

На правах рукописи

**СЛОБОДЧИКОВА НАДЕЖДА АНАТОЛЬЕВНА**

**Модифицированные композиты общестроительного назначения  
с использованием золошлаковых отходов**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва

2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» и ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Научный консультант **Клюев Сергей Васильевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород

Официальные оппоненты: **Бурьянов Александр Федорович**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», консультант кафедры «Строительное материаловедение», г. Москва

**Казанская Лилия Фаатовна**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», профессор кафедры «Строительные материалы и технологии», г. Санкт-Петербург

**Тиратуриян Артем Николаевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», профессор кафедры «Автомобильные дороги», г. Ростов-на-Дону

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург

Защита диссертации состоится 24 апреля 2026 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета ПДС 2022.015 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН) по адресу: г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3., ауд. \_\_\_\_

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РУДН и на сайте <http://dissovet.rudn.ru>.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета ПДС 2022.015,  
кандидат технических наук

Виноградова Е.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность* работы обусловлена необходимостью утилизации отходов от сжигания угля на тепловых электростанциях (золошлаковых смесей ТЭЦ).

Проблема накопления и повторного использования техногенных отходов носит глобальный характер. Объем накопления золошлаковых смесей ТЭЦ на конец 2024 г. составляет более 11 млрд т.

В РФ принят ряд нормативных документов, таких как «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» и Распоряжение Правительства РФ от 15 июня 2022 г. № 1557-р «Об утверждении комплексного плана по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности».

Золоотвалы можно рассматривать как крупные техногенные месторождения, а золошлаковые смеси – как техногенный грунт, который можно эффективно использовать для возведения различных видов земляных сооружений. Наиболее материалоемким направлением является строительство автомобильных дорог.

Различными исследованиями в разные годы изучены свойства золошлаковых отходов для их применения в строительстве земляных сооружений и укрепления грунтов (стабилизации) сооружений. Получены научные результаты применения золошлаковых отходов для стабилизации грунтов с целью улучшения их водно-физических свойств: снижения числа пластичности, снижения влажности, увеличения несущей способности, снижения относительной деформации морозного пучения и набухания. Разработаны составы золоминеральных композиций для строительства автомобильных дорог. Определены прочностные характеристики золошлаковой смеси Омской ТЭЦ-4 и доказано, что прочность золошлаковых смесей не ниже чем у природных грунтов. Определены деформационные характеристики золошлаковой смеси Омской ТЭЦ-4 в зависимости от степени уплотнения и влажности и деформационных характеристик золошлаковых отходов Амурской ТЭЦ-1. Исследована несущая способность забивных железобетонных свай, погруженных в массив золошлаковой смеси на золоотвале Омской ТЭЦ-4. Имеется большое количество исследований применения зол уноса для укрепления грунтов земляных сооружений.

С учетом различий свойств этих материалов в зависимости от вида угля и технологии сжигания применение золошлаковых отходов ТЭЦ в конструкциях земляных сооружений и, в частности, автомобильных дорог изучено недостаточно. Для применения материалов на основе местных грунтов и сырья, в том числе техногенных отходов, необходимо развитие методов подбора состава укрепленных грунтов и методов определения качественных характеристик в лабораторных условиях, а также разработка и развитие методов контроля качества устроенных слоев.

Золошлаковые смеси ТЭЦ можно применять как техногенный грунт для возведения слоев земляных сооружений, а также как техногенный грунт, укрепленный неорганическими вяжущими материалами.

В то же время не хватает исследований, в частности:

1) ограничены научные знания в области проектирования составов смесей грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, на основе золошлаковых отходов ТЭЦ, и методы оценки их эффективности в зависимости от конструктивного элемента земляных сооружений и климатических особенностей района строительства;

2) не разработаны рекомендации по определению модуля упругости укрепленных материалов в лабораторных условиях, что не позволяет осуществлять подбор смеси в строительных лабораториях с заданными проектными значениями модуля упругости;

3) отсутствуют ускоренные методы подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими; существующие методы лабораторных испытаний – трудоемкие и продолжительные во времени.

Кроме того, не наработан опыт широкомасштабного применения золошлаковых отходов в конструкциях земляных сооружений в условиях континентального климата. Количество объектов капитального строительства, построенных с применением золошлаковых отходов, незначительно.

Отсутствие научных знаний и, как следствие, подробных практических рекомендаций по применению золошлаковых отходов, в том числе ускоренных методов подбора состава и контроля качества, является одной из основных причин незначительного применения золошлаковых отходов для строительства земляных сооружений и, в частности, автомобильных дорог в условиях континентального климата, где продолжительность строительного сезона, в течение которого возможно устройство слоев из укрепленных грунтов, может составлять менее трех месяцев.

**Научная проблема.** Научная проблема заключается в недостатке знаний о составах и оценке качества неукрепленных золошлаковых смесей ТЭЦ, а также золошлаковых смесей ТЭЦ и местных грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, с позиции их применения в конструкциях земляных сооружений. Существующий уровень знаний не обеспечивает выполнение требований к качеству устроенных слоев земляных сооружений с применением золошлаковых смесей ТЭЦ, а также возможность строительства в условиях короткого строительного сезона в районах с континентальным климатом.

Учитывая изложенное выше, в работе поставлена цель и сформулированы задачи.

**Цель** – разработать технические решения по проектированию составов и оценке качества модифицированных композитов с использованием золошлаковых отходов ТЭЦ и местных грунтов, а также неукрепленных золошлаковых смесей ТЭЦ, для их применения в конструкциях земляных сооружений.

**Задачи:**

- разработать составы модифицированных композитов с использованием золошлаковых смесей ТЭЦ;
- предложить метод ускоренного подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в том числе на основе применения золошлаковых смесей ТЭЦ, в лабораторных условиях;
- разработать метод определения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в том числе на основе применения золошлаковых смесей ТЭЦ, в лабораторных условиях;
- предложить практические рекомендации по применению и оценке качества применения золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях земляных сооружений;
- провести апробацию полученных результатов на участках существующей сети автомобильных дорог.

**Объект исследования** – золошлаковые смеси ТЭЦ и местные грунты, неукрепленные и укрепленные неорганическими вяжущими материалами.

**Предмет исследования** – методы разработки составов и оценки качества модифицированных композитов на основе золошлаковых смесей ТЭЦ и местных грунтов.

**Научная новизна**

Экспериментально подтверждена эффективность применения кислых золошлаковых смесей ТЭЦ при строительстве слоев земляных сооружений с позиций общей толщины конструкций и стоимости строительства в условиях континентального климата.

Впервые экспериментально и теоретически обосновано применение микроволнового излучения для ускоренного набора прочности лабораторных образцов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами. Установлено, что под воздействием микроволнового излучения значительно уменьшается длительность структурообразования в грунтах, укрепленных портландцементом и известью. Предложен метод ускоренного подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в том числе на основе применения золошлаковых смесей ТЭЦ, в лабораторных условиях.

Предложен метод определения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в том числе на основе применения золошлаковых смесей ТЭЦ, в лабораторных условиях. Метод заключается в нагружении, последующей разгрузке образца укрепленного грунта и определении упругой деформации при разгрузке. Он позволяет определять значения модуля упругости как для грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, так и для золошлаковых смесей, укрепленных неорганическими вяжущими материалами.

Установлены закономерности влияния количества содержания портландцемента и извести в составах на прочность на сжатие золошлаковой сме-

си, укрепленной известью, и золошлаковой смеси, укрепленной цементом. Получены значения модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом и известью. Значения составили 300, 600 и 690 МПа.

Установлены эмпирические зависимости значений модуля упругости грунтов, укрепленных известью, и грунтов, укрепленных портландцементом, от прочности на сжатие, позволяющие снизить трудоемкость разработки составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами.

Выполнены сравнительные расчеты 66 конструкций дорожных одежд автомобильных дорог с применением золошлаковых смесей и традиционных материалов. Расчеты выявили положительный эффект применения золошлаковых смесей: снижение общей толщины конструкции дорожной одежды со слоями из золошлаковых смесей ТЭЦ по сравнению со слоями из традиционных материалов составило от 0 до 48 %; снижение стоимости строительства конструкций дорожных одежд со слоями из золошлаковых смесей ТЭЦ в сравнении с конструкциями со слоями из традиционных материалов составило от 14 до 21 %.

Выполнены сравнительные расчеты конструкций автомобильных дорог с земляным полотном из золошлаковой смеси и с земляным полотном из местных грунтов. Расчетами установлено, что стоимость строительства автомобильной дороги с земляным полотном из золошлаковых смесей ТЭЦ ниже стоимости строительства автомобильной дороги с земляным полотном из местных грунтов на 14,5 %.

#### ***Теоретическая и практическая значимость работ***

Экспериментально подтверждена возможность применения золошлаковых смесей ТЭЦ в больших объемах, что позволит сохранить природные ресурсы и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Экспериментально обосновано применение микроволнового излучения для ускоренного набора прочности лабораторных образцов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами. Предложен метод ускоренного подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в том числе на основе применения золошлаковых смесей ТЭЦ, в лабораторных условиях. Данный метод сокращает набор прочности образцов грунта, укрепленных портландцементом, с 28 до 1 сут., что позволяет снизить трудоемкость работ в строительных лабораториях, сократить сроки подбора составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами.

Предложен метод определения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в лабораторных условиях. Метод позволяет осуществлять подбор состава смеси укрепленных грунтов с заданными проектными значениями модуля упругости.

Получены значения модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом и известью, которые составили 300, 600 и 690 МПа. Значения могут применяться для расчета конструкций земляных сооружений.

Разработаны составы модифицированных композитов на основе золошлаковых смесей ТЭЦ. Составы обладают высокими марками по прочности и морозостойкости и могут использоваться для строительства слоев оснований дорожных одежд и верхнего слоя земляного полотна автомобильных дорог, искусственных оснований и полов промышленных предприятий в условиях континентального климата.

Получены эмпирические зависимости прочности на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной известью или портландцементом, от содержания портландцемента и извести в составах. Это позволяет снизить трудоемкость работ в строительных лабораториях и сократить сроки подбора составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами.

Разработаны рекомендации по применению золошлаковых смесей ТЭЦ в качестве материала для строительства автомобильных дорог. Приведены рекомендации по технологии производства работ по возведению слоев дорожных одежд и земляного полотна автомобильных дорог, учитывающие особенности золошлаковых смесей ТЭЦ.

Разработанные методы и рекомендации внедрены и прошли апробацию при строительстве реальных участков земляного полотна и дорожных одежд существующей сети автомобильных дорог с последующим мониторингом состояния. Полученные результаты признаны положительными, что позволяет применять методы всем участникам инвестиционного процесса строительства, реконструкции и капитального ремонта земляных сооружений.

Результаты исследований отражены в двух монографиях и используются в учебном процессе. Техническая новизна разработанных научно обоснованных решений подтверждается двумя патентами на изобретения.

**Работа соответствует паспорту научной специальности 2.1.5 «Строительные материалы и изделия» п. 9.** Разработка составов и совершенствование технологий изготовления эффективных строительных материалов и изделий с использованием местного сырья и отходов промышленности, в том числе повторного использования материалов от разборки зданий и сооружений; п. 17. Развитие системы контроля и оценки качества строительных материалов и изделий.

**Методология и методы исследования.** Для получения и обработки данных в диссертационной работе использовались следующие методы: натурные наблюдения, методы лабораторных испытаний, методы математического моделирования и эксперимент. Результаты экспериментальных исследований обрабатывались известными статистическими методами.

***Положения, выносимые на защиту:***

1) технические и технологические решения по применению золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях земляных сооружений, позволяющие повысить объем использования золошлаковых смесей и снизить стоимость строительства земляных сооружений;

2) составы модифицированных композитов на основе золошлаковых смесей ТЭЦ для строительства земляных сооружений;

3) метод определения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в лабораторных условиях, позволяющий осуществлять подбор состава смеси укрепленных грунтов с заданными проектной документацией значениями модуля упругости;

4) метод ускоренного подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в том числе на основе применения золошлаковых смесей ТЭЦ, в лабораторных условиях.

**Степень достоверности и апробация результатов** подтверждается применением актуальных методов расчета, современного лабораторного оборудования, большим объемом экспериментальных данных, полученных в результате лабораторных и опытно-промышленных испытаний.

