0,25% до 0,5%. При увеличении процента армирования значение критической нагрузки, при которой произошло разрушение, в общем случае не превосходило значения, полученного для меньшего процента армирования. Это может быть объяснено худшей перемешиваемостью частиц грунта с 0,5% волокон, что было замечено авторами при исследовании технологии приготовления фиброгрунта. Увеличение процента армирования приводит к локальной концентрации волокон и неравномерному распределению фибры в грунте.

Также следует отметить, что при армированной обратной засыпке (0,25% и 0,5%) для расстояния штампа от стены 22 и 32 см не было достигнуто предельного уровня критической нагрузки, при которой происходит разрушение. Испытание было доведено до максимально возможного для используемой установки давления 600 кПа, после чего последовала разгрузка. Такие результаты позволяют рассматривать фиброгрунт в качестве материала для земляных сооружений, работающих под большими нагрузками, например, в гидротехническом строительстве.

По результатам испытаний определялась критическая нагрузка как пиковое значение нагрузки, после которого произошло разрушение, или максимальное значение нагрузки в конце испытания. Для оценки влияния фибрового армирования грунта обратной засыпки на критическую нагрузку был введен безразмерный коэффициент критической нагрузки  $K_{кр}$ , который определялся как:

$$K_{кр} = \frac{P_{арм}^{max}}{P_{неарм}^{max}}, \quad (3.6)$$

где  $P_{арм}^{max}$  и  $P_{неарм}^{max}$  – критическая нагрузка для фиброармированной и неармированной песчаной засыпки соответственно, кПа.

Результаты расчетов коэффициентов критической нагрузки для разного процента армирования, расположения фундамента относительно стены  $x$  и высоты стены  $H$  приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Результаты модельных экспериментов

Материал засыпки	Высота стенки $H$ , см	Расстояние от фундамента до стенки $x$ , см	$P^{max}$ , кПа	$K_{кр}$
Песок	25	2	23	1
		12	38	1
		22	64	1
		32	100	1
	20	2	32	1
		12	50	1
		22	75	1
		32	112	1
Фибропесок 0,25%	25	2	75	3,26
		12	475	12,5
		22	600	9,38
		32	600	6
	20	2	200	6,25
		12	600	12
		22	600	8
		32	600	5,36
Фибропесок 0,5%	25	2	270	11,74
		12	356	9,37
		22	600	9,38
		32	600	6
	20	2	175	5,47
		12	440	8,8
		22	450	6
		32	600	5,36

Из таблицы 3.3 видно, что при фибровом армировании грунта обратной засыпки критическая нагрузка, при которой было завершено испытание, увеличивается в среднем в 8 раз. Даже при приложении нагрузки в непосредственной близости от стены ( $x=2$  см) было достигнуто увеличение

критической нагрузки до 75 кПа для фиброармированной обратной засыпки, тогда как неармированная конструкция теряла устойчивость при минимальном нагружении. Наибольшая эффективность армирования достигается при расположении фундамента относительно стены на расстоянии 12 см ( $K_{кр}=8,8-12,5$  для фиброгрунта 0,25% и 0,5%). Как было уже сказано ранее, более рационально работает конструкция с обратной засыпкой из фиброгрунта с содержанием волокон 0,25%. Увеличение процента армирования до 0,5%, а соответственно и затрат на него, нецелесообразно.

Применение в качестве обратной засыпки фиброгрунта позволяет располагать нагрузку в непосредственной близости от удерживающих конструкций, что особенно актуально в стесненных условиях строительства.

Второй задачей экспериментальных исследований модели подпорной стены являлась оценка влияния фибрового армирования на горизонтальные перемещения модели подпорной конструкции при различных расположениях штампа и высоте стенки для диапазона строительных нагрузок 0-300 кПа. В качестве исходных данных для сравнения были взяты показания индикатора 5 (рисунок 3.5) верхней точки модели подпорной стенки. Эффект армирования на горизонтальные перемещения стенки был оценен при помощи безразмерного коэффициента горизонтальных перемещений  $\Delta$ , который определялся как:

$$\Delta = \frac{\delta_{неарм}}{\delta_{арм0,25\%(0,5\%)}} \quad (3.7)$$

где  $\delta_{неарм}$  и  $\delta_{арм0,25\%(0,5\%)}$  – горизонтальные перемещения верхней точки стенки при критической нагрузке, определенной для неармированной обратной засыпки, и для засыпки, армированной 0,25% и 0,5% волокнами полипропилена, при той же нагрузке соответственно, мм.

В таблице 3.4 приведены значения горизонтальных перемещений верхней точки подпорной стенки (индикатор 5, рисунок 3.5) для разных материалов засыпки при критической нагрузке, полученной для песка, а также коэффициента  $\Delta$ , показывающего снижение горизонтальных перемещений при использовании

фиброгрунтовой засыпки:

$$\Delta = \frac{\delta_n}{\delta_{0,25\%(0,5\%)}} \quad (3.8)$$

Таблица 3.4 – Значения горизонтальных перемещений модели подпорной стенки при критической нагрузке, определенной для песка

Высота стенки $H$ , см	Расстояние от штампа до стенки $x$ , см	$P$ , кПа	Горизонтальные перемещения т. 5, мм			$\Delta = \frac{\delta_n}{\delta_{0,25\%(0,5\%)}}$	
			Песок, $\delta_n$	Фиброгрунт 0,25%, $\delta_{0,25\%}$	Фиброгрунт 0,5%, $\delta_{0,5\%}$	0,25% арм	0,5% арм
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 3.4 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. Наибольший эффект от армирования проявляется при применении фибропеска при расположении нагрузки на расстоянии 12 и 22 см от подпорной стенки.

Уменьшение горизонтальных перемещений стенки в случае применения фибропеска объясняется снижением активного давления грунта обратной засыпки за счет более высоких прочностных характеристик фиброгрунтового композита.

В таблице 3.5 приведены значения горизонтальных перемещений верхней точки подпорной стенки (индикатор 5, рисунок 3.2) при критической нагрузке, полученной для фибропеска, а также коэффициента  $\Delta_{арм}$ , показывающего изменение горизонтальных перемещений при замене процента армирования 0,25% на процент 0,5%, который определялся как:

$$\Delta_{арм} = \frac{\delta_{0,5\%}}{\delta_{0,25\%}}, \quad (3.9)$$

Таблица 3.5 - Значения горизонтальных перемещений модели подпорной стенки при критической нагрузке, определенной для фибропеска

Высота стенки $H$ , см	Расстояние от фундамента до стенки $x$ , см	$P$ , кПа	Горизонтальные перемещения т. 5, мм		$\Delta_{арм}$
			Фиброгрунт 0,25%, $\delta_{0,25\%}$	Фиброгрунт 0,5%, $\delta_{0,5\%}$	
25	2	75	3,16	0,98	0,3
	12	250	1,6	6,64	4,2
	22	300	1,43	1,95	1,4
	32	300	0,34	1,04	3,1
20	2	175	9,09	15,97	1,8
	12	250	2,04	6,68	3,3
	22	300	2,43	4,31	1,8
	32	300	0,68	2,24	3,3

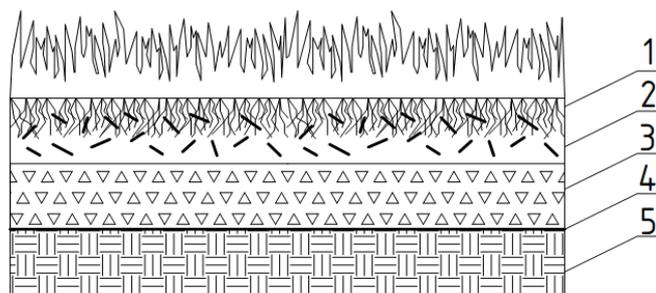
По результатам сравнительного анализа горизонтальных перемещений стенки с обратными засыпками из фиброгрунта 0,25% и 0,5% (таблица 3.5) был сделан вывод о том, что при увеличении процента армирования до 0,5% эффективность армирования с целью снижения горизонтальных перемещений подпорной стенки снижается. При применении фиброармированной засыпки 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).

Таким образом, был сделан вывод, что увеличение процента армирования до 0,5% нецелесообразно, так как в большинстве случаев это отрицательно сказывается на значения контрольных показателей ( $K_{кр}$ ,  $\Delta$ ) по сравнению с армированием 0,25%. Этот факт может быть объяснен худшей перемешиваемостью частиц грунта с 0,5% волокон и образованием поверхностей проскальзывания.

### 3.4. Оценка применимости фиброгрунта в качестве материала конусов и откосов насыпей удерживающих конструкций

Конусы и откосы насыпей удерживающих конструкций часто подвергаются размыву под воздействием поверхностных стоков и другим формам эрозии и, как в правило, нуждаются в дополнительном укреплении. Поэтому важным этапом исследований стала оценка сопротивляемости откосов насыпей из фиброгрунта временным потокам атмосферных вод (ливневых дождей, талых вод и т.д.) [48].

Для исследования сопротивляемости покрытий из фиброгрунта различным природным факторам на экспериментальной площадке под открытым небом были сооружены две модели покрытия насыпей. Конструкции покрытий насыпей располагались на уплотненном грунте с устроенным слоем гидроизоляции и дренажа. Верхнее покрытие первой насыпи представляло собой плодородный слой, уложенный поверх песчаного. В песчаный и плодородный слой второй насыпи были вмешаны волокна полипропилена (рисунок 3.11), следуя рекомендациям, приведенным выше. Размеры экспериментальных площадок в плане составил 1x1 м, высота – 300 мм [23].



**Рисунок 3.11** – Конструктивная схема покрытия с применением фиброгрунта:  
1 – газон на фиброармированном основании; 2 – песчаный слой; 3 – дренажный слой (щебень разных фракций); 4 – слой гидроизоляции; 5 – уплотненный грунт

Устройство покрытий насыпей осуществлялось поэтапно. На первом этапе был устроен слой гидроизоляции и сооружены деревянные лотки, выполняющие роль несъемной опалубки. Деревянные лотки были изготовлены из доски шириной 150 мм и толщиной 40 мм. Соединения узлов выполнено с помощью

гвоздей длиной 120 мм, для жесткости конструкции были использованы металлические уголки и саморезы по дереву длиной 70 мм.

Второй этап, согласно конструктивной схеме (см. рисунок 3.11), подразумевал подготовку дренажного слоя. Дренажный слой был выполнен из песчано-гравийной смеси, фракция гравия 20-40 мм. Дренажный слой после укладки был тщательно утрамбован с помощью ручной трамбовки. Высота дренажного слоя составила 100 мм.

На следующем этапе был приготовлен фиброгрунт и плодородный грунт, армированный волокнами, который в дальнейшем использовался в качестве корневого слоя газона. Приготовление фиброармированных грунтов осуществлялось по технологии смешивания, приведенной выше. Для корневого слоя в смесь, помимо песка и волокон, был также добавлен чернозем. Отношение песка и волокон фибропесчаного слоя составило 1:0,0025, отношение песка, чернозема и волокон плодородного армированного слоя – 1:1:0,0025%. Грунт укладывался в лоток с тщательным послойным уплотнением с помощью ручной трамбовки.

Далее были сформированы откосы покрытия насыпей путем выемки грунта с помощью кельмы. После того как образцы были полностью сформированы, была произведена посадка газона с предварительным взрыхлением, с последующим удобрением и поливом. Количество семян было принято согласно инструкциям с упаковки и равнялось 50 г на 1 м<sup>2</sup>. После рассеивания семян было произведено конечное уплотнение и формирование образцов с досыпкой грунта. Оба покрытия насыпей были идентичны по размерам и по уровню и находились в одинаковых условиях эксплуатации. Для предотвращения уничтожения семян птицами и преждевременного размыва образцов в результате действия атмосферных осадков насыпи были выдержаны под пленкой до укрепления травы газона в корневой зоне. Наблюдение за экспериментальными образцами осуществлялось в течение трех месяцев в летний период.

Напряжения, возникающие в процессе роста травы, привели к образованию трещин покрытия образца на неармированном основании. При появлении первых

ростков газона на фиброармированном основании поверхность насыпи сохранила свою целостность. Скорость роста травы не зависела от наличия волокон, что позволяет сделать вывод о том, что фибровое армирование не препятствует появлению растительности.

При воздействии на неармированный образец ливневого дождя наблюдалась эрозия поверхности откосов насыпи, которая развивалась при следующих сильных дождях. Продолжительные дожди вызвали вымывание частиц грунта с поверхности насыпи с образованием промоин (рисунок 3.12, а).

При этом обильные осадки за весь период наблюдения не нарушили целостность покрытия насыпи с применением фиброгрунта (рисунок 3.12, б). Наблюдения за образцами насыпей, находящимися под воздействием природных факторов, позволяют сделать вывод о влиянии волокон на сопротивление грунта эрозионным процессам, что положительно скажется на эксплуатационных характеристиках земляных сооружений с применением фиброгрунта.



а)



б)

**Рисунок 3.12** – Образцы покрытий насыпей после проливных дождей (вид сверху): а) с неармированным покрытием с указанием зон, подвергшихся эрозионным процессам; б) с фиброармированным покрытием

На основании выполненных наблюдений за образцами насыпей можно сделать вывод, что наличие фибрового армирования в корневой зоне газона благоприятно влияет на сопротивление эрозионным процессам, возникающим под воздействием временных потоков атмосферных вод. Полипропиленовые волокна, находясь в будущей корневой зоне, не мешают росту травы. Скорость роста травы

в армированном грунте не отличается от скорости роста травы в неармированном грунте.

Укрепление откоса с помощью фибрового армирования покрытия – один из возможных вариантов конструкции земляного полотна наряду с уже утвержденными методами в ОДМ 218.2.078-2016 «Методические рекомендации по выбору конструкции укрепления откосов земляного полотна автомобильных дорог общего пользования».

### 3.5. Выводы по Главе 3

По результатам проведенных модельных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Фибровое армирование грунта в пределах призмы обрушения позволяет увеличить критическую нагрузку в среднем в 8 раз. Наибольшая эффективность замены грунта активной зоны достигается в случае применения фибропеска с содержанием волокон 0,25% и расположением фундамента на расстоянии 12 см от стены.

2. Зависимость между осадками и приложенным давлением хорошо аппроксимируется прямой для расстояния между фундаментом и стеной  $x \geq 12$  см. Фибропесок можно оценивать как линейно-деформируемый материал в расширенном диапазоне нагрузок, что позволит предсказывать его поведение по простейшим зависимостям.

3. При замене песчаной обратной засыпки на фибропесчаную снижаются горизонтальные перемещения модели подпорной стены, что объясняется увеличением прочностных характеристик  $c$  и  $\phi$  вследствие армирования волокнами. Для нагрузки, при которой стенка с песчаной обратной засыпкой теряла устойчивость, снижение горизонтальных перемещений составило в среднем 50 раз. При применении фиброгрунта с содержанием волокон 0,25% горизонтальные перемещения оказывались меньше в 1,4-4,2 раза перемещений стенки с фиброгрунтовой засыпкой 0,5%.

4. Увеличение процента армирования полипропиленовыми волокнами до 0,5% нецелесообразно, так как в большинстве случаев это отрицательно сказывается на значения контрольных показателей ( $K_{кр}$ ,  $\Delta$ ) по сравнению с армированием 0,25%. Этот факт может быть объяснен худшей перемешиваемостью частиц грунта с 0,5% волокон и образованием поверхностей проскальзывания.

5. Применение фиброгрунта в качестве обратной засыпки может позволить располагать нагрузки в непосредственной близости от удерживающих конструкций, а также передавать на грунт основания повышенные нагрузки без увеличения затрат на материал облицовки, что актуально для строительства на урбанизированных территориях и в гидротехнике.

6. Фибровое армирование грунта откосов и конусов насыпей может быть рекомендовано как один из способов борьбы с эрозией. На основании наблюдений за моделями насыпей были сделаны выводы, что наличие фибрового армирования в корневой зоне газона грунта насыпи благоприятно влияет на сопротивление эрозионным процессам, возникающим под воздействием временных потоков атмосферных вод, при этом не препятствуя росту травы.

## **ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЧНОСТИ ФИБРОГРУНТА И ОБОСНОВАНИЕ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ОБРАТНОЙ ЗАСЫПКИ УДЕРЖИВАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

В настоящей главе даются рекомендации по определению прочностных характеристик фиброармированного грунта на основании результатов лабораторных трехосных и модельных испытаний, полученных в Главах 2 и 3 соответственно, по оптимизации удерживающей конструкции устоя моста, а также технико-экономическое сравнение метода объемно-дисперсного армирования с типовыми решениями и горизонтальным армированием.

Для обоснования применения фиброгрунта в качестве обратной засыпки в геотехнических проектах были поставлены следующие задачи:

1. На основании анализа существующих моделей фиброармированного грунта, представленных в Главе 1, и результатах экспериментальных исследований предложить эмпирическую модель фиброгрунта и методику, позволяющую рассчитать параметры прочности фиброгрунта – удельное сцепление и угол внутреннего трения.

2. Определить горизонтальные перемещения стенки, которые были измерены в модельных испытаниях, аналитически для верификации предложенного условия прочности фиброгрунта. Проанализировать полученные результаты и сделать вывод о корректности предложенной методики.

3. Решить задачу по оптимизации геометрии обратной засыпки и удерживающей конструкции при замене неармированного и горизонтально армированного грунта на фиброгрунт.

4. Выполнить технико-экономическое обоснование выбранного способа армирования грунта обратной засыпки.

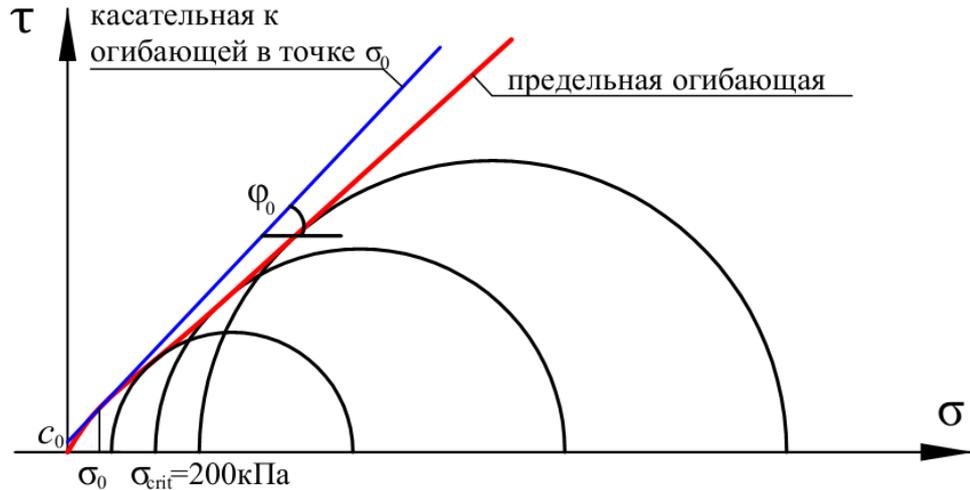
#### 4.1. Разработка эмпирической модели прочности фиброгрунта и методики определения его прочностных характеристик

На основании проведенного анализа существующих моделей и условий прочности фиброгрунта [80, 92] был сделан вывод, что для фиброармированного грунта может быть использована теория прочности Мора-Кулона, но при определенной модификации. Большинство исследователей объемно-дисперсного армирования сошлись во мнении, что предельная огибающая Кулона для фиброгрунта имеет два участка, соответствующие выдергиванию и растяжению волокон. Границей между ними является некоторое критическое напряжение  $\sigma_{crit}$ , зависящее от независимых характеристик грунта и фибры, а также от параметров трения грунт-волокно [80, 92].

Ряд исследователей [80, 92, 108] предлагает использовать в качестве модификации предельной прямой Мора-Кулона ломаную линию, выходящую из нуля и меняющую свой наклон (т.е. угол внутреннего трения  $\phi$ ) после достижения напряжения  $\sigma_{crit}$ . Учитывая, что действительное деформирование фиброармированного грунта не является линейным и зависит от множества факторов, в основу предлагаемой эмпирической модели прочности фиброгрунта легла гипотеза, что предельная огибающая для фиброармированного грунта имеет нелинейный характер [100]. Так как наличие волокон способствует повышению прочности песка на растяжение, можно провести аналогию со скальным грунтом, также обладающим высокой прочностью на растяжение. Для скальных грунтов наиболее удачной попыткой обобщения модели Мора – Кулона является модель Хоека – Брауна, которая предлагает нелинейную зависимость между наибольшим ( $\sigma_1$ ) и наименьшим ( $\sigma_3$ ) эффективным главным напряжением [54].

На основании проведенных экспериментальных исследований методом трехосного сжатия для грунта, армированного 0,25% волокон полипропилена, была получена предельная огибающая кругов Мора (рисунок 4.1), для которой был подобран полином третьей степени вида:

$$\tau = 0,000006\sigma^3 - 0,0032\sigma^2 + 1,43\sigma \quad (4.1)$$



**Рисунок 4.1** – Предлагаемый вид предельной огибающей для фиброгрунта и методика определения параметров прочности  $c$  и  $\varphi$  фиброгрунта

Так как взаимодействие волокон с грунтом осуществляется за счет обжатия, предполагается, что параметры прочности будут являться функцией от нагрузки, которая приложена к грунту ( $c, \varphi = f(P)$ ), а эквивалентные параметру модели Мора-Кулона для фиброгрунта ( $c'$  и  $\varphi'$ ) предлагается определять по уравнению касательной, построенной к предельной огибающей, полученной в соответствии с приведенным выше уравнением, в точке, соответствующей нормальному сжимающему напряжению  $\sigma_0$  в массиве фиброгрунта:

$$\tau = f(\sigma_0) + f'(\sigma_0) \cdot (\sigma - \sigma_0), \quad (4.2)$$

где  $\sigma_0$  – действующее сжимающее напряжение;  $f(\sigma_0)$  – значение функции предельной огибающей (4.1) в точке  $\sigma_0$ ;  $f'(\sigma_0)$  – значение производной функции предельной огибающей (4.1) в точке  $\sigma_0$ , равное тангенсу эквивалентного угла внутреннего трения  $\varphi'$ :

$$\operatorname{tg} \varphi' = f'(\sigma_0) = 0,000018\sigma_0^2 - 0,0064\sigma_0 + 1,43. \quad (4.3)$$

Значение эквивалентного удельного сцепления определяется в данном случае как:

$$c' = f(\sigma_0) - f'(\sigma_0) \cdot \sigma_0. \quad (4.4)$$

При сжимающих напряжениях  $\sigma$  более 200 кПа график аппроксимируется прямой, и прочностные характеристики рекомендуется определять по результатам трехосных испытаний (таблица 2.10):  $c' = 32$  кПа,  $\varphi' = 41^\circ$ .