Основные положения работы доложены и обсуждены на международных и всероссийских научно-практических конференциях в гг. Омск (2016), Екатеринбург (2017), Ростов-на-Дону (2018), Уфа (2020), Иркутск (2020), Москва (2022, 2024, 2025), Санкт-Петербург (2023–2025 гг.).

**Внедрение результатов работы.** Разработанные в данной диссертационной работе научно-технические предложения были использованы:

- при выполнении подряда на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ «Применение золошлаковых материалов (ЗШМ) ООО "Байкальская энергетическая компания" для земляного полотна автомобильных дорог» по заказу ООО «Иркутскзолопродукт» (договор № 23П/2021 от 16.04.2021 г.);

- при разработке «Методических указаний по применению золошлаковых смесей в земляном полотне автомобильных дорог Иркутской области», 2022 г.;

- при выполнении научно-исследовательской, опытно-конструкторской работы «Исследование грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими с использованием техногенных отходов в конструкциях автомобильных дорог Иркутской области» по заказу ОГКУ «Дирекция по строительству и эксплуатации автомобильных дорог Иркутской области» (гос. контракт ГК № 14/454-18);

- при разработке «Типовых материалов для проектирования автомобильных дорог и искусственных сооружений» Государственной компанией «Автодор», г. Москва, Российская Федерация;

- в деятельности ООО «Стройсервис», Омская Область, рп Таврическое, Российская Федерация;

- при разработке практических рекомендаций на изготовление золошлаковых смесей, укрепленных неорганическими вяжущими, ООО «СК "ИнвестПром-Элит"», Белгородская область, г. Белгород, Российская Федерация.

**Публикации.** Основные результаты и положения диссертационных исследований представлены в 52 публикациях, в том числе: 2 монографиях;

2 статьях, опубликованных в изданиях, индексированных в международные базы данных Web of Science и Scopus; 17 статьях в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 435 страниц, в том числе 125 иллюстраций и 110 таблиц. Список литературы включает 239 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, степень ее разработанности, поставлена цель, сформулированы задачи, определены объект и предмет исследования.

**В первой главе** рассмотрены методы укрепления местных грунтов неорганическими вяжущими материалами. В частности, в конструкциях земляных сооружений возможно применять переработанный бетонный порошок, измельченный стеклянный порошок и известь, лигносульфонат, порошок из яичной скорлупы, золошлаковые отходы ТЭЦ, золы рисовой шелухи, багассы и кофейной шелухи. Особенно важным является применение золошлаковых отходов ТЭЦ, так как объемы их накопления в РФ составляют более 1 млрд тонн. Всесторонний обзор опубликованной литературы показывает, что применение золошлаковых отходов ТЭЦ в конструкциях земляных сооружений ограничено, а количество объектов капитального строительства, построенных с применением золошлаковых отходов, незначительно.

Одной из важнейших задач в развитии применения техногенных отходов является разработка научных основ использования золошлаковых смесей.

Перспективные направления применения золошлаковых смесей:

- 1) в качестве техногенного грунта для возведения земляных сооружений;
- 2) в качестве техногенного грунта, укрепленного неорганическими вяжущими, для возведения земляных сооружений.

Для практического применения укрепленных грунтов необходимо правильно подбирать их состав и проектировать конструкцию земляных сооружений.

Анализ научной литературы позволил выявить нерешенные научные проблемы применения золошлаковых смесей ТЭЦ и методов подбора состава укрепленных грунтов:

- не проводились исследования влияния физических, прочностных и деформационных характеристик золошлаковых смесей на строительные и эксплуатационные характеристики земляных сооружений;

– не разработан метод определения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическим вяжущим, при действии динамической нагрузки в лабораторных условиях, что не позволяет осуществлять проектирование состава смеси укрепленных грунтов с заданными проектной документацией значениями модуля упругости;

– не определены ориентировочные качественные характеристики и область применения укрепленных грунтов в зависимости от вида вяжущего материала, климатических особенностей района строительства и вида земляных сооружений;

– существующие методы лабораторных испытаний очень трудоемки и затратны по времени, что приводит к большой продолжительности процесса подбора состава (от двух месяцев) и сокращает область применения этих материалов;

– отсутствуют ускоренные методы оценки качественных характеристик грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами;

– не выработаны четкие рекомендации и требования к подбору составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами.

В результате применение золошлаковых смесей в конструкциях земляных сооружений в условиях континентального климата, когда продолжительность строительного сезона может составлять менее трех месяцев, ограничено.

**Во второй главе** рассмотрены процессы структурообразования в грунтах, укрепленных портландцементом и известью. Эти процессы можно представить в виде нескольких стадий. Рассмотрены явления в грунтах, влияющие на формирование структуры. Выполнен анализ факторов, определяющих структуру грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, среди которых следует выделить минералогический и гранулометрический состав, температуру, пластичность и дисперсность.

Проанализированы возможные способы регулирования процессов, развивающихся в грунтах при укреплении их известью и портландцементом.

Проведенный анализ показывает, что в настоящее время не сформулировано теоретическое обоснование применения золошлаковых смесей ТЭЦ в составах грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими.

**В третьей главе** изложена методика проведения экспериментальных исследований. Для решения поставленных в работе задач использованы: кислые золошлаковые смеси ТЭЦ, грунты, портландцемент, известь. Золошлаковые отходы ТЭЦ Иркутской области являются типичными кислыми золошлаковыми отходами, которые образуются при сжигании каменных и бурых углей. Поэтому отбор проб произведен на территории Иркутской области.

Определение физико-механических характеристик осуществляется стандартными методами ГОСТ.

Для решения поставленных задач в работе предложена методика подбора состава укрепленных грунтов, которая состоит из нескольких этапов.

1. *Определение начального ориентировочного количества вяжущего*  
Обоснованы ориентировочные значения начального количества вяжущих материалов (таблица 1).

**Таблица 1 – Начальное ориентировочное количество вяжущего материала**

Вяжущее	Грунты	Количество вяжущего, %
Портландцемент и его аналоги	Крупнообломочные грунты	6–8
	Песчаные грунты	7–12
	Суглинки с числом пластичности $I_p$ не более 12	10–16
	Золошлаковые смеси	4–8
Известь	Супесь	6–10
	Супесь	–
	Пески и супесь с добавкой до 30 % золошлаковой смеси	5–12
	Суглинок	5–9
	Глина с числом пластичности не более 22	6–12

2. *Изготовление и хранение образцов для набора прочности*

Хранение и твердение образцов осуществлено при температуре  $20 \pm 2$  °С и относительной влажности воздуха  $95 \pm 5$  %.

3. *Определение качественных характеристик укрепленного грунта*

Определение характеристик прочности и морозостойкости выполнено стандартными методами ГОСТ.

4. *Оценка воздействия воды на прочностные характеристики*

Попеременное увлажнение и высушивание образцов позволяет оценивать долговечность материалов от воздействия воды. Оценка воздействия воды на прочностные характеристики выполнена в следующей последовательности:

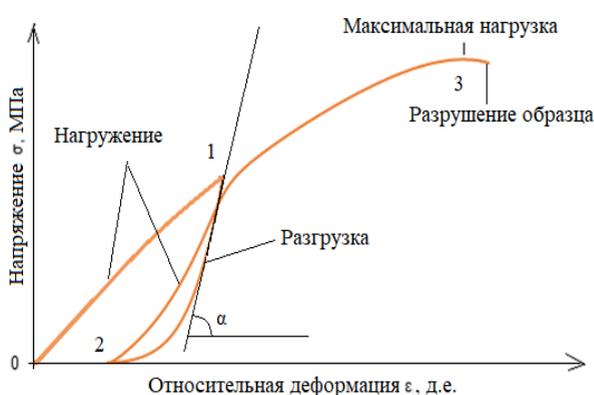
- погружение образцов в воду температурой 25 °С на пять час.;
- высушивание образцов при температуре около 70 °С в сушильном шкафу в течение 42 час.;
- высушивание образцов при комнатной температуре на воздухе в течение не менее 1 час.;
- измерение массы образцов для определения процента потери веса и водопоглощения;
- определение прочности на сжатие стандартными методами ГОСТ после 0, 1, 3, 6, 9, 12 и 15 циклов увлажнения-высыхания образцов.

5. *Определение модуля упругости в лабораторных условиях*

Предложен метод определения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в лабораторных условиях. Приведены результаты экспериментальных исследований по практическому применению этого метода.

5.1. *Изготовление образцов.* В лабораторных условиях изготавливаются образцы-цилиндры. Возможно использование образцов-цилиндров или образцов-кубов, отобранных из конструкции.

5.2. *Нагружение лабораторных образцов на прессе.* Нагружение образцов укрепленного грунта производится на прессе статической нагрузкой. При достижении значения на уровне 50 % от разрушающей нагрузки производится разгрузка образца и повторное нагружение до разрушающей нагрузки (рисунок 1).



0–1 – нагружение (линейная зависимость между  $\sigma$  и  $\epsilon$ ; прямая упругих деформаций – соблюдается закон Гука);  
1–2 – разгрузка (область пластических деформаций, нелинейная зависимость между  $\sigma$  и  $\epsilon$ );  
2–3 – нагружение

**Рисунок 1 – Определение модуля упругости грунта, укрепленного портландцементом**

5.3. *Многократное циклирование.* Для оценки долговечности слоев из укрепленных грунтов от воздействия нагрузок транспортных средств образец подвергается многократному циклированию. Количество циклов назначается в зависимости от числа приложений расчетной нагрузки и расчетной скорости движения. Рекомендуемая продолжительность повторной загрузки составляет 1 с., из которых 0,1 с. составляет период нагружения, а 0,9 с. составляет период разгрузки.

Рекомендуется использовать частоту 1,0–3,0 Гц для определения начального модуля упругости и количества нагружений до падения модуля упругости в 2 раза.

5.4. *Обработка данных.* Модуль упругости (ветвь 1–2, рисунок 2)

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\epsilon}, \quad (1)$$

За конечный результат принимается среднее арифметическое значение серии лабораторных образцов

$$\bar{E} = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_n}{n}, \quad (2)$$

где  $E_1, E_2, \dots, E_n$  – значения модуля упругости образцов 1, 2, ... n;  
n – количество образцов.

Единичные отклонения

$$E_i = \bar{E} - E_{1.2...n}. \quad (3)$$

Средняя квадратическая ошибка отдельного измерения

$$S = \sqrt{\frac{\sum(\bar{E} - E_i)}{n-1}}. \quad (4)$$

Коэффициент вариации

$$v = \frac{S}{\bar{E}}. \quad (5)$$

Итоговое значение модуля упругости

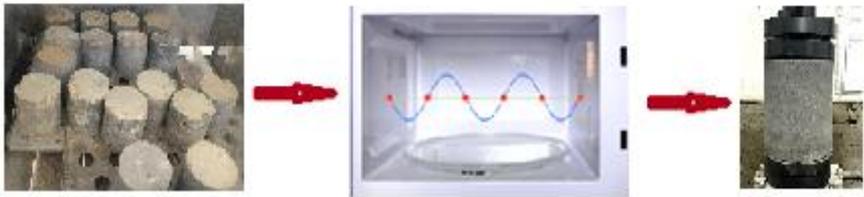
$$E = \bar{E}(1 - t \cdot v), \quad (6)$$

где  $t$  – коэффициент Стьюдента.

Предложенный метод позволяет разрабатывать составы грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, с заданными проектной документацией значениями модуля упругости в лабораторных условиях.

*б. Ускоренный подбор состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами*

Для сокращения сроков подбора составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, и снижения трудоемкости лабораторных испытаний предложено использовать микроволновое излучение для обработки образцов с целью ускоренного набора прочности. Обработка микроволновым излучением с частотой около 2400 МГц вызывает разогрев образцов, ускоренное схватывание и твердение (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Твердение образцов в микроволновом поле**

Ускоренный метод сводится к следующей последовательности:

- назначаются 3–4 состава с различным содержанием вяжущих;
- изготавливаются образцы укрепленного грунта;
- образцы обрабатываются микроволновым излучением;
- производится определение прочности на сжатие;
- из 3–4 назначенных составов выбирается состав с наибольшим значением прочности на сжатие;
- производится изготовление образцов в количестве, необходимом для определения всех физико-механических характеристик;
- проводятся лабораторные испытания требуемых физико-механических характеристик.