Приведем пример расчета прочностных характеристик фиброгрунта обратной засыпки удерживающих конструкций. Рассмотрим устой моста, приведенный на рисунке 3.4. На устой действует равномерно распределенная временная подвижная нагрузка ( $P_{\text{вп}} = 59,5$  кПа) и сосредоточенная нагрузка от собственного веса пролетного строения ( $F = 47,3$  кН), которые были определены в соответствии с СП 35.13330.2011 Мосты и трубы [60]. Приведем обе эти нагрузки к равномерно распределенной, действующей на грунт обратной засыпки,  $q = 72$  кПа. Удельный вес фиброгрунта  $\gamma = 18,64$  кН/м<sup>3</sup>. Высота грунта обратной засыпки устоя составляет 4 метра. Разобьем ее на четыре слоя толщиной 1 метр и посчитаем для каждого  $c'$  и  $\varphi'$  по формулам 4.1-4.4:

- $h=0$ :  $\sigma_0 = q = 72$  кПа;  $\text{tg } \varphi' = 0,000018 \cdot 72^2 - 0,0064 \cdot 72 + 1,43 = 1,06$ ;  $\varphi' = 46,7^\circ$ ;  $c' = 0,000006 \cdot 72^3 - 0,0032 \cdot 72^2 + 1,43 \cdot 72 - 1,06 \cdot 72 = 12,1$  кПа.

- $h=1$  м:  $\sigma_0 = q + \gamma h = 90,6$  кПа;  $\text{tg } \varphi' = 0,000018 \cdot 90,6^2 - 0,0064 \cdot 90,6 + 1,43 = 1,00$ ;  $\varphi' = 44,9^\circ$ ;  $c' = 0,000006 \cdot 90,6^3 - 0,0032 \cdot 90,6^2 + 1,43 \cdot 90,6 - 1,00 \cdot 90,6 = 17,4$  кПа.

- $h=2$  м:  $\sigma_0 = q + \gamma h = 109,28$  кПа;  $\text{tg } \varphi' = 0,000018 \cdot 109,28^2 - 0,0064 \cdot 109,28 + 1,43 = 0,95$ ;  $\varphi' = 43,4^\circ$ ;  $c' = 0,000006 \cdot 109,28^3 - 0,0032 \cdot 109,28^2 + 1,43 \cdot 109,28 - 0,95 \cdot 109,28 = 22,6$  кПа.

- $h=3$  м:  $\sigma_0 = q + \gamma h = 127,92$  кПа;  $\text{tg } \varphi' = 0,000018 \cdot 127,92^2 - 0,0064 \cdot 127,92 + 1,43 = 0,91$ ;  $\varphi' = 42,2^\circ$ ;  $c' = 0,000006 \cdot 127,92^3 - 0,0032 \cdot 127,92^2 + 1,43 \cdot 127,92 - 0,91 \cdot 127,92 = 27,2$  кПа.

Определим средние значения удельного сцепления  $c'$  и угла внутреннего трения  $\varphi'$  в пределах высоты обратной засыпки:

$$\varphi' = \frac{46,7 \cdot 1 + 44,9 \cdot 1 + 43,4 \cdot 1 + 42,2 \cdot 1}{4} = 44,3^\circ;$$

$$c' = \frac{12,1 \cdot 1 + 17,4 \cdot 1 + 22,6 \cdot 1 + 27,2 \cdot 1}{4} = 19,83 \text{ кПа.}$$

Дальнейший расчет ограждающей конструкции ведется по стандартным методикам, приведенным, например в [68]. При моделировании подпорных стен в программных комплексах нахождение средних значений  $c'$  и  $\varphi'$  можно не

производить. В этом случае при создании расчетной схемы необходимо разбить грунт обратной засыпки на слои, задав для каждого разные параметрами прочности.

#### 4.2. Аналитический расчет для верификации предложенной методики определения прочностных характеристик фиброгрунта

Для проверки предложенной эмпирической модели фиброгрунта была подобрана методика расчета горизонтальных перемещений стенки, которые являлись контролируемым параметром в модельных испытаниях, на основе известных подходов сопротивления материалов.

В основе расчета горизонтальных перемещений подпорной стенки лежит уравнение изгиба балки на упругом основании (рисунок 4.2) [9, 34].

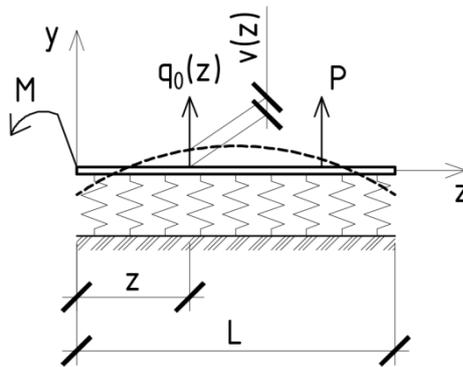


Рисунок. 4.2 – Расчетная модель балки на упругом основании

Алгоритм расчета был предложен Крыловым А.Н. [37]. Он основан на методе начальных параметров. Из условия закрепления балки находятся известные параметры, и составляется система уравнений, решением которой являются неизвестные начальные параметры.

Уравнение изгиба балки на упругом основании отличается от основного уравнения изгиба стержня только наличием дополнительного члена в правой части [32]:

$$\frac{d^2}{dz^2} \left[ EI_x(z) \cdot \frac{d^2 v}{dz^2} \right] = q_y + q_0 = q_y - k(z) \cdot v(z), \quad (4.5)$$

где  $k$  – коэффициент жесткости упругого основания на  $m^2$ ;

$q_y$  – внешняя нагрузка;

$EI_x$  – изгибная жесткость балки;

$v$  – прогиб балки.

Для балки постоянного сечения и жесткости ( $EI=\text{const}$ ,  $k=\text{const}$ ) после преобразований получим дифференциальное неоднородное уравнение четвертого порядка:

$$\frac{d^4 v(z)}{dz^4} + 4 \cdot m^4 \cdot v(z) = \frac{q_y}{EI_x}, \quad (4.6)$$

где  $m$  – величина, которая отражает отношение жесткостей основания (постели) и балки:

$$m = \sqrt[4]{\frac{K \cdot b}{4 \cdot EI_x}}, \quad (4.7)$$

$$k = K \cdot b, \quad (4.8)$$

где  $K$  – коэффициент упругого основания (постели) на  $\text{м}^3$ ;

$b$  – ширина балки.

Дважды продифференцировав уравнение (4.6), получим:

$$\frac{d^4 M(z)}{dz^4} + 4 \cdot m^4 \cdot M(z) = \frac{\ddot{q}_y}{EI_x}, \quad (4.9)$$

где  $M$  – изгибающий момент в балке.

Если интенсивность внешней нагрузки  $q_y=\text{const}$  или изменяется по линейному закону  $q_y=a+d \cdot z$ , то  $\ddot{q}_y=0$  и уравнение (4.9) становится однородным относительно  $M(z)$ :

$$\frac{d^4 M(z)}{dz^4} + 4 \cdot m^4 \cdot M = 0. \quad (4.10)$$

Решение однородного дифференциального уравнения четвертого порядка (4.10) записывается как:

$$M(z) = C_1 \cdot e^{r_1 \cdot z} + C_2 \cdot e^{r_2 \cdot z} + C_3 \cdot e^{r_3 \cdot z} + C_4 \cdot e^{r_4 \cdot z}, \quad (4.11)$$

где  $C_i$  – произвольные постоянные;

$r_i$  – корни характеристического уравнения:

$$r^4 + 4 \cdot m^4 = 0. \quad (4.12)$$

Дальнейшие преобразования были выполнены Крыловым А.Н. и подробно описаны в [37]. По окончании математических действий получаем следующие уравнения начальных параметров:

$$M(z) = M_0 A + Q_0 \frac{1}{m} B + p_0 \frac{1}{m^2} C + \dot{p}_0 \frac{1}{m^3} D, \quad (4.13)$$

$$Q(z) = M_0 (-4m) D + Q_0 A + p_0 \frac{1}{m} B + \dot{p}_0 \frac{1}{m^2} C, \quad (4.14)$$

$$p(z) = M_0 (-4m^2) C + Q_0 (-4m) D + p_0 A + \dot{p}_0 \frac{1}{m} B, \quad (4.15)$$

$$\dot{p}(z) = M_0 (-4m^3) B + Q_0 (-4m^2) C + p_0 (-4m) D + \dot{p}_0 A, \quad (4.16)$$

где  $M_0, Q_0, p_0, \dot{p}_0$  – начальные параметры, зависящие от условий закрепления балки.

В уравнениях (4.13-4.16)  $A, B, C, D$  – это гиперболо-тригонометрические функции влияния Крылова [37]:

$$A_z = \cosh(mz) \cos(mz), \quad (4.17)$$

$$B_z = 0,5[\cosh(mz) \sin(mz) + \sinh(mz) \cos(mz)], \quad (4.18)$$

$$C_z = 0,5 \sinh(mz) \sin(mz), \quad (4.19)$$

$$D_z = 0,25[\cosh(mz) \sin(mz) - \sinh(mz) \cos(mz)]. \quad (4.20)$$

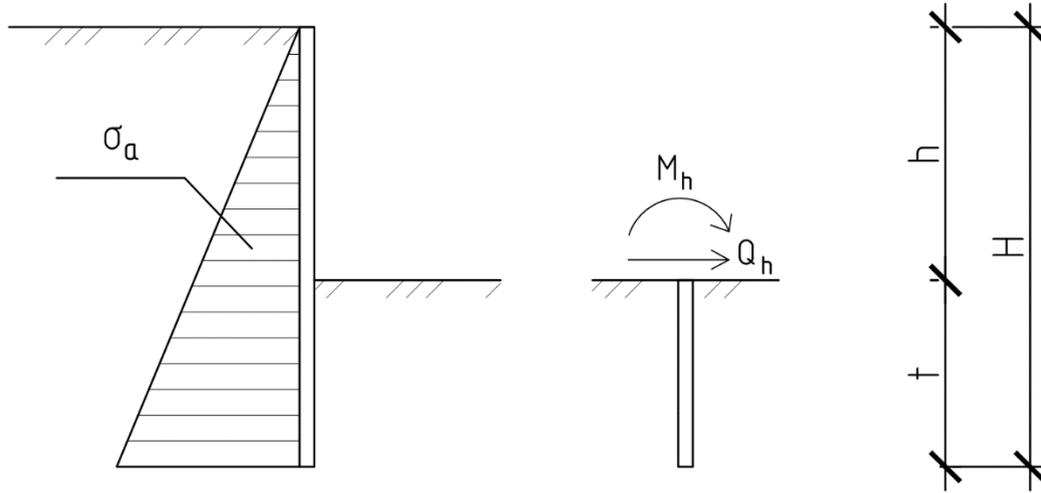
В методе начальных параметров два параметра всегда известны и зависят от условий закрепления балки на левом или правом концах, а два другие неизвестны. Таким образом, неизвестные начальные параметры находятся из решения системы двух уравнений (4.13-4.16).

Из (4.6) перемещение точки балки может быть определено по формуле:

$$v(z) = \frac{p(z) - q_y(z)}{K \cdot b}. \quad (4.21)$$

Подпорная стена в модельных испытаниях не была закреплена и свободно находилась в массиве грунта. В данном случае известными начальными параметрами являлись  $M_0=0, Q_0=0$ , а неизвестными –  $p_0, \dot{p}_0$ .

Величины  $M_h, Q_h$  определяются по эпюре активного давления грунта  $\sigma_a$  (рисунок 4.3). Это давление приводится к горизонтальной силе  $Q_h$  и моменту  $M_h$  в уровне поверхности грунта.