7. *Прогнозирование конечных свойств грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами*

Рассмотрены методы прогнозирования прочностных характеристик укрепленных грунтов, разработанные различными авторами. Применение на практике рассмотренных уравнений затруднительно, так как на процессы структурообразования влияет много факторов: характеристики вяжущего материала, минералогия грунта, число пластичности, значение оптимальной влажности и др.

Учитывая большое количество факторов, влияющих на структуру укрепленных грунтов, а также то, что золоотвалы представляют собой крупные техногенные месторождения, прогнозирование свойств целесообразно осуществлять путем разработки математических моделей для каждого отдельно взятого золоотвала.

**В четвертой главе** приведены результаты исследований местных грунтов и золошлаковых смесей ТЭЦ (таблицы 2–6).

**Таблица 2 – Результаты испытаний физико-механических свойств грунтов**

Р/н пробы	Классификация по ГОСТ 25100
Г-1	Суглинок тяжёлый
Г-6	Суглинок легкий песчаный твердый
Г-22	Супесь песчаная твердая
Г-18/1	Крупнообломочный галечниковый
Г-19/1	Крупнообломочный галечниковый заполнитель песок гравелистый
Г-19/2	Песок средней крупности
Г-21/1	Крупнообломочный гравийный заполнитель песок гравелистый

**Таблица 3 – Физико-механические характеристики грунтов**

Наименование показателя	Ед. изм.	Результаты испытаний						
		Г-1	Г-6	Г-19/2	Г-19/1	Г-21/1	Г-22	Г-18/1
Влажность на границе текучести	%	31,45	25,78	–	–	–	19,7 5	–
Влажность на границе раскатывания	%	17,78	16,43	не раскат. в жгут диам. 3 мм	не раскат. в жгут диам. 3 мм	не раскат. в жгут диам. 3 мм	14,3 2	не раскат. в жгут диам. 3 мм
Число пластичности	%	13,67	9,35	–	–	–	5,43	–
Показатель текучести	д.е.	-0,93	-1,4	–	–	–	-2,4	–
Макс. плотность	г/см <sup>3</sup>	1,91	1,99	1,7	1,83	1,86	1,83	–
Оптимальная влажность	%	13,17	9,83	9,76	4,75	5,13	13,3 5	–
pH	–	6,01	6,9	8,86	–	–	8,53	–

По результатам химического анализа золошлаковых смесей установлено, что основными их компонентами являются оксид алюминия и оксид кремния (таблица 4).

**Таблица 4 – Химический состав золошлаковых смесей**

Наименование	ТЭЦ 9	Н-3 ТЭЦ	ТЭЦ 6	ТЭЦ 6 (ТИ и ТС)	Н-И ТЭЦ	Н-И ТЭЦ Ш. уч.	ТЭЦ 10	ТЭЦ 11	ТЭЦ 12	У-И ТЭЦ
$Al_2O_3$	24,3	29,0	10,1	13,4	22,2	27,3	23,4	20,4	18,8	17,2
$Fe_2O_3$	7,9	6,3	14,6	11,2	13,6	8,9	8,7	26,8	38,9	8,6
$SiO_2$	56,1	51,1	51,9	58,9	50,4	52,1	56,9	43,6	48,0	50,5
$SO_3$	0,2	1,0	0,6	0,7	0,6	0,5	0,2	0,7	1,3	0,5
$TiO_2$	0,6	0,7	0,4	0,5	0,7	0,8	0,6	0,7	0,4	0,7
$Mn_2O_4$	0,1	–	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	–	–	0,2
$P_2O_3$	0,1	–	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	–	–	0,2
$MgO$	1,5	1,2	4,8	2,9	1,7	1,1	1,7	1,3	1,4	2,8
$CaO$	4,5	4,9	15,0	9,2	6,8	4,3	4,4	4,9	4,6	12,8
$K_2O$	0,8	0,7	0,5	0,9	0,9	0,8	1,2	0,7	1,2	0,9
$Na_2O$	0,2	0,0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,4
Mo	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3

Золошлаковые смеси представляют собой техногенные грунты. По результатам испытаний определены характеристики золошлаковых смесей (таблица 5).

**Таблица 5 – Результаты испытаний золошлаковых смесей ТЭЦ**

ТЭЦ	Наименование показателя								
	Потери массы при прокаливании, %	Содержание горючих веществ	Относительная деформация морозного пучения, д.е.		рН	Коэффициент фильтрации, м/сут	Модуль деформации, МПа	Удельное сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, °
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ТЭЦ -6	13,77	высокое	0,019	слабопучинистый	–	0,04	10,53	0,002	13
ТЭЦ -7	15,4	высокое	–	–	8,86	–	14,29	0,003	17
ТЭЦ -9	1,34	низкое	0,043	среднепучинистый	–	0,07	–	–	–
ТЭЦ -10	–	–	–	–	8,75	–	–	–	–
ТЭЦ -11	4,49	низкое	0,022	слабопучинистый	–	0,02	9,52	0,002	22

Окончание таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ново-Иркутская	–	–	–	–	9,39	–	14,29	0,00 3	23
Усть-Илимская	3	низкое	–	–	–	–	4,55	0,00 7	19
Ново-Иркутская (Шел.уч.)	14,45	высокое	0,0005	практически непучинистый	8,77	–	10,53	0,00 2	14
Участок № 1 ТЭЦ-9	–	–	0,039	среднепучинистый	–	0,12	–	–	–
ТЭЦ-12	–	–	–	–	8,15	–	–	–	–
Участок ТИИТС ТЭЦ-6	5,5	среднее	0,028	слабо пучинистый	–	0,03	–	–	–
Ново-Зиминская	1,13	низкое	0,0015	практически непучинистый	9,71	–	–	–	–

В результате установлено следующее.

1. Золошлаковые смеси классифицируются как пески мелкие, гравелистые и пылеватые. Кривые гранулометрического состава в основном имеют крутой наклон с большим содержанием фракций 0,1–1 мм. Золошлаковые смеси являются неоднородными по гранулометрическому составу (таблицы 6 и 7).

**Таблица 6 – Результаты определения гранулометрического состава золошлаковых смесей**

Лабораторные пробы	Размер сит, мм								Классификация по ГОСТ 25100
	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ТЭЦ-6	0,00	0,06	0,32	0,41	0,85	5,53	100,0 0	0,00	песок пылеватый
ТЭЦ-9	0,99	2,28	4,32	6,68	8,91	13,68	30,19	100,00	песок пылеватый
ТЭЦ-10	0,00	0,28	0,60	1,30	2,43	5,51	27,12	100,00	песок пылеватый
ТЭЦ-11	0,00	0,00	0,04	0,15	0,48	1,52	7,47	100,00	песок пылеватый
ТЭЦ-12	1,72	2,85	4,54	5,83	6,83	16,54	56,30	100,00	песок пылеватый
Ново-Иркутская	0,22	0,45	1,24	2,44	5,57	17,86	49,07	100,00	песок пылеватый
Ново-Иркутская (Шел.уч.)	0,27	0,55	0,86	1,19	1,73	6,85	47,35	100,00	песок пылеватый

## Окончание таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Усть-Илимская	5,52	13,9 6	30,2 8	57,8 0	68,0 3	73,22	82,94	100,00	песок гравели- стый
Ново-Зиминская	0,61	1,69	2,31	3,16	4,57	9,77	26,86	100,00	песок пылеватый

Таблица 7 – Разновидность золошлаковых смесей в соответствии с классификацией ГОСТ 25100

ТЭЦ	Степень неоднородности Су	Разновидность
ТЭЦ-6	64,5	неоднородные
ТЭЦ-9	6,7	неоднородные
ТЭЦ-10	5,5	неоднородные
ТЭЦ-11	3,7	неоднородные
ТЭЦ-12	9,4	неоднородные
Ново-Иркутская ТЭЦ	8,8	неоднородные
Шелеховский участок Ново-Иркутской ТЭЦ	6,8	неоднородные
Ново-Зиминская ТЭЦ	6,0	неоднородные
Усть-Илимская ТЭЦ	26,5	неоднородные

2. Низкая прочность частиц золошлаковых смесей приводит к их дробности при уплотнении и, как следствие, к значительному изменению первоначального гранулометрического состава золошлаковых смесей (рисунки 3 и 4).

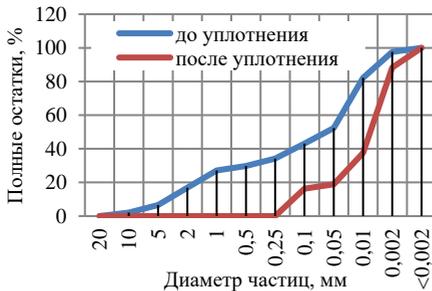


Рисунок 3 – Гранулометрический состав Усть-Илимской ТЭЦ

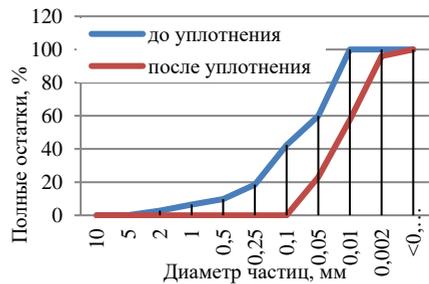


Рисунок 4 – Гранулометрический состав ТЭЦ 10

Для количественной оценки дробления частиц при уплотнении предлагается использовать введенный в работе показатель степень измельчения частиц

$$I = \frac{\sum a_i \cdot d_i}{\sum a_j \cdot d_j} \quad (7)$$

где  $a_i, a_j$  – содержание частиц каждой фракции до и после уплотнения, соответственно, %

$d_i, d_j$  – диаметр частиц до и после уплотнения, соответственно, мм.

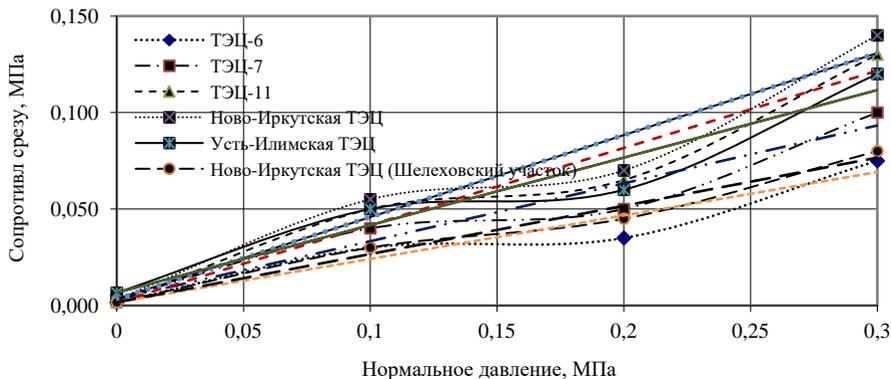
Результаты определения степени измельчения приведены в таблице 8.

**Таблица 8 – Результаты определения степени измельчения I образцов проб золошлаковых смесей**

Наименование ТЭЦ	Степень измельчения I
Усть-Илимская ТЭЦ	38,27
Ново-Иркутская ТЭЦ	32,59
Ново-Иркутская ТЭЦ (Шелеховский участок)	12,47
ТЭЦ-6	7,07
ТЭЦ-7	1,31
ТЭЦ-9	8,35
ТЭЦ-10	10,74
ТЭЦ-11	46,74
ТЭЦ-12	3,99

3. Естественная влажность варьируется в диапазоне 20–30 %, что позволяет транспортировать золошлаковые смеси к месту производства строительных работ без дополнительных мероприятий по обеспыливанию.

4. Определение сопротивления сдвигу выполнено на образцах, уплотненных до максимальной плотности при оптимальной влажности. Золошлаковые смеси имеют низкие значения угла внутреннего трения и сцепления в сравнении с природными песчаными грунтами (рисунок 5).



**Рисунок 5 – График зависимости сопротивления сдвигу от нормального давления**

Значения угла внутреннего трения до 23° обусловлены окатанной формой частиц и незначительным количеством контактов зацепления, что при повышенной влажности приводит к выдавливанию золошлаковой смеси из-под вальца катка при уплотнении.

5. Установлено, что золошлаковые смеси имеют модуль деформации E0 в пределах 5–14 МПа (рисунок 6).

Давление, МПа

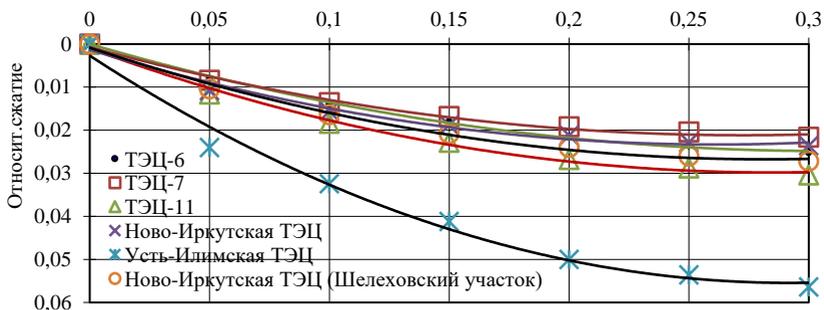


Рисунок 6 – График зависимости относительного сжатия от давления

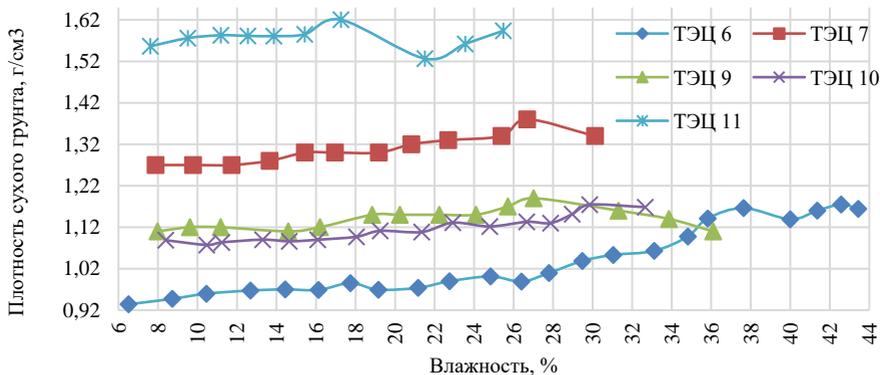
б. Золошлаковые смеси относятся ко II и III классу по эффективной удельной активности природных радионуклидов. По степени негативного воздействия на окружающую среду золошлаковые смеси относятся к V классу «Практически неопасные отходы» (таблица 9).

Таблица 9 – Результаты определения класса опасности для окружающей природной среды и удельной эффективности активности природных радионуклидов золошлаковых смесей

Наименование ТЭЦ	Класс опасности	Требования Сан-ПиН 2.6.1.2523-09 при строительстве автомобильных дорог в пределах населенных пунктов (II класс)	Требования Сан-ПиН 2.6.1.2523-09 при строительстве автомобильных дорог вне населенных пунктов (III класс)	Удельная эффективная активность природных радионуклидов, Бк/кг
Ново-Иркутская ТЭЦ	V	$A_{эфф} \leq 740$ Бк/кг	$A_{эфф} \leq 1500$ Бк/кг	224–382
Ново-Иркутская ТЭЦ (Шел. уч.)	V			213–312
ТЭЦ-10	V			250–408
ТЭЦ-9	V			215–376
ТЭЦ-11	V			242–259
ТЭЦ-6	V			45–110
ТЭЦ-6 ТИиТС	V			61–327
Усть-Илимская ТЭЦ	V			31–259

Золошлаковые смеси ТЭЦ можно применять для строительства земляных сооружений в населенных пунктах и вне их.

7. Графики максимальной плотности имеют два и более выраженных максимума (рисунок 7).



**Рисунок 7 – Графики стандартного уплотнения проб золошлаковых смесей ТЭЦ**

8. Относительная деформация морозного пучения золошлаковых смесей, как правило, не превышает 0,035.

В работе предложены составы грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в том числе на основе применения золошлаковых смесей ТЭЦ (таблица 10). Показано, что применение золошлаковых смесей в составах укрепленных грунтов позволяет повысить марки по морозостойкости и прочности.

**Таблица 10 – Результаты подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими**

Грунт	Неорганическое вяжущее	Сод-е, %	Марка по прочности		Марка по морозостойкости	
			ГОСТ 23558	Фактическое значение	ГОСТ 23558	Фактическое значение
Суглинок легкий песчаный твёрдый	Известь	6	M10	M40	F5	F15
Песок средней крупности	Портландцемент	6		M40		F50
Супесь песчаная твердая	Известь	8		–		–
Золошлаковая смесь	Портландцемент	6		M75		F50
	Известь	6	M40	F15		

По результатам рентгенофазового анализа определен минералогический состав отдельных составов укрепленных материалов (таблица 11).

**Таблица 11 – Результаты определения количественного фазового анализа**

Фазовый состав	Количество, %				
	ЗШС ТЭЦ-12	Составы			
		ЗШС ТЭЦ-12, укрепленная портландцементом	ЗШС Ново-Иркут. ТЭЦ (Шел. уч.), укрепленная портландцементом	ЗШС Ново-Иркут. ТЭЦ (Шел. уч.) с грунтом, укрепленная известью	ЗШС Усть-Илимской ТЭЦ, укрепленная портландцементом
Кварц	50	48	29,58	20,95	16,17
Муллит 3:2	17	13	25,94 %	–	17,50
Полевой шпат (альбит)	13	15	–	17,10	–
Микроклин максимум	–	–	–	6,06	12,78
Силлиманит	–	–	23,91 %	–	3,94
Кальцит	5	6	7,48 %	3,16	24,39
Анортит	–	–	9,75 %	3,78	–
Гегит	5	–	–	–	–
Маггемит	8	18	–	–	1,56
Волластонит 2М	–	–	3,34 %	4,32	–
Санидин NaO,1	–	–	–	6,56	–
Каолинит-1А(БИШ)	–	–	–	2,37	–
Нордстрандит	–	–	–	3,62	–
Периклаз	–	–	–	1,59	–
Витерит	–	–	–	–	10,78
Доломит	–	–	–	–	2,20
Анортит	–	–	–	–	10,67
Маггемит	8	18	–	–	1,56
Волластонит 2М	–	–	3,34 %	4,32	–
Санидин NaO,1	–	–	–	6,56	–
Каолинит-1А(БИШ)	–	–	–	2,37	–
ИЛЛИТ2М1	–	–	–	30,50	–
Нордстрандит	–	–	–	3,62	–
Периклаз	–	–	–	1,59	–
Витерит	–	–	–	–	10,78
Доломит	–	–	–	–	2,20
Анортит	–	–	–	–	10,67

Дифракционная картина показана на рисунках 8 и 9.

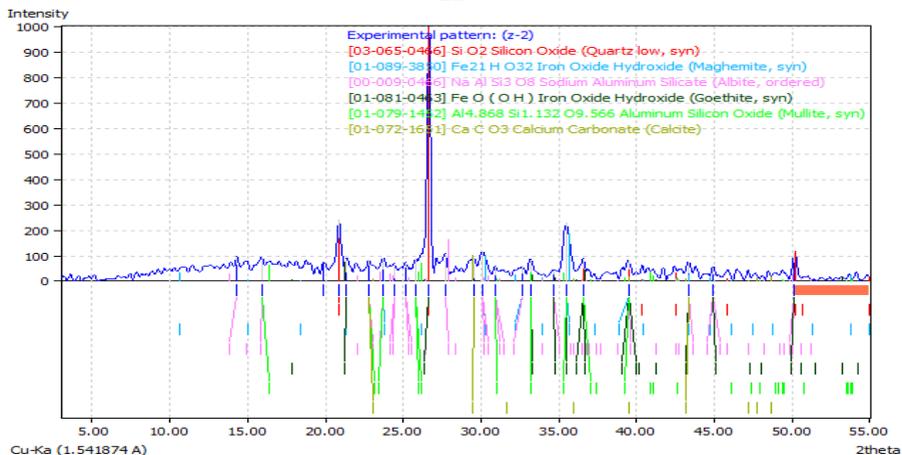


Рисунок 8 – Рентгенограмма золошлаковой смеси ТЭЦ-12

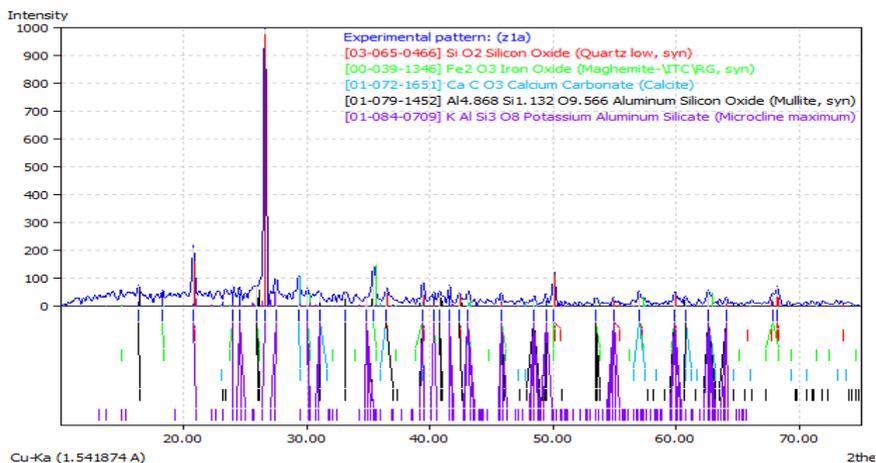


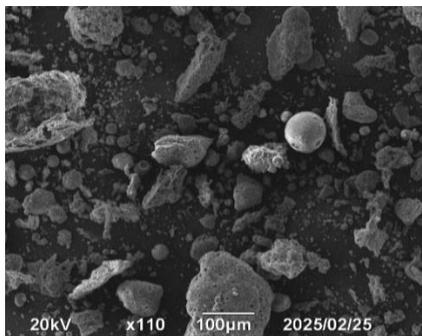
Рисунок 9 – Рентгенограмма золошлаковой смеси ТЭЦ-12, укрепленной портландцементом

Установлено, что интенсивность кристаллических фаз очень низкая. Основным минералом, присутствующим в золошлаковых смесях исследуемых проб, является кварц. Другие фазы включают муллит и полевоы шпат.

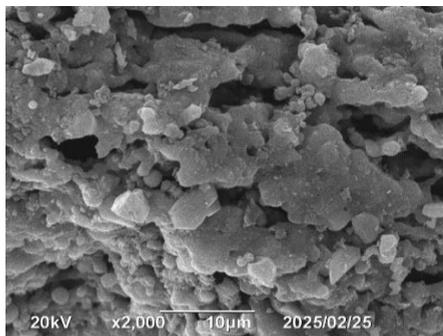
Несмотря на высокое содержание оксидов алюминия и кремния, глинистые минералы в золошлаковых смесях отсутствуют, что объясняет отсутствие пластичности и низкие значения относительной деформации морозного пучения.

По результатам электронной микроскопии установлено, что золошлаковая смесь представлена частицами неправильной формы и частицами сфери-

ческой формы (рисунок 10). Частицы неправильной формы имеют пористую структуру (рисунок 11).



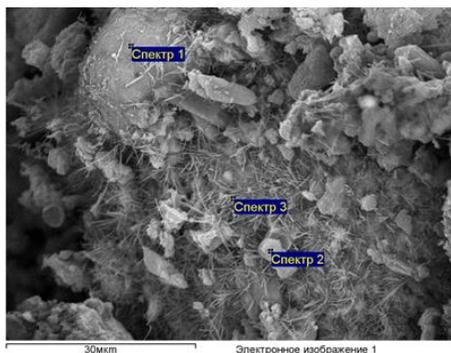
**Рисунок 10 – Структура золошлаковой смеси ТЭЦ-12**



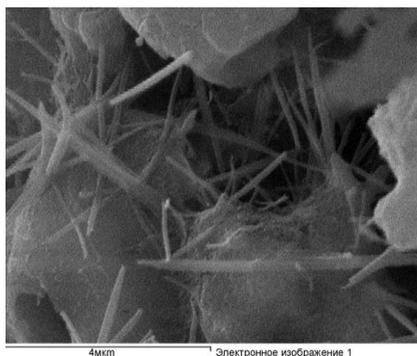
**Рисунок 11 – Структура крупных агломератов неправильной формы золошлаковой смеси ТЭЦ-12**

Сферы имеют пористые стенки переменной толщины и крупные поры.

Микроструктура золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом, приведена на рисунках 12, 13. Структура изучаемого образца – пористая, размер пор – в пределах 1–4 мкм. Поры заполнены связующим веществом в виде игольчатых кристаллов портландцемента. Диаметр кристаллов в пределах 0,5 мкм.