**Рисунок 4.3** – Расчетная схема подпорной стены:  $\sigma_a$  – активное давление грунта,  $M_h, Q_h$  – усилия, действующие в уровне защемления

Распределение активного давления  $\sigma_a$  по задней грани подпорной стены принимается по линейному закону и определяется как:

$$\sigma_a(z) = \gamma z \lambda_a + q \lambda_{aq} - c \lambda_{ac}, \quad (4.22)$$

где  $\gamma$  – удельный вес грунта обратной засыпки подпорной стены;

$z$  – расстояние от верха подпорной стены до точки, в которой определяется значение активного давления;

$\lambda_a, \lambda_{aq}, \lambda_{ac}$  – коэффициенты активного давления грунта;

$q$  – вертикальная нагрузка на зону обратной засыпки подпорной стены;

$c$  – удельное сцепление грунта.

Коэффициенты активного давления грунта при условии гладкой вертикальной грани подпорной стены, контактирующей с грунтом, и при горизонтальной поверхности грунта обратной засыпки определяются по формулам:

$$\lambda_a = \lambda_{aq} = (\operatorname{tg} \mu)^2, \quad (4.23)$$

$$\lambda_{ac} = 2\sqrt{\lambda_a}, \quad (4.24)$$

$$\mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}, \quad (4.25)$$

$$\theta = \mu, \quad (4.26)$$

где  $\varphi$  - угол внутреннего трения грунта;

$\theta$  - угол наклона плоскости скольжения.

Значения  $M_h$ ,  $Q_h$  определяются как:

$$Q_h = b \int_0^h \sigma_{a(z)} dz, \quad (4.27)$$

$$M_h = b \int_0^h \sigma_{a(z)} z dz. \quad (4.28)$$

По полученным значениям перемещения защемленной части подпорной стены в массиве грунта строится кубическое уравнение линии тренда. По полученному уравнению линии тренда строится касательная к верхней точке защемленной части подпорной стены. Горизонтальные перемещения стенки в точках, где они были измерены в модельных испытаниях с помощью датчиков, определяются по уравнению касательной. Стоит отметить, что данная методика применима только при условии действия внешней нагрузки в пределах линии скольжения грунта обратной засыпки.

Алгоритм определения горизонтального перемещения подпорной стены представлен на рисунке 4.4.

Исходными данными для аналитического расчета горизонтальных перемещений подпорной стены являлись результаты лабораторных испытаний образцов песка и фиброгрунта на трехосное сжатие, геометрические параметры подпорной стены, а также предложенная модель расчета действительных характеристик прочности фиброармированного грунта, предложенная в п. 4.1 настоящей Главы (таблица 4.1).

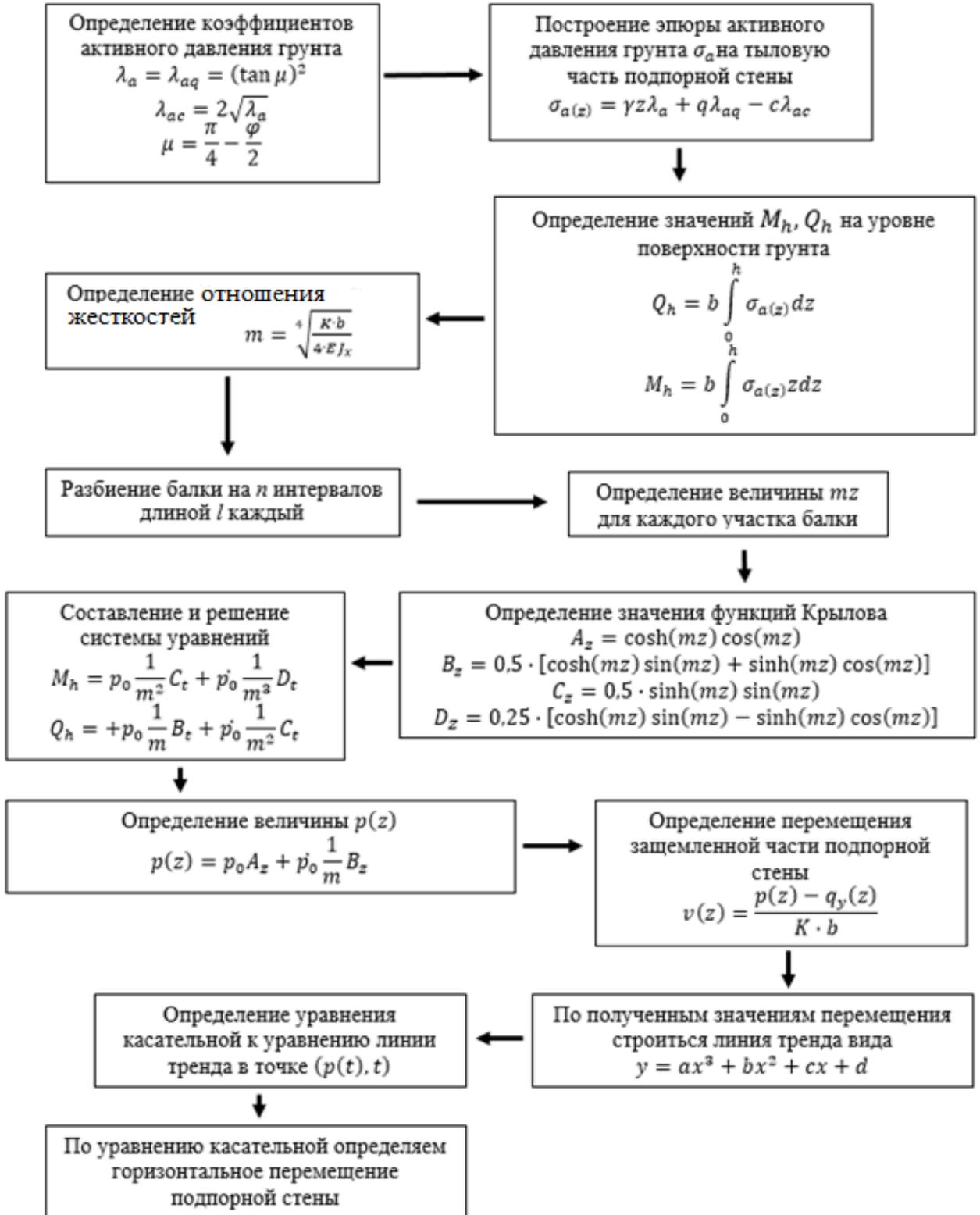


Рисунок 4.4 – Алгоритм определения горизонтального перемещения подпорной стены

Таблица 4.1 – Исходные данные для аналитического расчета

№ п/п	Характеристика	Ед. изм.	Материал обратной засыпки	
			Неармированный песок	Фиброгрунт 0,25 %
1	Удельное (кажущееся) сцепление, $c'$	кПа	0	изм.*
2	Угол внутреннего трения, $\varphi'$	град	36,4	изм.*
3	Коэффициент постели грунта, $k$	МН/м <sup>3</sup>	17,0	12,0
4	Ширина подпорной стены, $b$	мм	156	
5	Момент инерции подпорной стены, $J_x$	см <sup>4</sup>	1,78	
6	Модуль упругости материала подпорной стены, $E$	ГПа	5,5	
7	Максимальная внешняя нагрузка, $q$ - при высоте подпорной стены 20 см - при высоте подпорной стены 25 см	кПа	31	200
			20	75
* характеристики будут меняться в зависимости от действующей нагрузки				

Для оценки точности предложенной аналитической методики на первом этапе стал расчет горизонтальных перемещений для песчаной обратной засыпки. Значения горизонтальных перемещений подпорной стены, полученные по расчету и по результатам модельных испытаний, и их сравнительный анализ при высоте подпорной стены 20 и 25 см при размещении нагрузки на призме обрушения представлены в таблицах 4.2 - 4.3.

Таблица 4.2 – Сравнительная таблица значений горизонтальных перемещений, определенных по модельным испытаниям и в ходе аналитического расчета, подпорной стенки с песчаной обратной засыпкой при  $h = 25$  см,  $P = 20$  кПа

№ датчика	Высота расположения контрольной точки, мм	Горизонтальные перемещения подпорной стены, мм		Отклонения, %
		По модельным испытаниям	По аналитическому расчету	
1	450	9,84	10,04	2,49
2	400	8,15	8,46	4,53
3	350	6,23	6,88	11,64
4	300	4,82	5,29	11,03
5	250	3,15	3,71	18,48

Таблица 4.3 – Сравнительная таблица значений горизонтальных перемещений, определенных по модельным испытаниям и в ходе аналитического расчета, подпорной стенки с песчаной обратной засыпкой при  $h = 20$  см,  $P = 31$  кПа

№ датчика	Высота расположения контрольной точки, мм	Горизонтальные перемещения подпорной стены, мм		Отклонения, %
		По модельным испытаниям	По аналитическому расчету	
1	450	-	-	-
2	400	10,33	9,66	6,91
3	350	8,46	7,86	7,65
4	300	6,36	6,06	5,03
5	250	4,36	4,25	2,54

Анализируя данные, представленные выше, можно сделать вывод об удовлетворительной сходимости результатов аналитического расчета с результатами модельных испытаний. Отклонения составили 2,5-18,5%. Следовательно, дальнейший расчет проводился по алгоритму, представленному на рисунке 4.4.

Следующим этапом стал расчет для фибропеска, исходными данными для которого стали прочностные характеристики, рассчитанные по методике, описанной в п. 4.1. Для более полного контроля сходимости предложенной модели горизонтальные перемещения были рассчитаны не только при максимальной нагрузке на призму обрушения, но и при промежуточных давлениях, при которых также были замерены горизонтальные перемещения стенки. Результаты сравнительного анализа приведены в таблицах 4.4 - 4.8.

Таблица 4.4 – Сравнение значений горизонтальных перемещений, определенных по модельным испытаниям и в ходе аналитического расчета, подпорной стенки с фибропесчаной обратной засыпкой при  $h = 25$  см,  $P = 75$  кПа

№ датчика	Высота расположения контрольной точки, мм	Горизонтальные перемещения подпорной стены, мм		Отклонения, %
		По модельным испытаниям	По аналитическому расчету	
1	450	3,16	3,94	19,80%
2	400	2,55	2,99	14,72%
3	350	1,93	2,17	11,06%
4	300	1,26	1,47	14,29%

№ датчика	Высота расположения контрольной точки, мм	Горизонтальные перемещения подпорной стены, мм		Отклонения, %
		По модельным испытаниям	По аналитическому расчету	
5	250	0,67	0,89	24,72%

Таблица 4.5 – Сравнение значений горизонтальных перемещений, определенных по модельным испытаниям и в ходе аналитического расчета, подпорной стенки с фибропесчаной обратной засыпкой при  $h = 20$  см,  $P = 75$  кПа

№ датчика	Высота расположения контрольной точки, мм	Горизонтальные перемещения подпорной стены, мм		Отклонения, %
		По модельным испытаниям	По аналитическому расчету	
2	400	1,73	2,28	24,12%
3	350	1,33	1,66	19,88%
4	300	0,91	1,13	19,47%
5	250	0,53	0,69	23,19%

Таблица 4.6 – Сравнение значений горизонтальных перемещений, определенных по модельным испытаниям и в ходе аналитического расчета, подпорной стенки с фибропесчаной обратной засыпкой при  $h = 20$  см,  $P = 125$  кПа

№ датчика	Высота расположения контрольной точки, мм	Горизонтальные перемещения подпорной стены, мм		Отклонения, %
		По модельным испытаниям	По аналитическому расчету	
2	400	2,92	3,47	15,85%
3	350	2,26	2,73	17,22%
4	300	1,57	2,04	23,04%
5	250	0,99	1,40	29,29%

Таблица 4.7 – Сравнение значений горизонтальных перемещений, определенных по модельным испытаниям и в ходе аналитического расчета, подпорной стенки с фибропесчаной обратной засыпкой при  $h = 20$  см,  $P = 175$  кПа