**Рисунок 12 – Микроструктура золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом**



**Рисунок 13 – Игольчатые кристаллы гидратированного портландцемента**

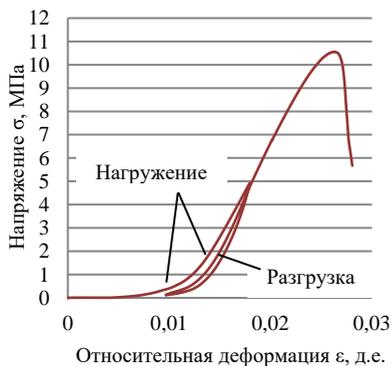
Установлено, что прочность на сжатие образцов укрепленного грунта после обработки их микроволновым излучением близка к прочности на сжатие в сухом состоянии в проектном возрасте (таблица 12).

**Таблица 12 – Результаты определения прочности на сжатие укрепленных грунтов после обработки микроволновым излучением**

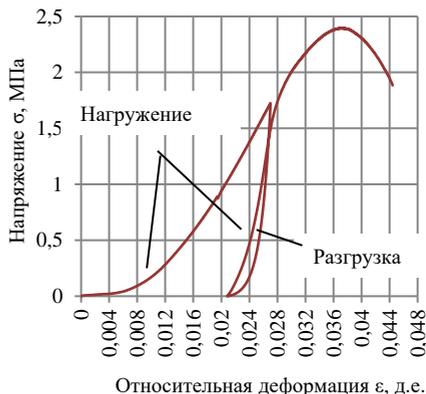
Наименование грунта	Вязущее	Содержание вяжущего, %	Предел прочности на сжатие после обработки микроволновым излучением, МПа	Предел прочности на сжатие после выдерживания образцов в нормальных условиях, МПа		
				В возрасте 28 сут.		В возрасте 90 сут.
				В сухом состоянии	В водонасыщенном состоянии	В водонасыщенном состоянии
Суглинок	Известь	6	4,06	3,90	2,71	3,89
Супесь	Портландцемент	6	3,26	4,76	3,85	–
Суглинок	Портландцемент	4	4,69	9,05	4,58	–

Показано, что путем вариации параметров микроволнового излучения и времени обработки в зависимости от влажности, содержания крупных частиц и размера образца обеспечивается лучшая сходимости результатов твердения при обработке микроволновым излучением и при твердении в нормальных условиях. Использование микроволнового излучения для подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, позволяет сократить сроки и трудоемкость работ в строительных лабораториях.

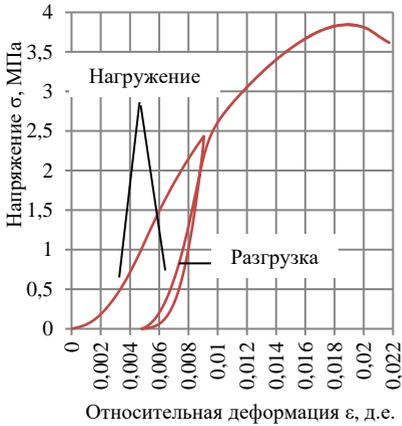
С использованием разработанного метода определены значения модуля упругости укрепленных грунтов (таблица 13, рисунки 14–17).



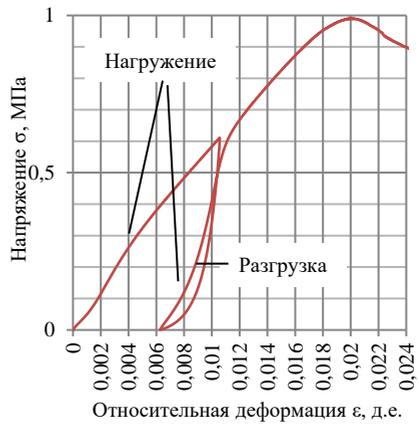
**Рисунок 14 – Определение модуля упругости суглинка, укрепленного портландцементом 4 %**



**Рисунок 15 – Определение модуля упругости супеси, укрепленной портландцементом 6 %**



**Рисунок 16 – Определение модуля упругости песка средней крупности, укрепленного портландцементом 6 %**



**Рисунок 17 – Определение модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом 6 %**

**Таблица 13 – Сводная таблица результатов определения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами**

Наименование грунта	Вяжущее	Содержание вяжущего, %	Прочность на сжатие, МПа	Модуль упругости E, МПа
Гравийный грунт с добавлением золошлаковой смеси	Портландцемент	6	6,49	674
Суглинок	Портландцемент	4	1,48	500
Золошлаковая смесь (песок средней крупности)	Портландцемент	7	2,92	600
Золошлаковая смесь (песок пылеватый)	Портландцемент	6	0,83	300
Супесь	Портландцемент	6	2,3	282
Песок средней крупности	Портландцемент	6	4,09	566
Супесь	Известь	7	0,19	50
Супесь	Известь	6	0,16	50
Суглинок	Известь	10	3,62	553
Суглинок	Известь	6	3,89	217
Золошлаковая смесь	Известь	7	4,22	696
Золошлаковая смесь	Известь	6	3,71	470

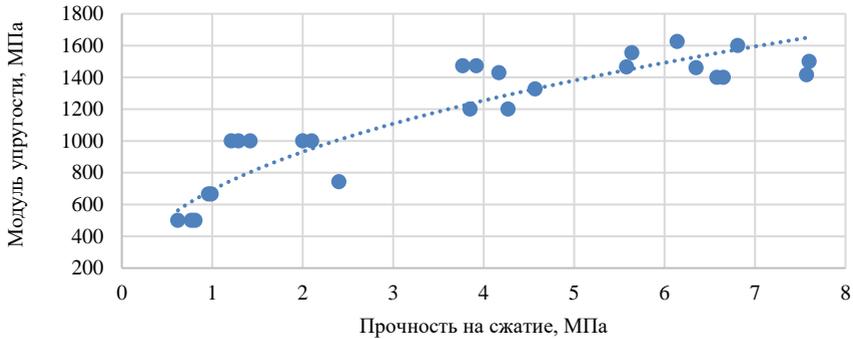
На основе полученных результатов определена эмпирическая зависимость модуля упругости от прочности на сжатие для грунтов, укрепленных портландцементом (рисунок 18).

$$E = 691,57R_{сж}^{0,4292}, \quad (8)$$

где 691,57 и 4292 – параметры регрессии;

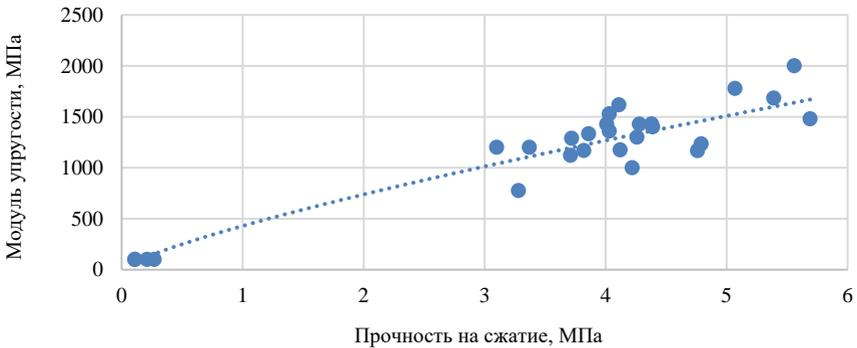
$R_{сж}$  – прочность на сжатие, МПа.

Коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,85.



**Рисунок 18 – График зависимости модуля упругости от прочности на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом**

Также определена эмпирическая зависимость модуля упругости от прочности на сжатие грунтов, укрепленных известью (рисунок 19).



**Рисунок 19 – График зависимости модуля упругости от прочности на сжатие грунтов, укрепленных известью**

$$E = 429,7R_{сж}^{0,7805}, \quad (9)$$

где 429,7 и 0,7805 – параметры регрессии;

$R_{сж}$  – прочность на сжатие, МПа.

Коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,96.

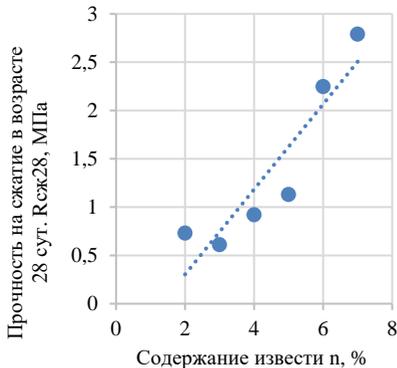
По результатам проведенных исследований определены рекомендуемые расчетные значения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами  $E_p$ , для проектирования конструкций земляных сооружений (таблица 14).

Предложенные расчетные значения модуля упругости золошлаковых смесей, укрепленных портландцементом и известью, и зологрунтовых смесей позволяют повысить надежность проектных решений, а также расширяют возможности применения золошлаковых смесей ТЭЦ в земляных сооружениях.

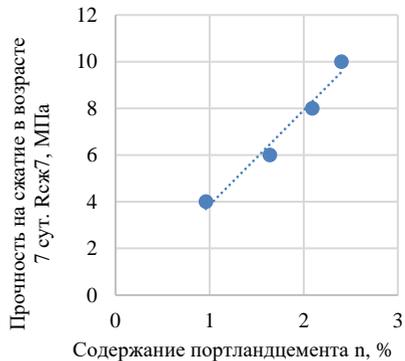
**Таблица 14 – Рекомендуемое расчетное значение модуля упругости**

Наименование грунта	Вяжущее	Марка по прочности	Значение модуля упругости, Е МПа	$K_k$	Рекомендуемое расчетное значение модуля упругости, $E_p$ МПа
Гравийный грунт + ЗШС	Портландцемент	M60	1340	0,5	670
ЗШС (песок средней крупности)	Известь	M40	1380	0,5	690
ЗШС (песок средней крупности)	Портландцемент	M20	1200	0,5	600
ЗШС (песок пылеватый)	Портландцемент	M10	600	0,5	300

На основе полученных результатов определена эмпирическая зависимость прочности на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной известью, от содержания извести в возрасте 28 сут. (рисунок 20) и эмпирическая зависимость прочности на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом, от содержания портландцемента в возрасте 7 сут. (рисунок 21) для золошлаковой смеси Усть-Илимской ТЭЦ Иркутской области. Для описания данных использована линейная аппроксимация.



**Рисунок 20 – График зависимости прочности на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной известью, от содержания извести**



**Рисунок 21 – График зависимости прочности на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом, от содержания портландцемента**

Прочность на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной известью:

$$R_{\text{сж}28} = 0,441n - 0,578, \quad (10)$$

где 0,441 и 0,578 – параметры регрессии;

$n$  – содержание извести, %.

Коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,84, что указывает на высокую степень соответствия данных полученному уравнению.

Прочность на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом:

$$R_{\text{сж}7} = 4,069n - 0,212, \quad (11)$$

где 4,069 и 0,212 – параметры регрессии;

$n$  – содержание портландцемента, %.

Коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,97, что указывает на высокую степень соответствия данных полученному уравнению.

На основе разработанных составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, с использованием золошлаковых смесей (см. таблицу 13) рассчитаны типовые конструкции дорожных одежд автомобильных дорог в количестве 66 конструкций. Установлено, что использование предложенных технических решений позволило снизить общую толщину дорожных одежд со слоями из золошлаковых смесей ТЭЦ по сравнению со слоями из традиционных материалов от 0 до 48 % (таблица 15).

**Таблица 15 – Уменьшение общей толщины конструкции дорожной одежды со слоями из золошлаковых смесей, укрепленных неорганическими вяжущими, в сравнении с применением традиционных материалов**

Категория автомобильной дороги	Тип дорожной одежды	Снижение толщины конструкции для схемы увлажнения, %	
		1, 2	3
V	Переходный	7–11	9–11
	Облегченный	2–7	5–9
II	Переходный	6–48	6–48
	Облегченный	0–48	0–48
	Капитальный	10–48	8–48
III	Облегченный	–	6–16
	Капитальный	7–12	2–12
II	Капитальный	4–32	2–32

В пятой главе изложены результаты апробации и внедрения предложенных методов и разработанных составов укрепленных грунтов. В качестве объекта апробации выбраны автомобильные дороги, так как их слои воспринимают значительные транспортные нагрузки и нагрузки от собственного веса; к элементам и материалам автомобильных дорог предъявляются наиболее высокие технические требования в сравнении с другими земляными сооружениями. Кроме того, многослойность конструкций автомобильных дорог позволяет

оценить полученные в диссертации результаты и разработанные составы в разных условиях работы и при разных воздействиях.

*1. Строительство экспериментальных конструкций дорожных одежд*

В лабораторных условиях подобраны составы грунтов, укрепленных портландцементом, для строительства опытно-экспериментальных конструкций дорожных одежд (таблицы 16 и 17).

Разработанные составы укрепленного грунта соответствуют марке по прочности М40 и марке по морозостойкости F25.

**Таблица 16 – Составы укрепленного грунта**

Наименование компонента	Содержание компонента в смеси, %	
	Состав 1	Состав 2
Грунт	75,2	-
Золошлаковая смесь	18,8	92
Портландцемент	6	8
Вода	13,26 (от массы сухого грунта)	37,72 (от массы сухого грунта)

**Таблица 17 – Физико-механические характеристики составов укрепленного грунта**

Наименование показателя	Ед. изм.	Результаты испытаний	
		Состав 1	Состав 2
Максимальная плотность	г/см <sup>3</sup>	1,83	1,19
Оптимальная влажность	%	13,26	37,72
Прочность на сжатие, в возрасте:			
7 сут (в водонасыщенном состоянии)	МПа	5,12	2,12
28 сут (в водонасыщенном состоянии)	МПа	7,54	5,27
28 сут (в сухом состоянии)	МПа	8,23	5,34
Прочность на растяжение при изгибе, в возрасте:			
28 сут (в водонасыщенном состоянии)	МПа	1,32	1,12
Марка по прочности	–	М40	М40
Водостойкость	–	0,92	0,99
Морозостойкость:			
прочность на сжатие (25 циклов)	МПа	5,05	4,24
прочность на сжатие (50 циклов)	МПа	3,34	3,43
Марка по морозостойкости	–	F50	F50

По результатам расчета конструкций дорожных одежд разработаны варианты конструкций, приведенные в таблице 18.

**Таблица 18 – Варианты опытно-экспериментальных конструкций дорожных одежд автомобильной дороги и/н 25 ОП МЗ 25Н-217 «Егоровщина – Рязановщина»**

Конструктивный элемент	Вариант 1		Вариант 2	
	Материал	Толщина <i>h</i> , м	Материал	Толщина <i>h</i> , м
1	2	3	4	5
Грунт земляного полотна	суглинок	суглинок	–	–

**Окончание таблицы 18**

1	2	3	4	5
Покрытие	Асфальтобетон плотный из горячей мелкозернистой смеси марки I тип Б по ГОСТ 9128	0,04	Асфальтобетон плотный из горячей мелкозернистой смеси марки I тип Б по ГОСТ 9128	0,04
Основание	Галечниковый грунт с песчаным заполнителем 80 % + золошлаковая смесь 20 % + портландцемент 6 %	0,20	Золошлаковая смесь + портландцемент 8 % (от массы смеси грунтов)	0,20

Построены экспериментальные конструкции дорожной одежды (рисунок 22). Работы по строительству оснований проведены с использованием технологии холодной регенерации.

Определено значение коэффициента запаса на уплотнение золошлаковой смеси ТЭЦ, укрепленной портландцементом:

$$K_{\text{зап}} = 1,5.$$

Значение коэффициента запаса на уплотнение золошлаковой смеси ТЭЦ, укрепленной портландцементом, позволит определять толщину отсыпаемых слоев земляных сооружений, а также количество золошлаковой смеси, которое необходимо транспортировать для возведения слоев.



**Рисунок 22 – Строительство дорожной одежды на автомобильной дороге н/н 25 ОП МЗ 25Н-217 «Егоровщина – Рязановщина» (2019)**

Определение и сопоставление модуля упругости устроенных слоев выполнено предложенным в работе методом и методом использования установки динамического нагружения «ДИНА-3». Модуль упругости на поверхности существующей дорожной одежды до проведения строительных работ составил 40–46 МПа. Результаты определения модуля упругости на поверхности экспериментальных конструкций дорожной одежды приведены в таблице 19.

**Таблица 19 – Результаты определения модуля упругости на поверхности дорожной одежды**

Местоположение	Прогиб, мм	Температура покрытия, °С	Значение прочности, МПа
км 0+596 право	2,265	30,0	79,482
км 0+596 лево	1,794	26,2	100,316
км 0+363 лево	1,402	29,4	128,388
км 0+363 право	1,424	30,8	126,404

Модуль упругости на поверхности дорожной одежды увеличился с 40–46 до 79–128 МПа. Расчетное значение модуля упругости укрепленного материала, определенное после 8 мес. эксплуатации с использованием установки динамического нагружения «ДИНА-3», составляет 300–350 МПа. Значение модуля упругости, определенное в лабораторных условиях после 8 мес. эксплуатации, составляет 365 МПа. Отклонение – 4–17 %. Увеличение модуля упругости в период эксплуатации с 300 до 365 МПа вызвано продолжением развития процессов структурообразования после достижения материалом проектного возраста (28 сут.)

*2. Строительство опытно-экспериментального участка земляного полотна*

Так как модуль упругости золошлаковых смесей ТЭЦ составляет в среднем 50 МПа, конструкция дорожной одежды имеет увеличенный слой фракционированного щебня в сравнении с конструкцией на земляном полотне из местного песчаного грунта (таблица 20).

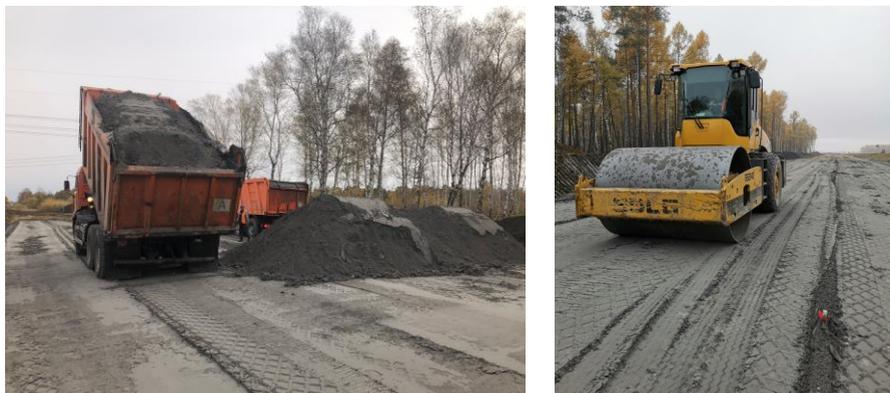
**Таблица 20 – Конструкции дорожных одежд**

Материал	Толщина h, м	Материал	Толщина h, м
Горячий плотный асфальтобетон, тип Б, II марки (щебень М1000) по ГОСТ 9128-2013	0,05	Плотный асфальтобетон II марки, тип Б по ГОСТ 9128-2013 (щебень М1000)	0,05
Горячий пористый асфальтобетон II марки (щебень М800) по ГОСТ 9128-2013	0,07	Пористый асфальтобетон II марки по ГОСТ 9128-2013 (щебень М800)	0,07
Щебень М1000 по ГОСТ 8267-93	0,40	Пористый асфальтобетон II марки по ГОСТ 9128-2013 (щебень М800)	0,31
Песок по ГОСТ 8736-2014	0,30	Песок по ГОСТ 8736-2014	0,30
Земляное полотно из золошлаковой смеси	–	Земляное полотно из местного песчаного грунта	–

В 2021 г. проведены работы по строительству экспериментального участка автомобильной дороги с земляным полотном:

- из золошлаковой смеси ТЭЦ-10 общей протяженностью 150 м;
- из местного песчаного грунта.

Технология производства работ аналогична технологии возведения слоев из местных грунтов (рисунок 23).



**Рисунок 23 – Строительство земляного полотна на автомобильной дороге Р-255 «Сибирь. Новосибирск – Кемерово – Красноярск – Иркутск» на участке км 1797+000 – км 1842+000 (2021)**

Эксплуатация опытно-экспериментальной конструкции земляного полотна производится в сложных условиях:

- повышенная влажность основания и, как следствие, повышенная влажность слоев земляного полотна, что обусловлено непосредственной близостью ручья Целота, а также геологическими особенностями местности и отсутствием естественного водоотвода;

- интенсивность движения транспортных средств – 13 316 авт./сут.; состав потока включает до 45 % грузового транспорта весом более 25 т.

По результатам экспериментальных работ установлено следующее.

- 1) Золошлаковые смеси в сухом состоянии обладают значительной пылимостью. Поэтому при необходимости временного складирования и хранения золошлаковой смеси в буртах необходимо проводить периодическое увлажнение или укрытие неткаными материалами. Не допускается устройство покрытий из золошлаковых смесей, укрепленных неорганическими вяжущими, без устройства защитных слоев.

- 2) Уплотнение золошлаковых смесей сопровождается выдавливанием смеси из-под вальца катка, увеличением ширины слоя и уменьшением его толщины. Поэтому контроль влажности золошлаковой смеси имеет особенно большое значение. Также для исключения выпора золошлаковой смеси рекомендуется предварительное устройство обочин или валиков по кромке проезжей части из материала обочин дорожной одежды, которые выступают в роли упора при уплотнении слоя.

- 3) При необходимости движения строительной техники по устроенному слою земляного полотна из золошлаковой смеси или при длительных технологических перерывах рекомендуется устройство слоя из песка.

4) При устройстве земляного полотна из золошлаковых смесей обязательно проведение работ по укреплению откосов для предотвращения развития эрозионных процессов под действием воды и ветра, а также пыления земляного полотна.

По результатам мониторинга работы построенных конструкций установлено, что использование золошлаковых смесей в конструкциях автомобильных дорог обеспечивает эксплуатационные характеристики не ниже чем конструкция смежного участка из местных грунтов (таблица 21).

**Таблица 21 – Результаты измерения продольной ровности (IRI) покрытия экспериментального участка**

Дата	Требования СП 78.13330/ГОСТ Р 50597	Конструкция с земляным полотном из золошлаковой смеси			Конструкция с земляным полотном из песчаного грунта		
		Прямое направление	Обратное направление	Итоговое значение	Прямое направление	Обратное направление	Итоговое значение
2021	До 2,6	2,55	2,51	2,53	–	–	–
2022	Не более 5,5	2,83	2,46	2,80	2,79	2,64	2,72

Для оценки водно-теплового режима земляного полотна в тело земляного полотна установлены датчики измерения температуры и влажности грунта (рисунок 24).

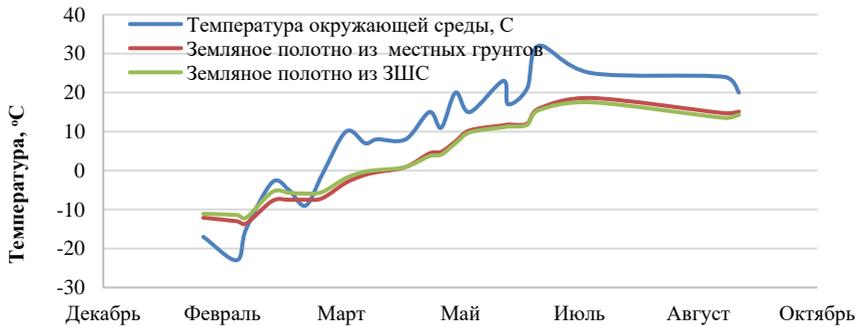


**Рисунок 24 – Установка датчиков контроля температуры и влажности**

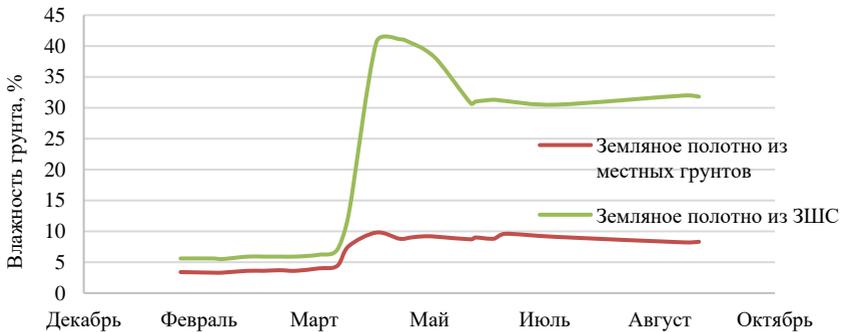
По результатам измерения температуры и влажности земляного полотна установлено значительное влагонакопление слоев из золошлаковой смеси в сравнении со слоями из местных грунтов (рисунки 25 и 26).

Кроме того, установлено, что температура слоев из золошлаковых смесей в холодный период года выше, чем из местных грунтов, что объясняется теплоизоляционными свойствами ЗШС.