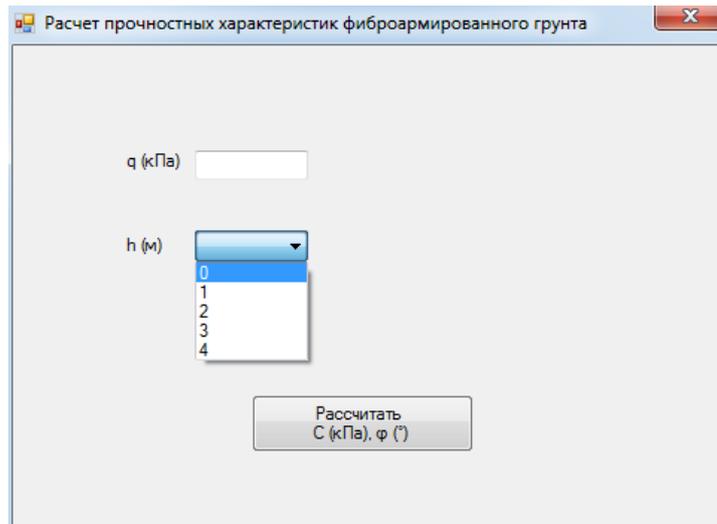
№ датчика	Высота расположения контрольной точки, мм	Горизонтальные перемещения подпорной стены, мм		Отклонения, %
		По модельным испытаниям	По аналитическому расчету	
2	400	7,47	8,29	9,89%
3	350	5,88	6,79	13,40%
4	300	4,11	5,30	22,45%
5	250	2,79	3,81	26,79%

Таблица 4.8 – Сравнение значений горизонтальных перемещений, определенных по модельным испытаниям и в ходе аналитического расчета, подпорной стенки с фибропесчаной обратной засыпкой при  $h = 20$  см,  $P = 175$  кПа

№ датчика	Высота расположения контрольной точки, мм	Горизонтальные перемещения подпорной стены, мм		Отклонения, %
		По модельным испытаниям	По аналитическому расчету	
2	400	13,07	13,91	6,01%
3	350	10,42	10,84	3,88%
4	300	7,45	7,78	4,19%
5	250	4,62	4,71	1,93%

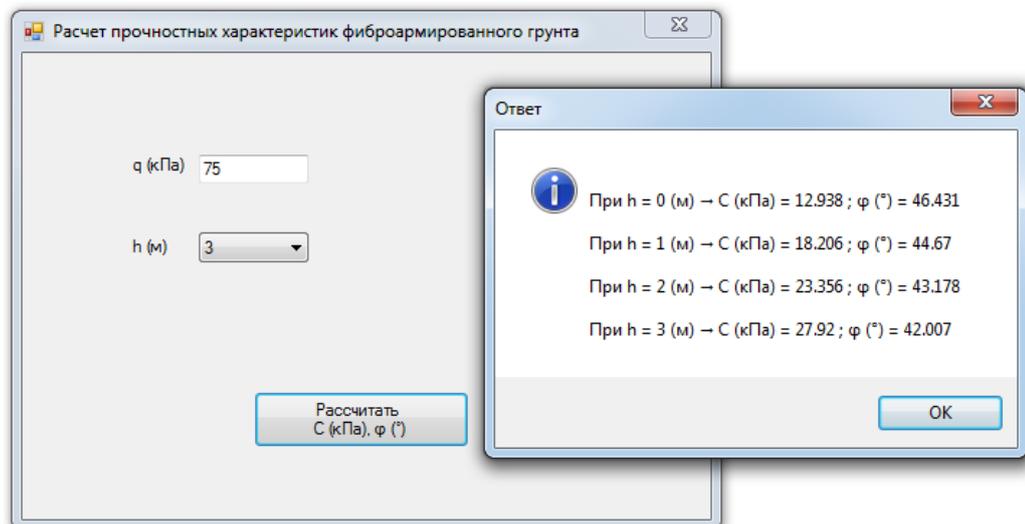
Анализируя значения горизонтальных перемещений, полученных по данным модельных испытаний и по аналитическому расчету, подпорной стены с обратной засыпкой из фиброгрунта, можно сделать вывод, что результаты аналитического расчета обладают удовлетворительной сходимостью (2-29%) с результатами модельных испытаний. Таким образом, предложенная модель определения прочностных характеристик фибропеска с процентным содержанием волокон 0,25% по массе сухого грунта адекватна и может быть применена в практике геотехнических расчетов.

Для прикладных расчетов прочностных характеристик фиброармированного грунта по предложенной методике была составлена программа для ЭВМ в Visual Studio на платформе Windows Form. Программа разработана на языке Visual basic. Прикладная программа представляет собой пользовательскую форму, которая позволяет определить удельное сцепление и угол внутреннего трения фиброгрунта в зависимости от действующей нагрузки и высоты стенки. Программа запускается двойным щелчком мыши, после которого открывается диалоговое окно программы. Интерфейс программы представлен на рисунке 4.5.



**Рисунок 4.5** - Интерфейс разработанной программы для расчета прочностных характеристик фиброармированного грунта

В пользовательскую форму вводятся исходные данные: значение равномерно распределенной нагрузки на поверхность, а также высота засыпки. После нажатия кнопки «Рассчитать  $S$  (кПа),  $\varphi$  ( $^{\circ}$ )» на экран выводятся значения прочностных характеристик фиброгрунта (рисунок 4.6).



**Рисунок 4.6** – Пример вывода результатов расчета прочностных характеристик фиброармированного грунта в окне программы

Программа позволит быстро определить параметры прочности фиброгрунта – удельное сцепление  $s$  и угол внутреннего трения  $\varphi$  по предложенной модели без необходимости нахождения значений функции и производной функции при

нужном напряжении. В программе заложены зависимости и уравнения, предложенные в п. 4.1 и верифицированные в п. 4.2 настоящей Главы.

К преимуществам программы можно отнести простой и понятный интерфейс, скорость расчета, возможность получения результата для любой нагрузки и высоты засыпки.

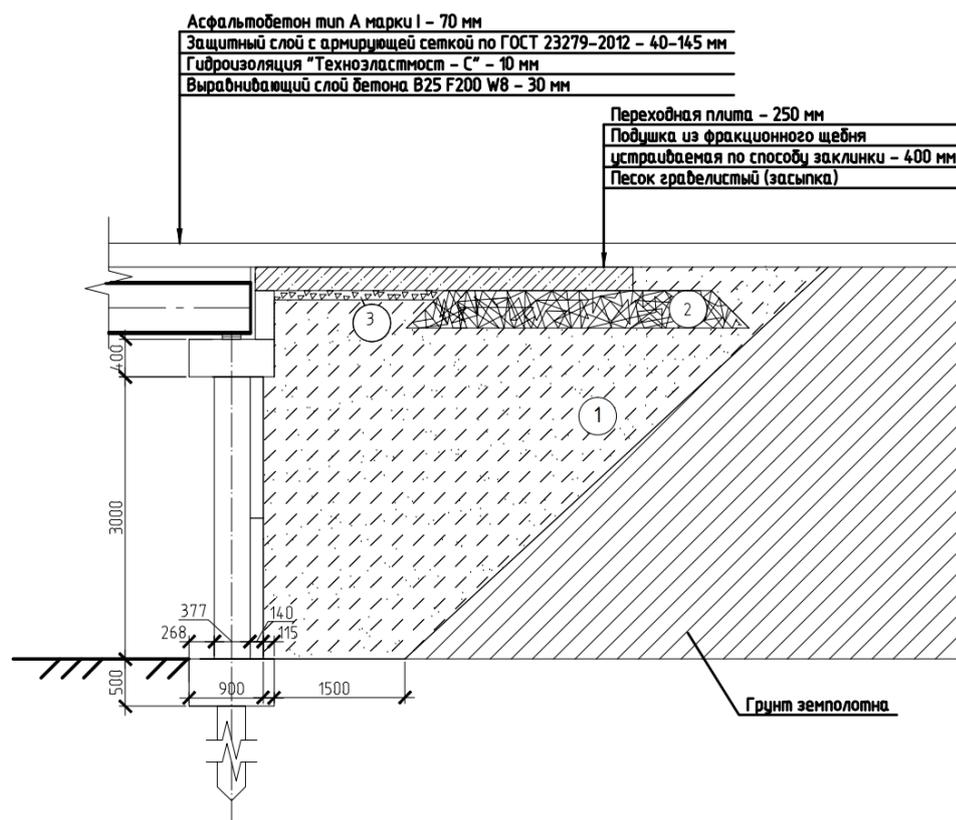
#### **4.3. Численное моделирование удерживающей конструкции с обратной засыпкой из фиброармированного грунта и оценка ее экономической эффективности**

В качестве примера применения предложенного способа армирования для грунта обратной засыпки было выполнено численное моделирование устоя моста, рассмотренного в п. 3.2 Главы 3.

При армировании грунта обратной засыпки горизонтально расположенными прослойками геосинтетика длина анкеровки, независимо от расчета, должна быть не менее 1 м и/или не менее 70% от высоты удерживающей конструкции [46, 56]. Это требование было учтено при назначении размеров обратной засыпки в случае горизонтального армирования (рисунок 3.4, б).

Объемно-дисперсное армирование, в отличие от горизонтального, не требует анкеровки, поэтому геометрия обратной засыпки выбиралась из конструктивных требований, приведенных в [44]. Согласно рекомендациям, насыпь за устоями и конусы должны быть отсыпаны из дренирующего материала (в исследуемом случае – из фиброгрунта) с коэффициентом заложения откоса 1:1,25 и размером по низу у опор 1,5 м (рисунок 4.7).

В соответствии с серией 3.503.1-79 «Опоры свайные железобетонные автодорожных мостов с пролетами до 24 м» заглубление мостовых свай в грунт должно быть не менее 4 метров. Поэтому устой моста с фиброармированной обратной засыпкой моделировался со сваями длиной 4 м.

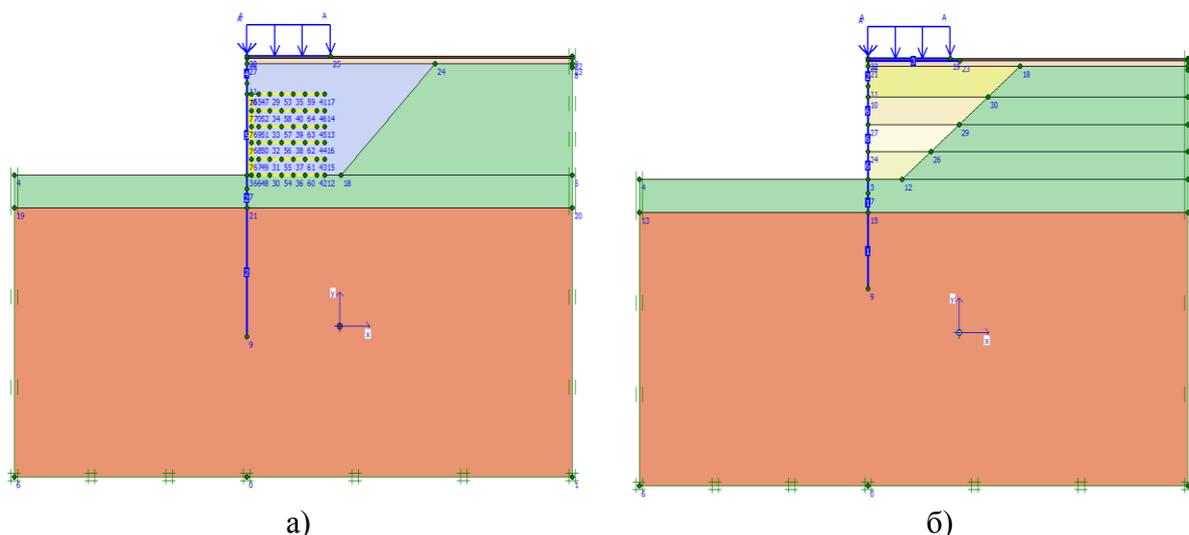


**Рисунок 4.7** – Предлагаемое решение конструкции устоя моста.  
 1. – фиброгрунт, 2 – щебеночная подушка, 3 – щебень

Численное моделирование осуществлялось в программном комплексе Plaxis 2D. Железобетонные элементы устоя (шкафная стенка, ригель, ростверк, свая, переходная плита) моделировались элементами Plates, характеристики которых были назначены в соответствии с проектом. Физико-механические свойства грунта земляного полотна были взяты из отчета по инженерно-геологическим изысканиям. Физические и деформационные характеристики фиброгрунта были получены по результатам лабораторных исследований. Расчет параметров прочности был выполнен по предложенной в п. 4.1 методике.

Устой был рассчитан на равномерно распределенную временную подвижную нагрузку ( $P_{вр} = 59,5$  кПа) и сосредоточенную нагрузку от собственного веса пролетного строения ( $F = 47,3$  кН) в соответствии с СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» [60].

Предложенная конструкция устоя с фиброармированной обратной засыпкой сравнивалась с устоем с горизонтально армированной обратной засыпкой [56]. Расчетные схемы двух вариантов конструкций представлены на рисунке 4.8.



**Рисунок 4.8** – Расчетные схемы двух вариантов устоя моста: а) с горизонтальным армированием обратной засыпки [56]; б) с фиброгрунтовой обратной засыпкой

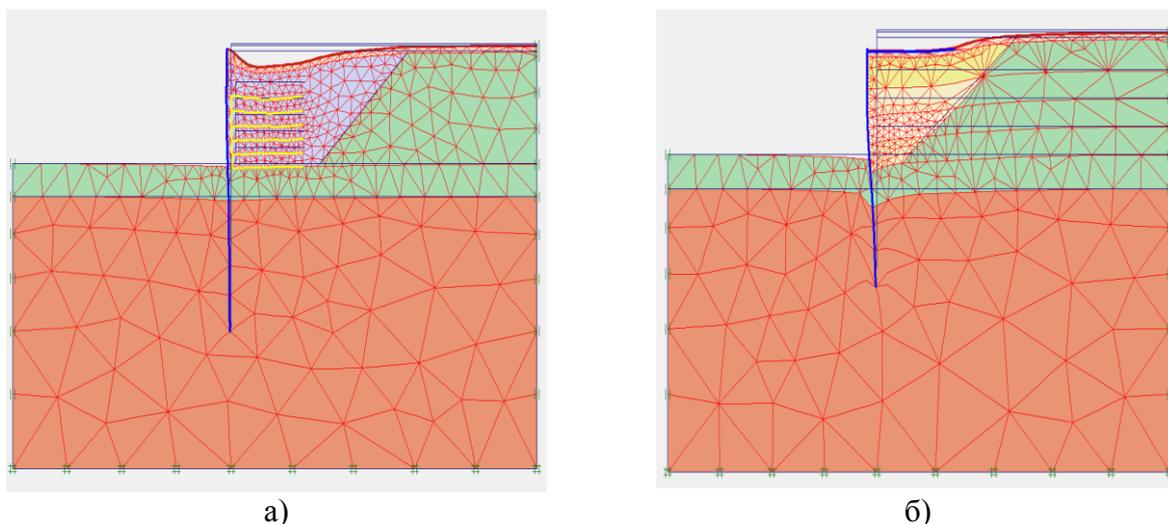
Для оценки адекватности выбора расчетной схемы и дополнительной верификации методики определения прочностных характеристик фиброгрунта были рассчитаны горизонтальные перемещения устоя с обратной засыпкой из фиброгрунта по алгоритму, приведенному на рисунке 4.4. Результаты расчета представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Результаты расчета горизонтального перемещения верхней точки устоя моста в программном комплексе Plaxis 2D и аналитически

	По Plaxis 2D	Аналитически	Отклонение, %
Значение перемещения, мм	23,4	26,3	10,9

Из таблицы 4.9 видно, что погрешность составляет около 11%, что говорит об адекватности выбора расчетной схемы и подтверждения верификации методики определения параметров прочности фиброгрунта.

Деформационные схемы двух вариантов конструкций устоев представлены на рисунке 4.9.



**Рисунок 4.9**– Деформационные схемы двух вариантов устоя моста:  
а) с горизонтальным армированием обратной засыпки [56]; б) с фиброгрунтовой обратной засыпкой

Значения контролируемых параметров, полученные по результатам расчетов двух конструкций устоя моста, приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Результаты расчета устоя моста в программном комплексе Plaxis 2D

Контролируемый параметр	Устой с горизонтально армированной засыпкой, длина свай 6 м [56]	Устой с объемно-дисперсно армированной засыпкой, длина свай 4 м
Максимальный изгибающий момент в шкафной стенке, кН·м	49,8	41,0
Максимальное вертикальное перемещение, мм	42	42

На основании результатов расчета можно сделать вывод, что прочность двух вариантов конструкций устоя моста обеспечена, и они оба могут быть применены на практике. При этом по сравнению с типовым проектом, двухрядное расположение свай было заменено на однорядное, размеры ростверка уменьшены, а в случае с фиброармированной обратной засыпкой заглубление свай в грунт вместо проектных 6 метров составило 4 метра. Значения вертикальных перемещений в обоих случаях составили 4,2 см. Значение изгибающего момента, которое необходимо при подборе железобетонных конструкций подпорных стен,

при использовании фиброгрунта составило 41 кН·м, что на 17% меньше, чем для горизонтально армированной обратной засыпки.

При приблизительно равных контролируемых расчетных параметрах 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.

Эффективность применения того или иного вида армирования для усиления грунтового массива можно оценить двумя способами [64]. Первый предполагает варьировать значения нагрузок, воспринимаемых основанием без разрушения, при этом затраты на тот или иной вариант улучшения принимаются постоянными. Второй способ позволяет оценить эффективность метода армирования по изменению объемов работ (например, по разработке, уплотнению грунта и др.) и стоимости материалов (армирующих включений, грунта засыпки, железобетона и т.д.) при различных вариантах усиления грунтового массива, при этом константой является нагрузка от здания/сооружения [64].

Оценка эффективности применения фиброармированного грунта была выполнена вторым способом на основании сравнения сметной стоимости строительства устоя моста через реку Ирень в Кунгурском районе Пермского края. Для этого были составлены локальные сметные расчеты для трех вариантов конструкций устоя моста:

1. в соответствии с типовым проектом (двухрядное расположение свай, неармированный грунт обратной засыпки) (рисунок 3.2, а);

2. в соответствии с принятым в [56, 57] решением (однорядное расположение свай, горизонтальное армирование грунта обратной засыпки) (рисунок 3.2, б);

3. в соответствии с предлагаемым методом (однорядное расположение свай, фибровое армирование грунта обратной засыпки) (рисунок 4.7).

Расчет сметной стоимости выполнен в программном комплексе «ГРАНД-Смета» для уровня цен третьего квартала 2021 года. Сметная стоимость определена в соответствии с МДС 81-35.2004 «Методикой определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации». Локальный сметный на расчет на устройство различных конструкций устоев моста выполнен базисно-индексным методом в соответствии с Федеральными Единичными расценками – ФЕР-2001 в редакции 2014 г.

В результате расчета были получены три значения сметной стоимости, которые составили:

- **1457,62 тыс. руб.** для устоя по типовому проекту;
- **1422,55 тыс. руб.** для устоя с горизонтальным армированием обратной засыпки;
- **1224,20 тыс. руб.** для устоя с фиброармированной обратной засыпкой.

Таким образом, стоимость возведения устоя моста с обратной засыпкой из фиброгрунта оказалась ниже сметной стоимости типового решения и варианта с армированием горизонтальными прослойками на 16 и 14 процентов соответственно.

Для более полной технико-экономической оценки предлагаемого метода была составлена таблица структуры прямых затрат на устройства трех вариантов устоев моста (таблица 4.11).

Таблица 4.11 – Структура прямых затрат

Конструкция устоя моста	Стоимость ресурсов, тыс. руб.			Всего прямые затраты, тыс. руб.	Трудоемкость, чел-ч
	ФОТ	Машины и механизмы	Материалы и конструкции		
типовой проект	94,614	396,724	542,691	1000,069	337
с горизонтальным армированием обратной засыпки	80,985	259,612	709,888	1021,103	287
с фибровым армированием обратной засыпки	67,043	271,478	554,860	871,979	251

Согласно таблице 4.11 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, что говорит о возможном сокращении сроков строительства. Затраты на машины, механизмы, материалы и конструкции при устройстве устоя с объемно-дисперсным армированием обратной засыпки незначительно превышают затраты на устройство других вариантов. Это связано с дополнительными расходами на изготовление фиброгрунта и с высокой стоимостью самой фибры. Но в совокупности прямые затраты на устройство устоя с фиброгрунтовой обратной засыпкой в среднем ниже на 14% двух других вариантов.

Таким образом, на основании технико-экономической оценки можно сделать вывод, что применение фиброгрунта в качестве обратной засыпки удерживающих конструкций позволит сократить стоимость и сроки строительства. Благодаря оптимизации геометрии засыпки удастся добиться сокращения объемов земляных работ, которые являются одними из самых трудоемких, а также уменьшить сметную стоимость строительства.

#### **4.4. Выводы по Главе 4**

На основании результатов, полученных при решении поставленных в настоящей главе задач, можно сделать следующие выводы:

1. Предложена эмпирическая модель фиброгрунта, согласно которой предельная огибающая прочности не является линейной функцией, а прочностные характеристики  $c'$  и  $\varphi'$  непостоянны и зависят от сжимающих напряжений, которые испытывает массив грунта. Параметры прочности фиброгрунта предлагается определять по касательной, проведенной к нелинейной предельной огибающей в точке, соответствующей сжимающему напряжению в грунте.

2. Предложенная методика определения параметров прочности фиброгрунта была верифицирована аналитическим расчетом горизонтальных перемещений и сравнением их с результатами модельных испытаний. Выполнена верификация модели, которая показала хорошую сходимость. Отклонения значений

горизонтальных перемещений, определенных аналитическим расчетом с использованием предложенных зависимостей и экспериментальным путем, составили 6-29%. Для прикладных расчетов была разработана программа для ЭВМ, позволяющая получить параметры прочности фиброгрунта  $c'$  и  $\phi'$  в зависимости от нагрузки и высоты засыпки.

3. На основании результатов численного моделирования был сделан вывод о возможном применении фиброармированной обратной засыпки для удерживающих конструкций. В этом случае существенно сокращаются объемы земляных работ (почти в два раза) и материалоемкость конструкции устоя (сокращение количества и длины свай в 2 и 1,5 раза соответственно) при приблизительно равных контролируемых расчетных параметрах.

4. На основании технико-экономической оценки предлагаемого способа армирования можно сделать вывод, что применение фиброгрунта в качестве обратной засыпки подпорных стен позволит сократить стоимость и сроки строительства. Сметная 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 по отношению к природным грунтам.

На основании проведенных исследований были сформулированы следующие выводы:

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 примерно 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. Совместная работа базальтовых волокон с грунтом хуже 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 предложена 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 (6-29%). Для прикладных расчетов была создана программа, рассчитывающая параметры прочности фиброгрунта  $c'$  и  $\phi'$  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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абдукамилов, Ш. Ш. Несущая способность земляного полотна, отсыпанного барханными песками, воспринимающими вибродинамическую нагрузку: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.22.06 / Абдукамилов Шавкат Шухратович. – Санкт-Петербург, 2011. – 23 с.
2. Анферов, Е.П., Гришина А.С., Смирнов Р.С. 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.
3. Армирующее полипропиленовое волокно. – URL: <http://polimer-rostov.ru/fibrovolokno> (дата обращения: 01.12.2019).
4. Базальтовое волокно: характеристики и свойства. – URL: <http://kamni.ws/?p=304> (дата обращения: 01.12.2019).
5. Беллендир, Е. Н. Взаимодействие подпорных стен с основанием и обратной засыпкой с учетом упруго-пластических свойств грунтов: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.23.02 / НИИ гидротехники. – Санкт-Петербург, 1992. – 24 с.
6. Биргер, И. А. Соппротивление материалов: учеб. пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. - М : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. - 560 с.
7. Богомолов, А.Н. Два новых подхода к определению горизонтального давления грунта на ограждающие конструкции котлована / А. Н. Богомолов, А. С. Иванов, О. А. Богомоллова, А. Н. Ушаков, С. В. Кузнецова // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2012. Вып. 29 (48). – С. 26—35.
8. Болдырев, Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: монография / Г.Г. Болдырев. – Пенза: ПГУАС, 2008. – 696 с.
9. Бугров, А.К. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия / А.К. Бугров, Р.М. Нарбут, В.П. Сипидин. – Л.: Стройиздат, 1987. – 184 с.

10. ВСН 56-97. Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций. – Москва, 1997. – 177 с.

11. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат. 1973. – 375 с.

12. Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Госстройиздат, 1973. - 628 с.

13. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200084869> (дата обращения: 12.09.2018).

14. ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200096129> (дата обращения: 14.05.2019).

15. ГОСТ 22733-2002 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200137273> (дата обращения: 19.05.2018).

16. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095052> (дата обращения: 21.06.2021).

17. ГОСТ 25584-2016 Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200141112> (дата обращения: 17.10.2019).

18. ГОСТ 4640-2011 Вата минеральная. Технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200088537> (дата обращения: 20.02.2022).

19. Гришина, А. С. К вопросу определения активного давления обратной засыпки из фиброгрунта на подпорную стену / А. С. Гришина, И. Н. Попова // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2019 – № 3(10). – С. 18-23.

20. Гришина, А. С. Разработка состава фиброгрунта для повышения эксплуатационных характеристик земляных сооружений и сокращения

техногенных отходов предприятий Пермского края / А.С. Гришина // Материалы регионального конкурса инновационных проектов по программе УМНИК 2018: тез. выступлений / Ассоц. науч., инновац. учр. и предприятий Перм. края, Правительство Перм. края, Администрация г. Перми. – Пермь: Интер-ЕС, 2018. – С. 54-57

21. 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.

22. Гришина, А. С. Особенности приготовления фиброгрунтовых смесей для армирования грунта / А. С. Гришина, Р.С. Смирнов, А.Б. Пономарев // Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. по геотехнике; СПбГАСУ. – СПб, 2017. – С. 286-291.

23. Гришина, А.С. Изучение особенностей применения фиброармированного грунта в качестве основания натуральных покрытий / А. С. Гришина, Р.С. Смирнов // Master's Journal. – 2018. – №1. – С. 61-72.

24. 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. 125–132.

25. Громов, П.А. Эффективность применения плоских георешеток с металлическими жилами в конструкциях армогрунтовых автодорожных насыпей / П.А. Громов, Р.Т. Емельянов, В.В. Серватинский // Вестник МГСУ. – 2016. – № 6. – С. 7—14.

26. Джоунс, К.Д. Сооружения из армированного грунта / К. Д. Джоунс // Пер. с англ. В.С. Забавина; под ред. В. Г. Мельника. М.: Стройиздат, 1989. 280 с.

27. Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Синицин. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Госстройиздат, 1961. - 241 с.

28. Игошева, Л.А. Обзор основных методов укрепления грунтов основания / Л.А. Игошева, А.С. Гришина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 5-21.

29. Илларионов, С.О. Изучение влияния объектов нового строительства на осадку основания существующей застройки на основе модельного эксперимента / С.О. Илларионов, С.В. Калошина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2013. – №4. – С. 116-123.

30. Карманова, О. С. Анализ методов определения активного давления грунта на подпорные стенки / О.С. Карманова, В.О. Пикулева, В.И. Клевекко // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 55-летнему юбилею кафедры «Строительное производство и геотехника» ПНИПУ и кафедры «Гидротехнические и земляные сооружения» ВолгГАСУ, 10—13 февраля 2015 г., Волгоград. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2015. – С. 220-229.

31. Кашапова, К. Р. Планирование модельных экспериментов по исследованию работы подпорных стен, армированных горизонтальными геосинтетическими прослойками / К.Р. Кашапова // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 30-38.

32. Кашапова, К. Р. Результаты модельных испытаний по определению горизонтальных деформаций армогрунтовых подпорных стен / К.Р. Кашапова, В.И. Клевекко // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. – 2016. – № 4. – С. 128-140.

33. Кашарина, Т. П. Расчетно-экспериментальное исследование грунтоармированных подпорных стен для транспортных систем в условиях сейсмичности / Т. П. Кашарина, Д. В. Кашарин // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. – 2016. - №3. – С. 84-91.

34. Кидакоев, А. М. Основные принципы возведения грунтоармированного сооружения/ А.М. Кидакоев // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3. – С. 243-252.

35. Киселев, В.А. Расчет балок на упругом основании / В.А. Киселев. – М.: МАДИ, 1981.
36. Клевеко, В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния армированных оснований в пылевато-глинистых грунтах: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.23.02 / Клевеко Владимир Иванович. – Уфа, 2002. – 17 с.
37. Клепиков, С. Н. Расчет конструкций на упругом основании / С. Н. Клепиков. - Киев : Изд-во Будивельник, 1967. - 184 с.
38. 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.
39. Косиков, М.С. Усиление грунтов оснований временных дорог методом фибрового армирования / М.С. Косиков, А.С. Гришина // Информационные технологии в обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений: материалы 18-ой Международной научно-практической конференции. – Новочеркасск, 2019. – С. 179-183.
40. Крылов, А. Н. О расчете балок, лежащих на упругом основании / А. Н. Крылов. - 2-е изд., доп. - Санкт-Петербург : Изд-во академии наук СССР, 1931. - 154 с.
41. Кузнецова, А.С. Оценка прочности фиброармированного песка по результатам испытаний на трехосное сжатие / А.С. Кузнецова, В.Г. Офрихтер // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2012. – №2. – С. 37-44.
42. 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.
43. Кузнецова, А. С. Планирование эксперимента по исследованию напряженно деформированного состояния нагруженного массива

фиброармированного грунта, находящегося за подпорной стеной / А.С. Кузнецова, А.Б. Пономарев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2015. – № 1. – С. 135–148.

44. Кузнецова, А. С. Планирование эксперимента трехосного сжатия глинистого грунта, улучшенного фибровым армированием / А.С. Кузнецова, А.Б. Пономарев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 151–161.

45. Кузнецова, А. С. Исследование прочностных характеристик песка, армированного дискретными волокнами полипропилена / А.С. Кузнецова, А.Б. Пономарев, В. Г. Офрихтер // Вестник ПНИПУ: Строительство и архитектура. – 2012. – С. 44–57.

46. Кундупян, К.С. Проведение экспериментальных исследований модели армогрунтового подпорного сооружения / К.С. Кундупян // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 71–78.

47. Мансурская, А.В. Ограждающие конструкции котлованов и причины их аварий / А.В. Мансурская, Р.В.Мельников // Сборник материалов XV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, соискателей и магистрантов ТюмГАСУ в двух томах. – Тюмень, 2015. – Том 1. – С. 89-95.

48. Методические рекомендации по проектированию и строительству сопряжений автодорожных мостов и путепроводов с насыпью. – М.: Союздорнии, 1975.

49. Методы подготовки и устройства искусственных оснований: учебное пособие / Мангушев Р.А., Усманов Р.А., Ланько С.В., Конюшков В.В., - М.,СПб.: Изд-во АСВ, 2012. с.266.

50. Методы строительства армогрунтовых конструкций / В.Г. Офрихтер, А.Б. Пономарев, В.И. Клевеко, К.В. Решетникова. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 145 с.

51. Минвата: смертельно опасный утеплитель. – URL: <https://energo22.ru/index.php/news/142-minvata.html/> (дата обращения: 20.02.2022).

52. ОДМ 218.2.078-2016 Методические рекомендации по выбору конструкции укрепления откосов земляного полотна автомобильных дорог общего пользования [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456019726> (дата обращения: 22.06.2020).

53. Особенности процессов и оборудования для получения полиолефиновых волокон и нитей. – URL: <https://extxe.com/7324/osobennosti-processov-i-oborudovaniya-dlja-polucheniya-poliolefinovyh-volokon-i-nitej/> (дата обращения: 20.02.2022).

54. Пичугин, Е. А. Закономерности получения стабилизированных геоэкологически устойчивых грунтовых смесей на основе буровых шламмов: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 25.00.36 / Пичугин Евгений Александрович. – Пермь, 2019. – 16 с.

55. Пономарев А.Б., Применение фиброармированного песка в качестве оснований зданий и сооружений / Кузнецова А.С., Офрихтер В.Г. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 30(49). – С. 101-107.

56. Пономарев, В.С. Анализ результатов эксперимента по исследованию работы подпорной стенки с обратными засыпками из песка и фиброармированного грунта / В.С. Пономарев // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2018. – С. 177-180.

57. Пронозин, Я.А. Укрепление склона, находящегося в запредельном состоянии / Я.А. Пронозин, Р.В.Мельников // Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири: сборник материалов международной научно-практической конференции в трех томах. – Тюмень, 2014. – Том 1. – С. 60-64.

58. Пухаренко, Ю.В. Особенности приготовления фибробетонных смесей / Ю.В. Пухаренко // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – №1 (30). – С. 157-162.

59. Сас, И.Е. Об особенностях модели поведения скального грунта Хоека-Брауна и задание ее исходных параметров / И.Е. Сас, А.В. Бершов // Инженерные изыскания. – 2015. - № 13. – С. 42-47.

60. Сипидин, В. П. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия / В.П. Сипидин, Н. Н. Сидоров. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963.

61. Соколова, В.Д. Применение армогрунта в конструкции устоев моста на лесовозной дороге / В.Д. Соколова, В.И. Клевеко // Северогеоэкотех-2014: Материалы XV Международной молодежной конференции, в 5 ч. Ч.4. – Ухта: УГТУ, 2014. – С. 102-104.

62. Соколова, В.Д. Экономическое обоснование применения армированного грунта в конструкциях устоев мостов / В.Д. Соколова, В.И. Клевеко // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: материалы V международной научно-практической конференции. – North Charleston: CreateSpace, 2015. – С. 85.

63. Скибин, Г. М. Методика расчета новой конструкции грунтоармированного основания / Г. М. Скибин, А. М. Кидакоев // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. – 2014. - №3. – С. 66-67.

64. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054206> (дата обращения: 17.03.2020).

65. СП 35.13330.2011 Мосты и трубы [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084849> (дата обращения: 31.08.2021).

66. СП 43.13330.2012. Сооружения промышленных предприятий [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092709> (дата обращения: 06.04.2020).

67. Спириин, А.В. Анализ существующих конструктивных решений концевых опор мостовых сооружений и схема применения фиброармированного грунта при их реконструкции / А.В. Спириин, А.С. Гришина, В.И. Клевеко //

Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета: Строительство и архитектура. – 2016. – Т.7, № 1. – С. 5–12.

68. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Под общей ред. В. А. Ильичева и Р. А. Мангушева. Москва. АСВ. 2014 г. 728 с.

69. Татьянников, Д.А. Совершенствование конструкции песчаной подушки, армированной горизонтальными геосинтетическими элементами, и ее расчет на слабом основании: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.23.02 / Татьянников Даниил Андреевич. – Пермь, 2019. – 24 с.

70. Тер-Мартirosян, А.З. Влияние устройства котлована с дополнительными поперечными стенками на окружающую застройку и оценка эффективности рассматриваемых мероприятий / А.З. Тер-Мартirosян, Р.Х. Черкесов, И.О. Исаев, В.С. Гришин // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 4. – С. 54–67. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.04.

71. Тер-Мартirosян, З.Г. Напряженно-деформированное состояние слабых и насыпных грунтов, армированных железобетонными и грунтовыми сваями соответственно / З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, А.С. Акулецкий // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – Вып. 9. – С. 1182–1190. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1182-1190.

72. Тер-Мартirosян, З.Г. Опыт преобразования слабых водонасыщенных грунтов сваями конечной жесткости / З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, В.В. Сидоров // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13. – Вып. 3. – С. 271–281. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.3.271-281.

73. Технологии производства базальтовых волокон. – URL: <http://basaltm.com/tehnologii/technology-of-production-basalt-fiber.html> (дата обращения: 20.02.2022).

74. Цытович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. – Москва: Госстройиздат, 1963. – 637 с.

75. Цимбельман, Н. Я. Метод расчета устойчивости подпорных сооружений уголкового типа с учетом их взаимодействия с окружающим сыпучим телом:

автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.23.17, 05.23.01 / Цимбельман Никита Яковлевич. – Владивосток, 2004 г. – 23 с.

76. Шенкман, Р.И. Расчет осадок слабых глинистых оснований, улучшенных вертикальными грунтовыми элементами в оболочке из геосинтетических материалов: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.23.02 / Шенкман Роман Игоревич. – Пермь, 2016. – 24 с.

77. Abdullah, I. A. Effects of Fiber on Swell of Expansive Soils / I. A. Abdullah // Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, China, June 20-25, 2010. – 2010. – С. 663-669.

78. Ahmad, F. Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres / F. Ahmad, F. Bateni, M. Azmi // Geotextiles and Geomembranes. – 2010. – № 28. – С. 93-99.

79. Al Refeai, O. Behaviour of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions / O. Al Refeai // Geotextiles and Geomembranes. – 1991. – № 10. – С. 319-333.

80. Bogomolov, A. N. Evaluating the stress-strain state, the stability factor magnitude and the landslide pressure forces in order to manage the landslide processes / A. N. Bogomolov, O. A. Vikhareva, A. N. Ushakov, S. I. Shiyan // Geotechnical Engineering for Disaster Prevention & Reduction: Proceedings of the International Geotechnical Symposium (IGSS, 2007). — Yuzhno-Sakhalinsk: [Kazakhstan Geotechnical Society], 2007. — Pp. 281—285.

81. Chauhan, M. S. Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre / M. S. Chauhan, S. Mittal, B. Mohanty // Geotextiles and Geomembranes. – 2008. – № 26. – С. 429-435.

82. Construction processes. State of the art report. J. Chu, S. Varaksin, U. Klotz, P. Menge. 17<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. Alexandria, Egypt, 5-9 Oktober, 2009.

83. Effect of material properties on the behavior of sand-cement-fiber composites / C. Consoli, P. Montardo, M. Donato [et al.] // Ground Improvement. – 2004. – № 8. – С. 77-90

84. Estabragh, A. R. Improving piping resistance using randomly distributed fibers / A.R. Estabragh, K. Soltannajad, A.A. Javadi // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2014. – № 42. – C. 15-24.

85. Falorca, I.M.C.F.G. Influence of microfibres on the performance of a trial embankment under natural weathering / I.M.C.F.G. Falorca, M.I.M. Pinto, L.M.F. Gomes // *Proceedings of the 5<sup>th</sup> European Geosynthetics Congress, 16-19 September 2012, Valencia, Spain*. – 2012. – Vol.4. – C. 205-210.

86. Falorca, I.M.C.F.G., Gomes L.M.F., Pinto M.I.M. A full-scale trial embankment construction with soil reinforced with short randomly distributed polypropylene microfibers // *Geosynthetics International*. – 2011. – №5. – C. 280-288.

87. Ghazavi, M. The influence of freeze–thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay/ M. Ghazavi, M. Roustaeie // *Cold Regions Science and Technology*. – 2010. – № 61. – P. 125–131.

88. Gray H. Mechanics of fiber-reinforcement in sand / H. Gray, H. Ohashi // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1983. – №109. – C. 335-353.

89. Grishina, A. S. Analysis of efficiency of fiber reinforced sand as a backfill of retaining walls / A. S. Grishina, A. B. 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*. - Boca Raton; New York; London: Taylor & Francis Group; Leiden: CRC Press/Balkema, 2016. - P. 233-236.

90. 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*. - Boca Raton: New York: London: Taylor & Francis Group; Leiden: CRC Press/Balkema, 2019. - P. 82-85. - (Proceedings in Earth and geosciences; Vol. 2).

91. Hejazi, S. M. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers / S. M. Hejazi, M. A. Sheikhzadeh // *Construction and Building Materials*. – 2012. – №30. – C. 101-116.
92. Hirakawa, D. Mechanical properties of fiber reinforced gravelly soil / D. Hirakawa, Miyata Y. // *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics*, 21-25 September 2014, Berlin, Germany. – 2014.
93. Ibraim, E. Assessment of laboratory sample preparation for fibre reinforced sands / E. Ibraim, A. Diambra, A.R. Russell, D. M. Wood // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2012. – № 34. – C. 69-79.
94. Kaniraj, R. Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions / R. Kaniraj, V. Gayathri // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2003. – №21. – P. 123–149.
95. Kumar, R. Engineering behaviour of fibre-reinforced pond ash and silty sand / R. Kumar, V.K. Kanaujia, D. Chandra // *Geosynthetics international*. – 1999. – Vol. 6. – № 6. – C. 509-518.
96. Leflaive, E. Soil reinforced with continuous yarns: Texol / E. Leflaive // *Proceedings of the 11th International conference on soil mechanics and foundation engineering*, San Francisco, USA. 1985.
97. Li, C. Mechanical response of fiber-reinforced soil / C. Li // *PhD thesis*. – Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin. – 2005.
98. Liu, J. Static liquefaction behavior of saturated fiber-reinforced sand in undrained ring-shear tests / J. Liu, G. Wang, T. Kamai, F. Zhang, J. Yang, B. Shi // *Geotextiles and Geomembranes*. – 1994. – № 120. – C. 1381-1393.
99. Maher, H. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite / H. Maher, C. Ho // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1990. – №116. – C. 1661-1677.
100. Maher, H. Static response of sand reinforced with randomly distributed fibers / H. Maher, H. Gray // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1990. – №116. – C. 1661-1677.
101. Michalowski, L. Failure of fibre-reinforced granular soils / L. Michalowski, A. Zhao // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1996. – №122. – C. 226-234.

102. Michalowski, L. Limit analysis with anisotropic fibre-reinforced soil / R.L. Michalowski // *Geotechnique* – 2008. – № 58 (6). – C. 489–501.
103. Nasr, A. M. Behavior of strip footing on fiber-reinforced cemented sand adjacent to sheet pile wall / A. M. Nasr // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2014. – № 42. – C. 599-610.
104. 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.
105. Park, S.-S. Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand / S.-S. Park // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2009. – № 27. – C. 162-166.
106. Park, T. Enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber / T. Park, S. A. Tan // *Geotextiles and geomembranes*. – 2005. - №23. – C. 348-361.
107. Pino, L. F. M. The effect of the particle size distribution on the mechanics of fiber reinforced sands under one-dimensional compression / L. F. M. Pino, B. A. Baudet // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2015. – № 43. – C. 250-258.
108. Ranjan, G. Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil / G. Ranjan, M. Vasan, D. Charan // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1996. – №122. – P. 419-426.
109. Segetin, M. Harakeke reinforcement of soil–cement building materials:Manufacturability and properties / M. Segetin, K. Jayaraman, X. Xu // *Building and Environment*. – 2007. – №42. – C. 3066 – 3079.
110. Senol, A. Stabilization of clayey soils using propylene and polymer fibers / A. Senol, E. Etminan, G. Cevikbilen, H. Yildirim // *Proceedings of the 5<sup>th</sup> European Geosynthetics Congress, 16-19 September 2012, Valencia, Spain*. – 2012. – Vol.4. – C. 504-508.
111. Schofield, A.N., Wroth C.P. *Critical State Soil Mechanics*. Mc-Graw Hill, UK. – 1968.

112. Shukla, S. K. Fundamentals of fibre-reinforced soil engineering / S. K. Shukla ; Edith Cowan University. - Perth : Springer, 2017. - 181 c.
113. Sivakumar, Babu G.L. Numerical simulation of fiber-reinforced sand behavior / G.L. Sivakumar Babu, A.K. Vasudevan, S. Haldar // Geotextiles and Geomembranes. – 2008. – № 26. – C. 181-188.
114. Tang, C.-S. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil / C.-S. Tang, B. S. Li-Z. Zhao // Geotextiles and Geomembranes. – 2010. – № 28. – C. 54-62.
115. Waldron, J. Shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil / J. Waldron // Soil Science Society of America Journal. – 1977. – № 41. – C. 843-849.
116. Wu, H. Study of soil-root interaction / H. Wu, T. Erb // Journal of Geotechnical Engineering. – 1988. – №114. – P. 1351-1375.
117. Yetimoglu, T. A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay / T. Yetimoglu, M. Inanir, O. E. Inanir // Geotextiles and Geomembranes. – 2005. – № 23. – C. 174-183.
118. Zaimoglu, A.S., 2010. Freezing-thawing behavior offi negraind soils reinforced withpolypropylene fibers/ A.S. Zaimoglu // Cold Regions Science and Technology. – 2010. – № 60. – Pp. 63– 65.
119. Ziegler, S. Effect of short polymeric fibers on crack development in clays / S. Ziegler, D. Leshchinsky, H. I. Ling, E. B. Perry // Soils and Foundations – 1998. - №38. – C. 247-253.
120. Zornberg, G. Prediction of the performance of a geogrid-reinforced slope founded on solid waste / G. Zornberg, E. Kavazanjian // Soils and Foundations. – 2002. – №42. – C. 129-130.

## Приложение А. Патент на изобретение

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2764507

### КОНСТРУКЦИЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ С АРМИРОВАНИЕМ ВОЛОКНИСТЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Патентообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Пермский национальный исследовательский политехнический университет" (RU)*

Авторы: *Гришина Алла Сергеевна (RU), Косиков Матвей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2021113105

Приоритет изобретения 05 мая 2021 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 18 января 2022 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 05 мая 2041 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью  
Сертификат 0x75699C0019AC1878543BD83DF819A6CD1  
Владелец: **Ильин Григорий Петрович**  
Действителен с 24.12.2021 по 24.12.2022

*Г.П. Ильин*



Приложение Б. Диплом победителя регионального конкурса инновационных проектов по программе «Умник»



**Приложение В. Диплом победителя конкурса-акселератора инновационных проектов «Большая разведка»**