Полученные в работе результаты использованы при разработке региональных практических рекомендаций по возведению слоев земляного полотна из золошлаковых смесей ТЭЦ.



**Рисунок 25 – Температура грунтов экспериментальной конструкции земляного полотна**



**Рисунок 26 – Влажность грунтов экспериментальной конструкции земляного полотна**

**В шестой главе** приведен анализ стоимости строительства конструкций дорожных одежд и земляного полотна автомобильных дорог из золошлаковых смесей ТЭЦ.

Установлено следующее:

- снижение стоимости строительства конструкций дорожных одежд с применением золошлаковых смесей составило 8–22 %.
- снижение стоимости строительства конструкций земляного полотна с применением золошлаковых смесей составило 14,5 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований получены следующие результаты.

1. Экспериментально обосновано применение микроволнового излучения для ускоренного набора прочности образцов укрепленного грунта. Показано, что обработка микроволновым излучением (с частотой около 2000 МГц) об-

разцов укрепленного грунта вызывает разогрев образцов, ускоренное схватывание и твердение.

Предложен метод ускоренного набора прочности образцов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, который позволяет сократить сроки набора прочности с 28 до 1 сут. и тем самым повысить эффективность применения укрепленных грунтов в условиях короткого строительного сезона в континентальном климате.

2. Разработан метод определения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами в лабораторных условиях, позволяющий осуществлять подбор состава смеси укрепленных грунтов с заданными проектными значениями модуля упругости.

3. Разработаны составы модифицированных композитов на основе использования кислых золошлаковых смесей, крупнообломочных грунтов и портландцемента. Составы обладают высокими марками по прочности и морозостойкости и могут использоваться для строительства земляных сооружений: насыпей, дамб, автомобильных дорог, искусственных оснований, а также полов на промышленных предприятиях, в том числе в условиях континентального климата.

Применение золошлаковых смесей позволяет повысить марки по морозостойкости и прочности укрепленных грунтов. При этом после достижения образцов укрепленного грунта проектного возраста наблюдается увеличение морозостойкости, что свидетельствует о длительном структурообразовании. Длительные сроки структурообразования вызваны значительным (более 45 %) содержанием оксида кремния в золошлаковых смесях.

Показано, что зологрунтовые смеси обладают лучшими прочностными характеристиками по сравнению с золошлаковой смесью, укрепленной портландцементом, что объясняется наличием в составах обломочной фракции (более 2 мм).

При укреплении золошлаковой смеси портландцементом образуется микроструктура, аналогично образованию микроструктуры в бетонах. Сформированная структура является пористой, размер пор – в пределах 1–4 мкм. Поры заполнены связующим веществом в виде игольчатых кристаллов гидратированного цемента. Диаметр кристаллов в пределах 0,5 мкм нанометров.

4. Разработаны практические рекомендации по применению золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях автомобильных дорог.

5. Получены значения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими на основе применения золошлаковых смесей ТЭЦ. Предлагаемые расчетные значения позволят повысить надежность проектных решений автомобильных дорог, оптимизировать их конструкции, а также расширят возможности применения золошлаковых смесей ТЭЦ.

6. Показано, что методы лабораторных испытаний модуля упругости и прочности на сжатие в проектном возрасте продолжительны во времени и трудоемки. Для снижения трудоемкости возможно использование математических

формул, определяющих значение модуля упругости от различных параметров (прочности на сжатие, содержания вяжущего и т. д.).

На основе выполненных исследований предложены эмпирические модели, отражающие зависимость значений модуля упругости от значений прочности на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом и известью. Также предложены эмпирические модели прогнозирования прочности на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом и известью, от содержания вяжущего.

7. Предложены типовые конструкции дорожных одежд автомобильных дорог с использованием золошлаковых смесей и с использованием традиционных материалов. Типовые конструкции позволяют расширить сферу применения золошлаковых смесей в конструкциях автомобильных дорог.

Установлено, что снижение общей толщины дорожных одежд автомобильных дорог со слоями из золошлаковых смесей ТЭЦ по сравнению с дорожными одеждами со слоями из традиционных материалов составило до 48 %.

8. Результаты лабораторных исследований внедрены на действующей сети автомобильных дорог регионов Российской Федерации. По результатам выполненных работ построены экспериментальные конструкции дорожной одежды на автомобильной дороге «Егоровщина – Рязановщина» и земляного полотна на автомобильной дороге «Сибирь» с применением золошлаковых смесей ТЭЦ. Конструкции участков автомобильной дороги с применением золошлаковых смесей имеют уровень эксплуатационного состояния не ниже чем у конструкции участка автомобильной дороги с земляным полотном из местных грунтов.

9. Установлено, что снижение стоимости строительства конструкций дорожных одежд со слоями из золошлаковых смесей ТЭЦ, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в сравнении с дорожными одеждами со слоями из традиционных материалов составляет до 21 %.

Строительство автомобильной дороги с земляным полотном из местных грунтов и золошлаковых смесей составило:

– устройство автомобильной дороги с использованием грунта песчаного составляет 4677,651 тыс. руб.;

– устройство автомобильной дороги с использованием золошлаковых смесей ТЭЦ составляет 3999,511 тыс. руб.

Снижение стоимости строительства автомобильной дороги с использованием золошлаковых смесей составляет 14,5 %.

10. Полученные в работе научные результаты использованы при разработке региональных практических рекомендаций по возведению слоев земляного полотна из золошлаковых смесей ТЭЦ Иркутской области.

11. Результаты исследования позволяют увеличить объемы повторного использования золошлаковых отходов ТЭЦ и тем самым сократить площадь

территории, занятой золоотвалами, а также сохранить природные ресурсы путем снижения объемов разработки карьеров местных грунтов и материалов.

Выводы теоретических исследований были подтверждены результатами опытов, проведенных в лабораторных условиях, и путем натурных экспериментов на существующей сети автомобильных дорог Российской Федерации. Составы материалов на основе золошлаковых смесей защищены патентами.

**Перспективы дальнейших исследований** целесообразно рассматривать в направлении исследований процессов структурообразования в грунтах, укрепленных различными неорганическими вяжущими, в том числе комплексными, при воздействии на них микроволнового излучения разной частоты.

## СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*В изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук*

1. Лофлер, М. Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства / М. Лофлер, **Н.А. Слободчикова**, К.В. Плюта // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость : научный журнал. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2017. – Том 7. – № 2. – С. 62–67.

2. Лофлер, М. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства / М. Лофлер, **Н.А. Слободчикова** // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость : научный журнал. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2018. – Том 8. – № 2. – С. 141–147.

3. Лофлер, М. Направления использования нефтешламов в дорожном строительстве / М. Лофлер, В.Г. Шелегов, **Н.А. Слободчикова** // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2018. – Том 8. – № 4 (27). – С. 98–104.

4. **Слободчикова Н.А.** Необходимость совершенствования нормативной базы по подбору составов грунтов, укрепленных неорганическим вяжущим / **Н.А. Слободчикова**, К.В. Плюта // Дороги и мосты, 2018. – Вып. 39. – С. 336–342.

5. Степаненко, А.А. Метод определения модуля упругости укрепленных грунтов в лабораторных условиях / А.А. Степаненко, А.В. Рудых, **Н.А. Слободчикова** // Промышленное и гражданское строительство : научный журнал, 2020. – № 12. – С. 93–99.

6. **Слободчикова, Н.А.** Состояние сети автомобильных дорог регионального и местного значения Байкальского региона / **Н.А. Слободчикова** // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость : научный журнал. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2021. – Том 11. – № 1(36). – С. 74–84.

7. **Слободчикова, Н.А.** Исследование возможностей применения золошлаковых материалов для строительства земляного полотна автомобильных дорог на примере Иркутской области / **Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта** // Дороги и мосты : научный журнал, 2023. – № 1(49). – С. 223–237.

8. **Слободчикова, Н.А.** Прогнозирование изменения во времени некоторых переменных параметров состояния автомобильных дорог / **Н.А. Слободчикова** // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2023. – Том 13. – № 4(47). – С. 677–686.

9. **Слободчикова, Н.А.** Зависимость модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, от прочности на сжатие / **Н.А. Слободчикова, С.В. Клюев, К.В. Плюта** // Вестник СибАДИ : научный журнал, 2024. – № 21(5). – С. 786–800.

10. **Слободчикова, Н.А.** Исследование свойств золошлаковых смесей тепловых электростанций с позиции их применения в дорожном строительстве / **Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта, С.В. Клюев** // Транспортные сооружения : электронный научный журнал, 2024. – Том 11. – № 3.

11. Клюев, С.В. Применение техногенных отходов при укреплении грунтов автомобильных дорог / С.В. Клюев, **Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта, А.В. Клюев** // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2024. – Т. 21. – Вып. 4. – С. 775–786. – DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-775-786.

12. Клюев, С.В. Зологрунтовые смеси для дорожного строительства / С.В. Клюев, **Н.А. Слободчикова** // Научные труды КубГТУ : электронный научный журнал, 2024. – № 6. – С. 49–59.

13. **Слободчикова, Н.А.** Оценка эффективности применения золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях автомобильных дорог / **Н.А. Слободчикова, С.В. Клюев, А.А. Степаненко** // Инженерный вестник Дона, 2025. – № 2. – С. 11.

14. **Слободчикова, Н.А.** Теоретические основы укрепления грунтов портландцементом / **Н.А. Слободчикова, С.В. Клюев, А.В. Горелов** // Инженерный вестник Дона, 2025. – № 2. – С. 14.

15. **Слободчикова, Н.А.** Возможности применения твердых коммунальных отходов в дорожном строительстве / **Н.А. Слободчикова, С.В. Клюев, А.М. Исмаилов** // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость : научный журнал. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2025. – Том 15. – № 1. – С. 119–132.

16. **Слободчикова, Н.А.** Микроструктура золошлаковой смеси ТЭЦ, укрепленной портландцементом / **Н.А. Слободчикова, С.С. Шабуров, Н.М. Полонов, С.В. Клюев** // Инженерный вестник Дона, 2025. – № 5. – С. 13.

17. **Слободчикова, Н.А.** Разработка составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами / **Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта, А.В. Горелов, С.В. Клюев, Д.И. Леонов** // Современное строительство и архитектура, 2025. – № 10 (65). – С. 8.

*В изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science*

18. Klyuev S.V., Slobodchikova N.A., Saidumov M.S., Abumuslimov A.S., Mezhidov D.A., Khezhev T.A. Application of ash and slag waste from coal combustion in the construction of the earth bed of roads // *Construction Materials and Products*, 2024. – 7 (6). – P. 12.

19. Slobodchikova, N.A. Physical and Mechanical Properties of Ash-And-Slag Mixtures for Their Use in Structural Foundations / N.A. Slobodchikova, S.V. Klyuev, A.M. Ismailov // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2025. – Pp. 243–248.

*В изданиях, индексируемых в Russian Science Citation Index (RSCI)*

20. **Slobodchikova, N.A.** Selection of a composition of reinforced soils / **N.A. Slobodchikova**, A.Y. Bashkarev // *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2024. – Article No 11006. – P. 12. – DOI 10.4123/CUBS.110.6.

*В изданиях, индексируемых в РИНЦ*

21. **Слободчикова, Н.А.** Использование отходов промышленности для получения вяжущих в дорожной отрасли / **Н.А. Слободчикова** // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость : научный журнал*. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2015. – № 1(12). С. 116–120.

22. **Слободчикова, Н.А.** Научные основы подбора состава грунтов, укрепленных известью / **Н.А. Слободчикова** // *Вестник науки и образования Северо-Запада России : научное электронное издание*, 2017. – Том 3. – № 4.

23. **Слободчикова, Н.А.** Грунтовые смеси, укрепленные неорганическим вяжущим / **Н.А. Слободчикова**, К.В. Плюта // *Мир дорог*. – Изд-во ООО «Издательский дом "МИР"», 2019. – С. 44–46.

24. **Слободчикова, Н.А.** Применение золошлаковых смесей в дорожных одеждах / **Н.А. Слободчикова**, А.А. Степаненко, К.В. Плюта // *Наука и техника в дорожной отрасли*. – Изд-во «Дороги», 2022. – № 1. – С. 35–37.

25. **Слободчикова, Н.А.** Прогнозирование прочностных характеристик укрепленных золошлаковых смесей ТЭЦ неорганическими вяжущими материалами / **Н.А. Слободчикова**, Ю.Г. Лазарев, К.В. Плюта [и др.] // *Путевой навигатор*. – 2024. – № 59(85). – С. 52–57.

26. Анализ эффективности модификатора для асфальтобетонных покрытий / Х.М. Вафаева, А.М. Исмаилов, Е.Е. Медрес [и др.] // *Путевой навигатор*. – 2023. – № 57(83). – С. 64–75.

27. **Слободчикова Н.А.** Метод прогнозирования состояния дорожных одежд автомобильных дорог капитального типа на основе алгоритма дерева решений / **Н.А. Слободчикова**, М.Д. Каташевцев, В.В. Кутенков // *Путевой навигатор*. – 2023. – № 57(83). – С. 36–43.

28. **Слободчикова, Н.А.** Применение извести в дорожном строительстве / **Н.А. Слободчикова**, Е.С. Жаркова, Е.М. Сазонова // *Вестник науки*. – 2023. – Том 1. – № 3(60). – С. 342–352.

29. **Слободчикова, Н.А.** Диагностика дефектов автомобильных дорог с использованием лазерных сканеров / **Н.А. Слободчикова**, Д.В. Баторов // Молодежный вестник ИРНИТУ : электронный научный журнал. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2021. – Том 11. – № 1. – С. 64–70.

30. Клюев, С.В. Метод оценки состояния автомобильных дорог / С.В. Клюев, **Н.А. Слободчикова** // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета : научный журнал, 2024. – № 4 (61). – С. 139–150.

31. **Слободчикова, Н.А.** Мальковская, Т.А. Строительство подъездных автомобильных дорог к промышленным предприятиям на газоконденсатных месторождениях в условиях многолетнемёрзлых, слабых и нестабильных грунтов // Нефть и газ: опыт и инновации, 2025. – Том 9. – №1. – С. 11.

### *Патенты*

32. Патент № 2779688 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04. Зологрунт для дорожного строительства : № 2021139523 : заявл. 29.12.2021 : опубл. 12.09.2022 / **Н.А. Слободчикова**, К.В. Плюта ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

33. Патент № 2803756 С1 Российская Федерация, МПК С04В 11/06, С04В 7/28, С04В 18/04. Состав для укрепления грунтов оснований при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог : № 2022130968 : заявл. 16.12.2022 : опубл. 19.09.2023 / **Н.А. Слободчикова**, К.В. Плюта ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

### *Монографии*

34. **Слободчикова, Н.А.** Укрепление грунтов в дорожном строительстве / **Н.А. Слободчикова** : монография. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2019. – 160 с.

35. **Слободчикова, Н.А.** Модифицированные материалы с использованием золошлаковых отходов ТЭЦ для строительства автомобильных дорог / **Н.А. Слободчикова**, С.В. Клюев : монография. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2024. – 402 с.

### *Материалы конференций*

36. **Slobodchikova, N.A.** Methods for producing laboratory samples of soils reinforced with inorganic binders. Conference series: materials science and engineering : IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. – P. 6.

37. **Slobodchikova, N.A.** The elastic modulus for ash and slag mixtures reinforced with inorganic binders / **N.A. Slobodchikova**, A.V. Rudih // Investments. Construction. Real estate : New Technologies and targeted development priorities. – 2020 : International Scientific Conference.

38. **Slobodchikova, N.A.** Standard structures of road pavements for highways of the Baikal region / **N.A. Slobodchikova, A.A. Stepanenko** // Spatial Restructuring of territories ; International Baikal Investment and Construction Forum (4 December 2020). – Irkutsk. – Russian Federation.

39. **Slobodchikova, N.A.** Methods of quality control of construction of layers of soils reinforced with inorganic binders / **N.A. Slobodchikova, K.V. Pluta, A.V. Rudih** // Investments. Construction. Real Estate: New Technologies and Targeted Development Priorities 2021 : IV International Scientific Conference, 29–30 April 2021. – Irkutsk, Russian Federation. – Aug 24, 2022. – P. 8.

40. **Слободчикова, Н.А.** Обзор методов укрепления грунтов оснований дорожных одежд автомобильных дорог и улично-дорожных сетей населенных пунктов / **Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта, А.А. Дзогий** // Авиамашиностроение и транспорт Сибири : сборник статей V Всерос. науч.-практ. конференции (г. Иркутск, 16–18 апреля 2015 г.) – Иркутск : Изд-во ИРННТУ, 2015. – С. 245–250.

41. **Слободчикова, Н.А.** Применение извести для стабилизации грунтов автомобильных дорог населенных пунктов / **Н.А. Слободчикова, К.Н. Баева** // Авиамашиностроение и транспорт Сибири : сборник статей VII Всероссийской научно-практ. конференции (г. Иркутск, 13–16 апреля 2016 г.). – Иркутск : Изд-во ИРННТУ, 2016. – С. 85–88.

42. **Слободчикова, Н.А.** Применение отходов производства и потребления для укрепления оснований дорожной одежды при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог в условиях резко континентального климата / **Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта, А.А. Дзогий** // Наука XXI века: опыт прошлого – взгляд в будущее : мат-лы II Международной научно-практ. конференции (г. Омск, 25 апреля 2016 г.). – [Электронный ресурс]. – Омск : СибАДИ, 2016. – С. 234–237.

43. **Слободчикова, Н.А.** Отходы промышленного производства и потребления для укрепления грунтов при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте улично-дорожных сетей / **Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта** // Авиамашиностроение и транспорт Сибири : сборник статей всероссийской научно-практ. конференции. – Иркутск : Изд-во ИРННТУ, 2016. – С. 148–150.

44. **Слободчикова, Н.А.** Применение отходов промышленного производства в конструкциях дорожных одежд автомобильных дорог / **Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта** // Актуальные проблемы развития строительной отрасли : мат-лы междунар. научно-практ. конференции. – Иркутск : Изд-во ИРННТУ, 2017. – С. 201–204.

45. **Слободчикова, Н.А.** Методы технической мелиорации в дорожном строительстве / **Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта** // Междисциплинарные исследования. Современное состояние и перспективы развития : сборник статей VI Международной студ. научно-практ. конференции. – Екатеринбург : Изд-во «ИМПРУВ», 2017. – С. 16–22.

46. **Слободчикова, Н.А.** Исследование отечественного и зарубежного опыта применения грунтов, укрепленных известью в дорожном строительстве / **Н.А. Слободчикова** // Качество городской среды: строительство, архитектура и дизайн : мат-лы Всероссийской научно-практ. конференции. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2017. – С. 259–265.

47. **Слободчикова, Н.А.** Применение пластика в дорожном покрытии / **Н.А. Слободчикова**, Д.В. Баторов // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог в условиях региона : сборник трудов регион. научно-практ. конференции. – 2018. – С. 37–42.

48. **Слободчикова, Н.А.** Применение золошлаковых материалов в дорожном строительстве / **Н.А. Слободчикова**, М.З. Бальжинмаева // Взаимодействие науки, образования и производства : сборник трудов всероссийской научно-практ. конференции. – Иркутск, 2018. – С. 19–33.

49. **Слободчикова, Н.А.** Анализ методик подбора составов грунтоизвестковых смесей / **Н.А. Слободчикова**, Д.А. Домбровский // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: проблемы, пути решения : мат-лы XVI Всероссийской научно-практ. конференции (26 ноября 2018 г.) : в 3 ч. ; ч. 2. – Ростов н/Д : Изд-во Южного университета ИУБиП, 2018. – С. 361–366.

50. **Слободчикова, Н.А.** Необходимость повышения эффективности применения золошлаковых смесей в дорожном строительстве / **Н.А. Слободчикова**, Д.А. Домбровский // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: проблемы, пути решения : мат-лы XVI Всероссийской научно-практ. конференции (26 ноября 2018 г.) : в 3 ч.; ч. 2. – Ростов н/Д : Изд-во Южного университета ИУБиП, 2018. – С. 366–370.

51. **Слободчикова, Н.А.** Применение средств измерений и испытательного оборудования, в соответствии с требованиями ПНСТ, для оценки контроля качества асфальтобетонных смесей и асфальтобетона / **Н.А. Слободчикова**, К.В. Плюта // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог в условиях региона : сборник трудов междунар. научно-практ. конференции. – 2019. – С. 76–82.

52. **Слободчикова, Н.А.** Методы укрепления грунтов вяжущими материалами. / **Н.А. Слободчикова**, К.В. Плюта // Новая наука: История становления, современное состояние, перспективы развития, сборник статей Всероссийской научно-практ. конференции (29 июня 2020 г.). – Уфа : OMEGA SCIENCE, 2020. – С. 44–49.

В опубликованных работах автору принадлежат основные идеи, теоретический и экспериментальный материал, выводы.

**АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ****Модифицированные композиты общестроительного назначения с использованием золошлаковых отходов****Слободчикова Надежда Анатольевна**

К экономичным и эффективным технологиям возведения земляных сооружений относится укрепление местных грунтов неорганическими вяжущими материалами, в том числе на основе использования отходов от сжигания угля. Несмотря на имеющиеся наработки по применению различных золошлаковых материалов ТЭЦ в строительстве, исследования их использования в регионах континентального климата ограничены. В работе обоснована методика проведения экспериментальных исследований и получены следующие основные результаты. Экспериментально обосновано применение микроволнового излучения для ускоренного набора прочности образцов укрепленного грунта. Предложен метод ускоренного набора прочности образцов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами. Разработан метод определения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами в лабораторных условиях. Разработаны составы зологрунтовых смесей на основе использования золошлаковой смеси, крупнообломочных грунтов и портландцемента. Разработаны практические рекомендации по применению золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях земляных сооружений. Получены значения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими на основе применения золошлаковых смесей ТЭЦ. На основе выполненных исследований предложены эмпирические модели, отражающие зависимость значений модуля упругости от значений прочности на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом и известью. Предложены типовые конструкции дорожных одежд автомобильных дорог с использованием золошлаковых смесей. Результаты лабораторных исследований внедрены на действующей сети автомобильных дорог регионов Российской Федерации. Полученные в работе научные результаты использованы при разработке региональных практических рекомендаций по возведению слоев земляного полотна из золошлаковых смесей ТЭЦ Иркутской области. Результаты исследования позволяют увеличить объемы повторного использования золошлаковых отходов ТЭЦ и тем самым сократить площадь территории, занятой золоотвалами, а также сохранить природные ресурсы путем снижения объемов разработки карьеров местных грунтов и материалов.

**DISSERTATION ABSTRACT****Modified composites for general construction purposes using ash and slag waste****Slobodchikova Nadezhda Anatolyevna**

Economical and efficient technologies for the construction of earthworks include the reinforcement of local soils with inorganic binders, including through the

use of waste from coal combustion. Despite the existing developments on the use of various ash and slag materials of CHP plants in construction, research on their use in regions of continental climate is limited. The paper substantiates the methodology of experimental research and provides the following main results. The use of microwave radiation for accelerated strength gain of reinforced soil samples has been experimentally substantiated. A method for accelerated strength gain of soil samples reinforced with inorganic binders is proposed. A method for determining the modulus of elasticity of soils reinforced with inorganic binders in laboratory conditions has been developed. Compositions of zologrunt mixes based on the use of ash and slag mixtures, coarse-grained soils and Portland cement have been developed. Practical recommendations on the use of ash and slag mixtures of thermal power plants in the structures of earthworks have been developed. The values of the modulus of elasticity of soils reinforced with inorganic binders based on the use of ash and slag mixtures of thermal power plants have been obtained. Based on the performed studies, empirical models are proposed that reflect the dependence of the modulus of elasticity on the compressive strength of soils reinforced with Portland cement and lime. Typical designs of road clothes for highways using ash and slag mixtures are proposed. The results of laboratory studies have been implemented on the existing highway network of the regions of the Russian Federation. The scientific results obtained in the work were used in the development of regional practical recommendations for the construction of layers of earthwork from ash and slag mixtures of thermal power plants in the Irkutsk region. The results of the study make it possible to increase the volume of reuse of ash and slag waste from thermal power plants and thereby reduce the area of the territory occupied by ash dumps, as well as preserve natural resources by reducing the volume of quarrying of local soils and materials.

## **СЛОБОДЧИКОВА НАДЕЖДА АНАТОЛЬЕВНА**

### **Модифицированные композиты общестроительного назначения с использованием золошлаковых отходов**

#### **2.1.5 Строительные материалы и изделия**

#### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук