

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

На правах рукописи

Слободчикова Надежда Анатольевна

**МОДИФИЦИРОВАННЫЕ КОМПОЗИТЫ
ОБЩЕСТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Клюев Сергей Васильевич

Иркутск
2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В МИРОВОЙ НАУКЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	15
1.1. Применение техногенных отходов при строительстве земляных сооружений	15
1.2. Методы укрепления грунтов неорганическими вяжущими материалами в конструкциях автомобильных дорог.....	31
1.3. Применение золошлаковых отходов ТЭЦ в конструкцияхавтомобильных дорог	40
1.3.1. Зола уноса.....	40
1.3.2. Топливные шлаки.....	43
1.3.3. Золошлаковая смесь.....	45
1.4. Методы лабораторных испытаний грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами.....	49
Выводы	59
Глава 2. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРУКТУРООБРАЗОВАНИИ В ГРУНТАХ, УКРЕПЛЕННЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ ВЯЖУЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ	62
2.1. Явления, влияющие на структурообразование укрепленных грунтов.....	62
2.2. Структурообразование в грунтах, укрепленных портландцементом.....	71
2.2.1. Процессы структурообразования в сыпучих грунтах.....	72
2.2.2. Процессы структурообразования в глинистых грунтах	74
2.2.3. Регулирование процессов, развивающихся при укреплении грунтов портландцементом.....	78
2.3. Структурообразование в грунтах, укрепленных известью	81
2.3.1. Процессы структурообразования в глинистых грунтах	81
2.3.2. Регулирование процессов, развивающихся при укреплении грунтов известью	85
Выводы	86

Глава 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	88
3.1. Определение физико-механических характеристик естественных грунтов, неорганических вяжущих материалов, золошлаковых отходов ТЭЦ	88
3.2. Совершенствование методов подбора составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами	94
3.2.1. Определение начального ориентировочного количества вяжущего материала	94
3.2.2. Изготовление образцов грунта.....	97
3.2.3. Определение прочностных характеристик укрепленного грунта	99
3.2.4. Оценка воздействия воды.....	103
3.2.5. Разработка ускоренного метода определения качественных характеристик	104
3.2.6. Разработка метода определения модуля упругости в лабораторных условиях	107
3.2.7. Определение коэффициента запаса на уплотнение золошлаковых смесей, укрепленных неорганическими вяжущими в лабораторных условиях	120
3.3. Расчет экспериментальных конструкций с применением грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, и золошлаковых смесей ТЭЦ	121
3.3.1. Методика расчета экспериментальных конструкций	121
3.3.2. Принципы конструирования и расчета	124
Выводы	126
Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	128
4.1. Результаты исследования местных грунтов	128
4.2. Результаты исследования золошлаковых смесей ТЭЦ.....	148
4.3. Результаты разработки составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами	190
4.4. Результаты применения микроволнового излучения для сокращения сроков подбора составов укрепленных грунтов.....	205

4.5. Результаты определения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами в лабораторных условиях.....	208
4.6. Результаты моделирования значений прочности на сжатие укрепленных материалов во времени	214
4.7. Предложения по актуализации методов ГОСТ 23558-94 и ГОСТ Р 70452-2022	216
4.8. Результаты определения коэффициента запаса на уплотнение золошлаковых смесей, укрепленных неорганическими вяжущими	220
4.9. Результаты расчета экспериментальных конструкций с применением грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, и золошлаковых смесей ТЭЦ	220
Выводы	223
Глава 5. АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	226
5.1. Строительство экспериментальных конструкций.....	226
5.1.1. Характеристика участка	226
5.1.2. Расчет экспериментальных конструкций.....	233
5.1.3. Строительство экспериментальных конструкций.....	236
5.1.4. Мониторинг опытно-экспериментальных конструкций с использованием золошлаковых смесей ТЭЦ.....	245
5.2. Строительство экспериментальной конструкции земляного полотна	247
5.2.1. Расчет конструкции.....	247
5.2.2. Производство работ по возведению экспериментальной конструкции земляного полотна.....	251
5.2.3. Итоговый мониторинг конструкции земляного полотна	257
Выводы	260
Глава 6. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ СМЕСЕЙ ТЭЦ.....	262
6.1. Анализ стоимости строительства конструкций с применением золошлаковых смесей ТЭЦ.....	262
6.2. Анализ стоимости применения золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях земляного полотна в сравнении с местными грунтами и материалами	276

Выводы	284
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	285
Список литературы.....	291
Словарь терминов.....	321
<i>Приложение А.....</i>	<i>323</i>
<i>Приложение Б.....</i>	<i>384</i>
<i>Приложение В.....</i>	<i>428</i>
<i>Приложение Г.....</i>	<i>431</i>

ВВЕДЕНИЕ

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 эффективно используется 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 [4, 67, 177]. Разработаны составы золоминеральных композиций для строительства автомобильных дорог [197, 195, 201]. Определены прочностные характеристики золошлаковой смеси Омской ТЭЦ-4 и доказано, что прочность золошлаковых смесей не ниже чем у природных грунтов [213, 214]. Определены деформационные характеристики золошлаковой смеси Омской ТЭЦ-4 в зависимости от степени уплотнения и влажности и деформационных характеристик золошлаковых отходов Амурской ТЭЦ-1 [191]. Исследована несущая способность забивных железобетонных свай, погруженных в массив золошлаковой смеси на золоотвале Омской ТЭЦ-4 [199]. Имеется большое количество ис-

следований применения зол уноса для укрепления грунтов земляных сооружений [23, 71, 104, 127, 129].

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 развитие и разработка 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. Метод позволяет определять значения модуля

упругости как для грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, так и золошлаковых смесей, укрепленных неорганическими вяжущими материалами.

Установлены закономерности влияния на прочность на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной известью, и золошлаковой смеси, укрепленной цементом, количества содержания портландцемента и извести в составах. Получены значения модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом и известью. Полученные 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 работы

Экспериментально обоснована и 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, 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. Омске (2016), Екатеринбурге (2017), Ростове-на-Дону (2018), Уфе (2020), Иркутске (2020), Москве (2022, 2024, 2025), Санкт-Петербурге (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, индексируемых 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.

Глава 1. Обзор исследований в мировой науке по теме диссертации

1.1. Применение техногенных отходов при строительстве земляных сооружений

В инженерной деятельности человека широко представлено строительство различных видов земляных сооружений: дамб, плотин, автомобильных и железных дорог, обратных засыпок траншей и котлованов, искусственных оснований и т. п. Проектирование земляных сооружений выполняется с учетом характеристик и вида грунтов, крутизны откосов, глубины заложения фундамента. Для возведения земляных сооружений, так же, как и для других сооружений и зданий, необходимо применение экономичных и эффективных технологий. К таким технологиям относится укрепление местных грунтов неорганическими вяжущими материалами, в том числе на основе использования техногенных отходов.

Укрепление местных грунтов неорганическими вяжущими материалами выполняется для улучшения геотехнических свойств слабых грунтов и позволяет им выдерживать различные виды нагрузок и противостоять климатическим воздействиям. Типичной особенностью слабых грунтов является то, что они, как правило, представляют собой набухающие пучинистые глинистые грунты, которые широко распространены как в Российской Федерации, так и по всему миру (рисунок 1.1).

Давление набухания и морозного пучения может вызвать подъем конструкций, в то время как усадка может привести к оседанию поверхности и/или разрушению.

Введение в грунты неорганических вяжущих материалов позволяет понизить число пластичности, уменьшить деформации набухания и морозного пучения глинистых грунтов, а также получить материалы с высокими прочностными характеристиками.



Рисунок 1.1 – Набухающие глинистые грунты (фото автора)

Применение методов укрепления грунтов неорганическими вяжущими материалами позволяет эффективно использовать техногенные отходы (отходы производства и потребления), что, в свою очередь, дает возможность сократить объемы накопления отходов и снизить отрицательное воздействие на окружающую среду [230].

Ежегодно в мире образуется огромное количество техногенных отходов. Согласно официальному сайту Евростата [60], в результате всех видов экономической деятельности и ведения домашних хозяйств в странах Евросоюза в 2020 г. образовалось 2135 млн т отходов. Наибольший их объем приходится на строительство (37,5 % от общего объема) и добычу полезных ископаемых (23,4 % от общего объема) (рисунок 1.2).

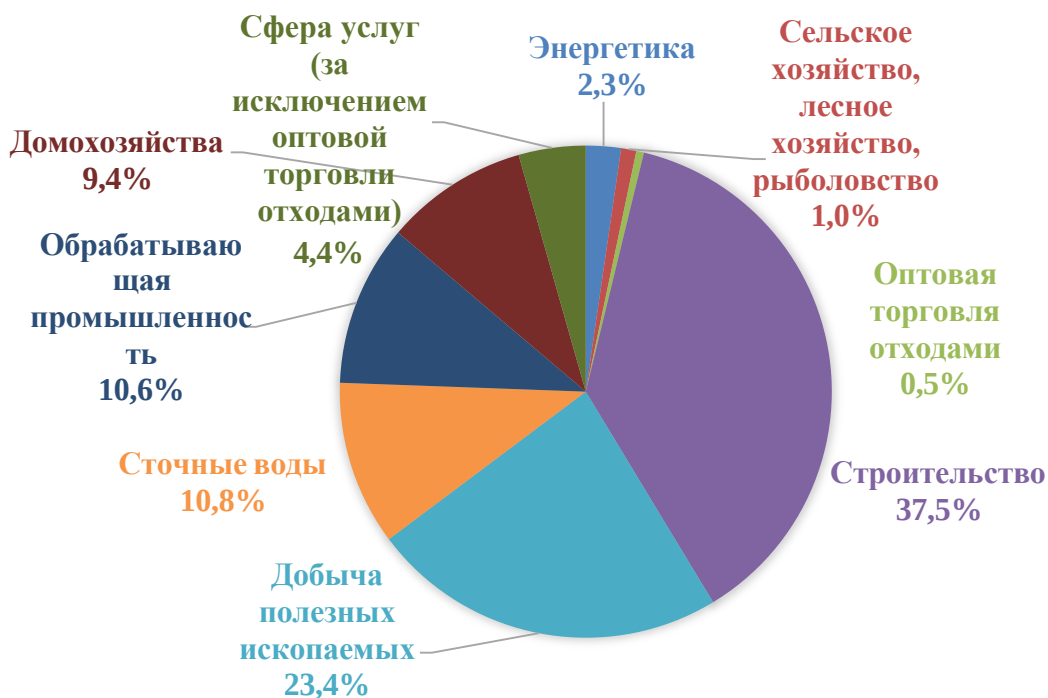


Рисунок 1.2 – Образование отходов в странах Евросоюза по видам экономической деятельности, по данным за 2020 г. [60]

В Российской Федерации 95 % всех образующихся отходов составляют отходы от добычи полезных ископаемых. Утилизация и обезвреживание различных отходов составляет в среднем 46 % от общего объема образующихся отходов (рисунок 1.3).

Большинство всех образованных отходов (около 63 %) приходится на Сибирский Федеральный округ (по данным за 2021 г.), что связано с наибольшими объемами добычи полезных ископаемых [230].

Как видно из рисунка 1.3, в РФ происходит постоянный рост количества образования отходов, при этом темпы роста количества утилизированных и обезвреженных отходов значительно ниже, в связи с чем проблема необходимости расширения практики вторичного использования техногенных отходов стоит особенно остро. При этом многие отходы можно эффективно использовать в качестве техногенного сырья для получения строительных материалов. Всесторонний обзор опубликованной литературы показывает, что существует значительное количество исследований использования нетрадиционных вяжущих для стабилизации и укрепления грунтов земляных сооружений [230].

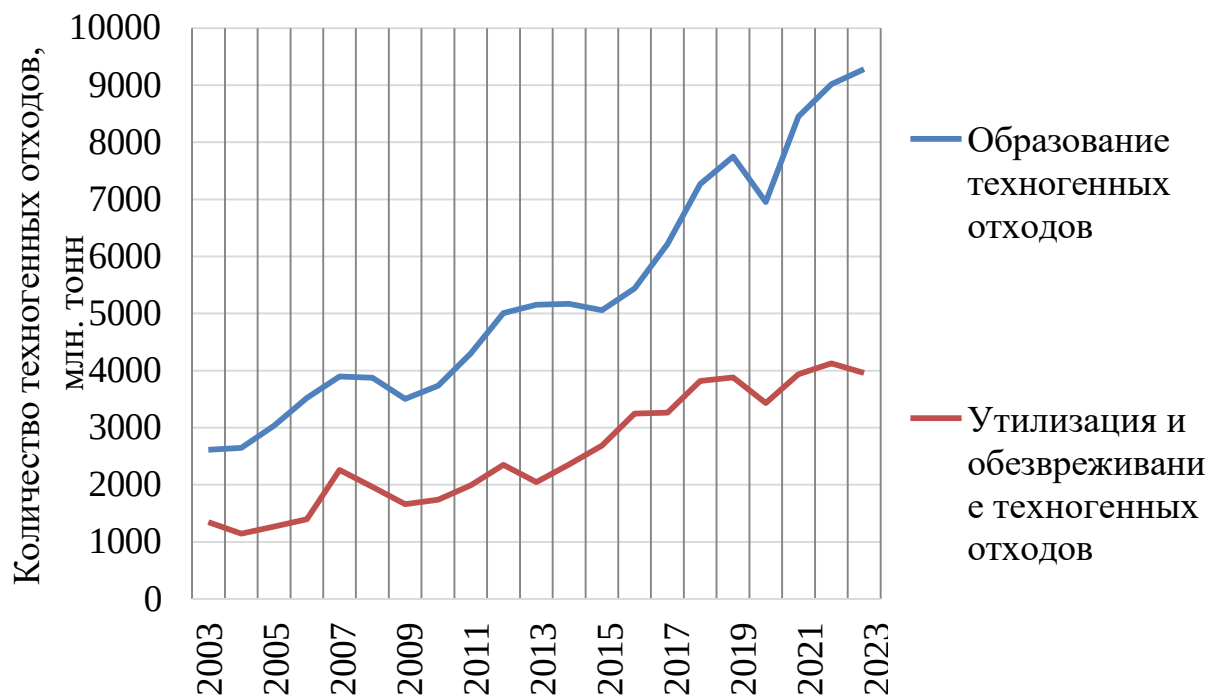


**Рисунок 1.3 – Образование и утилизация техногенных отходов в РФ
(по данным РОССТАТА) [230]**

В частности, для возведения конструкций земляных сооружений можно эффективно применять следующие виды отходов.

Переработанный бетонный порошок (RCP) – побочный продукт переработки бетона. Введение порошка в глинистые грунты повышает их прочностные характеристики [169].

Измельченный стеклянный порошок и известь. Стеклянный порошок получают путем измельчения стекловолокна или различных отходов стекла. Введение указанных компонентов в глинистые грунты снижает их дисперсность [169, 230].

Лигносulfонат – продукт технологической переработки растительного древесного сырья при производстве бумаги. Введение в глинистые грунты лигно-сulfоната с добавкой или без полипропиленового волокна снижает дисперсность грунтов [169, 230].

Пары кремнезема – побочный продукт при производстве ферросилиция и кремниевых сплавов. Введение в глинистые грунты паров кремнезема позволяет снизить их набухание и усадку [169, 230].

Золошлаковые отходы тепловых электростанций – продукты сжигания углей. Эти отходы представляют наибольший интерес, так как они имеют наибольшие объемы накопления в Российской Федерации (примерно 50 % от общей массы отходов на хранении). Исследованиями применения этих отходов занимались различные ученые [23, 36, 45, 53, 56, 62, 63, 66, 71, 76, 81, 83, 85, 99, 103–107, 126–128, 140, 154, 165, 186, 230, 236, 239].

Золы биомассы (BBA) и золы уноса биомассы (BFA) – отход от сжигания древесных опилок, щепы, коры и др. Использование этих отходов в сочетании с известью и нанокремнеземом для укрепления глинистых грунтов позволяет снизить количество используемой извести до 66 %, улучшить геотехнические и механические свойства грунта по сравнению со стабилизацией только известью [40].

Геополимеры на основе зол уноса [3, 33, 71, 167, 230]. Геополимер образуется в результате щелочной активации золы уноса щелочью. При воздействии щелочи на поверхности частицы золы уноса образуются отверстия, которые заполняются более мелкими частицами. Позже происходит двунаправленное (внутри и снаружи) воздействие щелочного активатора на оболочку частицы. В то же время щелочной раствор проникает и контактирует с более мелкими частицами, содержащимися внутри более крупных сфер; внутреннее пространство последних начинает заполняться продуктом реакции, что приводит к образованию плотной матрицы.

При стабилизации малопластичного грунта частицы золы уноса при введении щелочных активаторов (гидроксид натрия NaOH и силикат натрия Na_2SiO_3) разрушаются и образуют алюмосиликатный гель вокруг частиц грунта. Значительный контакт и реакция между частицами грунта, частицами золы уноса и щелочными активаторами определяют жесткую структуру укрепленного грунта с улучшенными прочностными характеристиками (UCS и CBR). Содержание золы уноса 25 % обеспечивает максимальную прочность после 28 дней отверждения.

Золы бумажного шлама. В работе [135] проанализировано влияние разрыхления на характеристики набухания стабилизированной известью и золой бумажного шлама сульфатсодержащей глины.

Биополимеры целлюлозы (CL). В работе [39, 230] показана эффективность биополимера целлюлозы в стабилизации латеритного грунта (грунты с высоким содержанием гидратов окиси железа и алюминия 65–80 % и низким содержанием кремнезёма) в пропорциях 0, 1, 2, 3 и 4 % от сухой массы грунта. Добавление биополимера целлюлозы значительно повысило прочность и когезионность латеритных грунтовых смесей. С увеличением количества целлюлозы до 3 % значение CBR увеличивается на 110,4 % во влажном состоянии и на 34,9 % в сухом, также происходит увеличение сцепления до 80 %, без изменения значений угла внутреннего трения. Однако с дальнейшим увеличением количества целлюлозы значение CBR незначительно снижается как при замачивании, так и без него. Изучение микроструктуры с помощью полевой эмиссионной сканирующей электронной микроскопии (FESEM) выявило появление новых вяжущих веществ в результате химических взаимодействий между целлюлозой и компонентами латеритного грунта в микроскопическом масштабе. Эти реакции привели к улучшению состава грунта за счет слияния его частиц и заполнения пустот в грунтовом каркасе [39].

Гранулированный доменный шлак (GBFS) и основной кислородный печной шлак (BOFS). Гранулированный доменный шлак – отход, преимущественно стекловидный, получаемый быстрым охлаждением водой жидкого горячего шлака, образованного в доменной печи или конвертере. Основной кислородный печной шлак – отход, образующийся в процессе производства стали. Использование этих отходов позволяет уменьшить дисперсность глинистых грунтов и снизить их пластичность [170].

Отходы пластика (ПЭТ). В работе [79] исследовано применение ПЭТ в виде лент и крошки (около 5 мм). Выяснилось, что оно позволяет повысить прочностные характеристики глинистого грунта. При этом использование большего количества пластиковых частиц (более 2 %) в качестве армирующего материала значительно снижает прочность образца грунта. Добавление извести позволяет

повысить прочностные характеристики. Использование ПЭТ в форме полос демонстрирует более высокую прочность и большую гибкость по отношению к приложенным нагрузкам, по сравнению с ПЭТ в форме гранул [32, 120].

Нефтьешламы. Интересно применение отходов нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности. Нефтяная промышленность оказывает крайне негативное воздействие на окружающую среду. Между тем нефтьешламы по своему составу схожи с битумами. Их можно эффективно применять для укрепления грунтов в сочетании с цементом.

Порошок из яичной скорлупы – отходы, получаемые из куриных инкубаториев, ресторанов быстрого питания и гостиниц. Содержит большое количество карбоната кальция. Использование извести из яичной скорлупы обеспечивает более высокий уровень прочности и жесткости по сравнению с обычной известью при стабилизации грунтов, в том числе в сочетании с молотым стеклом [39, 122, 158, 172]. В работе [169] исследовано применение порошка яичной скорлупы и искусственно произведенного альбумина: добавление альбумина в количестве 1–2 % повышает прочность на сдвиг и сжатие.

Золы рисовой шелухи (RHA) – побочный продукт рисовой мельницы. На каждые 1000 кг размолотого риса получается около 220 кг (22 %) шелухи, а при сжигании этой шелухи в котлах образуется около 55 кг (25 %) RHA [113].

Золы багассы сахарного тростника (SCBA) – отходы от сжигания волокон сахарного тростника, остающихся после извлечения сока в сахарной промышленности. Содержат большое количество клетчатки и кремнезема. В работах [5, 63] исследованы образцы с использованием золы багассы с различным содержанием гашеной извести (0, 6, 10, 18 и 25 % от массы сухого грунта) в соотношении 3:1 соответственно. Результаты исследования показали улучшение таких характеристик как набухание, прочность при сжатии и калифорнийское число (CBR) в возрасте 3, 7 и 28 сут.

Золы коровьего навоза (CDA) – отходы от сжигания коровьего навоза.

Введение в пластичный глинистый грунт золы рисовой шелухи, золы багассы сахарного тростника или золы коровьего навоза в количестве 7,5 % увеличива-

ет прочностные характеристики, а также возможность контролировать изменение объема [28, 177].

Золы кофейной шелухи (СНА). При производстве кофе образуются значительные объемы сельскохозяйственных отходов – около 30–50 % от общего объема, производимого кофе по весу, в зависимости от вида обработки. Кофейная шелуха относится к внешней оболочке плодов кофейной вишни. Отработанный кофейный порошок («кофейная гуща») относится к осадку, оставшемуся после извлечения кофейных зерен из кофейного раствора. СНА – тип твердых отходов, которые образуются в результате переработки кофейных зерен на ферме или заводе. Химические свойства различных типов зол различаются в зависимости от их происхождения и технологии сжигания. К основным их компонентам относятся силикат кальция, карбонат кальция, фосфат кальция и сульфат калия [109]. Введение в набухающий глинистый грунт золы кофейной шелухи совместно с известью позволяет понизить число пластичности и повысить несущую способность в большей степени, чем при укреплении и стабилизации только известью. Добавление 15 % СНА в грунт, стабилизированный 6-процентной известью, увеличивает значение CBR на 19,5 %. Кроме того, снижаются деформации набухания и усадки [109, 112]. Введение в набухающий глинистый грунт 20 % золы кофейной шелухи позволяет увеличить CBR в 3 раза до 3,1 % при предварительном водонасыщении и с 8,3 до 10,67 % в сухом состоянии. Кроме того, при концентрации СНА 20 % процент набухания уменьшается с 10 до 5,7 %, что указывает на значительное снижение примерно на 43 % [17].

Золы оливкового масла. Введение в грунт золы от сжигания отходов производства оливкового масла снижает пластичность глинистых грунтов, увеличивает плотность сухого грунта и снижает набухание [172].

Золы пальмового масла (POFA) – отход сжигания пустых плодовых гроздей (EFB), волокон и скорлупы из пальмового масла (POS). Содержат большое количество кремнезема (61 %) и глинозема (28 %). Результаты исследований показывают, что использование только POFA для стабилизации глинистого грунта приводит к небольшому увеличению прочностных характеристик образцов, в то вре-

мя как его сочетание с цементом приводит к резкому увеличению UCS образцов при одинаковых сроках твердения, а также снижает пластичность грунта [108, 129, 172].

Также имеются исследования об использовании кожуры банана [5, 164], золы кукурузной шелухи [7], золы финиковой пальмы [8], косового волокна [26, 107, 121], джутового волокна [52], древесных отходов [78], золы от сжигания твердых бытовых отходов [87].

Способы применения техногенных отходов приведены в таблице 1.1.

Данные таблицы 1.1 подтверждают, что для укрепления грунтов можно эффективно применять различные виды отходов.

Таблица 1.1 – Применение техногенных отходов для укрепления и стабилизации грунтов

Страна исследований	Вид грунтов	Виды отходов	Количество	Основные выводы	Источник
1	2	3	4	5	6
Китай	Глинистый	Переработанный бетонный порошок (RCP)	1–5 %	Увеличение прочности на сжатие и растяжение при увеличении содержания RCP в смеси и при увеличении продолжительности твердения	[169]
Китай	—	Отработанная угольная порода (WCG)	1–10 %	Позволяет эффективно снижать дисперсность и улучшать водостойкость дисперсного грунта	[166]
Бразилия	Глинистый	Измельченный стекл. порошок и известь	Стекл. порошок (10 и 30 %), известь (5 и 12 %)	Снижение дисперсности глинистых грунтов	[169]

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
Иран	Глини- стый	Лигносуль- фонат	0–1,5 %	Снижение дисперсности на 57,88 % после 7 дней тверде- ния при обработке 1,5 % лиг- носульфонатом. В сочетании с электроосмосом напр. 48 В дисперсность снизилась на 65,45 % через 7 дней по срав- нению с необработанным об- разцом	[169]
Иран	Глини- стый	Пары кремнезема	5–15 %	Снижение набухания с 48 до 9 %	[169]
Иран	Глини- стый	Порошок из яичной скорлупы	10, 20, 30 и 50 %	Увеличение UCC с 215 до 304 кН/м ² (на 30 %)	[172]
Иран	Илисто- песча- ный	Лигносуль- фонат	Лигно- сульфонат (0–2 %) и полипро- пиленовое волокно (0–1,4 %)	Позволяет снизить дисперс- ность грунта на 73 %. Исполь- зование 1,4 % полипропилене- нового волокна приводит к снижению дисперсности на 55 %. При сочетании 2 % лиг- носульфоната и 0,35 % поли- пропиленового волокна дис- персность снижается на 76 %	[169]
Иран	Глини- стый	Отходы пла- стика в соче- тании с из- вестью	до 2 %	Повышение прочностных ха- рактеристик	[79]
Испа- ния	Глини- стый	Золы био- массы (BBA) и золы уноса биомассы (BFA)	5 %	Введение 5 % золы биомассы, 0,50 % извести и 0,056 % нанокремнезема от массы су- хого грунта позволяет сни- зить кол-во извести до 66 %, улучшить геотехн. и мех. свойства по сравнению со стабилизацией только изве- стью	[40]

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
Индия	Глинистые	Геополимеры на основе зол уноса	25 %	Улучшение прочностных характеристик (UCS и CBR)	[167]
Индия	Глинистые	Зола рисовой шелухи, зола багассы сахар. тростника и зола коровьего навоза	0, 2,5, 5, 7,5, 10 и 12,5 %	Увеличение прочностных характеристик (CBR и UCS) при содержании золы 7,5 %	[177]
Бангладеш	—	Зола уноса	0–9 %	Снижение дисперсности, повышение прочности	[169]
Индия	—	Золы рисовой шелухи	2, 4, 6, 8, 10 и 12 %	Увеличение UCS с 70 до 1204 кПа	[172]
Иордания	Набухающие глинистые	Сланцевая зола совместно с портландцементом	Сланцевая зола – 30 %, портландцемент – 4 %	Снижение набухания и линейной усадки, снижение числа пластичности, а также повышение прочностных характеристик обработанного грунта (UCS и CBR)	[134]
Великобритания	Сульфатсодержащие глинистые	Золы бумажного шлама	—	Исследовано влияние разрыхления на набухание стабилизированного сульфатсодержащего глинистого грунта	[135]
Индия	Латеритные	Биополимеры целлюлозы	3 %	Значение CBR увеличивается на 110,41 % во влажном состоянии и на 34,95 % в сухом. Увеличение сцепления до 80 %, без изменения значений угла внутреннего трения	[39]

Окончание таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
Австралия	Набухающие глинистые	Зола багассы сахарного тростника	3–12 %	Увеличение UCC с 138,58 до 245,65 кН/м ² через 28 дней твердения. Увеличение CBR с 12,88 до 22,04 %. Снижение индекса набухания при количестве вяжущего 12 %	[172]
Иордания	Набухающие глинистые	Золы оливкового масла	2,5–7,5 %	Снижение индекса набухания на 2,5 %. Увеличение UCC с 175 до 215 кПа при количестве вяжущего 2,5 %	[5, 172]
Малайзия	Глинистые	Зола из пальмового масла	10–40 %	Увеличение плотности на 20 % и UCC с 90 до 170 кПа. Сочетание цемента и POFA снижает число пластичности и увеличивает значение UCC	[172]
Эфиопия, Британская Колумбия	Набухающие глинистые	Зола кофейной шелухи (СНА)	СНА – 15 %, известь – 6 %	Введение золы совместно с известью снижает число пластичности и повышает несущую способность в большей степени, чем при стабилизации только известью. Введение 20 % золы позволяет увеличить CBR в 3 раза при предварительном водонасыщении и с 8,3 до 10,67 % в сухом состоянии, а также уменьшить набухание с 10 до 5,7 %	[109]
Иран	—	Гранулированный доменный шлак и основной кислородный печной шлак	GBFS – 0–30 %, BOFS – 0–30 %	Снижение дисперсности и числа пластичности; увеличение UCS	[170]

Наибольший интерес представляет применение золошлаковых отходов ТЭЦ, так как они имеют наибольшие объемы накопления в РФ – это примерно 1,1–1,7 млрд т (около 50 % от общей массы отходов на хранении). Ежегодно сжигается более 123 млн т твердого топлива. На угольных ТЭЦ образуется около 18–25 млн т золошлаков, из которых повторно используется около 12–17 % [132, 194] (рисунок 1.4).

Объемы образования золошлаковых отходов при сжигании топлива отличаются в зависимости от вида [201]:

- сжигание каменных и бурых углей – от 1 до 45 %;
- сжигание горючих сланцев – от 50 до 80 %;
- сжигание топливного торфа – от 2 до 30 %.

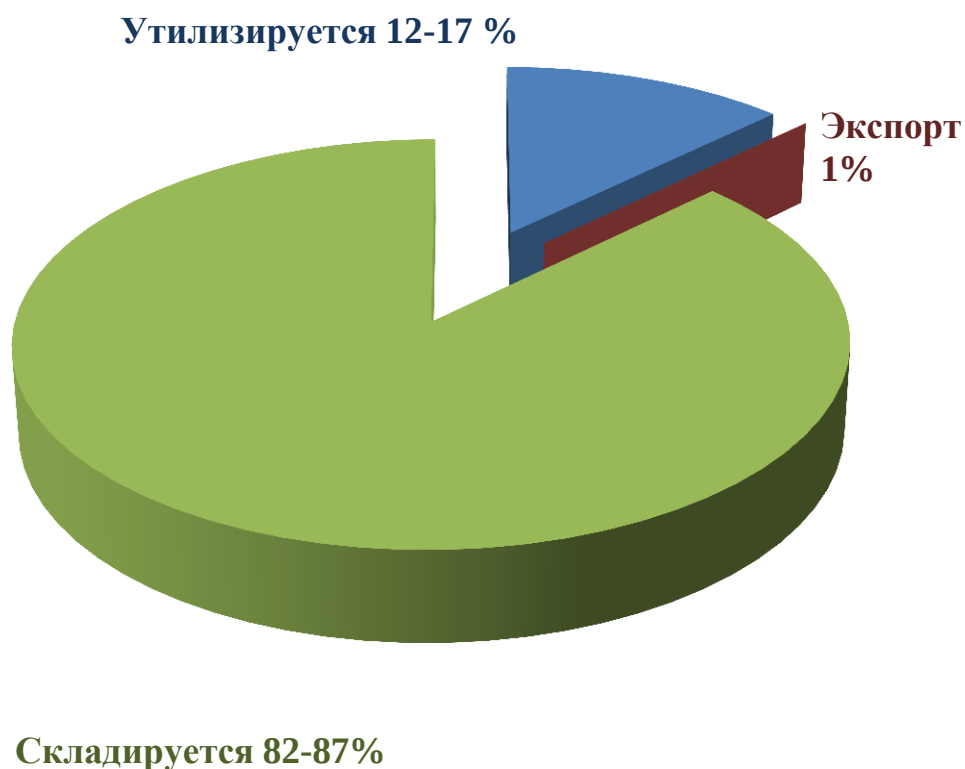


Рисунок 1.4 – Объемы повторного использования золошлаковых отходов ТЭЦ от объема образования в год (рисунок автора, по данным [132])

Золоотвалы Иркутской области иллюстрирует рисунок 1.5.

***а******б***

**Рисунок 1.5 – Золоотвалы Ново-Иркутской ТЭЦ Шелеховский участок
(фото автора, 2018 [234])**

Повторное применение золошлаковых отходов имеет важное экономическое и экологическое значение, так как накопление и увеличение объемов золошлаковых отходов приводит к росту экологической и экономической нагрузки

[221]. В отдельных странах мира объемы утилизации достигают 100 % [132] (рисунок 1.6).

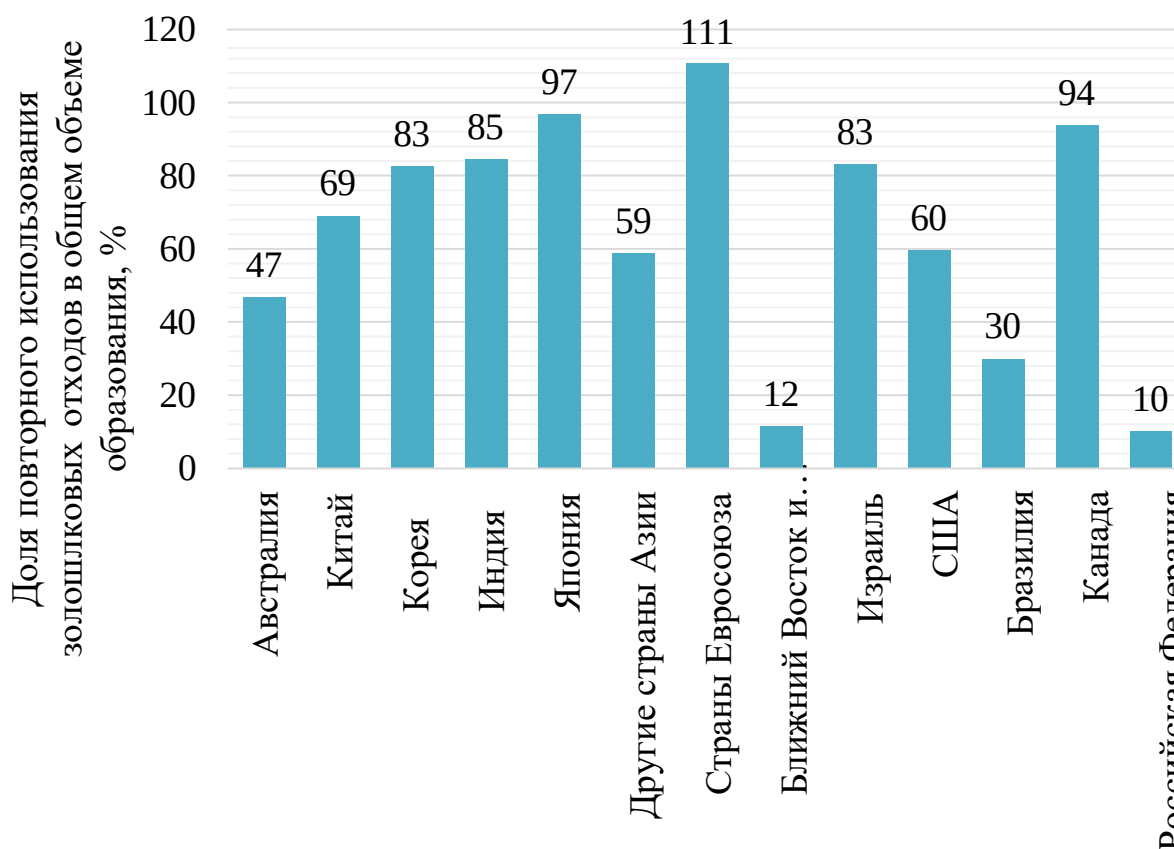


Рисунок 1.6 – Доля утилизированных золотшлаковых отходов, в общем объеме образованных в разных странах (рисунок автора, по данным [132])

В различных источниках научной и технической информации встречаются разные классификации отходов тепловых электростанций [132, 134, 141, 189, 198, 199, 212]:

- побочные продукты сжигания угля (Coal Combustion Products, CCP или Coal Burning Bound-products, CCB);
- остатки от сжигания угля (CCRS);
- побочные продукты утилизации угля (CUBs);
- зола и шлаки (угольная зола);
- зола уноса (Fly Ash, FA);

- зола уноса класса F (FFA) производится из антрацита или битуминозных углей (<10 % извести) – сумма SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 более 70 %;
- зола уноса класса C производится из бурого угля или полубитуминозных углей (>20 % извести) – сумма SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 более 50 %;
- зола уноса бурого угля (BCFA);
- пылевидная топливная зола (PFA);
- котельный шлак из котлов с удалением твердой золы (золошлаковый осадок, BA или золошлаковый осадок печей, FBA);
- котельный шлак из котлов с жидким золоудалением (Boiler Slak, BS);
- золошлаковая смесь (ASM) – гидратированная смесь золы и шлака, образующаяся из золошлаковой суспензии;
- сланцевые золы OSA – отход тепловых электростанций от сжигания диспергированного горючего сланца.

В российской практике строительства золошлаки принято подразделять следующим образом:

- 1) золы уноса – частицы размером 0,005–0,1 мм, которые выносятся дымовыми газами из топки котлового агрегата с осаждением частиц в циклонах и электрофильтрах либо вместе с водой и шлаком удаляются на золоотвал;
- 2) топливные шлаки – частицы минерального остатка угля размером до 40 мм, которые образуются при плавлении минеральной части топлива;
- 3) золошлаковая смесь – гидратированная смесь золы и шлака, которая образуется в котле и в виде пульпы направляется в золоотвал.

Применение золошлаковых отходов в конструкциях земляных сооружений является наиболее материалоемким направлением их повторного использования. В мировой практике строительства накоплен большой опыт применения этих материалов в конструкциях автомобильных дорог.

Направления использования золошлаковых отходов определяются их свойствами и, соответственно, классификацией. Свойства зависят от различных факторов, а именно:

- вид и качественные характеристики угля;
- степень предварительного измельчения угля;
- технология сжигания;
- технология окисления;
- метод подготовки угля перед сжиганием;
- метод сбора и хранения золошлаковых отходов и т. п.

Для укрепления и стабилизации различных видов грунтов применяются золы уноса в качестве самостоятельного вяжущего [13, 18, 20, 23].

Золошлаковые смеси можно применять в качестве техногенного грунта, укрепленного неорганическими вяжущими либо применять в качестве компонента комплексных вяжущих путем предварительного высушивания и измельчения в сочетании с цементом или известью [141].

1.2. Методы укрепления грунтов неорганическими вяжущими материалами в конструкциях автомобильных дорог

Применение для строительства местных грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, позволяет получить материалы с высокими строительными и эксплуатационными характеристиками.

Технологии укрепления грунтов неорганическими вяжущими материалами известны более 2000 лет. Эти технологии использовались, например, при строительстве пирамид Шанси на Тибето-Монгольском плато и для укрепления дорог в Древнем Риме. В Европе и России исследования по разработке методов укрепления грунтов были начаты в конце XIX в. – после изобретения цемента [239, 230].

В СССР было построено около 60 000 км автомобильных дорог с применением укрепленных грунтов. В 1955–1970 гг. укрепленные грунты применялись при строительстве автомобильных дорог в период освоения целинных земель Ка-

захстана и юга Западной Сибири; с 1962 г. до конца 1990-х гг. – при строительстве технологических дорог на нефтяных и газовых месторождениях Западной Сибири.

Применение в конструкциях автомобильных дорог грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, имеет ряд преимуществ по сравнению с применением каменных материалов [6, 18, 22, 67, 138, 178, 180, 184, 239]:

- отсутствуют значительные транспортные расходы на перевозку материалов;
- приготовление укрепленных грунтов может осуществляться в смесительной установке и методом смешения на месте производства работ;
- в слоях из укрепленных грунтов поступление воды к грунтам земляного полотна автомобильных дорог сверху вниз через дорожную одежду почти полностью отсутствует, поэтому влажность верхних слоев земляного полотна меньше, чем при устройстве оснований из щебеночно-гравийно-песчаных смесей;
- эти методы позволяют улучшить физико-механические характеристики грунтов, снизить набухание и число пластичности глинистых грунтов;
- позволяют улучшить прочностные характеристики слоев дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна автомобильных дорог и снизить общую толщину дорожной одежды на 20–50 %;
- продольная ровность покрытий на основаниях из укрепленных грунтов лучше, чем на основаниях из каменных материалов;
- наблюдается относительно хорошая ровность покрытия при морозном пучении грунтов земляного полотна;
- наличие слоев из укрепленных грунтов полностью предотвращает смешение материалов смежных слоев, тем самым улучшаются условия уплотнения вышележащих слоев дорожной одежды.

В практике строительства Российской Федерации различают две принципиально различные технологии преобразования свойств грунтов и каменных материалов.

1. *Укрепление грунтов* – технологические операции, направленные на формирование структурно-механических свойств грунта путем введения неорганических вяжущих, в результате чего изменяются структурные связи грунта, увеличиваются его прочностные характеристики в сухом и водонасыщенном состоянии.

2. *Стабилизация* – улучшение водно-физических свойств и предохранение от разрушения под действием воды существующих структурных связей между частицами и агрегатами грунта. Методы стабилизации увеличивают гидрофобность, снижают коэффициент фильтрации и высоту капиллярного поднятия, уменьшают пластичность, набухание и относительную деформацию морозного пучения.

Виды неорганических вяжущих материалов, применяемых для укрепления и стабилизации грунтов, приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Виды неорганических вяжущих материалов, применяемых для укрепления и стабилизации грунтов

Вяжущее	Грунты
1	2
Портландцемент и его аналоги	Крупнообломочные несцементированные оптимального и не-оптимального гранулометрического состава Песчаные грунты Супеси и суглинки с числом пластичности I_p не более 12 Глины с числом пластичности менее 22 Золошлаковые смеси Шлаки черной и цветной металлургии, фосфорные и др.
Известь, известьсодержащие отходы	Супеси Суглинки Глины
Жидкое стекло	Супеси Суглинки
Зола уноса тепловых электростанций	Разнозернистые, мелкозернистые однородные пески Местные малопрочные каменные материалы Песчаные и щебенистые грунты Глинистые грунты с числом пластичности I_p до 21

Окончание таблицы 1.2

1	2
Комплексные вяжущие	Крупнообломочные грунты Песчаные грунты Глинистые грунты Золошлаковые отходы

Выбор того или иного типа вяжущего зависит от вида грунта и его свойств, от требуемых свойств укрепленного грунта, а также от климатических, грунтовых и гидрогеологических условий местности.

Комплексные вяжущие материалы состоят из основного компонента и активатора твердения. В качестве основного компонента можно применять молотые золошлаковые смеси, золы уноса, бокситовые и нефелиновые шламы; в качестве активаторов твердения – портландцемент, известь, гипс и гипсосодержающие отходы, жидкое стекло и др.

Технология укрепления грунтов жидким стеклом основана на взаимодействии жидкого стекла (силиката натрия) с частицами грунта, в результате которого образуется гель кремниевой кислоты. Гель со временем твердеет, связывая частицы грунта между собой и образуя прочную структуру. Метод силикатизации позволяет эффективно укреплять супеси и суглинки. В строительстве этот метод не получил широкого распространения (за исключением строительства отдельных опытно-экспериментальных участков), так как укрепленный грунт обладает низкой морозостойкостью, быстро схватывается и твердеет.

Наиболее широкое распространение получили конструкции с автомобильных дорог с использованием грунтов, укрепленных цементом и известью. Эти технологии основаны на смешении компонентов (грунта, вяжущего материала, воды) до однородного состояния с целью придания укрепленному грунту определенных прочностных характеристик, а также водостойкости, морозостойкости и т. д.

При укреплении грунтов известью применяют негашеную известь CaO (молотая кипелка) и гашеную известь Ca(OH)_2 (пушонка).

Применение молотой негашеной извести является более предпочтительным, так как позволяет объединить гидратацию и схватывание извести в единый процесс, что дает возможность повысить прочность и водостойкость смесей. Это объясняется тем, что при обжиге известняков образуются силикаты и алюминаты кальция, которые способствуют отощению извести и образованию пережога. После помола их влияние проявляется в гидравлических характеристиках извести, потому что они являются носителями этих свойств.

Преимущества укрепления грунтов негашеной тонкоизмельченной известью перед гашеной известью в виде порошка или теста заключаются в следующем.

1. Негашеная известь при гидратации в конструктивных слоях автомобильных дорог связывает большое количество воды (около 32 %), переходящей в твердую фазу, что способствует снижению влажности переувлажненных грунтов.

2. Возможно использование при пониженных температурах воздуха. При гидратации нормально обожженной извести практически в течение первого часа после затворения ее водой выделяется большое количество тепла 276 кал/г за час. За то же время полуводный гипс выделяет 27 кал/г, а портландцемент – 30 кал/г за сутки [212]. При схватывании извести в процессе в начале начинается рост температуры, к концу схватывания температура достигает максимальных значений. Поэтому укрепленные грунты при температурах ниже 0 °С твердеют более спокойно и имеют лучшие прочностные характеристики, так как окружающие условия способствуют быстрому отводу тепла и уменьшению термических напряжений.

Однако применение негашеной извести имеет ряд сложностей.

1. Твердение негашеной извести протекает нормально при содержании воды в грунтоизвестковой смеси в пределах 100–150 % от массы извести. При этом наблюдается быстрое схватывание (через 30–40 мин) и твердение полученного теста.

2. При незначительном содержании воды (60–80 % от массы извести) происходит резкое повышение температуры грунтоизвестковой смеси. При этом структура смеси разрыхляется, что затрудняет ее схватывание и твердение.

3. При гидратации молотой извести без отвода тепла температура может возрастать до 150 °С. При температурах, близких к 100 °С, твердение извести в процессе гидратации не происходит, так как упругие силы паров препятствуют схватыванию. Вода быстро испаряется, вследствие чего образуются сухие частицы гидроокиси кальция, которые не обладают необходимой склеивающей способностью. За счет раздвигания частиц гидроксида кальция образуется большая пористость.

4. Известь быстро теряет свою активность при хранении. Разные источники приводят рекомендуемый срок хранения молотой негашеной извести – около 15–20 сут.

В строительстве для укрепления неорганическими вяжущими материалами можно использовать практически все разновидности дисперсных грунтов: крупнообломочные, песчаные, глинистые и техногенные. Также эффективно применение малопрочных каменных материалов – песчано-гравийных смесей.

Укрепление грунтов представляет собой сложный процесс, который развивается во времени и зависит:

- 1) от физико-механических свойств грунта;
- 2) от количества и размера грунтовых агрегатов;
- 3) от минералогии грунта;
- 4) от вида вяжущих материалов и добавок;
- 5) от температуры грунта и окружающей среды.

Требования к основным физико-механическим характеристикам грунтов, влияющим на процессы структурообразования, приведены в таблице 1.3.

Наличие больших грунтовых агрегатов (комков глин) во время строительства может препятствовать процессу смешения, приводит к снижению прочности и морозостойкости грунта, укрепленного вяжущими материалами. Поэтому при наличии комков необходимо их предварительное измельчение.

Таблица 1.3 – Требования к грунтам при укреплении их портландцементом и известью

Наименование характеристики	ГОСТ 23558, СП 34.13330	ГОСТ Р 70196	Руководство по применению извести для модификации и стабилизации грунтов [89]
1	2	3	4
Число пластичности	Не более 12	До 17	Более 5 %
Влажность на границе текучести	Не более 55 % по массе	—	—
Содержание в глинистом грунте комков глины размером более 5 мм	Не более 25 % по массе, в т. ч. комков глины размером более 10 мм – 10 % по массе	—	—
Содержание в грунте частиц/конгломератов размером более 5 мм должно составлять	Не свыше 25 % массы	—	—
Содержание частиц размером более 10 мм	Не свыше 10 % массы	—	—
Содержание частиц фракции от 31,5 до 45 м	—	Не более 10 %	—
Содержание частиц менее 74 мм	—	—	Более 25 %
Наибольшая крупность частиц	—	45 мм	—
Содержание гумусовых веществ	менее 2 % по массе – в I и II дорожно-климатических зонах, более 4 % – в III–V зонах	не более: – 2 % – в дорожно-климатических зонах I и II – 4 % – в дорожно-климатических зонах III–V	для насыпей – менее 4 %; для оснований – менее 2 %

Окончание таблицы 1.3

1	2	3	4
Содержание примесей гипса	менее 10 % по массе	не более 10 %	—
Содержание сульфатов при укреплении цементом или известью	менее 2 %	не более 2 %	для насыпей – менее 0,1 %; для оснований – менее 0,25 %
Содержание хлоридов при укреплении цементом или известью	—	не более 4 %	—
Объемное набухание G_v	—	—	для насыпей – менее 10 %; для оснований – менее 5 %

Ограничение по содержанию сульфатов в грунтах обусловлено тем, что сульфаты вступают в реакцию с вяжущими. Как следствие, это может приводить к потере прочности и значительным изменениям объема. Вредное действие сернокислых солей можно устранить добавками извести.

Если температура грунта составляет менее 4 °С, и не ожидается ее увеличение в течение одного месяца, химические реакции будут протекать медленно, и нарастание прочности укрепленного грунта будет минимальным. Поэтому в этих условиях использование цемента не рекомендуется [43].

Водородный показатель pH представляет собой соотношение концентрации H^+ и OH^- ионов в грунтовом растворе, выраженное через pH водной вытяжки из грунта. Для классификации грунтов по показателю pH можно использовать шкалу, принятую для классификации почв (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Классификация почв по степени кислотности, определяемой в водной вытяжке

Состояние почв	pH
1	2
Сильнокислые	<4
Кислые	4–5

Окончание таблицы 1.4

1	2
Слабокислые	5–6
Нейтральные	7
Слабощелочные	7–8
Щелочные	8–9
Сильнощелочные	9–11

Процессы гидратации и твердения цемента в кислых грунтах сильно замедляются, что приводит к снижению прочностных характеристик. Как уже сказано выше, повысить pH грунтов можно с помощью добавок извести.

Наличие в грунтах большого количества гумусовых веществ отрицательно влияет на прочностные характеристики укрепленного грунта. Введение извести позволяет снизить негативное воздействие гумусовых веществ, но по мере увеличения периода твердения (до 180 сут.) эффект от введения извести снижается [69].

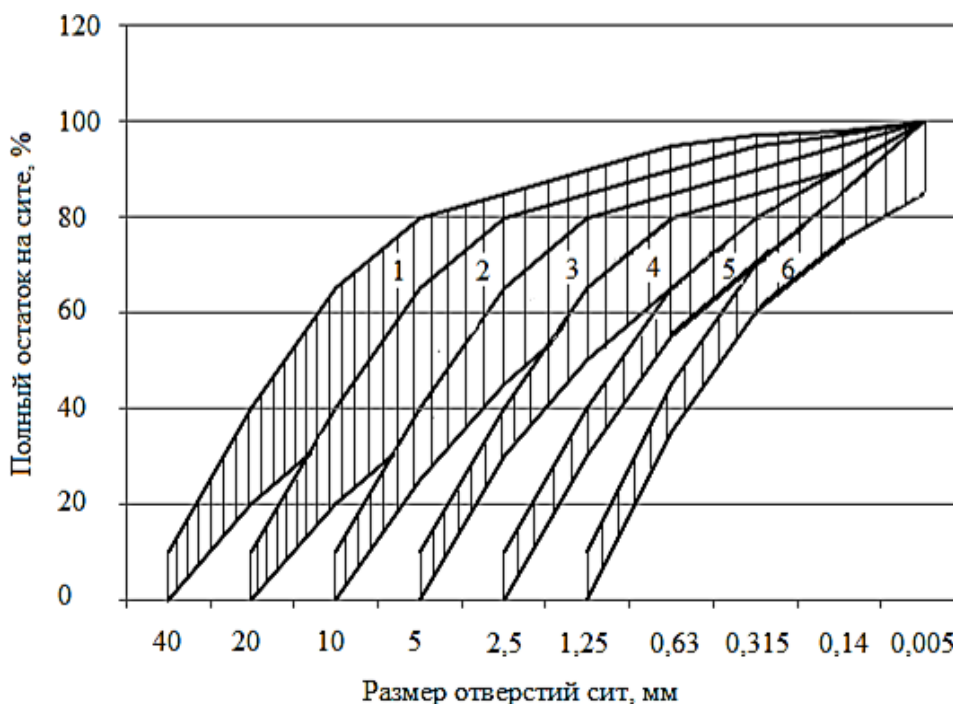


Рисунок 1.7– Кривые оптимального гранулометрического состава:

- 1 – макс. крупность зерен 40 мм; 2 – макс. крупность зерен 20 мм;
- 3 – макс. крупность зерен 10 мм; 4 – макс. крупность зерен 5 мм;
- 5 – макс. крупность зерен 2,5 мм; 6 – макс. крупность зерен 1,25 мм

(рисунок автора [234])

При укреплении карбонатных грунтов, например, карбонатных супесчаных или легкосуглинистых лессов, благодаря наличию в растворе ионов кальция и слабой щелочной среде процессы гидратации и твердения грунта будут происходить более интенсивно. Применение грунтов оптимального гранулометрического состава (рисунок 1.7) позволяет получить укрепленные грунты с улучшенными физико-механическими свойствами и при этом снизить расход вяжущих материалов и повысить плотность, а, соответственно, прочность и морозостойкость укрепленного грунта.

Наличие крупных фракций формирует в укрепленном грунте прочный скелет, который может воспринимать нагрузку от транспортных средств и строительной техники в первые дни после строительства слоев из укрепленных грунтов, что существенно сокращает сроки строительства.

Регулирование гранулометрического состава путем введения гранулометрических добавок позволяет изменять физико-механические свойства укрепленных грунтов.

1.3. Применение золошлаковых отходов ТЭЦ в конструкциях автомобильных дорог

1.3.1. Зола уноса

Направление использования золы уноса определяется ее физическими и химическими свойствами.

К основным физическим свойствам относятся следующие.

Дисперсность. Определяется значением удельной поверхности или значениями полных остатков на ситах.

Потери при прокаливании. Характеризуют содержание несгоревших углеродистых частиц и составляют в среднем 0,5–30 %. Наибольшее количество несгоревших частиц наблюдается в крупных фракциях. Несгоревшие частицы могут

являться активным адсорбентом по отношению к органическим малодиссоциирующим веществам.

Гранулометрический состав. Изменяется в широких пределах – от 0,001 до 0,200 мм. Основное количество частиц имеют размеры около 0,030–0,040 мм.

Насыпная плотность. Значения варьируются в среднем от 600 до 1000 кг/м³.

Истинная плотность. Варьируется в среднем от 1800 до 2400 кг/м³. При этом в золах уноса наблюдается большое количество частиц с мелкими замкнутыми порами. Общий объем пор может достигать 60 % от объема частиц, что обуславливает высокое значение удельной поверхности.

Гидравлическая активность. В первую очередь определяется количеством содержания свободного оксида кальция, оксида магния и сульфата кальция.

Процесс гидратации зол уноса, содержащих большое количество оксида кальция, протекает медленно, так как поверхность частиц свободного оксида кальция обычно покрыта оплавленной оболочкой, что затрудняет взаимодействие с водой.

Оксид магния может присутствовать как в активной форме (активно взаимодействует с водой), так и в виде периклаза (взаимодействие с водой протекает очень медленно). Присутствие в золах уноса периклаза снижает качество вяжущего, приводит к медленной гидратации и к возникновению трещин.

Значительное количество сульфата кальция в золах уноса в начальной стадии твердения может улучшать гидравлическую активность и вызывать снижение прочности в более поздние сроки твердения вяжущих на основе зол уноса.

Применение зол уноса при укреплении грунтов автомобильных дорог

Золы уноса могут применяться в качестве самостоятельного медленно твердеющего вяжущего и в составе комплексных вяжущих. Золы уноса эффективны при укреплении крупнообломочных и песчаных грунтов, а также супесей.

На прочность и морозостойкость укрепленного грунта оказывает влияние содержание в золе уноса свободной извести (CaO). В частности, золы уноса с содержанием свободной извести до 15 % эффективно применять для укрепления не-

связных грунтов, золы уноса с содержанием свободной извести от 15 % и выше – для укрепления глинистых грунтов [206].

Требования к золам уноса, применяемым в качестве самостоятельных вяжущих или в сочетании с добавками активаторов твердения, приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Требования к золам уноса (Пособие к СНиП 3.06.03)

Наименование показателя	Предельное значение
Содержание свободного оксида кальция, %	не менее 8
Удельная поверхность, см ² /г	не менее 3000
Содержание сернистых и сернокислых соединений, % в пересчете на SO ₃	не более 6
Прочие компоненты, %	не более 5

Укрепление грунтов золами уноса отличается от укрепления цементом или известью. В первую очередь, это медленное протекание реакций гидратации. Даже после года твердения частицы золы уноса гидратируются только с поверхности, сохраняя и при сильной коррозии шарообразную форму.

Так же как и в грунтах, укрепленных цементом и известью, в грунтах, укрепленных золами уноса, образуются гидросиликаты и гидроалюминаты кальция.

Золы уноса можно применять в качестве компонента комплексного вяжущего в сочетании с цементом или известью, а также с органическими вяжущими – битумом и смолами [230]. Комплексными вяжущими на основе золы уноса эффективно укреплять следующие грунты:

- крупнообломочные;
- песчаные;
- глинистые грунты с числом пластичности I_p до 21;
- золошлаковые смеси.

Цементозольное вяжущее на основе золы уноса можно получить путем активации портландцементом. Рекомендуемые требования приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Требования к золам уноса при активации портландцементом (Пособие к СНиП 3.06.03)

Наименование характеристики	Единица измерения	Количество
Удельная поверхность	м ² /кг	не менее 300
Содержание сернистых и серноокислых соединений в пересчете на SO ₃	%	не более 3
Потери при прокаливании	%	не более 10

Известковоугольное вяжущее на основе золы уноса можно получить путем активации известью. Рекомендуемые требования приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Требования к золам уноса при активации известью

Наименование показателя	Предельное значение
Содержание свободного СаО, %	–
Удельная поверхность, см ² /г	≥ 3000
Содержание сернистых и серноокислых соединений (в пересчете на SO ₃), %	≤ 3
Потери массы при прокаливании, %	≤ 10

1.3.2. Топливные шлаки

Топливные шлаки обычно образуются при кусковом сжигании топлива. При пылевидном сжигании шлаки составляют 10–25 % от массы образующей золы [207].

Химические свойства топливных шлаков

Химический состав шлаков, так же как и зол уноса, изменяется в широких пределах. В целом топливные шлаки состоят из оксидов кремния (19–65 %), оксидов алюминия (3–39 %), несгоревших частиц топлива (7–23 %) [206]. Часто топливные шлаки содержат в своем составе значительное количество оксидов железа (20 % и более).

Устойчивость против силикатного и железистого распадов. Топливные шлаки устойчивы против силикатного и железистого распада, так как после длительного хранения в золоотвалах (3–6 месяцев) в них происходит гашение свободного оксида кальция и частичное выщелачивание растворимых солей.

Модуль основности. По модулю основности шлаки подразделяются на кислые и основные.

Кислые шлаки образуются из каменных углей. Основные шлаки образуются из некоторых видов бурых углей и сланцев и могут содержать до 40 % оксида кальция и повышенное количество оксидов железа. К наименее кислым относятся антрацитовые шлаки.

Вредные примеси. Общее содержание сернокислых и сернистых соединений в пересчете на SO_3 в топливных шлаках не должно превышать 3 % от массы шлака, в том числе не более 1 % водорастворимых сульфатов и 1 % сульфидов [206].

Физические свойства топливных шлаков

Свойства шлаков, как и зол, зависят от технологии сжигания и вида топлива.

Пористость шлаков в среднем изменяется от 40 до 60 %.

Морозостойкость может достигать до 50 и более циклов замораживания/оттаивания.

Содержание зерен лещадной и игловатой формы. В отличие от щебня из прочных горных пород шлаковый щебень практически не содержит лещадных и игловатых зерен.

Гранулометрический состав. Частицы шлака обычно имеют крупность 0,14–30 мм, отдельные частицы могут иметь большую крупность.

Плотность. Насыпная плотность топливных шлаков составляет в среднем 1,6–1,7 г/см³. Истинная плотность шлака в основном 2,3–2,7 г/см³.

Гидравлическая активность топливных шлаков обусловлена количеством оксида кальция и составляет 20–30 мг/г.

Структура топливных шлаков. Для антрацитовых и каменноугольных углей при кусковом сжигании, а также для бурого угля при пылевидном сжигании, характерна пористая структура.

1.3.3. Золошлаковая смесь

Химические свойства золошлаковых смесей (ЗШС) обусловлены химическими свойствами входящих в их состав зол и шлаков.

Физические свойства. Золошлаковые смеси по виду шлаковой составляющей подразделяются на смеси с плотным и смеси с пористым шлаком.

Гранулометрический состав. В зависимости от гранулометрического состава в соответствии с классификацией ОДМ 218.2.031-2013 золошлаковые смеси подразделяются на крупнозернистые, среднезернистые и мелкозернистые (таблица 1.8).

К шлаку относятся шлаковый щебень (размер частиц более 5 мм) и шлаковый песок (размер частиц от 0,315 до 5 мм).

Несгоревшие остатки. Несгоревшие частицы угля стойки к окислению на воздухе, поглощают мало воды и слабо подвержены изменениям объема при попеременном увлажнении/высыхании и замораживании/оттаивании. Поэтому их негативное влияние на качество золошлаковой смеси незначительно.

Влажность. В конструкциях автомобильных дорог рекомендуется применять золошлаковые смеси влажностью не более 35 % по массе.

Таблица 1.8 – Классификация золошлаковых смесей в зависимости от гранулометрического состава по ОДМ 218.2.031-2013

Наименование показателя	Величина показателя для различных типов смесей		
	крупнозернистые (К)	среднезернистые (С)	мелкозернистые (М)
Максимальный размер зерен шлака, мм, не более	40	20	5
Содержание шлаковой составляющей в ЗШС, % по массе	от 50 до 90	от 10 до 50	от 0 до 10
Содержание шлакового щебня в шлаковой составляющей, % по массе	более 20	до 20	—

График зависимости максимальной плотности от оптимальной влажности. Форма кривой зависимости максимальной плотности от оптимальной влажности схожа с кривой несвязных грунтов. При этом золошлаковая смесь имеет более низкие значения максимальной плотности сухого грунта.

Применение золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог

В строительстве возможно применение золошлаковых смесей в качестве техногенного грунта (в соответствии с классификацией ГОСТ 25100) или материала, в качестве компонента зологрунтовых и золоминеральных композиций, а также в качестве техногенного грунта, укрепленного/стабилизированного неорганическими вяжущими материалами. При этом их можно применять для возведения слоев автомобильных дорог.

ОДМ 218.2.031-2013 предъявляет определенные требования к золошлаковым смесям (таблица 1.9).

Таблица 1.9 – Рекомендуемые требования к ЗШС, применяемым в дорожном строительстве (ОДМ 218.2.031-2013)

Назначение	Характеристики ЗШС	
В дополнительных слоях дорожных одежд	величина относительной деформации морозного пучения	не более 0,01
	коэффициент фильтрации	не менее 1 м/сут.
Для устройства морозозащитного и теплоизолирующего (но не дренирующего) слоя	величина относительной деформации морозного пучения	не более 0,035
	коэффициент фильтрации	не менее 0,2 м/сут.

К наиболее важным показателям, оцениваемым при строительстве слоев автомобильных дорог из золошлаковой смеси, относятся относительная деформация морозного пучения и коэффициент фильтрации.

С целью увеличения прочностных и эксплуатационных характеристик золошлаковых смесей в строительстве производят их укрепление неорганическими вяжущими материалами, к которым относятся:

- портландцемент;
- известь и известьсодержащие отходы;
- комплексные неорганические вяжущие (известково-шлаковое, известково-зольное, цементно-зольное и др.).

Введение неорганических вяжущих материалов в золошлаковые смеси значительно повышает общий модуль упругости слоев. Увеличение последнего позволяет снизить общую толщину конструкции и, как следствие, сократить расход строительных материалов и, соответственно, снизить стоимость.

Многие авторы отмечают, что при укреплении золошлаковых смесей портландцементом или известью, в процессе твердения ЗШС могут проявлять гидравлическую активность. При положительной температуре при гидратации вяжущего выделяется оксид кальция. Он вступает в реакцию с кремнеземом и глиноземом, входящими в состав золошлаковой смеси, и образует новые соединения (гидросиликаты кальция). Этот процесс приводит к увеличению прочности и морозостойкости укрепленного грунта.

Процессы структурообразования протекают относительно медленно (по сравнению с грунтами, укрепленными цементом), поэтому определение физико-механических характеристик укрепленных золошлаковых смесей целесообразно получать в возрасте 28 сут., а также 90, 180 и 360 сут [230].

Укрепление цементом. Для укрепления цементом подходят золошлаковые смеси с различным гранулометрическим составом.

Расход цемента составляет 4–10 % общей массы и зависит от гранулометрического состава и содержания частиц менее 0,14 мм. Подбор состава смеси производится аналогично, как и для грунтов, укрепленных цементом.

При укреплении золошлаковых смесей цементом возможно получение составов с высокими физико-механическими характеристиками.

Прочность на сжатие и растяжение при изгибе. Прочность на сжатие и растяжение при изгибе в возрасте 7 сут. составляет более 1 МПа и увеличивается с течением времени. В возрасте 28 сут. прочность на сжатие образцов в водонасыщенном состоянии может достигать значений 6–8 МПа.

Водостойкость. Золошлаковые смеси, укрепленные цементом, обладают высокой водостойкостью (более 0,6).

Укрепление известью. При укреплении золошлаковых смесей известью, в отличие от укрепления цементом, отсутствует опасность преждевременного схватывания. Для укрепления ЗШС можно применять молотую негашеную известь или пушонку. Содержание извести составляет 3–10 % общей массы смеси или 15–35 % (в пересчете на активные оксиды $\text{CaO} + \text{MgO}$) от массы пылевидной фракции золошлаковой смеси. Для ускорения процессов твердения можно использовать добавки портландцемента, хлоридов, сульфатов и др.

Прочность на сжатие и растяжение при изгибе. Прочность на сжатие в возрасте 28 сут. составляет более 1 МПа и увеличивается с течением времени. В возрасте 90 сут. прочность на сжатие образцов в водонасыщенном состоянии может достигать значений более 5 МПа.

Водостойкость. Золошлаковые смеси, укрепленные известью, так же как и при укреплении цементом, обладают высокой водостойкостью (более 0,6).

Золоминеральные и зологрунтовые смеси. На основе золошлаковых смесей возможно получение золоминеральных (на основе щебеночно-песчано-гравийных смесей) и зологрунтовых (на основе местных грунтов) смесей для строительства автомобильных дорог. Добавление золошлаковых смесей в местные грунты и материалы позволяет снизить расход вяжущих материалов.

1.4. Методы лабораторных испытаний грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами

Для высокой эффективности практического применения грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, необходимо обеспечивать высокое качество подбора состава и проектирования конструкции автомобильных дорог [21, 119].

Целью всех методов подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, является определение оптимального соотношения количества грунта, воды, неорганического вяжущего материала и добавок, при котором достигаются требуемые качественные характеристики: плотность, прочность на сжатие, прочность на растяжение при раскалывании, морозостойкость и др. [32, 80, 170].

Методы подбора составов, применяемые в строительстве, содержат общие требования к грунтам, вяжущим материалам и укрепленным грунтам и имеют ряд недостатков [221, 234].

1. Ориентировочное количество неорганического вяжущего

В отечественной и зарубежной практике имеются разрозненные рекомендации по назначению ориентировочного количества неорганического вяжущего в зависимости от вида грунта и конструктивного слоя (таблица 1.10 [230]).

Таблица 1.10 – Содержание вяжущих материалов в укрепленных грунтах

Вяжущее	Грунты	Дозировка вяжущего, % от массы сухого грунта						
		Методы подбора состава, США [62]	ОДМ 218.2.035	Пособие к СНиП 3.06.03-85, Рекомендации по комплексному укреплению грунтов золошлаковыми смесями	Руководство по обработке грунтов, США [89]	Метод подбора состава укрепленного грунта, Швеция [96]	Метод подбора состава укрепленного грунта США [37]	Методы подбора состава укрепленного грунта РФ [28]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Портландцемент и его аналоги: белитовый, спекательный шламы и шлако-портландцемент	Крупнообломочные нецементированные (гравийные, дресвяные, щебеночные) близкие к оптимальному составу	5–0	5–7	4–8 3–6	–	–	–	–
	Крупнообломочные нецементированные неоптимального состава	–	–	6–12 4–8	–	–	–	–
	Песчаные грунты	7–12	6–9	4–12 3–8	–	–	–	–

Продолжение таблицы 1.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Портландцемент и его аналоги	Супеси легкие крупные и пылеватые (близкие к оптимальному составу с числом пластичности I_p не более 12)	12–20	–	<u>8–12</u> 4–7	–	–	–	–
	Супеси тяжелые пылеватые; суглинки легкие и легкие пылеватые с числом пластичности I_p не более 12	12–20	–	<u>8–12</u> 4–7	–	–	–	–
	Суглинки тяжелые, тяжелые пылеватые с числом пластичности I_p не более 12	–	–	<u>11–14</u> 8–12	–	–	–	–
	Глины песчанистые и пылеватые с числом пластичности менее 22	–	–	<u>13–15</u> 10–12	–	–	–	–
	Золошлаковые смеси	–	–	<u>5–7</u> 4–6	–	–	–	–
	Шлаки черной и цветной металлургии, фосфорные и др.	–	–	<u>5–8</u> 4 – 7	–	–	–	–
	«Хвосты» – твердые отходы различных видов промышленности различного зернового состава	–	–	<u>5 – 9</u> 4–8	–	–	–	–

Окончание таблицы 1.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Портландцемент и его аналоги...	Слои из несвязных грунтов	—	—	—	2–8	—	4±0,5 5±1	3–6
	Земляное полотно	—	—	—	3–6	—	—	—
Известь, известьсодержащие отходы промышленного производства	Основание дорожной одежды (крупно-обломочные с глинистым заполнителем, известняк с содержанием более 50 % крупных частиц)	—	—	—	2–4	—	—	—
	Супесь	—	—	—	5–8	—	—	5–7
	Супесь песчанистая и пылеватая; суглинок легкий	—	—	—	5–8	—	—	4–8
	Пески и супесь с числом пластичности менее 3 с добавкой 15–25 % золы или золошлаковой смеси	—	—	—	—	—	—	2–4
	Суглинок тяжелый песчанистый и тяжелый пылеватый	—	—	—	5–8	6–8	—	5–9
	Глина легкая песчанистая и пылеватая с числом пластичности не более 22	—	—	—	5–8	8–10	—	6–10

Примечание. Над чертой – дозировка цемента для верхнего слоя основания или покрытия, под чертой – нижнего слоя основания.

При этом существующие рекомендации не учитывают климатические особенности района строительства, условия производства работ, технологию смешения (на месте производства работ или в смесительной установке), а также не дают подробных указаний по производству и применению комплексных вяжущих материалов, что затрудняет подбор состава смеси и не позволяет определить точную стоимость производства работ по устройству слоев из укрепленных грунтов без проведения лабораторных испытаний.

Из-за отсутствия четких рекомендаций количество составов укрепленного грунта с разным процентным содержанием вяжущего может быть неограниченным, что приводит к большой продолжительности и трудоемкости работ в строительных лабораториях.

2. Определение максимальной плотности и оптимальной влажности

Значения максимальной плотности и оптимальной влажности грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, принято определять методом стандартного уплотнения СОЮЗДОРНИИ и модифицированным методом Проктора.

Применение этих методов позволяет определить зависимость изменения плотности скелета грунта от последовательного увеличения его влажности при уплотнении образцов грунта под воздействием ударной нагрузки. Масса уплотняющего груза в методе СОЮЗДОРНИИ составляет 2500 г. В модифицированном методе Проктора применяется уплотняющий груз массой 4500 г.

При этом значение оптимальной влажности, полученное при стандартном уплотнении, может быть значительно меньше количества воды, необходимого для гидратации химических соединений неорганического вяжущего. Например, при укреплении грунтов негашеной известью для ее гашения может потребоваться до 80 % воды от массы извести. Причем это значение может быть увеличено, чтобы компенсировать потери при испарении воды за счет высокой температуры гидратации.

Согласно, например, формуле И.В. Егорова [203], величина оптимальной влажности известково-грунтовой смеси может быть увеличена:

$$W_{\text{см}}^0 = W_{\text{гр}}^0 + 2 + 0,2Д, \quad (1.1)$$

где: $W_{\text{см}}^0$ – оптимальная влажность известково-грунтовой смеси;

$W_{\text{гр}}^0$ – оптимальная влажность грунта;

Д – дозировка извести.

3. Изготовление образцов укрепленного грунта

Для изготовления образцов грунта, укрепленного неорганическими вяжущими, используется метод стандартного уплотнения СОЮЗДОРНИИ, модифицированный метод Проктора и метод прессования (использование статической нагрузки).

Изготовление образцов методом СОЮЗДОРНИИ имеет ряд недостатков:

- 1) метод применяется для грунтов с максимальным размером частиц менее 20 мм, что ограничивает его применение для грунтов, содержащих более крупные частицы;
- 2) использование насадки приводит к различию плотности по массе образца;
- 3) после извлечения образца из формы возможно образование на поверхности углублений из-за выпадения крупных частиц; эти углубления заполняются грунтом и разравниваются ножом, что искажает результаты испытания образцов на сжатие;
- 4) образцы часто получаются с неровностями, что искажает результаты испытания образцов на сжатие;
- 5) в приборе стандартного уплотнения СОЮЗДОРНИИ диаметр трамбовки соответствует внутреннему диаметру формы прибора, что может приводить к дробимости крупных частиц;
- 6) результаты лабораторных испытаний образцов, изготовленных данным методом, часто обладают низкой сходимостью.

Изготовление образцов модифицированным методом Проктора также имеет недостатки:

1) метод не распространяется на грунты и смеси щебеночно-гравийно-песчаные, содержащие более 25 % частиц крупнее 63 мм;

2) при наличии раковин и углублений, которые могут возникать из-за выпадения крупных частиц при выравнивании поверхности образца, эти раковины и углубления вручную заполняют грунтом и разравнивают ножом, что также может влиять на значения плотности;

3) так же как и в приборе СОЮЗДОРНИИ, при разборе формы часть грунта может налипать на стенки, разрушая монолитность и структуру образцов;

4) результаты лабораторных испытаний образцов, изготовленных данным методом, часто обладают низкой сходимостью.

Следует отметить, что увеличение массы уплотняющего груза в модифицированном методе Проктора позволяет моделировать в лабораторных условиях повышенное – по сравнению с методом СОЮЗДОРНИИ и методом Проктора – уплотнение. Это имеет очень большое значение, так как качественные характеристики укрепленных грунтов напрямую зависят от степени уплотнения.

Оба рассмотренных метода очень трудоемкие и продолжительные во времени.

Изготовление образцов с использованием статической нагрузки. Изготовление образцов возможно осуществлять методом прессования. ГОСТ 23558-94 регламентирует для смесей с максимальной крупностью до 5 мм использовать образцы в форме кубов (50х50х50 и 100х100х100 мм) или образцы в форме балочек (40х40х100 мм), а для смеси с максимальной крупностью до 20 мм образцы в форме балочек (размеры 100х100х400 мм). Изготовление образцов производится в течение трех минут под давлением 15 МПа – для смеси с максимальной крупностью до 5 мм, 20 МПа – для смеси с максимальной крупностью не более 20 мм.

Данный метод также имеет ряд недостатков:

1) отсутствуют четкие требования к образцам-кубам и образцам-балочкам укрепленных грунтов;

2) метод применяется для грунтов с максимальным размером частиц менее 20 мм, что ограничивает его применение для грунтов, содержащих частицы большего размера.

В то же время использование статической нагрузки для изготовления образцов является более предпочтительным по сравнению с ударными методами, так как:

- образцы получаются ровные, без раковин и сколов, постоянной высоты и массы;
- образцы имеют ровные грани вследствие более равномерного уплотнения и отсутствия налипания грунта на стенки формы;
- хорошее качество образцов сводит к минимальным расхождениям результаты параллельных испытаний укрепленных грунтов на прочность, водостойкость, морозостойкость и др.;
- степень раздробленности отдельных частиц значительно ниже, чем при использовании ударного метода;
- изготовление образцов методом прессования является менее трудоемким, чем применение прибора стандартного уплотнения СОЮЗДОРНИИ или модифицированного метода Проктора.

4. Определение прочности на сжатие

Определение прочности на сжатие проводят на образцах укрепленного грунта, подвергнутых полному или капиллярному водонасыщению. При этом отсутствуют требования к определению прочности на сжатие в неводонасыщенном состоянии, что является некорректным. А именно:

- определение прочности на сжатие образцов укрепленного грунта в водонасыщенном состоянии в промежуточном возрасте не позволяет достоверно оценить набор прочности во времени;
- отсутствие значений прочности на сжатие неводонасыщенных образцов не позволяет определить время открытия движения построенного транспорта по уложенному слою;

- отсутствует возможность оценки работы конструкции, имеющей в своем составе укрепленные грунты, без увлажнения, и, как следствие, нет возможности разработки конструкций с использованием укрепленных грунтов с низкими значениями водостойкости и устройством гидроизоляции;
- проведение лабораторных испытаний только на образцах укрепленного грунта, подвергнутых полному или капиллярному водонасыщению, увеличивает сроки подбора состава смеси.

5. Определение прочности на растяжение при изгибе и раскалывании

Определение прочности при раскалывании укрепленного грунта производится путем нагружения образца-цилиндра, установленного в горизонтальном положении.

Между значениями прочности на растяжение при изгибе и прочности на растяжение при раскалывании нет прямой зависимости. Однако с учетом отечественного и зарубежного опыта определение прочности при раскалывании для оценки качества укрепленного грунта является предпочтительным, так как оно более простое и не имеет недостатков метода определения прочности на растяжение при изгибе.

6. Метод определения калифорнийского числа (CBR)

Калифорнийское число определяется путем вдавливания в образец штампа диаметром 50 мм при установленной скорости нагружения.

7. Экспресс-методы подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами

В практике лабораторных испытаний отсутствуют методы ускоренного подбора состава укрепленных грунтов.

Определение качественных характеристик проводится на образцах укрепленного грунта в проектном и промежуточном возрасте после их твердения в нормальных условиях. Проектный возраст зависит от вида вяжущего материала и составляет: для цементов, извести, активных материалов с высокой удельной поверхностью – 28 сут.; для комплексных минеральных вяжущих – 56, 90, 180 сут.

Испытание образцов на морозостойкость производится базовым методом (попеременным замораживанием/оттаиванием). Определение качественных характеристик образцов в указанные сроки приводит к очень большой продолжительности процедуры подбора состава и может составлять до 6–7 мес. Это сильно затрудняет применение таких материалов, так как обеспечение качества строительных работ возможно только при правильном подборе состава. Особенно сложным становится применение этих материалов в условиях континентального климата, когда продолжительность строительного сезона может составлять всего несколько месяцев.

Сокращение сроков подбора состава можно обеспечить двумя способами:

- прогнозирование конечных качественных характеристик [55, 58];
- обработка образцов укрепленного грунта паром или микроволновым излучением.

Наиболее интересным с практической точки зрения представляется второй способ, так как он позволяет добиться набора прочности в наименьшие сроки.

8. Определение модуля упругости в лабораторных условиях

Так же как и прочность на сжатие, модуль упругости является важнейшей характеристикой грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, применяемых в строительстве. Данная характеристика используется при расчете конструкций автомобильных дорог на прочность.

Отсутствие подробных рекомендаций по определению модуля упругости в лабораторных условиях не позволяет осуществлять подбор состава смеси укрепленных грунтов с заданными проектной документацией значениями, что приводит к невозможности обеспечения требуемых значений модуля упругости при строительстве автомобильных дорог.

Можно сделать вывод, что в практике лабораторных испытаний грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами:

- 1) отсутствуют подробные рекомендации определения модуля упругости в лабораторных условиях;

2) отсутствуют ориентировочные качественные характеристики и область применения укрепленных грунтов в зависимости от вида вяжущего материала, климатических особенностей района строительства и условий производства работ;

3) изложенные методы лабораторных испытаний – очень трудоемкие и продолжительные во времени, что приводит к большой продолжительности подбора состава (от 2 мес.) и снижает область применения этих материалов (в частности, в условиях континентального и полярного климата к морозостойкости и водостойкости укрепленных грунтов предъявляются повышенные требования; продолжительность строительного сезона, когда возможно устройство слоев, из укрепленных грунтов может составлять менее 3 мес. в зависимости от района строительства, что не позволяет оперативно осуществлять подбор состава);

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

5) отсутствуют четкие рекомендации и требования к подбору составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами.

Для эффективного применения этих материалов необходимо развитие методологических подходов к подбору состава укрепленных грунтов и методов определения физико-механических характеристик в лабораторных условиях, а также развитие и разработка методов контроля качества устроенных слоев.

Выводы

1. Применение техногенных отходов и, в частности, золошлаковых смесей ТЭЦ при строительстве земляных сооружений позволит сохранить природные ресурсы и снизить экологическую нагрузку. Наиболее материалоемким направлением является строительство земляных сооружений и в частности, автомобильных дорог.

Несмотря на многочисленные исследования золошлаковых смесей ТЭЦ, возможность широкомасштабного их применения в конструкциях с автомобильных дорог в условиях континентального изучена недостаточно. Количество объектов капитального строительства, построенных с применением этих материалов, незначительно.

2. Для эффективного практического применения золошлаковых смесей ТЭЦ и грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в условиях континентального климата при строительстве автомобильных дорог необходимы эффективные методы разработки оптимального состава и оценки их качественных характеристик.

При этом в практике лабораторных испытаний:

- отсутствует метод определения модуля упругости из золошлаковых смесей ТЭЦ и грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в лабораторных условиях (это не позволяет подбирать состав укрепленных грунтов с заданными проектной документацией значениями модуля упругости, что приводит к невозможности обеспечения требуемых значений при строительстве объектов капитального строительства);
- методы лабораторных испытаний грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, трудоемки и продолжительны во времени, что приводит к большой длительности подбора состава (от 2 мес.) и сужает область применения этих материалов в условиях короткого строительного сезона;
- отсутствуют ускоренные методы оценки качественных характеристик золошлаковых смесей ТЭЦ и грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами;
- отсутствуют четкие рекомендации и требования к подбору составов золошлаковых смесей ТЭЦ и грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами.

Перечисленные недостатки являются одной из основных причин ограниченного применения этих материалов при строительстве автомобильных дорог в условиях континентального климата, когда продолжительность строительного

сезона небольшая. Необходима разработка методов подбора состава укрепленных грунтов и определения физико-механических характеристик в лабораторных условиях, а также методов контроля качества устроенных слоев автомобильных дорог.

3. Для достижения поставленной в работе цели необходимо:

- исследование свойств золошлаковых смесей ТЭЦ для оценки эффективности их применения в качестве техногенного грунта и в составах грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами;
- разработка в лабораторных условиях метода определения модуля упругости образцов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами;
- разработка и совершенствование ускоренных методов подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в том числе на основе использования золошлаковых материалов ТЭЦ;
- апробация полученных результатов при строительстве автомобильных дорог.

Глава 2. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРУКТУРООБРАЗОВАНИИ В ГРУНТАХ, УКРЕПЛЕННЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ ВЯЖУЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ

2.1. Явления, влияющие на структурообразование укрепленных грунтов

Для эффективного применения укрепленных грунтов необходимо наличие не только передовых технологий, но и технического понимания процессов структурообразования.

Грунты можно рассматривать как дисперсные системы. Твердые частицы являются дисперсной фазой, а вода – дисперсной средой.

Для дисперсной системы характерны такие явления как адсорбция, ионный обмен, коагуляция, которые оказывают большое влияние на процессы структурообразования в укрепленных грунтах. Наиболее ярко эти явления представлены в дисперсных глинах.

Механизм реакций ионного обмена, флокуляции и агломерации можно выразить в виде



Взаимодействие глинистых частиц с катионами кальция стабилизаторов в присутствии воды известно как реакция катионного обмена. Реакции катионного обмена включают замену катионов с более низкой валентностью, таких как Na^+ , катионами с более высокой валентностью, такими как Ca^{2+} . Этот процесс приводит к флокуляции частиц глины и уменьшению толщины диффузионного двойного слоя. Результатом этих реакций является улучшение обрабатываемости и пластичности укрепленного или стабилизированного грунта в краткосрочной перспективе.

Все процессы структурообразования в грунтах зависят от содержания и минералогии в них глинистых и коллоидных частиц. Большое содержание этих частиц легко определяется по высокой пластичности, чрезмерно высокой способности к набуханию и усадке грунта. Эти явления особенно сильно развиваются, когда предел текучести и число пластичности превышают 50 и 30 %, соответственно [163].

Способность грунтов к набуханию в соответствии с предельными значениями предела текучести, индекса пластичности и предела усадки приведена в таблице 2.1. Классификация потенциалов усадки на основе индекса пластичности представлена в таблице 2.2.

Таблица 2.1 – Классификация потенциала набухания [163]

Классификация потенциала набухания	Предел текучести, %	Число пластичности, %	Предел усадки, %
Низкий	20–35	<18	>15
Средний	35–50	15–28	10–15
Высокий	50–70	25–41	7–12
Очень высокий	>70	>35	<11

Таблица 2.2 – Классификация усадочных потенциалов грунтов в соответствии с числом пластичности [163]

Потенциал усадки	Число пластичности, %	Содержание частиц ме- нее 0,002 мм
Низкий	>35	>95
Средний	22–48	60–95
Высокий	12–32	30–60
Очень высокий	<18	<18

Когда в глинистый грунт попадает вода, его отрицательно заряженная поверхность притягивает положительно заряженные молекулы воды и позволяет ей проникать между слоями (рисунок 2.1).

Структура глинистого грунта расширяется, и вода еще больше раздвигает его слои, что приводит к расширению всего грунта. В процессе высыхания глинистый грунт дает усадку в результате высвобождения воды, удерживаемой между глинистыми минералами.

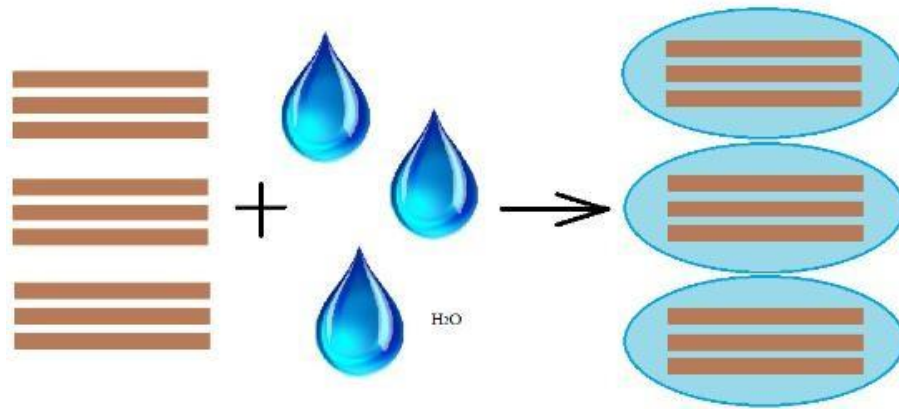


Рисунок 2.1 – Расширение кристаллической решетки
(рисунок автора)

Подробнее рассмотрим явления, влияющие на процессы структурообразования.

Адсорбция – способность грунтов концентрировать молекулы коллоидных частиц и различных веществ на границе раздела фаз или в порах (рисунок 2.2).

В грунтах адсорбция может происходить на различных межфазных поверхностях: твердой и жидкой (адсорбция из раствора); твердой и газообразной (адсорбция из паров или газа); жидкой и газообразной и др.

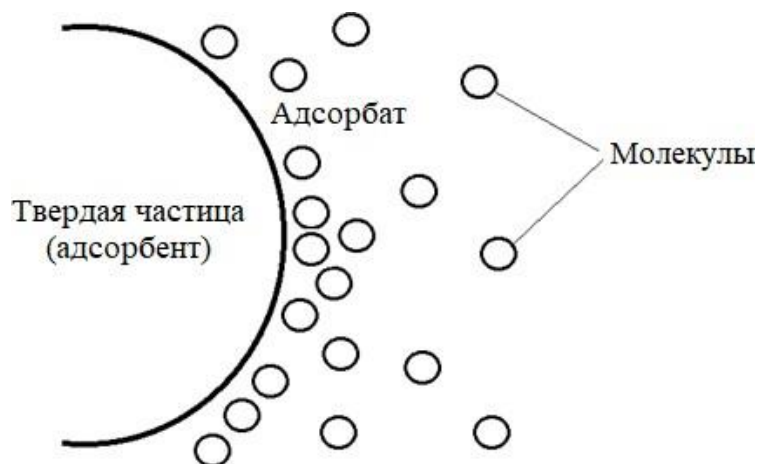


Рисунок 2.2 – Адсорбция (рисунок автора)

Существует множество видов адсорбции. К наиболее важным, с точки зрения укрепления грунтов, относятся следующие [14].

1. *Физическая адсорбция.* Является результатом проявления молекулярных сил и электростатических взаимодействий. Физическая поглотительная способность определяется количеством растворенных в воде молекул химических соединений на поверхности частиц грунта. Физическое поглощение приводит к образованию пленок на поверхности частиц грунта. Свойства этих пленок влияют на свойства грунта в целом.

2. *Химическая адсорбция.* Представляет собой поглощение растворимых веществ из раствора с образованием в грунтах нерастворимых или малорастворимых солей. Это явление имеет большое значение при укреплении грунтов неорганическими и комплексными неорганическими вяжущими в сочетании с добавкой легкорастворимых солей.

В настоящее время существуют различные теории адсорбции:

1) теория нелокализованной адсорбции – допускает возможность перемещения адсорбата по поверхности частиц;

2) теория локализованной адсорбции – предполагает, что молекулы адсорбата не могут перемещаться по поверхности, попав на поверхность адсорбента.

Адсорбция сильнее выражена в дисперсных грунтах, обладающих наибольшей удельной поверхностью и, как следствие, наибольшей поверхностной энергией.

На способности глинистых и коллоидных частиц сорбировать различные вещества основано стабилизирующее действие добавок поверхностно-активных веществ (ПАВ). Причем адсорбция разных ПАВ на поверхности одной и той же частицы протекает различно. По сорбционной активности ПАВ можно поставить в следующий ряд:

*Катионактивные ПАВ (КПАВ) → Неионогенные ПАВ (НПАВ) →
→ Анионактивные ПАВ (АПАВ).*

Физико-механические свойства стабилизированных грунтов напрямую зависят от сорбционной активности ПАВ [187].

Ионный обмен. Глинистые и коллоидные частицы в основном имеют отрицательный заряд, что объясняется наличием на их поверхности анионов, входящих в состав кристаллических решеток минералов. Ионы на поверхности частиц (дисперсной фазы) и противоионы грунтовых растворов (дисперсной среды) представляют собой двойной электрический слой. Катионы внешнего слоя способны обмениваться на катионы раствора (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{2+} и др.) в эквивалентных отношениях. Наличие эквивалентного соотношения отличает ионный обмен от адсорбции.

Изменяя состав грунтового раствора, можно существенно повлиять на свойства укрепленных грунтов.

Коагуляция – процесс «склеивания» мелких частиц дисперсных систем в более крупные агрегаты с образованием коагуляционных структур (рисунок 2.3).

При потере электрического заряда коллоидные частицы становятся нейтральными. Водные оболочки, которые находятся вокруг частиц, разрушаются, частицы при этом собираются в микрофлокулы и выделяются из раствора. В результате происходит разрушение коллоидной системы.

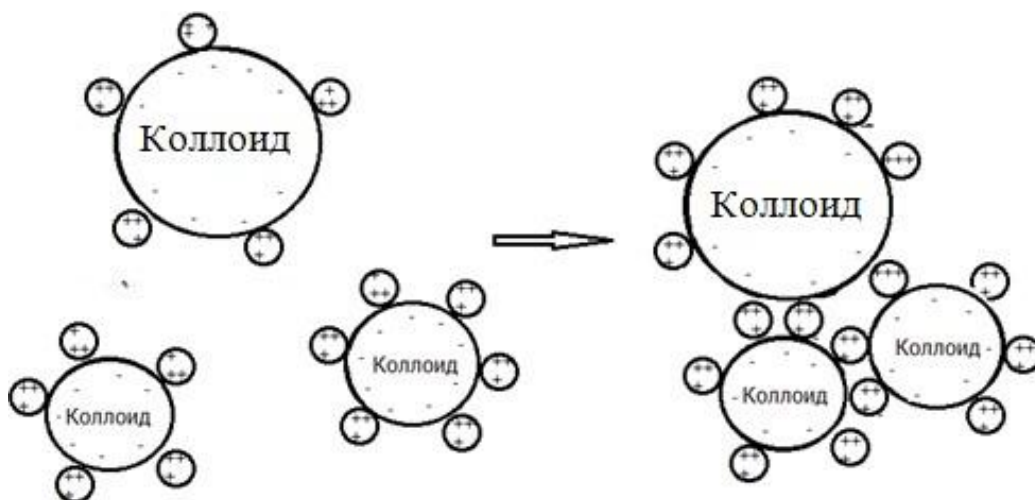


Рисунок 2.3– Коагуляция (рисунок автора)

Флокуляция. После коагуляции развивается флокуляция, представляющая собой столкновение частиц микрофлокул, которые образуют связи и формируют

объемные видимые рыхлые хлопьевидные скопления – коагуляционные структуры (рисунок 2.4).

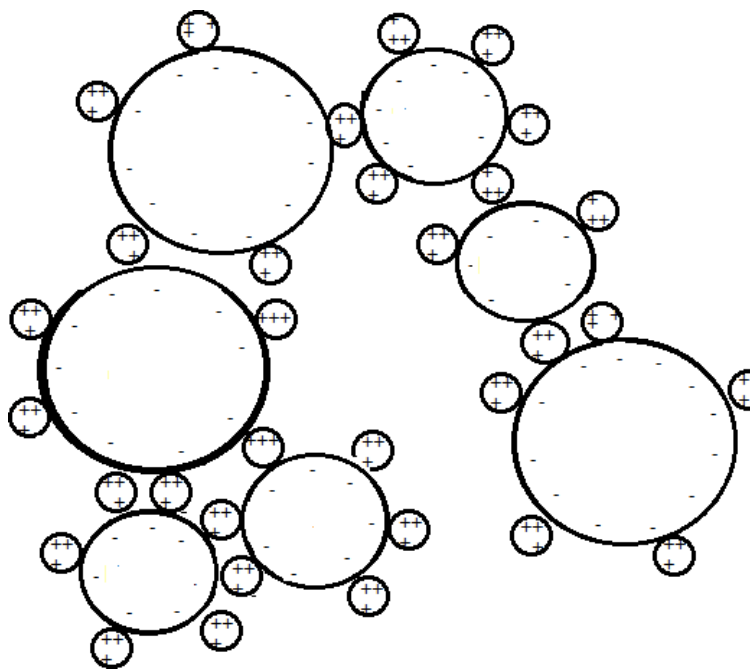


Рисунок 2.4 – Флокуляция (рисунок автора)

Коагуляция и флокуляция развиваются в несколько стадий [14].

Стадия 1. «Склеивание» коллоидных частиц и формирование первичных агрегатов. Первичные агрегаты могут сохранять остаточный заряд и формировать новые агрегаты. Происходит агрегация – пространственная группировка и адгезия дисперсных частиц, в ходе которой образуются более крупные «вторичные» частицы. Она развивается в разбавленных глинистых растворах и не приводит к их объемному структурированию, при этом первичные частицы в значительной степени сохраняют свою форму и размер, так как соединены силами межмолекулярного взаимодействия непосредственно или через прослойку окружающей водной среды.

Стадия 2. Происходит склеивание частиц силикагелем, солями, органическими и неорганическими соединениями и, как следствие, повышается прочность агрегатов. Образованные агрегаты в зависимости от прочности, вязкости и размеров делят на группы:

- 1) относительно прочные диаметром менее 2 мм;

- 2) малопрочные агрегаты (макроагрегаты) диаметром от 2 до 5 мм;
- 3) непрочные агрегаты диаметром более 5 мм.

Размеры и прочностные характеристики могут изменяться в процессе смещения грунта с неорганическими вяжущими и водой.

Минералогия грунта. Глинистые грунты обычно являются смесью минералов каолинита, монтмориллонита, гидрослюда, гидроксидов железа и марганца, кварца, а также тонких частичек гумусовых веществ.

Каолинит $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ – глинистый минерал кристаллического строения. Состоит из одного тетраэдрического и одного октаэдрического слоев (рисунок 2.5).

Обладает небольшими значениями деформации набухания и усадки. Катионный обмен происходит по внешним граням кристаллов и не происходит между слоями.

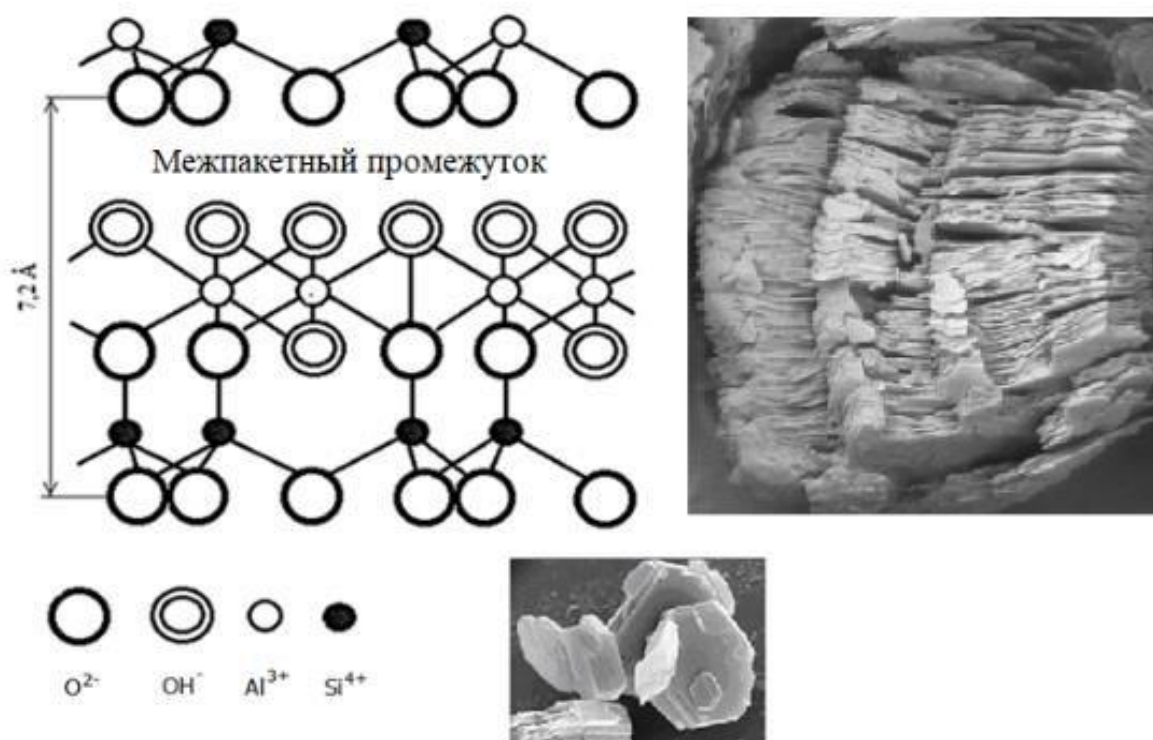


Рисунок 2.5 – Схема строения кристаллической решетки каолинита
(рисунок автора [234])

Монтмориллонит $(Ca,Na)(Mg,Al,Fe)_2[(Si,Al)_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$ представляет собой типичный трехслойный минерал (рисунок 2.6).

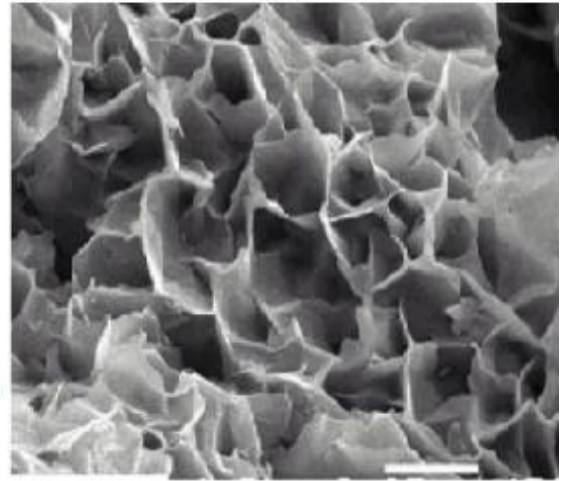
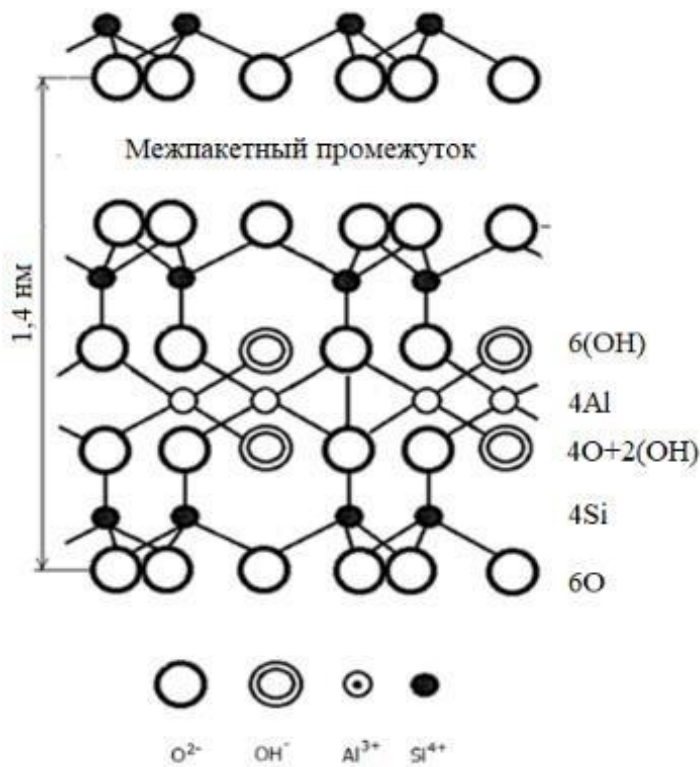


Рисунок 2.6 – Схема строения кристаллической решетки монтмориллонита (рисунок автора [234])

Монтмориллонит имеет высокие значения дисперсности и пластичности, а также деформации набухания и усадки (может в 10–20 раз увеличивать свой объем при увлажнении). Увеличение объема происходит путем расширения кристаллической решетки в результате раздвигания слоев. Катионы и молекулы воды притягиваются к отрицательно заряженным поверхностям кристаллической решетки. Это приводит к разделению заряженных поверхностей с образованием диффузного «двойного» слоя. Чем толще этот слой, тем больше пластичность грунта. Если катион, ответственный за нейтрализацию, является моновалентным, например, натрием, грунт становится пластичным.

Кроме воды в межслоевом пространстве могут находиться обменные катионы.

Миграция катионов, таких как Na⁺, из монтмориллонита изменяет структуру минеральной решетки, что приводит к инкапсуляции глинистых минералов, уменьшению количества двухслойной воды и улучшению эластичности. Анало-

гичным образом добавление поверхностно-активных веществ, содержащих катионы, такие как Ca^{2+} , Al^{3+} и Si^{4+} , ускоряет процесс выветривания глинистых минералов за счет катионного обмена, что может заменить одновалентные катионы на поверхности частиц глины и тем самым укрепить кристаллическую решетку глинистого и повысить гидрофобность грунта.

Размеры минералов монтмориллонита не превышают 1 мкм.

Гидрослюды (иллит, вермикулит и др.) – трехслойные глинистые минералы, элементарные пакеты которых построены так же как и у монтмориллонита (рисунок 2.7).

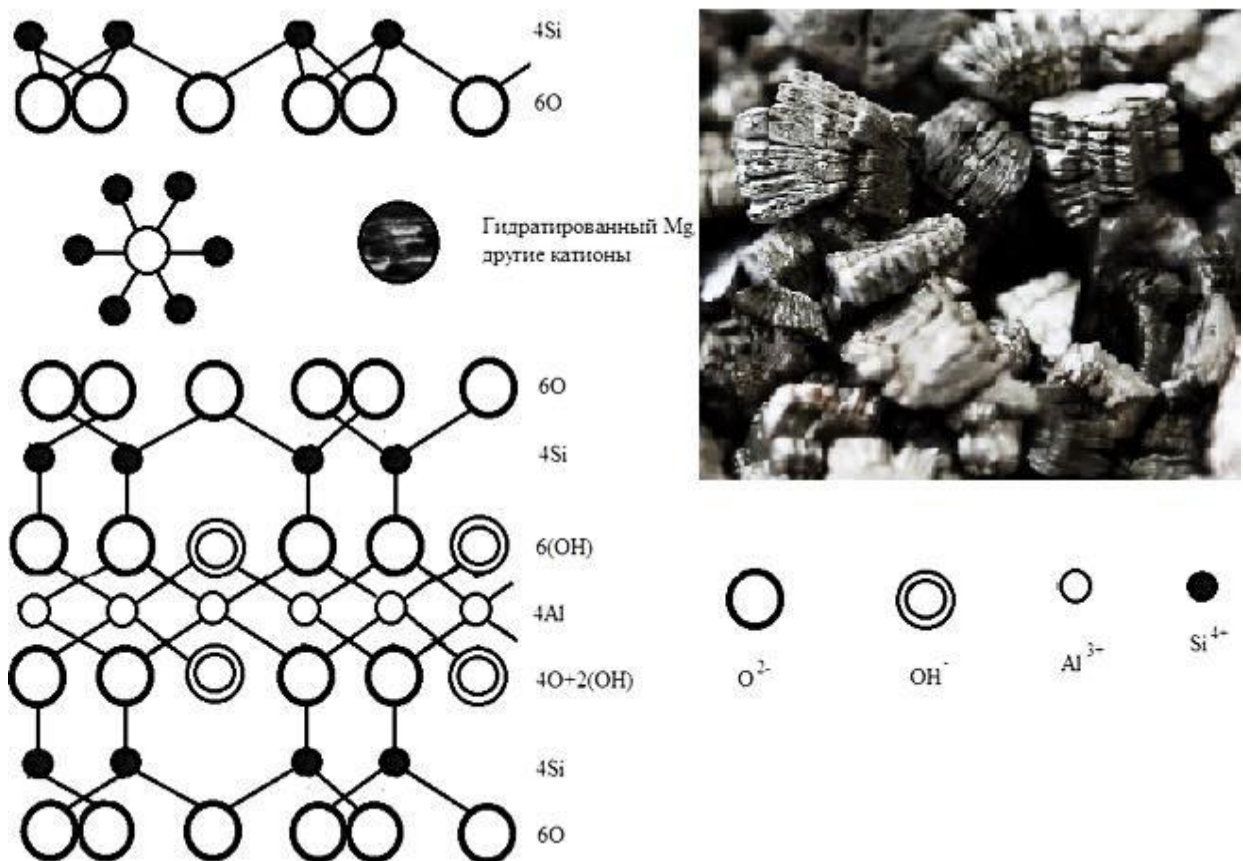


Рисунок 2.7 – Кристаллическая структура вермикулита
(рисунок автора [234])

В межслоевом комплексе преобладает K^+ . Большинство изоморфных замещений происходит в октаэдрическом слое, следовательно, отрицательный заряд сосредоточен ближе к поверхности слоя (чем у монтмориллонита). Поэтому слюдо-

подобные слои притянуты сильнее и межпакетная вода обычно отсутствует, поэтому структура гидрослюд «слабо набухающая» [19]. Удельная поверхность – 30–500 м²/г. Емкость обмена – 10–150 мг-экв/100 г.

Для этих минералов характерна значительная изменчивость химического состава. По своим свойствам они занимают промежуточное положение по сравнению со свойствами минералов групп монтмориллонита и каолинита.

2.2. Структурообразование в грунтах, укрепленных портландцементом

Портландцемент состоит из четырех основных искусственных минералов, которые образуются при обжиге (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Общий состав портландцемента

Наименование	Формула	Содержание, %	Характеристики
Алит (трехкальциевый силикат)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C ₃ S)	40–70	Относительно быстро реагирует с водой. Основной набор прочности происходит в первые 28 сут.
Белит (двукальциевый силикат)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C ₂ S)	15–40	Медленно реагирует с водой. Медленно набирает прочность в течение первых 28 сут. Существенно увеличивает прочность в поздние сроки и может достигать тех же значений что и алит
Алюминатная фаза (трехкальциевый алюминат)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C ₃ A)	5–15	Быстро реагирует с водой. Может вызвать быстрое схватывание. Имеет повышенную пористость, низкие прочность и долговечность
Алюмоферритная фаза (четырекальциевый алюмоферрит)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C ₄ AF)	5–20	Скорость реакции с водой высока в начальный период и может варьироваться из-за различий в составе или других характеристиках

2.2.1. Процессы структурообразования в сыпучих грунтах

Процессы структурообразования в грунтах, укрепленных портландцементом, описаны в литературе [10].

Структурообразование в несвязных грунтах, укрепленных портландцементом, развивается в две стадии.

Стадия 1. На первой стадии развивается процесс гидратации.

Процессы, развивающиеся при гидратации цемента, широко описаны в научно-технической литературе. Общее представление процесса гидратации цемента можно охарактеризовать несколькими периодами [91, 96].

Схватывание. Силикаты кальция при контакте с водой преобразуются в гидросиликаты кальция (CSH) и гидроксид кальция. Эти соединения обладают большой цементирующей способностью.

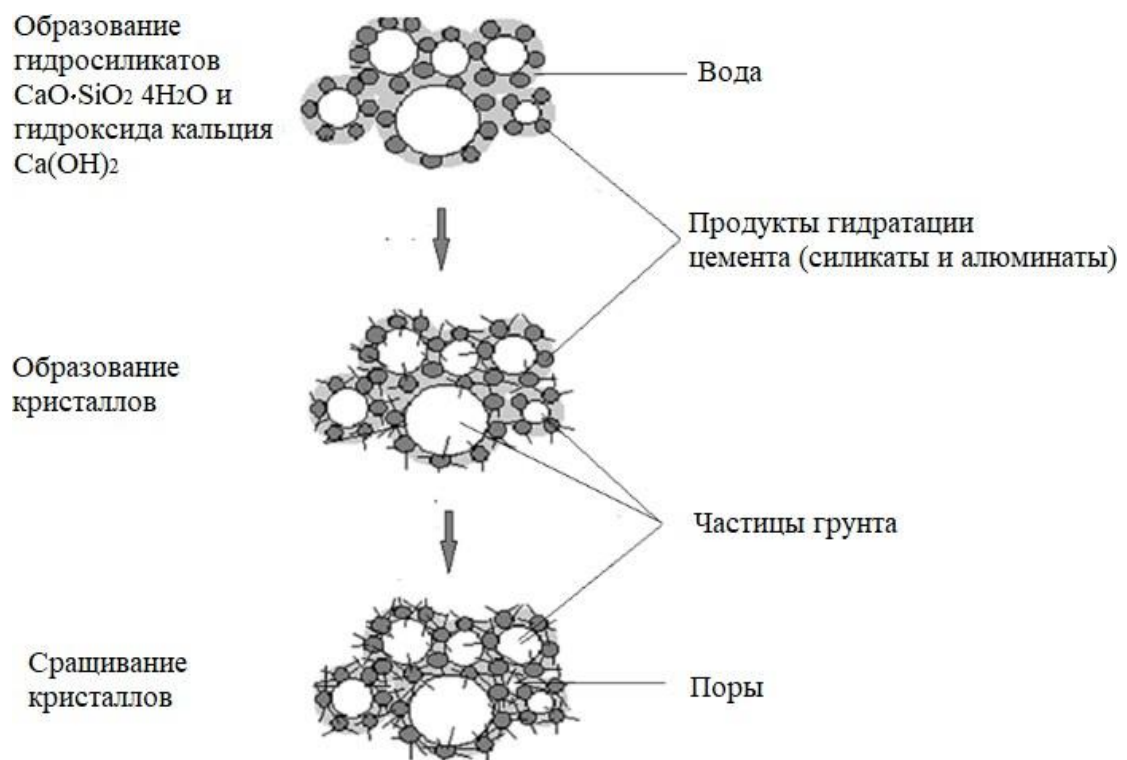


Рис. 2.8 – Гидратация портландцемента (рисунок автора [234])

При введении в грунтоцементную смесь воды молекулы воды обволакивают частицы цемента. Затем происходит переход ионов из кристаллической решетки цемента в воду. В воде (дисперсной среде) по истечении времени при-

мерно 1 часа в результате химической реакции начинается образование иглообразных кристаллов и возникает коагуляционная кратковременная структура. Она представляет собой пространственный каркас из беспорядочного сцепления мелких частиц дисперсной твердой фазы через тонкие прослойки жидкой дисперсионной среды. Структура характеризуется низкой прочностью и тиксотропностью.

При приложении вибрационной нагрузки произойдет разрушение коагуляционной структуры, уплотнение и, как следствие, повышение прочности и морозостойкости укрепленного грунта (рисунок 2.8).

Твердение. Через 8–10 часов во всем объеме смеси образуется каркас пространственной кристаллизационной алюминатной структуры из алюминатов C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$).

Далее происходит застывание и набор прочности, которые сопряжены с возникновением силикатной структуры, образующейся в процессе гидратации клинкерных минералов C_3S ($3CaO \cdot SiO_2$) и C_2S ($2CaO \cdot SiO_2$) [232].

Эти минералы сначала образуются в небольшом количестве, но из-за большой дисперсности (удельная поверхность тоберморитоподобной фазы примерно в 1000 раз превышает удельную поверхность исходного цемента [104]) они принимают участие в схватывании совместно с гидросульфоалюминатом кальция. В результате возникают очень небольшие кристаллы, которые соединяют частицы грунта и образуют цементные связи. Наличие этих связей между цементом и частицами улучшает гранулометрический состав модифицированного грунта путем образования больших агрегатов из мелкозернистых частиц.

Примерно через сутки силикатная структура начинает вытеснять алюминатную. Через 28 сут. она вытесняет ее полностью. Сформированная структура определяет итоговую прочность укрепленного грунта.

На процессы гидратации могут оказывать влияние [232]:

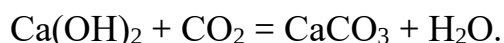
- наличие посторонних веществ или примесей;
- водоцементное соотношение;
- температура отверждения;
- наличие добавок;

- удельная поверхность смеси.

Реакция гидратации медленно протекает с поверхности частиц портландцемента, при этом центральная часть его зерен может оставаться негидратированной.

Стадия 2. На второй стадии происходит химическое взаимодействие глинозема и кремнезема глинистых минералов с гидроксидом кальция или оксидом кальция в присутствии воды.

В дополнение к образованию двух- и трехкальциевых силикатов и алюминатов (C_2A , C_2S , C_3A , C_3S) при гидратации цемента также образуется высокоактивный гидроксид кальция $Ca(OH)_2$. В результате реакции с углекислым газом атмосферного воздуха происходит процесс карбонизации, то есть образования карбонатов кальция $CaCO_3$:



Процесс карбонизации сопровождается образованием кристаллических сростков из кристаллов карбоната кальция и срастанием мелких песчаных частиц с кристаллическими образованиями. Этот процесс протекает медленно, распространяется на небольшую глубину в твердеющем материале, образуя густую переплетающуюся сетку кристаллических сростков [232].

2.2.2. Процессы структурообразования в глинистых грунтах

Основные процессы структурообразования в глинистых грунтах зависят от характера взаимодействия портландцемента с глинистыми частицами. Укрепление портландцементом грунтов, содержащих большое количество глинистых частиц, включает четыре стадии [232]:

Стадия 1. Характеризуется катионным обменом (рисунок 2.9).

Глинистый грунт/заполнитель обладает пластичностью, которая обуславливается количеством экспансивных минералов, например, монтмориллонита. Этот глинистый минерал образует связанную кристаллическую структуру посредством укладки слоев двуокиси кремния и оксида алюминия (рисунок 2.10).

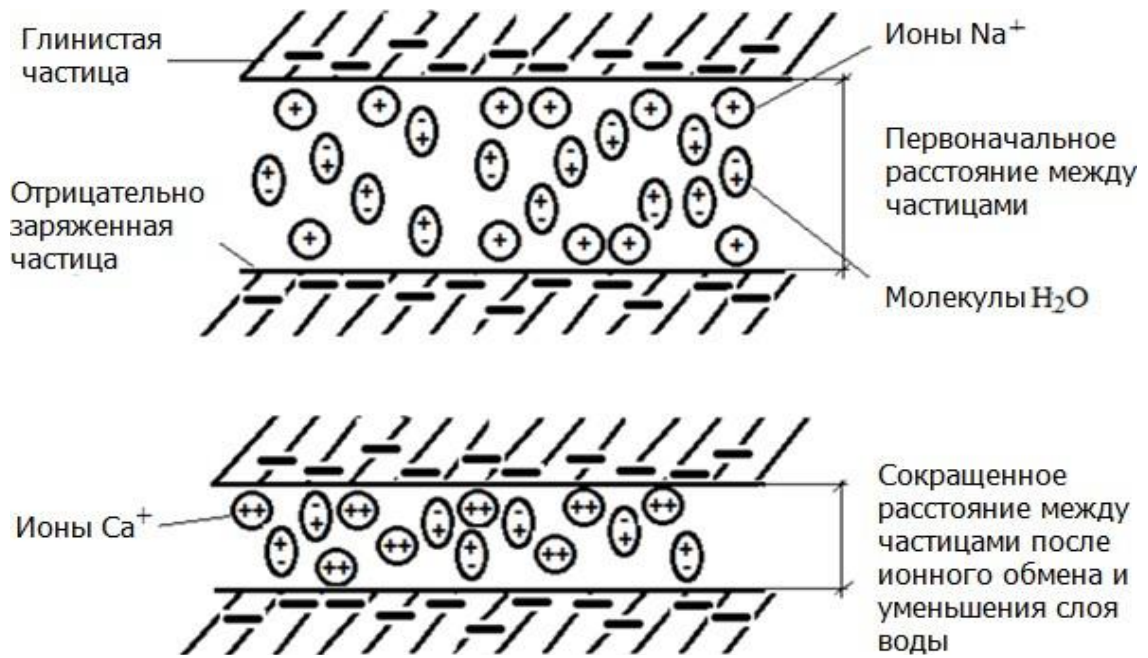


Рисунок 2.9 – Катионный обмен (рисунок автора [234])

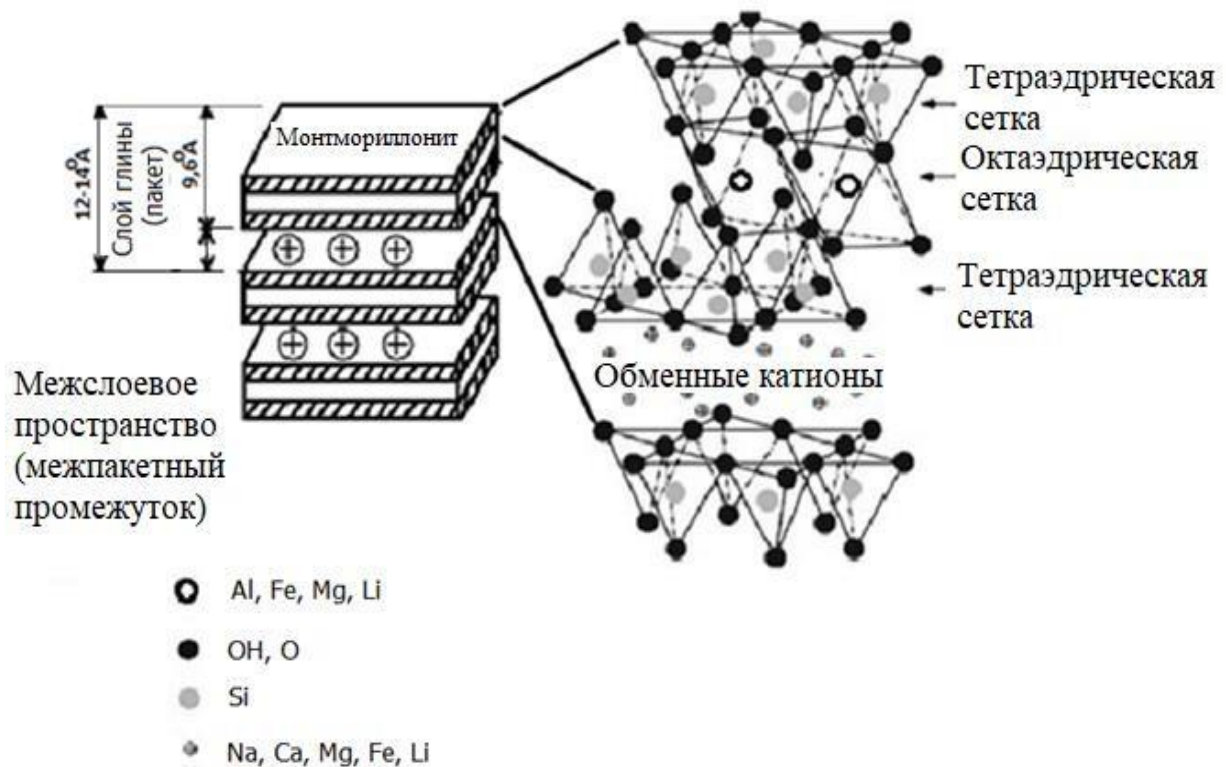


Рисунок 2.10 – Структура монтмориλλονита (рисунок автора [234])

Одновалентные катионы в двойном слое можно легко обменивать на другие катионы. Портландцемент может обеспечить достаточное количество ионов кальция Ca^{++} для замены одновалентных катионов на поверхности и уменьшения тол-

щины двойного слоя [96]. Этот процесс ионного обмена происходит в течение нескольких часов.

Стадия 2. На второй стадии происходит реструктуризация частиц, которая представляет собой развитие процессов флокуляции и агрегации.

Флокуляция развивается в результате катионного обмена. Благодаря флокуляции изменяется расположение глинистых частиц от плоской параллельной структуры до более случайной ориентировки на «грань к лицу» (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 – Реструктуризация частиц (рисунок автора [234])

При этом глинистые частицы склеиваются поверхностями между собой, образуя более крупные агрегаты. В процессе флокуляции и агрегации изменяется текстура укрепленного грунта. Грунт становится рыхлый, гранулированный. Уменьшенный размер двойного слоя из-за катионного обмена, а также повышенное внутреннее трение глинистых частиц из-за флокуляции и агрегации приводят к уменьшению пластичности, увеличению прочности на сдвиг и улучшению текстуры грунта.

Как и в случае катионного обмена, процесс реструктуризации частиц происходит быстро. Наиболее значительные изменения совершаются в течение нескольких часов после смешения.

Стадия 3. Цементная гидратация. Процесс гидратации в глинистых грунтах протекает так же как и в сыпучих грунтах. Кроме того, в стадии твердения в результате химической реакции силикатов и воды образуются очень небольшие кристаллы, которые соединяют флокулированные глинистые частицы и образу-

ют глиноцементные связи. Эти связи между частицами цемента и глинистыми частицами улучшает гранулометрический состав модифицированного глинистого грунта/заполнителя путем образования больших агрегатов из мелкозернистых частиц.

Через 28 сут. силикатная структура вытесняет алюминатную и определяет итоговую прочность укрепленного грунта (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 – Гидратация цемента в глинистых грунтах (рисунок автора [234])

Стадия 4. При гидратации цемента происходит образование гидроксида кальция Ca(OH)_2 , который значительно увеличивает pH смеси. В результате глинозем и кремнезем, содержащиеся в частицах глинистого грунта, растворяются.

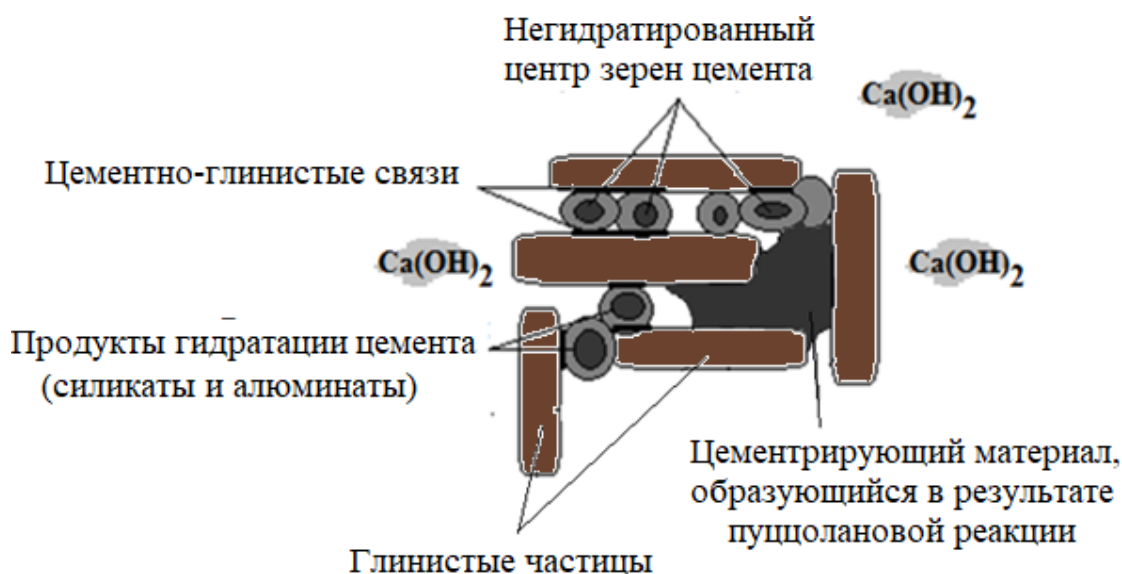


Рисунок 2.13 – Пуццолановая реакция (рисунок автора [234])

Растворившиеся глинозем и кремнезем могут образовывать с ионами кальция, поступившими из портландцемента, дополнительный цементирующий материал (C_2A , C_2S , C_3A , C_3S), который еще сильнее связывает глинистые частицы. Происходит так называемая пуццолановая реакция (рисунок 2.13).

Эти реакции протекают медленно, в течение нескольких месяцев и лет, и могут дополнительно увеличивать прочность укрепленного грунта, а также уменьшать его пластичность и улучшать его гранулометрический состав.

2.2.3. Регулирование процессов, развивающихся при укреплении грунтов портландцементом

При укреплении грунта портландцементом процессы гидратации и другие химические реакции могут усиливаться или замедляться:

- в зависимости от химического и минерального составов цемента;
- в зависимости от генезиса грунтов;
- в зависимости от температуры (процессы ускоряются при более высоких температурах) [169];
- в зависимости от количества кремнезема (SiO_2), оксида алюминия (Al_2O_3);
- в зависимости от значения pH (более высокие значения повышают растворимость кремнезема и оксида алюминия);
- в зависимости от состава и свойств грунтов, в частности их засоленности и состава обменных катионов.

Для регулирования процесса твердения в состав смеси укрепленного грунта можно вводить добавки хлорида кальция, извести, солей щелочных металлов, поверхностно-активных веществ и др.

Бентонит применяется для повышения стабильности укрепленного грунта. В грунтоцементную смесь эта добавка вводится в количестве 1–5 % [96].

Известь CaO , $Ca(OH)_2$ и известьсодержащие отходы. Известь и известьсодержащие отходы промышленного производства (с содержанием свободного оксида кальция CaO более 60 %) применяют для устранения вредного действия легкорастворимых солей (сернокислого натрия, сернокислого магния). Также

известь применяют для снижения кислотности грунтов. Введение небольших (0,6–7 % от массы сухой смеси) добавок $\text{Ca}(\text{OH})_2$ способствует увеличению прочности укрепляемого грунта [96].

Известь также эффективно применять для устранения вредного действия гумусовых веществ. Наличие гумусовых перегнойных веществ в грунте отрицательно влияет на набор прочности цементогрунта, причем с увеличением кислотности это воздействие увеличивается. Это связано, прежде всего, с изменением количественного соотношения и качественного состава органических кислот и солей, входящих в гумусовые вещества. При введении небольших добавок извести или извести в сочетании с хлоридом кальция это вредное воздействие на процессы структурообразования в цементогрунте может быть значительно ослаблено. При увлажнении смеси известь вступает во взаимодействие с тонкодисперсной частью грунта и гумусовыми веществами, насыщая их ионами кальция. При этом создается щелочная среда, благоприятная для твердения гидратированных зерен цемента, а наличие в растворе катионов кальция приводит к образованию нерастворимых в воде гуматов кальция.

Зола уноса ТЭЦ применяется в качестве активной и гранулометрической добавки. Ее количество составляет 10–25 % от массы сухой смеси.

Золошлаковые смеси ТЭЦ применяются в качестве гранулометрической добавки.

Хлорид кальция CaCl_2 и хлорид натрия NaCl . Хлорид кальция уменьшает водонасыщение, увеличивает скорость нарастания прочности, действует как флокулянт и облегчает уплотнение грунтоцементной смеси. Добавление этих солей позволяет снизить температуру замерзания воды, что, в свою очередь, позволяет проводить работы по устройству слоев из укрепленных грунтов при пониженных температурах воздуха. Хлорид кальция также вводят для компенсации потерь химических веществ из-за выщелачивания [96].

Эти добавки вводятся в грунт в количестве 0,3–3 % от массы сухой смеси. Для эффективного применения солей необходимо, чтобы относительная влажность воздуха была выше 30 %.

Силикат натрия Na_2SiO_3 применяется в сочетании с другими химическими веществами, такими как хлорид кальция, полимеры, хром лигнин, алкилхлорсиланы, кремний, амины и четвертичные аммониевые соли, гексаметафосфат натрия, фосфорная кислота в сочетании со смачивающим агентом. Силикат натрия вводится в грунт в количестве 0,5–2 % от массы сухой смеси.

Едкий натр NaOH и *углекислый натрий* Na_2CO_3 применяют для устранения кислотности. Эти добавки вводятся в грунт в количестве 0,15–2 % от массы сухой смеси.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ). Используются для придания частицам грунта и цемента гидрофобных свойств. К ПАВ относятся технические мыла: мылонафт, отходы щелочной очистки нефтепродуктов на нефтеперегонных заводах (сырые натровые мыла нафтенowych кислот, содержащие некоторое количество минеральных масел). Эти добавки вводят при затворении к воде в количестве 0,85–0,5 % от веса сухого грунта.

При взаимодействии с ионами кальция ПАВ образуют на свободных поверхностях частиц грунта и цемента пленки нерастворимых в воде кальциевых мыл. Эти пленки и сообщают несмачиваемость водой порам образовавшегося при схватывании грунтоцементного слоя. Слои такого гидрофобного цемента-грунта, уплотненные после смешения и увлажнения, схватываются и твердеют, сообщая слоям автомобильных дорог значительную механическую прочность и водонепроницаемость. При этом механическая прочность обусловлена содержанием цемента, добавление же мылонафта снижает влагоемкость и водонепроницаемость.

Кроме того, в настоящее время для регулирования процессов структурообразования укрепленных грунтов и придания им улучшенных свойств отечественные и зарубежные производители предлагают широкий спектр различных добавок. В работах А.Н. Шуваева произведена оценка эффективности применения добавок различных производителей при укреплении грунтов цементом [239].

2.3. Структурообразование в грунтах, укрепленных известью

2.3.1. Процессы структурообразования в глинистых грунтах

Укрепление грунтов известью имеет много общего с укреплением цементом. Эти процессы также описаны в литературе [9, 18, 118, 139, 159, 161].

При укреплении глинистых грунтов тонкодисперсные частицы грунта взаимодействуют с известью. Укрепление грунта происходит в течение длительного времени, при этом можно выделить четыре стадии.

Стадия 1. Растворение и коллоидация. Процесс схватывания и твердения молотой негашеной извести имеет гидратационный характер. После затворения извести водой происходит ее растворение до образования насыщенного раствора малой части вяжущего вещества, то есть происходит химическая реакция растворения и гидратации оксида кальция. По мере охвата этой реакцией всей массы вяжущего потребность в воде на образование гидроксида увеличивается. Растет потребность в воде на смачивание поверхности дисперсных частиц извести. Все это обуславливает выделение тепла при реакции гидратации.

В зависимости от содержания в смеси воды можно различить три основные разновидности конечного продукта гидратации:

- 1) несвязанная гидратированная известь, образующаяся при содержании воды затворения 10–45 %;
- 2) плотная камневидная масса, образующаяся при содержании воды затворения 50–80 %, затворение происходит в течение 2–3 ч.;
- 3) вязкая тестообразная масса с избытком воды на ее поверхности, образующаяся при содержании воды затворения более 90 %, смесь отвердевает через 2–3 ч.; при содержании воды 150 % эффект твердения снижается.

Далее наступает коллоидация (схватывание), характеризующаяся выделением коллоидных частиц. Вследствие испарения воды с поверхности образовавшихся коллоидных частиц гидроксида кальция, находящихся в известковом растворе, в нем образуется большое количество очень мелких замкнутых и сооб-

щающихся между собой пор. Под влиянием поверхностного натяжения внутри микроскопических пор на частицы материала начинают оказывать действие капиллярные силы.

Схема процессов схватывания и твердения извести показана на рисунке 2.14.

Стадия 2. Основные активные составляющие оксида кальция CaO превращаются в гидроксид кальция Ca(OH)_2 , оксида магния MgO в гидроксид магния Mg(OH)_2 . Скорость гидратации этих компонентов зависит от степени их дисперсности и температуры обжига известняков, однако, скорость гидратации CaO во всех случаях выше скорости гидратации MgO [64].

Спустя время тонкодисперсные частицы гидроксида кальция перекристаллизуются в присутствии воды в более большие кристаллы. В результате сращивания кристаллов гидроксида кальция Ca(OH)_2 образуется пространственно разветвленный каркас.

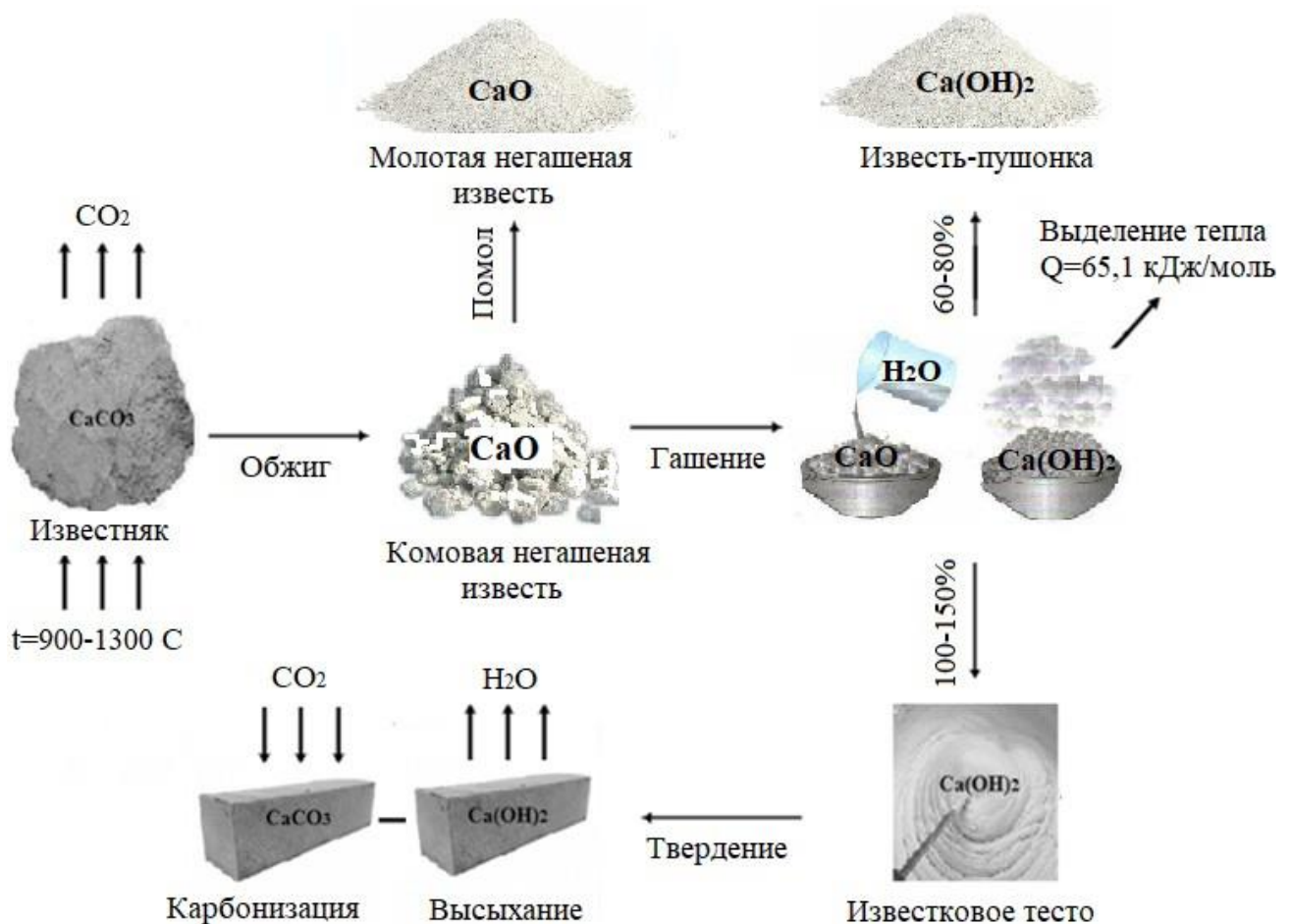
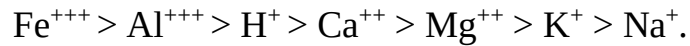


Рисунок 2.14 – Схватывание и твердение извести (рисунок автора [234])

Частицы грунта заряжены отрицательным электрическим зарядом. На поверхности этих частиц адсорбируются катионы, которые снижают их заряд. Ионы высших валентностей вызывают коагуляцию при меньших концентрациях, чем ионы низших валентностей. В зависимости от способности одних ионов вытеснять другие, катионы располагаются в следующем порядке [64]:



После перемешивания грунта с вяжущим и водой из гашеной извести выделяются ионы Ca^{+} , который направляются к поверхности глинистых частиц и вытесняют воду и другие ионы. Модификация грунта происходит в результате замены одновалентных катионов (натрия, водорода), присутствующих на поверхности глинистого минерала, катионами кальция из гидратированной извести [96]. Добавление извести всегда увеличивает рН и, следовательно, всегда будет способствовать интенсивности обмена ионов.

В результате грунт разрыхляется и визуально выглядит зернистым. При этом происходит снижение числа пластичности, увеличивается набухание и сжимаемость, развиваются процессы флокуляции и агрегации (рисунок 2.15).



**Рисунок 2.15 – Исходная структура глинистого грунта
(рисунок автора [234])**

Формирование хлопьев и агрегатов грунта развивается в течение нескольких часов. Структуру глинистого грунта в результате развития процессов флокуляции и агрегации демонстрирует рисунок 2.16.

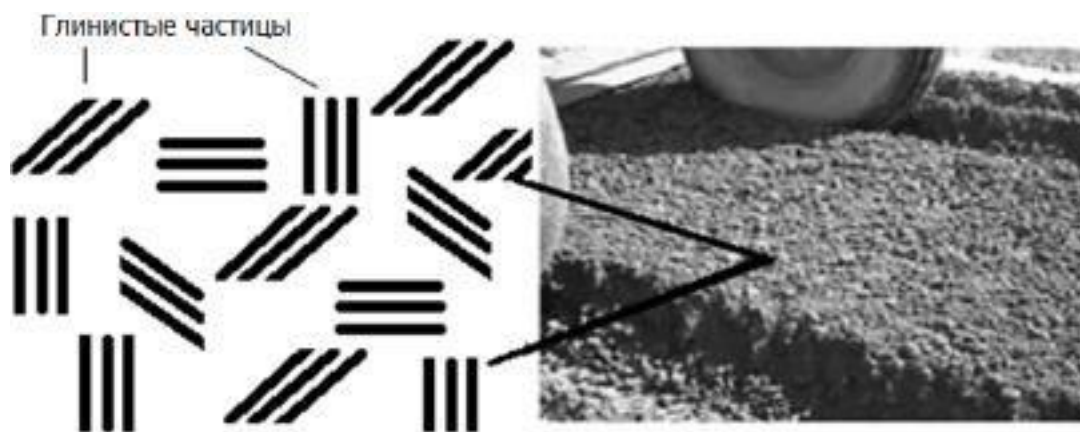
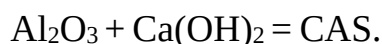


**Рисунок 2.16 – Структура глинистого грунта
в результате развития процессов флокуляции и агрегации (рисунок автора [234])**

Стадия 3. Стабилизация. При добавлении в грунт извести и воды кремнезем и глинозем (SiO_2 , Al_2O_3), входящие в состав глинистого грунта, вступают в реакцию с гидроксидом кальция. При этом происходит резкое увеличение рН грунта, что создает благоприятные условия для дальнейшей реакции. В итоге глинистые частицы разрушаются и образуются малоосновные гидросиликаты и гидроалюминаты:



Гидросиликаты (CSH) и гидроалюминаты (CAH) представляют собой новые цементирующие вещества, образующиеся в портландцементе. Эти вещества формируют структуру, увеличивающую прочность укрепленного грунта. Грунт превращается в жесткий относительно водонепроницаемый слой с хорошими прочностными характеристиками. Процесс стабилизации начинается в течение нескольких часов и продолжается в течение многих лет, и даже десятилетия, до тех пор, пока присутствует достаточное количество извести и рН остается высоким (выше 10), благодаря чему происходит нарастание прочности. Увеличение прочности происходит за счет обмена катионов, а не цементации. Сформированная структура характеризуется значительной прочностью, водонепроницаемостью и гибкостью (рисунок 2.17).

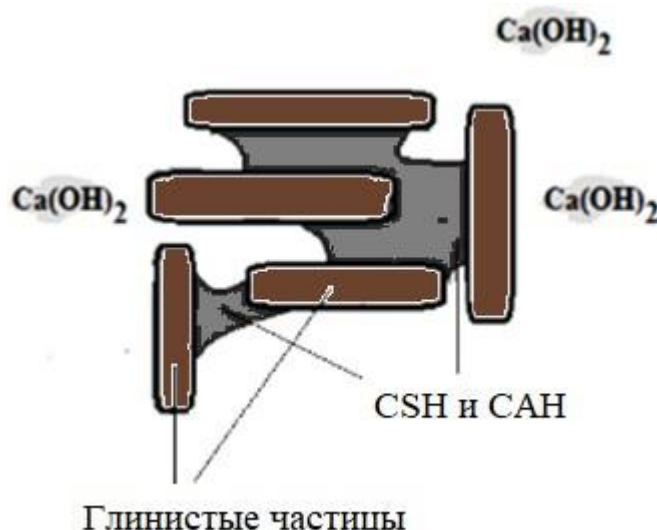
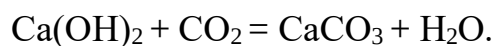


Рисунок 2.17 – Стабилизация глинистого грунта известью (рисунок автора [234])

Стадия 4. В данной стадии происходит поглощение углекислого газа из воздуха и преобразование в карбонат кальция (процесс карбонизации):



Процесс карбонизации сопровождается образованием кристаллических сростков из кристаллов карбоната кальция. Этот процесс протекает медленно в присутствии воды при достаточно крупных газопроницаемых порах и распространяется на небольшую глубину в твердеющем укрепленном грунте.

Карбонат кальция, образованный на поверхности извести, заполняет поры и затрудняет дальнейшее поступление углекислого газа в более глубокие слои грунта. Благодаря этому процесс карбонизации сильно тормозится и может даже почти приостановиться.

Этот процесс следует считать последней причиной нарастания механической прочности грунтов, укрепленных известью.

2.3.2. Регулирование процессов, развивающихся при укреплении грунтов известью

Снижение интенсивного разогрева смеси. Снижения температуры смеси можно достичь несколькими способами:

- 1) производство работ при пониженных температурах воздуха;

- 2) увеличение расхода воды одновременно с обеспечением отвода тепла (при этом температура гидратации может достигать 25–54 °С);
- 3) частичное гашение извести перед применением;
- 4) введение добавок, снижающих скорость гидратации, что приведет к снижению интенсивности тепловыделения (гипс, сульфат натрия) – добавки вводятся в количестве 0,2–5 %;
- 5) двухступенчатое перемешивание грунтоизвестковых смесей на молотой негашеной извести.

Вначале смесь извести с грунтом и водой в количестве 80–90 % от оптимальной влажности перемешивают и затем выдерживают некоторое время. При этом гидратируется наиболее активная часть извести, что сопровождается интенсивными объемными деформациями. После чего смесь вторично перемешивают с остальной частью воды, укладывают в основание и уплотняют. В спокойном состоянии развивается твердение, которое обусловлено гидратацией еще не прореагировавшей части оксида кальция. Развивающиеся деформации обладают низкой интенсивностью и не разрушают устроенный слой.

Выводы

1. Для эффективного применения грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, в конструкциях автомобильных дорог необходимо наличие не только современных технологий, но и технического понимания процессов структурообразования. Понимание развития процессов структурообразования в твердеющем слое укрепленного грунта позволит получать материалы с высокими физико-механическими характеристиками, а также осуществлять прогноз работы конструктивных слоев автомобильных дорог в течение периода эксплуатации.

2. В процессах структурообразования важную роль играют такие явления как адсорбция, ионный обмен, коагуляция. Анализ теоретических основ структурообразования в грунтах, укрепленных неорганическими вяжущими, показы-

вает, что для получения качественных материалов необходимо учитывать множество факторов, в том числе возможность регулирования процессов структурообразования.

3. В главе 2 рассмотрены процессы, которые развиваются при структурообразовании грунтов, укрепленных портландцементом и известью. Проанализированы возможные способы регулирования процессов, развивающихся в грунтах при укреплении их известью и портландцементом.

4. Проведенный анализ исследований показывает, что в настоящее время не сформулированы теоретические основы применения золошлаковых смесей ТЭЦ в составах грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими.

Глава 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Определение физико-механических характеристик естественных грунтов, неорганических вяжущих материалов, золошлаковых отходов ТЭЦ

Методика проведения экспериментальных исследований заключается в следующей последовательности:

- 1) отбор проб местных грунтов и золошлаковых отходов;
- 2) определение физико-механических характеристик местных грунтов, неорганических вяжущих материалов и золошлаковых отходов ТЭЦ;
- 3) разработка составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, и определение их качественных характеристик;
- 4) определение модуля упругости разработанных составов в лабораторных условиях;
- 5) определение эффективности применения разработанных составов.

Для решения поставленных в работе задач использованы кислые золошлаковые отходы тепловых электростанций (таблица 3.1, рисунок 3.1).

Таблица 3.1 – Золошлаковые смеси ТЭЦ Иркутской области, по данным ООО «Иркутскзолопродукт» [223]

ТЭЦ	Складировано, тыс. т	Местоположение	Вид сжигаемого угля
1	2	3	4
Иркутский участок			
Ново-Иркутская ТЭЦ	10 166,432	г. Иркутск	Ирша-Бородинский, Мугунский, Ирбейский, Перяславский

Окончание таблицы 3.1

1	2	3	4
Шелеховский участок Ново-Иркутской ТЭЦ	1352,025	г. Шелехов	Азейский, Мугунский
Ангарский участок			
ТЭЦ-9	27 737,030	г. Ангарск	Черемховский, Азейский, Мугунский
Участок № 1 ТЭЦ-9	6287,130	г. Ангарск	—
ТЭЦ-10	20 104,545	г. Ангарск	Мугунский
ТЭЦ-11	9249,944	г. Усолье- Сибирское	Мугунский, Азейский, Черемховский, Ирбейский
ТЭЦ-12	1044,771	г. Черемхово	—
Ново-Зиминская ТЭЦ	3619,661	г. Саянск	—
Братский участок			
ТЭЦ-6	3978,365	г. Братск	Ирша-Бородинский, Ирбейский, Черемховский
Участок ТИиТС ТЭЦ-6 (ТЭЦ-7)	1129,776	г. Братск	Ирбейский
Усть-Илимская ТЭЦ	3162,791	г. Усть- Илимск	Жеронский, Вереинский, Тунгусский
ИТОГО:	88 332,890		

Золошлаковые отходы ТЭЦ Иркутской области являются типичными кислыми золошлаковыми отходами, которые образуются при сжигании каменных и бурых углей.

Учитывая, что каменный уголь сжигается после предварительного измельчения и доля шлаковой составляющей в данных отходах минимальна, принято решение классифицировать золошлаковые смеси как техногенный грунт в соответствии с требованиями ГОСТ 25100 «Грунты. Классификация».



Иркутская область

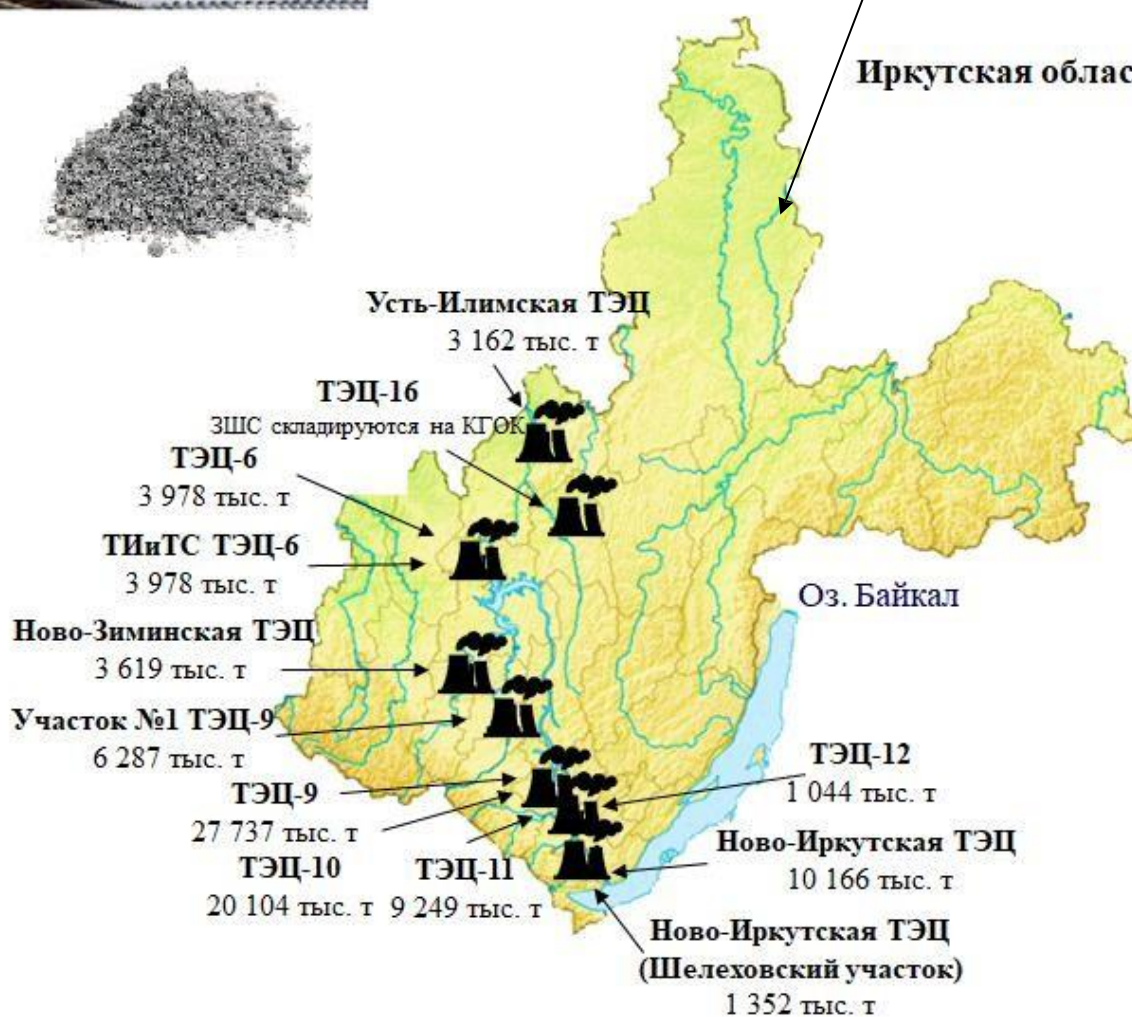


Рисунок 3.1 – Карта золоотвалов ТЭЦ Иркутской области:
общая площадь – 1,85 тыс. га, среднегодовой выход ЗШС – 1,38 млн т/год,
среднегодовой объем утилизации – 0,4–0,8 млн т/год
(рисунок автора [223])

Для определения физико-механических свойств золошлаковых материалов и их классификации использованы методы лабораторных испытаний, регламентированные следующей нормативной документацией:

- ГОСТ 12536 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава»;
- ГОСТ 23558 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия»;
- ГОСТ 25100 «Грунты. Классификация»;
- ГОСТ 28622 «Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости»;
- ГОСТ 310.2 «Цементы. Методы определения тонкости помола»;
- ГОСТ 5382 «Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа»;
- ГОСТ 8269.1 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы химического анализа»;
- ОДМ 218.2.031 «Методические рекомендации по применению золы уноса и золошлаковых смесей от сжигания угля на тепловых электростанциях в дорожном строительстве»;
- ГОСТ 25584 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации»;
- ГОСТ 12248 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости»;
- ГОСТ 26423 «Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки».

Для определения физико-механических и химических свойств вяжущих материалов использованы методы лабораторных испытаний, регламентированные следующей нормативной документацией:

- ГОСТ 310.1 «Цементы. Методы испытаний. Общие положения»;
- ГОСТ 310.2 «Цементы. Методы определения тонкости помола»;
- ГОСТ 310.3 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема»;
- ГОСТ 310.4 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии»;
- ГОСТ 22688 «Известь строительная. Методы испытаний»;
- ГОСТ 9179 «Известь строительная. Технические условия».

На территории Иркутской области отобраны образцы проб грунтов для проведения исследований в лабораторных условиях (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Определение характеристик вяжущих материалов в лабораторных условиях (фото автора)

Отбор объединенных проб крупнообломочных и песчаных грунтов произведен в объеме 100–150 кг (1 проба) со следующих карьеров (рисунок 3.3):

- Качугский филиал, месторождение «Култайское-1» (р/н Г-18/1);
- Зиминский филиал, месторождение «Мординское» (р/н Г-19/2);
- Казачинско-Ленский филиал, месторождение «Казачинский-1» (р/н Г-21/1).

Отбор проб глинистых грунтов произведен на территории Иркутского и Шелеховского районов Иркутской области: суглинок (р/н Г-1, р/н Г-6); супесь (р/н Г-22).

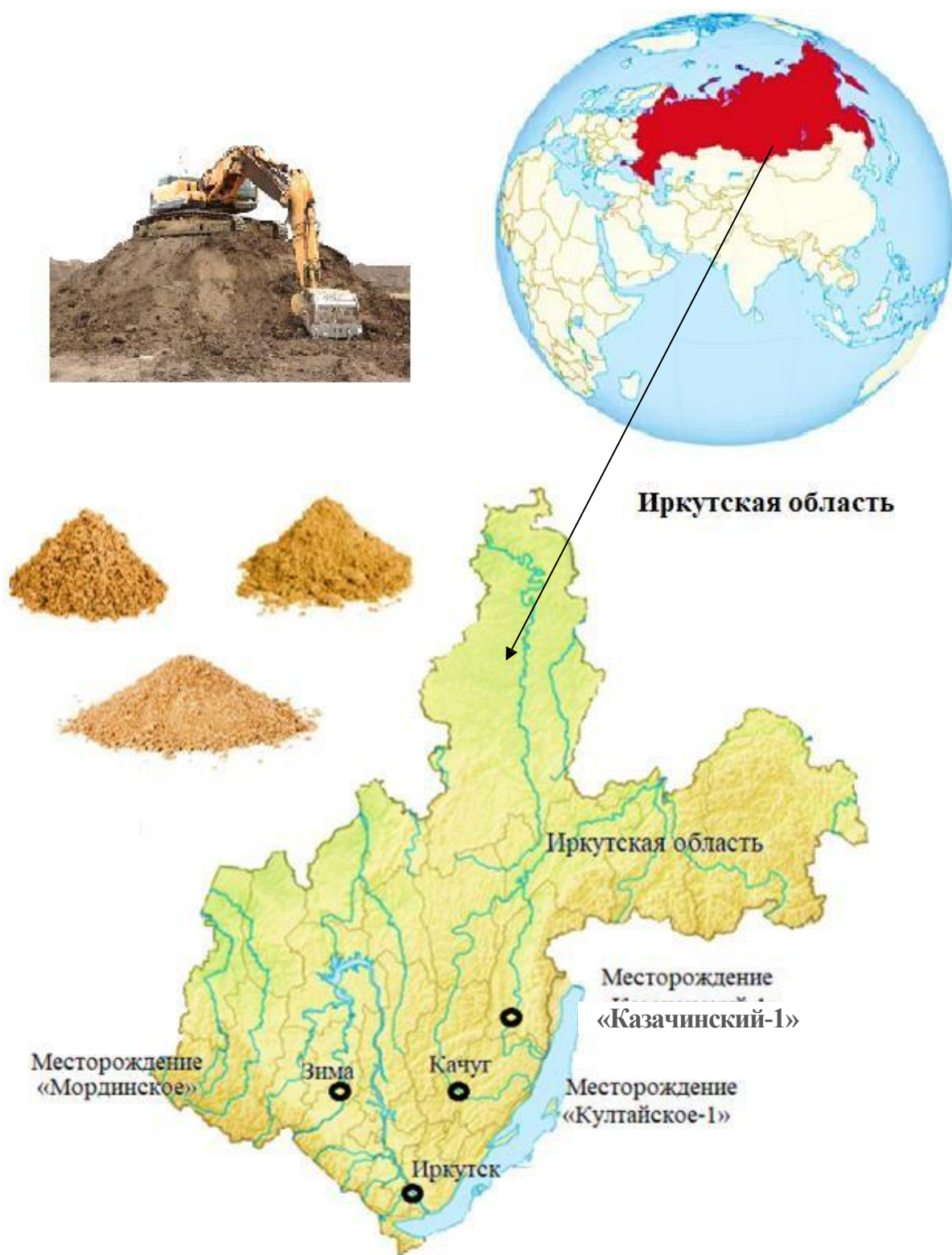


Рисунок 3.3 – Месторождения для отбора проб грунтов
(рисунок автора)

Для определения физико-механических свойств грунтов и их классификации использованы стандартные методы лабораторных испытаний, регламентированные следующей нормативной документацией:

- ГОСТ 12536 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава»;
- ГОСТ 22733 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности»;
- ГОСТ 23558 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия»;
- ГОСТ 23740 «Грунты. Методы определения содержания органических веществ»;
- ГОСТ 25100 «Грунты. Классификация»;
- ГОСТ 26423 «Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки»;
- ГОСТ 5180 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».

3.2. Совершенствование методики подбора составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами

3.2.1. Определение начального ориентировочного количества вяжущего материала

Ориентировочные значения содержания вяжущих приведены в таблице 3.2.

При содержании цемента в составе укрепленного грунта в количестве более 8 % необходимо учитывать, что гидратация и твердение уложенного и уплотненного слоя укрепленного грунта может сопровождаться образованием усадочных трещин.

Таблица 3.2 – Содержание вяжущих материалов в укрепленных грунтах

Вид вяжущего материала	Грунты	Дозировка вяжущего, % от массы сухого грунта
Портландцемент	Крупнообломочные	5–8
	Песчаные	5–8
	Супеси легкие	4–8
	Супеси тяжелые пылеватые; суглинки легкие и легкие пылеватые с числом пластичности I_p не более 12	4–10
	Суглинки тяжелые, тяжелые пылеватые с числом пластичности I_p не более 12	8–14
	Глины песчанистые и пылеватые с числом пластичности менее 22	10–14
	Золошлаковые смеси ТЭЦ	4–8
Известь	Супесь	5–8
	Супесь песчанистая и пылеватая; суглинок легкий	5–8
	Суглинок тяжелый песчанистый и тяжелый пылеватый	5–8
	Глина легкая песчанистая и пылеватая с числом пластичности не более 22	5–8

При подборе состава грунтов, укрепленных известью, для определения начального количества вяжущего можно использовать адаптированный метод Eades and Grim, изложенный в стандарте ASTM D6276.

Метод Eades and Grim заключается в определении содержания минимального количества извести, при котором рН смеси грунта и извести будет иметь значение 12,40: или значение, равное рН извести. Данный метод позволит значительно сократить количество образцов грунта, укрепленного известью, при подборе состава, и как, следствие, снизить трудоемкость работы и уменьшить сроки подбора состава.

Порядок определения оптимального содержания извести, адаптированный к проведению лабораторных испытаний в РФ

1. Определяется pH проб грунта и извести.
2. В грунт добавляется известь в таком количестве, чтобы значения pH смеси стало равным 12,4 или равным значению pH извести. Влияние количества извести на pH смеси отображено на рисунке 3.4.

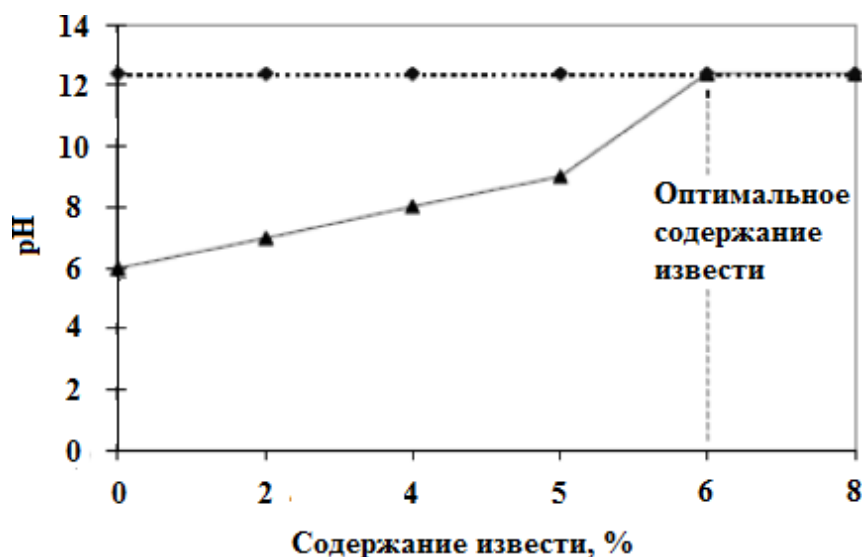


Рисунок 3.4 – Зависимость значений pH смеси грунта и извести от содержания извести (график автора [234])

3. Образцы грунта в воздушно-сухом состоянии, прошедшие через сито № 1 массой 20 г, взвешивают до ближайших 0,1 г и помещают в 150-миллилитровые пластиковые емкости с крышками.
4. Целесообразно использовать пять емкостей с содержанием извести 3, 4, 5, 6 и 7 %.
5. В емкости со смесью грунта и извести добавляется дистиллированная вода в количестве 100 мл. При этом дистиллированная вода не должна содержать углекислый газ.
6. Смесь встряхивается в течение не менее 30 с до выпадения на дне осадка. Встряхивание необходимо производить многократно с промежутком 10 мин.
7. Через 1 ч помещают часть полученной суспензии в пластиковый стакан и измеряют pH.

8. Если показания рН соответствуют значению 12,40, то самое низкое процентное содержание извести с рН 12,40 принимается как итоговый результат. Если значение рН составляет около 12,30, а 2 % извести дают одни и те же значения, то самое низкое содержание извести с рН 12,30 принимается как итоговый результат. Если самое высокое значение рН составляет 12,30, и при этом только 1 % извести дает значение рН 12,30, необходимо провести дополнительный подбор, начиная с более высокого процентного содержания извести.

9. Если показания рН значительно ниже 12,40, применяется наиболее близкое значение рН грунтоизвестковой смеси к рН извести.

Данный метод является менее трудоемким и продолжительным.

3.2.2. Изготовление образцов грунта

Прочность образцов укрепленного грунта в зависимости от вида вяжущего, определяется в зависимости от вида вяжущего в проектном возрасте: 28, 56, 90 сут.

Для сокращения времени проведения работ по разработке составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, образцы испытывают в промежуточном возрасте. На основании прочностных характеристик, полученных в промежуточном возрасте, изготавливают образцы укрепленного грунта для испытания на все показатели в проектном возрасте. Промежуточный возраст образцов укрепленного грунта – 7 и 28 сут. в зависимости от вида вяжущего.

Изготовление образцов для определения прочности на сжатие, прочности на растяжение при изгибе или раскалывании и морозостойкости

Образцы изготавливают и испытывают сериями, состоящими из трех образцов. Образцы изготавливаются с использованием статической нагрузки. Этот метод предпочтителен по сравнению с ударным методом СОЮЗДОРНИИ или Проктора, по следующим причинам:

- статическая нагрузка обеспечивает постоянную плотность образцов укрепленных грунтов, гарантируя более высокую степень однородности получаемых результатов;

- образцы имеют более ровные грани по сравнению с образцами, изготовленными методом стандартного уплотнения, образцы получаются без сколов и дефектов.

Ориентировочное давление прессы составляет для смеси с максимальной крупностью до 5 мм – 15–20 МПа, крупностью более 5 мм – 20–30 МПа, время выдержки под нагрузкой – 3 мин. После изготовления первого образца необходимо определить его плотность. Если значение плотности отличается от значения максимальной плотности, необходимо откорректировать значение приложенной нагрузки.

Для изготовления образцов укрепленных грунтов можно применять формы-цилиндры (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Размеры форм-цилиндров (ГОСТ 12801)

Наибольшая крупность зерен грунта, мм	Размеры форм, мм				Площадь образца, см ²
	Диаметр d	Высота H	Высота верхнего вкладыша h ₁	Высота нижнего вкла- дыша h ₂	
5	50,5	130	80	50	20
10, 15, 20	71,4	160	100	60	40
40	101	180	110	70	80

Масса грунта, необходимого для изготовления одного образца, для разных типов грунтов составляет 600–2200 г. Образцы-цилиндры в зависимости от размеров форм имеют высоты 50,5; 71,4; 101,0 мм.

Если образцы-цилиндры имеют высоту, отличающуюся от указанных размеров, то необходима корректировка массы смеси g для изготовления образца

$$g = g_0 \frac{h}{h_0}, \quad (3.1)$$

где: g_0 – масса пробного образца, г;

h – требуемая высота образца, мм;

h_0 – высота пробного образца, мм.

Изготовление серии образцов-цилиндров одинакового размера с использованием указанных форм значительно проще, чем применение прибора стандартного уплотнения СОЮЗДОРНИИ или модифицированного метода Проктора. Образцы получаются ровные, без раковин и сколов, постоянной высоты и массы. Хорошее качество образцов сводит к минимальным расхождениям результаты параллельных испытаний укрепленных грунтов.

Для приготовления образцов сначала определяют необходимое количество смеси:

$$P_{см} = \rho_v \cdot V \cdot n = \rho_{ск}(1 + 0,01W_o)Vn, \quad (3.2)$$

где $P_{см}$ – масса смеси, г;

$\rho_v, \rho_{ск}$ – плотность соответственно влажной смеси и скелета смеси, г/см³;

V – объем образца, см³;

n – количество образцов, необходимое для определения физико-механических свойств смеси;

W_o – оптимальная влажность смеси, % массы.

Содержание воды назначается по значению оптимальной влажности.

Хранение и твердение образцов производится стандартным методом при относительной влажности воздуха 95 ± 5 % и температуре 20 ± 2 °С с помещением их в камеру с нормальными условиями твердения, ванну с гидравлическим затвором, эксикатор и т. п.

3.2.3. Определение прочностных характеристик укрепленного грунта

К качественным характеристикам относятся прочность, водостойкость, морозостойкость, плотность. Определение данных характеристик производится стандартными методами:

- ГОСТ 23558-94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия (с Изменениями № 1, 2)»;

- ГОСТ Р 70452-2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия».

Калифорнийское число (CBR)

Калифорнийское число (CBR) характеризует несущую способность грунта и косвенно используется для оценки толщины слоев земляного полотна и дорожной одежды. Значение CBR определяется на водонасыщенных образцах путем вдавливания штампа диаметром 50 мм в образец уплотненного грунта, изготовленного при оптимальной влажности при скорости нагружения 1,27 мм/мин.

Калифорнийское число CBR косвенно характеризует прочность материалов на сдвиг и их жесткость. В исследованиях [211] приведены эмпирические зависимости модуля упругости и CBR для грунтов.

W. Heukelom и A.J.G. Klomp [57]:

$$E = 10,342 \cdot CBR, \quad (3.3)$$

Green and Hall [50]:

$$E = 37,294 \cdot CBR^{0,71}, \quad (3.4)$$

Witczak [174], Sukumaran [158]:

$$E = 20,684 \cdot CBR^{0,65}, \quad (3.5)$$

Witczak [174], Sukumaran [158], Puppala [130]:

$$E = 9,79 \cdot CBR, \quad (3.6)$$

Brown [29]:

$$E_r = \frac{q_r}{A} \left[\frac{\log CBR - D}{C \cdot q_r} \right]^B \cdot 10^{-3}, \quad (3.7)$$

где: A и B – константы жесткости исходных материалов;

C и D – константы CBR;

q_r – импульс напряжения.

При этом зависимости между прочностными характеристиками и калифорнийским числом грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, исследованы мало.

Прочность на сжатие

Это одна из основных качественных характеристик, которая определяется путем нагружения стандартных образцов укрепленного грунта статической нагрузкой на прессе.

Прогнозирование прочностных характеристик во времени

Различными авторами [30–31] предлагаются зависимости, которые были получены с использованием образцов, твердевших при влажности 100 % и при температуре около 23 °С. Для большинства этих уравнений требуется известная прочность через 28 дней, а затем может быть оценена прочность в другое время.

Укрепление цементом

Уравнение Wen [173]:

$$UCS(t) = (UCS_{28}) [p_1^{1 - \frac{1}{(1 + \frac{t-t_0}{p_2})}}], \quad (3.8)$$

где: p_1, p_2 – параметры регрессии 1,59 и 1,61, соответственно;

t_0 – определяется как 28/30,5;

$UCS(t)$ – прочность на сжатие в момент времени t , мес.

Укрепление цементом. Уравнение Lim and Zollinger [88]:

$$UCS(t) = (UCS_{28}) \left[\frac{t}{p_1 + p_2 \cdot t} \right], \quad (3.9)$$

где: p_1, p_2 – параметры регрессии 2,8 и 0,9, соответственно;

$UCS(t)$ – прочность на сжатие в момент времени t , дни.

Укрепление цементом. Уравнение Linares [90]:

$$UCS_{28} = p_1(UCS_7) + p_2, \quad (3.10)$$

где: p_1, p_2 – параметры регрессии 0,695 и 295, соответственно;

UCS_{28} – прочность на сжатие в момент времени t .

Укрепление цементом. Уравнение Linares-Unamunzaga [171]:

$$UCS_{90} = p_1(UCS_7) + p_2, \quad (3.11)$$

где: p_1, p_2 – параметры регрессии 0,763 и 2,95, соответственно;

UCS_{90} – прочность на сжатие в момент времени t .

Укрепление цементом глинистых грунтов

Уравнение [157]

$$q_u = A/B^{(s-\frac{w}{c})}, \quad (3.12)$$

где $s - \frac{w}{c}$ – параметр соотношения «грунт – вода – цемент»;

A и B – параметры, зависящие от типа глинистого минерала, времени твердения, числа пластичности: $A_7 = 5907/I_p^{0,287}$; $A_{14} = 7999/I_p^{0,284}$; $A_{28} = 10.465/I_p^{0,283}$; $B = 1,0304I_p^{0,0359}$.

Укрепление золой уноса

Уравнение Horpibulsuk (AASHTO):

$$UCS(t) = p_1(UCS_{28}) + p_2(UCS_{28})(\ln(t)), \quad (3.13)$$

где: p_1, p_2 – параметры регрессии 0,026 и 0,293, соответственно;

$UCS(t)$ – прочность на сжатие в момент времени t , дни.

Укрепление известью

Уравнение Baldovino [20]:

$$\frac{q_u}{q_{u-n}(\frac{\eta}{L_{iv}^{0,18}}=34,9)} = 819937 (\frac{\eta}{L_{iv}})^{-3,83}, \quad (3.14)$$

где: q_u – прочность на сжатие;

$\frac{\eta}{L_{iv}}$ – индекс пористости извести.

В исследовании [102] приводится зависимость прочности на сжатие глинистого грунта, укрепленного цементом, от водоцементного соотношения (w/c), времени твердения (t):

$$q_u = \frac{16192}{(\frac{w}{c})^{2,14}} x e^{-0,177(t-3,7)}. \quad (3.15)$$

Также в исследовании [102] приводится логарифмическая модель, которая отражает прочность при сжатии как функцию водоцементного соотношения и времени твердения (t):

$$q_u = \frac{X}{Y(\frac{w}{c})} \ln(t). \quad (3.16)$$

Применение на практике этих уравнений затруднительно, так как на процессы структурообразования, и как следствие, на конечную прочность на сжатие, влияет много факторов: характеристики вяжущего материала, минералогия грунта, число пластичности, значение оптимальной влажности и др. Прогнозирование конечных свойств укрепленных золошлаковых смесей ТЭЦ осложняется тем, что на процессы структурообразования будет также влиять содержание в золошлаковых материалах оксидов кальция и магния, количество стекловидной фазы и др.

3.2.4. Оценка воздействия воды

Для оценки влияния возможного переувлажнения слоев укрепленных грунтов на прочностные характеристики применяют отношение значений прочности на сжатие в условиях не насыщенных водой состояний и после водонасыщения в течение 1 сут. Хотя этот метод хорошо работает для обычных материалов, он может неточно отражать водостойкость укрепленных грунтов, которые не достигают полного водонасыщения после 24-часового погружения в воду.

В исследовании [46] приводятся результаты, указывающие, что прочность на сжатие после 7 сут. водонасыщения меньше, чем прочность на сжатие после водонасыщения в течение 1 сут. Кратковременное водонасыщение не позволяет оценивать долговечность укрепленных грунтов.

Попеременное увлажнение и высушивание образцов позволяет оценивать долговечность материалов от воздействия воды. Учитывая результаты исследования [59], можно предложить следующий метод:

- 1) погружение образцов в воду температурой 25 °С на 5 час.;
- 2) высушивание образцов в сушильном шкафу при температуре около 70 °С в течение 42 час.;
- 3) высушивание образцов при комнатной температуре на воздухе в течение не менее 1 час.;
- 4) измерение массы образцов для определения процента потери веса и водопоглощения;

5) определение прочности на сжатие стандартными методами ГОСТ после 0, 1, 3, 6, 9, 12, и 15 циклов увлажнения-высыхания образцов.

3.2.5. Разработка ускоренного метода определения качественных характеристик

Сокращение сроков подбора состава и снижение трудоемкости работ можно обеспечить путем обработки образцов грунта, укрепленного неорганическими вяжущими, паром или микроволновым излучением. Эти методы широко используются в производстве бетонных и железобетонных изделий и конструкций:

- 1) для ремонта бетонных конструкций [97];
- 2) для определения водоцементного соотношения с помощью микроволновой печи [25, 183];
- 3) для повышения прочности цементного теста в сочетании с низким давлением [95];
- 4) для повышения прочности и ускорения твердения [77, 86];
- 5) для исследования механизма появления трещин [183].

Обработка паром материалов на основе цемента используется несколько десятилетий. При этом прочностные характеристики материалов через 28 сут. после обработки паром ниже, чем при твердении в нормальных условиях. Снижение механической прочности объясняется тем, что быстрая ранняя гидратация цемента приводит к образованию тонкого C–S–H-геля, окружающего негидраты, что затрудняет диффузию и дальнейшее развитие механической прочности [170].

Кроме того, в процессе нагрева будет образовываться температурный градиент, приводящий к образованию неравномерного продукта и задержке процесса гидратации в более позднем возрасте [80].

Обработка микроволновым излучением (сверхвысокочастотное излучение, СВЧ) с частотой около 2000 МГц образцов укрепленного грунта вызывает интенсивный разогрев образцов, ускоренное схватывание и твердение. В отличие от обработки паром, микроволновое излучение может обеспечить быстрый и равномерный нагрев, а также селективный нагрев. Как и при обработке паром,

при твердении в микроволновой печи образуются мелкие продукты, обволакивающие частицы цемента и препятствующие дальнейшей гидратации в более позднем возрасте [80]. При этом ускоряются процессы гидратации и карбонизации, и увеличивается общее количество средних капиллярных пор затвердевшей массы по сравнению с твердением в нормальных условиях и твердением при обработке паром [170].

Необходимо учитывать, что при микроволновом нагреве возможно разрушение образца. Это объясняется теорией давления пара и теорией распределения тепловых напряжений.

Теория давления пара предполагает, что вода в закрытых порах материалов на основе цемента нагревается микроволновой печью и испаряется, что приводит к повышению давления пара, что в конечном итоге вызывает растрескивание или разрыв [120]. Соответственно, количество воды будет напрямую влиять на риск разрушения образца.

Теория термических напряжений предполагает, что характеристики избирательного нагрева микроволновой печью и тепловая инерция материалов на основе цемента вызывают неравномерную теплопроводность в материалах, создавая большой температурный градиент и тепловое напряжение, что в конечном итоге приводит к появлению трещин и разрушению [120]. Поэтому важно учитывать мощность обработки в зависимости от количества воды.

Для обработки образцов микроволновым излучением используется обычная микроволновая печь. Частота электромагнитного излучения в печи составляет 2,45 ГГц, что является оптимальной частотой для потерь в молекуле воды [47].

Свойства укрепленного грунта будут изменяться в зависимости от температуры: по мере нагревания образца увеличивается диэлектрическая проницаемость материала, а также увеличиваются диэлектрические потери. Даже после почти полного высыхания материала образца укрепленного грунта температура может быть очень высокой. Высокая температура материала образца приводит к потере карбонатов или сульфатов, снижению массы образца и, как следствие, к снижению точности измерения [47].

Поэтому обработка образцов укрепленного грунта проводится многократными циклами продолжительностью 2–10 мин., включающими воздействие электромагнитного поля и остывание образцов. Обработка микроволновым излучением проводится сразу после изготовления образцов.

Для анализа результатов набора прочности в нормальных условиях и в условиях обработки микроволновым излучением использована качественная характеристика укрепленного грунта – прочность на сжатие образцов в сухом и водонасыщенном состоянии.

В целом предложенный метод сводится к следующей последовательности:

- 1) назначают 3–4 состава с различным содержанием вяжущих;
- 2) изготавливают образцы укрепленного грунта;
- 3) обрабатывают образцы укрепленного грунта микроволновым излучением;
- 4) определяют прочность на сжатие;
- 5) выбирают состав с наибольшим значением прочности на сжатие;
- 6) изготавливают образцы с выбранным составом в количестве, необходимом для определения всех физико-механических характеристик;
- 7) проводят лабораторные испытания образцов для определения всех требуемых физико-механических характеристик.

Для оценки взаимосвязи значений прочности на сжатие образцов после набора прочности в нормальных условиях и в условиях обработки микроволновым излучением использован коэффициент корреляции Пирсона

$$r_{XY} = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}}, \quad (3.17)$$

где: X – расчетные значения показателя;

Y – фактические значения показателя;

$\bar{Y}, \bar{X}$ – средние значения выборок X и Y .

3.2.6. Разработка метода определения модуля упругости в лабораторных условиях

Модуль упругости является одной из важнейших характеристик при расчете конструкций автомобильных дорог. Отсутствие подробных рекомендаций по определению модуля упругости в лабораторных условиях не позволяет осуществлять подбор состава смеси укрепленных грунтов с заданными проектной документацией значениями модуля упругости. Это очень осложняет обеспечение требуемых значений.

Для моделирования работы грунтов используются различные модели [192].

Модель Винклера

Разработана для расчета путей железных дорог в 1868 г.

$$P = K \cdot Y, \quad (3.18)$$

где: P – реактивное давление;

K – коэффициент пропорциональности, определяется экспериментально;

Y – осадка.

Модель Винклера можно представить в виде множества несвязных между собой одинаковых упругих пружин, опирающихся на абсолютно жесткое основание.

Модель линейно деформируемого полупространства

Широко распространена и используется в нормативных документах, в частности, в СП 22.13330 для расчета осадок сооружений. В основу модели линейно деформируемого полупространства положен закон Гука. Деформации, возникшие в результате приложения нагрузки к упругому телу, линейно зависят от прикладываемых усилий. Одновременно с упругими возникают остаточные деформации, когда число остаточных деформаций значительно превосходит упругие, материал разрушается. Упругой деформации соответствует модуль упругости, полной деформации (условно включающей упругие и остаточные деформации) соответствует модуль деформации:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}, \quad (3.19)$$

где: E – модуль упругости, который представляет собой коэффициент пропорциональности между напряжением и относительной деформацией материала, Па;

σ – напряжение, вызываемое в образце действующей силой, Па.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.20)$$

где: F – действующая на образец сила, Н;

A – площадь приложения силы, м^2 ;

ϵ – упругая относительная деформация материала, вызванная напряжением.

$$\epsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%, \quad (3.21)$$

где: l_1 – размер образца после деформации;

l_0 – первоначальный размер образца.

Закон Гука подразумевает полное восстановление деформаций при снятии нагрузки, то есть в условиях одноосного простого сжатия или растяжения, и применим к относительно однородным системам (рисунок 3.5).

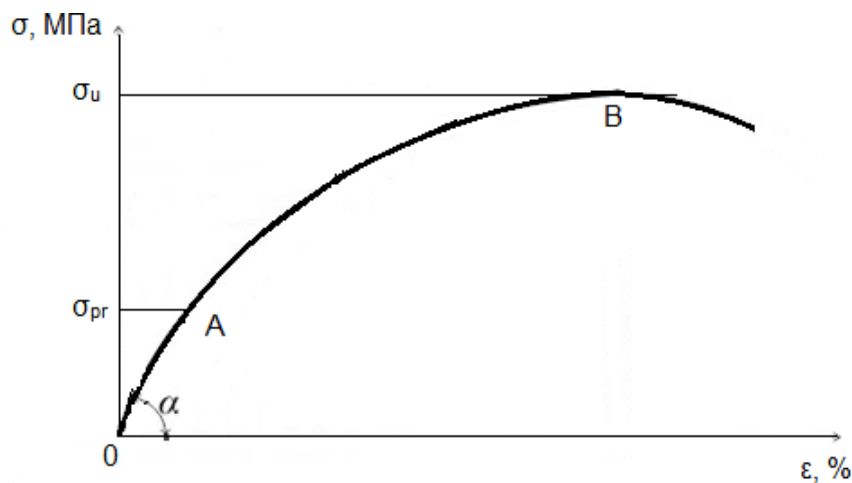


Рисунок 3.5 – Диаграмма деформирования материала:

OA – область упругих деформаций, линейная зависимость между σ и ϵ ;

прямая упругих деформаций (соблюдается закон Гука);

AB – область пластических деформаций, нелинейная зависимость между σ и ϵ ;

Точка A – предел пропорциональности, σ_{pr} ; Точка B – предел прочности, σ_i

(график автора)

Грунты представляют собой сложные системы, свойства которых, зависят от влажности, дисперсности, температуры и других факторов. Поэтому зависимость между напряжением и вызванным им сопротивлением становится нелинейной и для вычисления показателя используются более сложные формулы.

Например, в механике грунтов используются:

а) относительное поперечное сжатие

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{-d_1 - d}{d}, \quad (3.22)$$

где: d_1 – ширина образца после испытания;

d – ширина не сжатого образца.

б) коэффициент Пуассона – соотношение относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению

$$\mu = \frac{\frac{-d_1 - d}{d}}{\frac{l_1 - l_0}{l_0}} = -\frac{\frac{\Delta d}{d}}{\frac{\Delta l}{l_0}}. \quad (3.23)$$

Модель упругопластической среды (модель Кулона – Мора)

Эта модель обобщает модели линейно деформируемого полупространства и модели среды теории предельного равновесия.

Для описания модели используются:

а) уравнения равновесия

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3.24)$$

б) уравнение совместимости

$$\nabla^2 (\sigma_x + \sigma_z) = -\frac{1}{1-\mu} \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial z} \right), \quad (3.25)$$

в) уравнение предельного равновесия

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_2 + 2\sigma_c) \cdot \sin \varphi, \quad (3.26)$$

где: ∇^2 – Оператор Лапласа.

В качестве основного условия предельного равновесия широко применяют закон Кулона

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c, \quad (3.27)$$

где: τ – касательные напряжения;

φ – угол внутреннего трения;

c – сцепление;

и теорию прочности Мора

$$\tau = f(\sigma). \quad (3.28)$$

В дорожном строительстве принято различать:

- модуль упругого сдвига или жесткости – определяется при испытании грунта на сдвиг как соотношение между касательным напряжением τ и размером упругой деформации;
- модуль объемной упругости – определяется при действии на грунт все-сторонней нагрузки методом трехосного сжатия;
- модуль длительной упругости – определяется при долговременных статических нагрузках при наличии пластических деформаций в грунте;
- динамический модуль упругости – определяется при кратковременных нагрузках длительностью до 0,1 с от движения транспортных средств;
- требуемый модуль упругости – обеспечивает максимальную надежность автомобильной дороги на протяжении расчетного срока службы;
- модуль упругости эквивалентный – устанавливает усредненное значение модуля упругости слоев дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна;
- общий модуль упругости – определяется на поверхности конструктивного слоя или грунта земляного полотна.

В нормативной и научно-технической литературе приведены различные методы определения деформационных характеристик. К основным относятся методы с применением одноосного сжатия, трехосного сжатия и жесткого штампа.

Одноосное сжатие

Осуществляется путем приложения нагрузки к верхней грани образца. Образец в этом испытании находится в состоянии осевого сжатия. Модуль упругости при этом отражает соотношение напряжения и деформации материала в упругом состоянии при сжатии. Метод в основном применяется для проверки модуля упругости полужестких материалов или динамического модуля при сжатии. Например, ГОСТ 24452-2023 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» приводит следующую последовательность.

Испытание проводится на образцах-призмах квадратного сечения или цилиндрах круглого сечения с отношением высоты к ширине (диаметру), равным 4.

Образцы нагружаются ступенями до уровня 30 % от разрушающей нагрузки. Испытание проводится до разрушения образцов с одновременным измерением деформации.

Прочность на сжатие, модуль упругости и коэффициент Пуассона бетона определяются путем нагружения образцов до уровня нагрузки, равной 10 % от ожидаемой разрушающей нагрузки. Скорость нагружения составляет $0,6 \pm 0,2$ МПа/с. На каждой ступени производится выдержка нагрузки от 4 до 5 мин.

Модуль упругости определяется для каждого образца при нагрузке, равной 30 % от разрушающей нагрузки

$$E_{\sigma} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_{1y}}, \quad (3.29)$$

где: $\sigma_1 = P_1/F$ – приращение напряжения от условного нуля до уровня внешней нагрузки, равной 30 % от разрушающей;

P_1 – соответствующее приращение внешней нагрузки;

ε_{1y} – приращение относительной продольной деформации образца, соответствующее уровню нагрузки $P_1 = 0,3P_p$.

$$\varepsilon_{1y} = \varepsilon_1 - \sum \varepsilon_{1п}, \quad (3.30)$$

где: ε_1 – приращения полных относительных продольных деформаций, соответствующие уровню нагрузки и замеренные в конце ступени ее приложения;

$\sum \varepsilon_{1п}$ – приращения относительных продольных деформаций быстроснатекающей ползучести, полученные при выдержках нагрузки на ступенях нагружения до уровня нагрузки $P_1 = 0,3P_p$.

Значения относительных деформаций

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l_1}, \quad (3.31)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{l_2}, \quad (3.32)$$

где: l_1, l_2 – фиксированные базы измерения продольной и поперечной деформаций образца.

Трехосное сжатие

Трехосное сжатие осуществляется в стабилометре путем всестороннего воздействия на образец грунта до разрушения образца вертикальным нагружением.

Например, ГОСТ 12248.3-2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия» позволяет определить значение модуля деформации

$$E = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1}, \quad (3.33)$$

где: $\Delta\sigma_1$ – приращение вертикального напряжения в заданном диапазоне, МПа;

$\Delta\varepsilon_1$ – приращение относительной вертикальной деформации образца, д.е.

Определение жестким штампом

Осуществляется путем погружения штампа в грунт. Метод в основном применяется в полевых условиях и изложен в следующих нормативных документах:

- ОДМ 218.5.007-2016 «Методические рекомендации по определению модуля упругости статическим штампом»;
- ГОСТ Р 59866-2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Показатели деформативности конструктивных слоев дорожной одежды из несвязных материалов и грунтов земляного полотна. Технические требования и методы определения»;
- СТО АВТОДОР 10.3-2014 «Метод оценки качества несущих оснований из необработанных вяжущих материалов по деформативности их поверхности на стадии приемочного контроля при устройстве дорожных одежд».

Например, ГОСТ Р 59866 приводит порядок проведения испытания статическим и динамическим нагружением.

Статическое нагружение

Производится предварительное нагружение с передачей давления на штамп, в зависимости от размера плиты – 0,04–0,01 МН/м², с мгновенной разгрузкой до значений нулевой ступени нагружения.

Далее производится первичное нагружение ступенями до достижения предварительно выбранной максимальной нагрузки. Число ступеней должно быть

не менее 6 с выдержкой на каждой ступени не менее 60 с, но до достижения интенсивности изменения деформаций не более 0,02 мм/мин.

После чего производится плавная разгрузка ступенями и повторное нагружение с доведением давления до значения на ступень менее максимального при первичном нагружении.

Динамическое нагружение

Производится предварительное нагружение тремя сбросами груза без регистрации деформаций для устранения возможных случайных деформаций. Далее производится три сбрасывания груза с регистрацией деформации при каждом сбрасывании.

Осадка нагрузочной плиты:

$$S = S_1 \frac{L_1}{L_2}, \quad (3.34)$$

где: S_1 – вертикальное перемещение щупа, измеренное прогибомером, мм;

L_1 – расстояние от центра нагрузочной плиты до точки вращения прогибомера, мм;

L_2 – расстояние от точки вращения прогибомера до измерителя осадки, мм;

Модули деформации при первичном и повторном нагружениях (МПа):

$$E_r = \frac{0,75D}{a_1 + a_2 \sigma_{max}}, \quad (3.35)$$

где: 0,75 – коэффициент, учитывающий специфику проведения измерений нагрузочными плитами и усредненный коэффициент Пуассона;

D – диаметр нагрузочной плиты, мм;

a_1 – постоянная многочлена второй степени, мм/(МН/м²);

a_2 – постоянная многочлена второй степени, мм/(МН/м⁴);

σ_{max} – максимальное давление при измерении, МН/м².

Модуль упругости E_y , МПа

$$E_y = \frac{0,785(\sigma_{max1} - \sigma_0)D}{S_y} (1 - \mu^2), \quad (3.36)$$

где: σ_{max1} – максимальная нагрузка при первичном нагружении, МН/м²;

σ_0 – нагрузка при нулевой ступени нагружения, МН/м²;

D – диаметр нагрузочной плиты, мм;

S_y – упругая деформация при первичном нагружении, мм;

μ – коэффициент Пуассона, принимаемый равным 0,3.

Определяемые разными способами деформационные характеристики одного и того же грунта может различаться в несколько раз, так как проводятся при различных граничных условиях [191]. Кроме того, методы испытаний в разных странах различны. В Китае и Европе, например, используется медленная повторяющаяся нагрузка для имитации транспортной нагрузки. При этом условия нагружения отличаются от фактической транспортной нагрузки, и соответственно, модуль упругости может не объективно отражать соотношение деформаций и напряжений материалов при воздействии нагрузки транспортного средства [191].

В США и Австралии применяют повторное нагружение при трехосном испытании для определения упругости необработанного грунта или материалов основания. Метод основан на воздействии на образец импульса нагрузки длительностью 0,1 с, с последующей разгрузкой в течение 0,9 с. Такой режим больше похож на нагрузку от движения транспортного средства, но требует использования габаритного оборудования [182].

Также стоит отметить, что трехосное испытание под нагрузкой проводится в условиях ограничивающего давления, тогда как влияние ограничивающего давления на модуль грунта, укрепленного неорганическими вяжущими, незначительно по сравнению с неукрепленными грунтами земляного полотна, так как поперечные деформации укрепленных грунтов и других строительных материалов с жесткими структурными связями незначительны.

В настоящем исследовании определение модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, предлагается осуществлять при разгрузке путем одноосного сжатия в следующей последовательности.

1. Изготовление образцов

Для определения модуля упругости применяются образцы-цилиндры или образцы-кубы с диаметром или стороной 10 см. Число образцов в серии должно быть не менее 6 шт.

2. Водонасыщение образцов

Определение прочности на сжатие и модуля упругости проводят на образцах укрепленного грунта, подвергнутых полному или капиллярному водонасыщению.

3. Нагружение лабораторных образцов на прессе

Нагружение образцов укрепленного грунта производят на прессе статической нагрузкой ($0,6 \pm 0,2$) МПа/с. При достижении нагрузкой значения на уровне 50 % от разрушающей нагрузки, производится разгрузка образца и повторное нагружение (циклирование) до разрушающей нагрузки (рисунок 3.6). Деформации образцов контролируются по датчику перемещения плиты пресса.

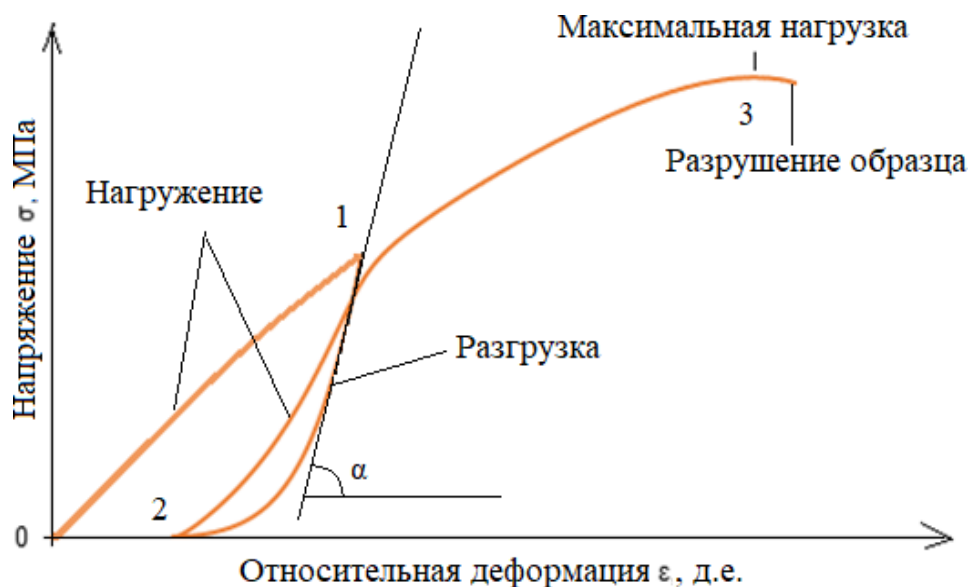


Рисунок 3.6 – Определение модуля упругости грунта, укрепленного портландцементом:

0–1 – нагружение; 1–2 – разгрузка; 2–3 – нагружение (рисунок автора [220])

Для оценки долговечности слоев из укрепленных грунтов от воздействия нагрузок от транспортных средств образец подвергают циклированию (серии повторяющихся нагрузок с периодами нагружения и разгрузки), которое хорошо имитирует нагрузки, создаваемые колесами транспортных средств. Количество циклов назначается в зависимости от числа приложений расчетной нагрузки и от расчетной скорости движения транспортных средств. В американских стандартах рекомендуемая продолжительность повторной загрузки составляет 1 с, из которых 0,1 с – период нагружения, а 0,9 с – период разгрузки.

В работе [101] рекомендуется использовать частоту 1,0–3,0 Гц для определения начального модуля упругости и количества нагружений до падения модуля упругости в 2 раза.

4. Обработка данных

Обработка данных производится с использованием формул 3.36–3.40. Модуль упругости представляет собой тангенс угла кривизны α на участке упругих изменений, которые имеют место при разгрузке (ветвь 1–2 на рисунке 3.6):

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

За конечный результат принимают среднее арифметическое значение серии лабораторных образцов

$$E = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_n}{n}, \quad (3.37)$$

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

n – количество образцов.

Для оценки точности полученных результатов при малом количестве измерений ($2 \leq n \leq 10$) используют методы математической статистики, разработанной для малого числа измерений. При этом полученные результаты рассматривают как случайную выборку из некоторой генеральной совокупности. Оценку точности измерений и правильности производят с помощью следующих критериев [188].

Единичные отклонения (отклонения отдельных измерений от среднего арифметического):

$$E_i = E - E_{1,2,\dots,n}. \quad (3.38)$$

Средняя квадратическая ошибка отдельного измерения:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (E - E_i)^2}{n-1}}. \quad (3.39)$$

Коэффициент вариации:

$$v = \frac{S}{E} \quad (3.40)$$

Итоговое значение модуля упругости:

$$E = E(1 - t \cdot v), \quad (3.41)$$

где: t – коэффициент Стьюдента при допустимом уровне надежности.

Модуль упругости слоев могут уменьшаться в результате образования трещин, переменного увлажнения/высыхания и замерзания/оттаивания, а также в результате сложности обеспечения высокой однородности смеси в период производства строительных работ. Поэтому расчетное значение модуля упругости составляет

$$E_p = K_k \cdot E, \quad (3.42)$$

где: K_k – коэффициент, учитывающий изменение модуля упругости материала в конструктивном слое в процессе эксплуатации дороги.

Уровень надежности принимается по ПНСТ 542-2021 (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Уровни надежности и коэффициент Стьюдента

Тип дорожных одежд	Уровень надежности, K_n	Коэффициент Стьюдента, t
Капитальный	0,98	3,4
	0,95	2,6
	0,92	2,2
	0,90	2,0
Облегченный	0,90	2,0
	0,85	1,7
Переходный	0,82	1,6

Ориентировочные значения коэффициента K_k с учетом укрепляемых неорганическими вяжущими материалов или грунтов указаны в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Ориентировочные значения коэффициента K_k (ВСН 46–83)

Наименование	K_k
Подобранная щебеночная (гравийная) смесь	0,1
Малопрочный каменный материал, отходы камнедробления и смеси с супесью или песком, золошлаковая смесь	0,6
Легкая супесь, разнотернистые пески	0,5
Пылеватая супесь, суглинок	0,4

Примечание. Коэффициент K_k необходимо уточнять по мере накопления данных испытаний.

Предложенный метод позволит повысить эффективность подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в лабораторных условиях и обеспечить возможность строительства слоев автомобильных дорог с заданными проектной документацией значениями модуля упругости.

Оценка корреляции между CBR и модулем упругости

Определение модуля упругости в лабораторных условиях является сложным и трудоемким. Существуют эмпирические модели, которые описывают взаимосвязь модуля упругости от других прочностных характеристик.

В работе [156] рассмотрены экспериментальные исследования корреляций значений модуля упругости со значениями калифорнийского числа CBR стабилизированных грунтов:

$$E = 17,6CBR^{0,64}. \quad (3.43)$$

Взаимосвязь между модулем упругости и прочностью на сжатие:

$$E = 0,124R_{сж} + 68,8, \quad (3.44)$$

где: E – модуль упругости, МПа;

$R_{сж}$ – прочность на сжатие, кПа.

Зависимости значений модуля упругости от значений калифорнийского числа CBR и прочности на сжатия укрепленных грунтов практически не исследованы. В исследовании [65] отмечается, что с наибольшей точностью прогнозировать значение модуля упругости для стабилизированных грунтов земляного полотна позволяют следующие уравнения:

$$M_r = UCS^{a+b\sigma_d}, \quad (3.45)$$

где: a и b – параметры регрессии;

UCS – прочность на сжатие.

$$M_r = UCS^{[a \cdot (\frac{\theta}{\sigma_{atm}})^b \cdot (\frac{\tau_{oct}}{\sigma_{atm}})^c]}, \quad (3.46)$$

где: θ – объемное напряжение $\sigma_1 + 2\sigma_3$;

τ_{oct} – напряжение сдвига в октаэдре ($\sqrt{2}/3$) ($\sigma_1 - \sigma_3$);

σ_{atm} – атмосферное давление, 101 кПа;

a , b и c – параметры регрессии.

Модуль упругости для грунтов, стабилизированных известью:

$$M_{Rt} = 0,124UCS + 9,8, \quad (3.47)$$

где: UCS – прочность на сжатие.

Изменение пластических деформаций в зависимости от изменения модуля упругости, которое наблюдается в разное время года, сезонно и в течение всего срока службы дорожной одежды можно определить по формуле [65]:

$$\sum_{t=1}^m \varepsilon_p = a \cdot \left(\frac{\sigma_{dt}}{M_{Rt}} \right) \cdot N_t^b. \quad (3.48)$$

$$\sum_{t=1}^m t = T, \quad (3.49)$$

где: ε_p – накопленная постоянная деформация в микродеформациях;

T – расчетный срок службы дорожного покрытия;

σ_{dt} – отклоняющее напряжение в кПа за период времени, t ;

N – количество повторений нагрузки за период времени, t ;

a и b – параметры регрессии.

В исследовании [49] указано, что модуль упругости щебня, укрепленного портландцементом, в любое время твердения M_{Rt} можно оценить, исходя из прочности на сжатие при том же времени твердения UCS_t :

$$M_{Rt} = m_0 UCS_t, \quad (3.50)$$

где: M_{Rt} – модуль упругости после t дней времени отвержения;

m_0 – наклон линии тренда регрессионной модели;

UCS – прочность на сжатие;

t – время твердения.

$$m_0 = m_1 \frac{1}{F} + m_2 \cdot I_P + m_3 \cdot AC + m_4 \frac{R_{сж1}}{p_a} + b, \quad (3.51)$$

где: F – содержание частиц, проходящих через сито № 200, %;

AC – количество вяжущего, % от веса сухого грунта;

I_P – число пластичности;

$R_{сж1}$ – прочность на сжатие после 1 дня твердения;

p_a – атмосферное давление;

m_1, m_2, m_3, m_4 – параметры регрессии.

Рассмотренные модели в основном разработаны для стабилизированных грунтов. Формулы (3.49, 3.50) разработаны для щебня, укрепленного портландцементом.

3.2.7. Определение коэффициента запаса на уплотнение золошлаковых смесей, укрепленных неорганическими вяжущими в лабораторных условиях

В нормативно-технической документации отсутствуют рекомендуемые значения коэффициента запаса на уплотнение золошлаковых смесей, укрепленных неорганическими вяжущими.

Определение коэффициента в лабораторных условиях возможно следующим методом:

- 1) приготовление смеси укрепленного грунта;
- 2) заполнение асфальтобетонной формы (по ГОСТ 12801) диаметром 101 мм смесью укрепленного грунта;
- 3) уплотнение смеси в форме штыкованием;
- 4) измерение фактической толщины уплотняемого слоя смеси в асфальтобетонной форме;
- 5) уплотнение смеси на прессе до достижения значения максимальной плотности (время выдержки под нагрузкой 3 мин.);
- 6) измерение высоты уплотненного образца укрепленного грунта;
- 7) определение коэффициента запаса по формуле

$$K_{\text{зап}} = \frac{h_1}{h_2}, \quad (3.52)$$

где: h_1 и h_2 – высота образца до и после уплотнения, соответственно.

3.3. Расчет экспериментальных конструкций с применением грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, и золошлаковых смесей ТЭЦ

3.3.1. Методика расчета конструкций

Повышение эффективности применения золошлаковых материалов в конструкциях автомобильных дорог достигается применением типовых конструкций дорожных одежд. Такие конструкции возможно применять на участках автомобильных дорог со схожими условиями проектирования и воздействия нагрузок от транспортных средств.

Для оценки эффективности применения конструкций дорожных одежд с использованием золошлаковых материалов ТЭЦ разработаны типовые конструкции дорожных одежд с использованием золошлаковых смесей и традиционных материалов.

Конструкции дорожных одежд разработаны в период производства работ по строительству опытно-экспериментальных конструкций с учетом следующих требований:

- СП 34.13330.2021 «Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85*»;
- ПНСТ 265-2018 Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование нежестких дорожных одежд;
- ПНСТ 390-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Типовые конструкции;
- ОДМ 218.2.104-2019 Альбом типовых конструкций нежестких дорожных одежд в различных дорожно-климатических зонах.

Дорожные одежды рассчитаны для автомобильных дорог общего пользования II-V технической категории, расположенных в дорожно-климатической зоне I₃. При этом разработанные конструкции возможно применять для автомобильных дорог необщего пользования.

Разработаны дорожные одежды капитального, облегченного и переходного типа. Расчетный срок службы принят 24 года.

Конструкции представлены для граничных условий проектирования.

Для промежуточных исходных данных в пределах граничных условий конструкции дорожных одежд можно выбирать методом интерполяции и проверять расчетом. В случаях, когда граничные условия хотя бы по одному показателю выходят за рамки минимальной и максимальной величины, необходим расчет индивидуальной конструкции дорожной одежды.

Расположение конструктивных элементов дорожной одежды приведено на рисунке 3.7.

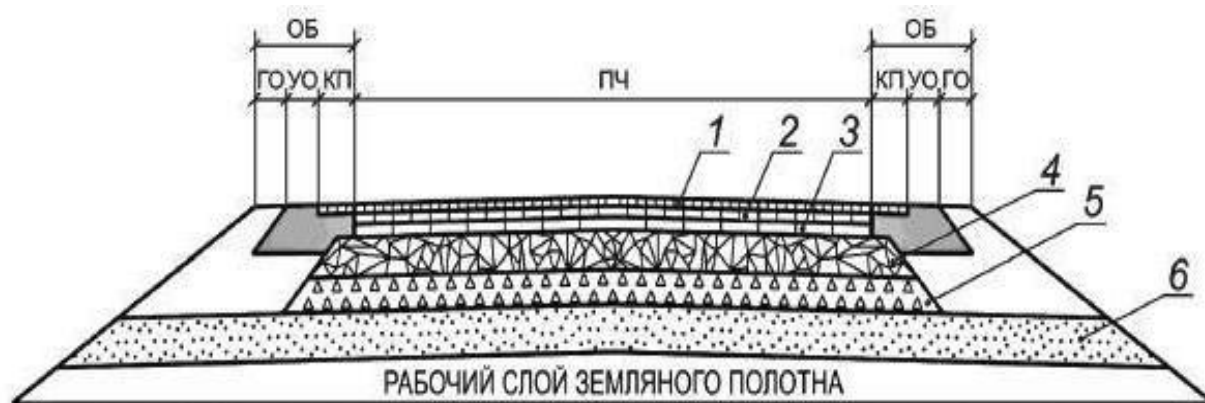


Рисунок 3.7 – Расположение слоев конструкции дорожной одежды на дорогах без разделительной полосы: 1 – верхний слой покрытия со слоем износа или защитным слоем; 2 – нижний слой покрытия; 3 – верхний слой основания; 4 – средний слой основания; 5 – нижний слой основания; 6 – дополнительный слой основания; РП – разделительная полоса; ПЧ – проезжая часть; ОБ – обочина; КП – крайняя полоса; УО – укрепленная часть обочины; ГО – грунтовая часть обочины; ПБ – полоса безопасности у разделительной полосы [224, 229]

Нормативная нагрузка на конструкцию принимается в соответствии с классами ГОСТ 32960 «Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения» в зависимости от типа дорожной одежды (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Расчетные параметры нормативной нагрузки для конструкций дорожной одежды

Тип дорожной одежды	Класс расчетной нагрузки	Нормативная статическая нагрузка, кН		Расчетные параметры нагрузки	
		на ось	на колесо	давление на покрытие, МПа	диаметр отпечатка движущегося колеса, см
капитальный	АК-11,5	115	57,5	0,8	34
облегченный переходный	АК-10	100	50,0	0,6	37

Требования к уровню надежности и коэффициентам запаса прочности конструкций дорожной одежды указаны в таблице 3.7 [224, 229].

Таблица 3.7 – Уровень надежности и коэффициенты прочности типовых дорожных одежд

Тип дорожной одежды	Категория дороги	Уровень надежности	Требуемый коэффициент прочности по критерию	
			упругий прогиб	сдвигоустойчивость и растяжение при изгибе
капитальный	IV	0,90	1,15	1,00
облегченный	IV	0,85	1,06	0,94
переходный	IV	0,82	1,02	0,87

Количество расчетных дней приложения нагрузки принято для района 7-150 (ПНСТ 265-2018, табл. 7).

Разрешаемая величина морозного пучения грунта земляного полотна для конструкций дорожной одежды должна составлять не более 4 см – для капитального типа покрытия; 6 см – для облегченного типа покрытия; 0 см – для переходного типа покрытия.

3.3.2. Принципы конструирования и расчета

Работа конструкции предусматривается совместно с работой земляного полотна и системы водоотвода при условии обеспечения руководящей отметки (вышения поверхности покрытия над уровнем грунтовых / поверхностных вод).

Конструкции дорожной одежды разработаны на основе расчетов, выполненных по трем критериям прочности [224]:

- допускаемый упругий прогиб;
- условие сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев;
- сопротивление монолитных слоев покрытия усталостному разрушению от растяжения при изгибе.

Конструкции дорожной одежды должны проверяться на морозоустойчивость и на осушение дорожной одежды и грунта рабочего слоя расчетом.

Расчет осушения конструкций дорожной одежды выполнен для 1-й и 3-й схемы увлажнения грунта рабочего слоя на земляном полотне из глинистых и песчаных пылеватых грунтов.

Работа дренирующих слоев конструкций дорожной одежды предусмотрена по принципу запаздывания при устройстве дополнительного слоя основания на всю ширину земляного полотна.

В разработанных конструкциях с покрытиями капитального и облегченного типов не предусмотрены защитные слои и слои износа. Для дорожных одежд с покрытиями переходного типа обязательно устройство защитного слоя покрытия при устройстве верхнего слоя из грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими.

Минимальная толщина конструктивных слоев назначена в зависимости от материала слоя. В конструкциях дорожных одежд для разделения морозозащитных и дренирующих слоев с каменными материалами и грунтом рабочего слоя земляного полотна, регулирования водно-теплового режима земляного полотна и усиления дренирующих свойств слоев рекомендуется применять геосинтетические материалы.

При изменении конструкций можно регулировать толщину дренирующего слоя путем изменения свойств материала слоя и типа конструкции дренажа. Материалы конструктивных слоев должны соответствовать нормативным требованиям (таблица 3.8). Расчет дорожных одежд выполнен с применением программного комплекса «Топоматик Robur – Дорожная одежда».

Таблица 3.8 – Нормативные документы, регламентирующие требования к материалам конструктивных слоев дорожных одежд [224, 229]

Материал	Нормативная документация
Грунты, укрепленные органическими вяжущими	ГОСТ Р 704532
Грунты, стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими	ГОСТ Р 70452
Смеси щебеночно-гравийно-песчаные, обработанные органическими вяжущими	ГОСТ Р 70454
Смеси щебеночно-гравийно-песчаные, обработанные неорганическими вяжущими	ГОСТ Р 70455
Смеси щебеночно-гравийно-песчаные	ГОСТ Р 70458 и ГОСТ 25607
Щебень и гравий из горных пород со средней плотностью зерен от 2,0 до 3,5 г/см	ГОСТ 32703
Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии, а также из фосфорных шлаков	ГОСТ 32826
Песчано-гравийные смеси, получаемые из гравийно-песчаных и валунно-гравийно-песчаных пород	ГОСТ 23735
Щебень и песок, а также готовые щебеночно-песчаные смеси из шлаков черной и цветной металлургии и фосфорных шлаков	ГОСТ 3344
Асфальтобетон: - на ПБВ по ГОСТ Р 52056 - на БНД по ГОСТ 33133 - на битумном вяжущем, классифицируемом по PG по ГОСТ Р 58400.1 и 58400.2	ГОСТ Р 58401.1 ГОСТ Р 58401.2 ГОСТ Р 58406.1-2020 ГОСТ Р 58406.2-2020
Песок природный	ГОСТ 32824

Конструкция дорожной одежды проверяется на морозоустойчивость. При низкой морозоустойчивости производится укрепление рабочего слоя земляного полотна с расчетом, что он будет выполнять функции морозозащитного слоя. В этом случае выше лежащие слои оснований устраиваются из грунтов и материалов, укрепленных вяжущими, с высокими марками по водостойкости и морозостойкости.

Выводы

1. Обоснована методика проведения экспериментальных исследований. Определены места отбора проб грунтов и золошлаковых смесей ТЭЦ. Определение физико-механических характеристик грунтов и ЗШС осуществляется стандартными методами ГОСТ.

2. Рассмотрены математические модели прогнозирования во времени прочностных характеристик грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими. Применение на практике этих уравнений затруднительно, так как на процессы структурообразования и, как следствие, на конечную прочность на сжатие влияет много факторов: характеристики вяжущего материала, минералогия грунта, число пластичности, значение оптимальной влажности и др. Прогнозирование конечных свойств укрепленных золошлаковых смесей ТЭЦ осложняется тем что на процессы структурообразования будет также влиять содержание в золошлаковых материалах оксидов кальция и магния, количество стекловидной фазы и т. д. Поэтому с учетом крупнотоннажного накопления золошлаковых смесей в золоотвалах, которое исчисляется млн т, целесообразно построение математических зависимостей для каждого золоотвала в отдельности.

3. Усовершенствован метод подбора составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, на основе золошлаковых отходов ТЭЦ, позволяющий повысить эффективность применения отходов в конструкциях автомобильных дорог и снизить трудоемкость работ в строительных лабораториях.

4. Теоретически обосновано применение микроволнового излучения для ускоренного набора прочности образцов укрепленного грунта. Установлено, что обработка микроволновым излучением (с частотой около 2000 МГц) образцов 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.

5. Усовершенствован метод определения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в лабораторных условиях, позволяющий осуществлять подбор состава смеси с заданными проектными значениями модуля упругости, что обеспечит строительство автомобильных дорог с требуемыми значениями модуля упругости.

6. Подтверждено, что различными авторами исследованы корреляции значений модуля упругости со значениями калифорнийского числа CBR стабилизированных грунтов, при этом практически не исследованы зависимости значений модуля упругости от значений калифорнийского числа CBR и прочности на сжатие укрепленных грунтов.

Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.1. Результаты исследования местных грунтов

По результатам лабораторных испытаний проб золошлаковых смесей и местных грунтов определены их физико-механические характеристики. Виды лабораторных проб грунтов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты испытаний физико-механических свойств грунтов

Р/н пробы	Место отбора пробы	Классификация по ГОСТ 25100
Г-1	Шелеховский район	Суглинок тяжелый
Г-6	Шелеховский район	Суглинок легкий песчанистый твердый
Г-22	Шелеховский район	Супесь песчанистая твердая
Г-18/1	Месторождение «Култайское»	Крупнообломочный галечниковый
Г-19/1	Месторождение «Мординское»	Крупнообломочный галечниковый заполнитель – песок гравелистый
Г-19/2	Месторождение «Мординское»	Песок средней крупности
Г-21/1	Месторождение «Казачинский-1»	Крупнообломочный гравийный заполнитель – песок гравелистый

Исходя из данных таблиц 4.1 и 4.3, грунт в соответствии с номенклатурой ГОСТ 25100-2020 классифицируется как суглинок тяжёлый песчанистый твердый. По значению рН грунт является слабокислым.

Гранулометрический состав и физико-механические характеристики тяжелого суглинка приведены в таблицах 4.2–4.4.

Таблица 4.2 – Суглинок (Г-1). Гранулометрический состав по ГОСТ 25100

Размер сит, мм	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	1390,07	1590,79	1076,81	1455,99	1246,25	1204,34	1311,96	5954,38
Частные остатки, %	9,13	10,44	7,07	9,56	8,18	7,91	8,61	39,09
Полные остатки, %	9,13	19,57	26,64	36,20	44,38	52,29	60,91	100,00
Полные проходы, %	90,87	80,43	73,36	63,80	55,62	47,71	39,09	0,00

Как видно из таблицы 4.3, гранулометрический состав не соответствует рекомендуемым требованиям к оптимальному гранулометрическому составу ГОСТ 23558-94. ГОСТ Р 70452-2022 не приводит требований к гранулометрическому составу суглинков.

Таблица 4.3 – Суглинок (Г-1). Гранулометрический состав по ГОСТ 23558

Размер сит, мм	40	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14	0,005
Частные остатки, г	0,00	0,00	1390,07	1590,79	414,08	1761,25	1308,86	1064,91	1097,52	6603,11	–
Частные остатки, %	0,00	0,00	9,13	10,44	2,72	11,56	8,59	6,99	7,21	43,35	–
Полные остатки, %	0,00	0,00	9,13	19,57	22,29	33,85	42,45	49,44	56,65	100,00	–
Полные проходы, %	100,00	100,00	90,87	80,43	77,71	66,15	57,55	50,56	43,35	0,00	–
ГОСТ 23558-94	–	–	до 10	25–40	45–65	60–80	70–85	75–90	80–95	–	85–100

Таблица 4.4 – Суглинок (Г-1). Физико-механические характеристики

Наименование показателя	Един. изм.	Требования к испытываемому материалу		Результаты испытаний
		Наименование нормативно-технической документации	Норматив. значение показателя	
Естественная влажность грунта	%	ГОСТ 5180-2015	не нормируется	3,16
Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	ГОСТ 25100-2020	–	26,64
Влажность на границе текучести	%	ГОСТ 5180-2015	–	31,45
Влажность на границе раскатывания	%	ГОСТ 5180-2015	–	17,78
Число пластичности	%	ГОСТ 25100-2020	$7 < I_p \leq 17$	13,67
Показатель текучести	д.е.	ГОСТ 25100-2020	$IL < 0$	–0,93
Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм), по массе	%	ГОСТ 25100-2020	≥ 40	46,71
Разновидность грунта	–	ГОСТ 25100-2020	–	суглинок тяжёлый песчанистый твердый
Содержание частиц менее 0,005 мм, по массе	%	ГОСТ 23558-94	от 85 до 100	–
Максимальная плотность	г/см ³	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	1,91
Оптимальная влажность	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	15,99
Оптимальная влажность (с учётом крупных частиц)	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	13,17
Набухание	д.е.	ГОСТ 25100-2020	–	–
pH	–	ГОСТ 23558-94	не нормируется	6,01

Гранулометрический состав и физико-механические характеристики легко-го суглинка приведены в табл. 4.5–4.7.

Таблица 4.5 – Суглинок (Г-6). Гранулометрический состав по ГОСТ 25100

Размер сит, мм	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	500,46	850,20	945,11	959,79	1347,52	1461,89	1558,37	3157,54
Частные остатки, %	4,64	7,89	8,77	8,90	12,50	13,56	14,45	29,29
Полные остатки, %	4,64	12,53	21,29	30,20	42,70	56,26	70,71	100,00
Полные проходы, %	95,36	87,47	78,71	69,80	57,30	43,74	29,29	0,00

Таблица 4.6 – Суглинок (Г-6). Гранулометрический состав по ГОСТ 23558

Размер сит, мм	40	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14	0,005
Частные остатки, г	0,00	0,00	500,46	850,20	639,87	997,29	1243,14	1329,32	1339,01	3881,59	–
Частные остатки, %	0,00	0,00	4,64	7,89	5,94	9,25	11,53	12,33	12,42	36,00	–
Полные остатки, %	0,00	0,00	4,64	12,53	18,46	27,71	39,25	51,58	64,00	100,00	–
Полные проходы, %	100,00	100,00	95,36	87,47	81,54	72,29	60,75	48,42	36,00	0,00	–
ГОСТ 23558-94	–	–	до 10	25–40	45–65	60–80	70–85	75–90	80–95	–	85–100

Таблица 4.7 – Суглинок (Г-6). Физико-механические характеристики

Наименование показателя	Един. изм.	Требования к испытываемому материалу		Результаты испытаний
		Нормативно-техническая документация	Нормативное значение	
Естественная влажность грунта	%	ГОСТ 5180-2015	не нормируется	1,71
Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	ГОСТ 25100-2020	–	21,29
Влажность на границе текучести	%	ГОСТ 5180-2015	–	25,78
Влажность на границе раскатывания	%	ГОСТ 5180-2015	–	16,43
Число пластичности	%	ГОСТ 25100-2020	$7 < I_p \leq 12$	9,35
Показатель текучести	д.е.	ГОСТ 25100-2020	$IL < 0$	–1,4
Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм), по массе	%	ГОСТ 25100-2020	≥ 40	66,52
Разновидность грунта	–	ГОСТ 25100-2020	–	суглинок легкий песчанистый твердый
Содержание частиц менее 0,005 мм, по массе	%	ГОСТ 23558-94	от 85 до 100	–
Максимальная плотность	г/см ³	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	1,99
Оптимальная влажность	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	11,13
Оптимальная влажность (с учётом крупных частиц)	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	9,83
Относительная деформация морозного пучения	д.е.	ГОСТ 25100-2020	–	0,0303
Набухание	д.е.	ГОСТ 25100-2020	–	–
pH	–	ГОСТ 23558-94	не нормируется	6,90
Содержание оксида кальция CaO, по массе	%	ГОСТ 5180-2015	не более 10	–

Исходя из данных таблиц 4.5 и 4.7, грунт в соответствии с номенклатурой ГОСТ 25100-2020 классифицируется как суглинок легкий песчанистый твердый слабопучинистый. По значению рН грунт является нейтральным.

Гранулометрический состав и физико-механические характеристики супеси приведены в таблицах 4.8–4.10.

Исходя из данных таблиц 4.8 и 4.10, грунт в соответствии с номенклатурой ГОСТ 25100-2020 классифицируется как супесь песчанистая твердая. По значению рН грунт является среднещелочным.

Таблица 4.8 – Супесь (Г-22). Гранулометрический состав по ГОСТ 25100

Размер сит, мм	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	0,00	0,00	16,24	13,11	28,21	192,69	163,69	86,10
Частные остатки, %	0,00	0,00	3,25	2,62	5,64	38,53	32,74	17,22
Полные остатки, %	0,00	0,00	3,25	5,87	11,51	50,05	82,78	100,00
Полные проходы, %	100,00	100,00	96,75	94,13	88,49	49,95	17,22	0,00

Как видно из данных таблицы 4.9, гранулометрический состав не соответствует рекомендуемым требованиям к оптимальному гранулометрическому составу ГОСТ 23558-94. ГОСТ Р 70452-2022 не приводит требований к гранулометрическому составу супеси.

Таблица 4.9 – Супесь (Г-22). Гранулометрический состав по ГОСТ 23558

Размер сит, мм	40	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14	0,005
Частные остатки, г	0,00	0,00	0,00	0,00	10,58	13,08	24,67	114,23	207,83	129,65	–
Частные остатки, %	0,00	0,00	0,00	0,00	2,12	2,62	4,93	22,84	41,56	25,93	–

Окончание таблицы 4.9

Полные остатки, %	0,00	0,00	0,00	0,00	2,12	4,73	9,67	32,51	74,07	100,00	–
Полные проходы, %	100,00	100,00	100,00	100,00	97,88	95,27	90,33	67,49	25,93	0,00	–
Требования ГОСТ 23558-94	–	–	до 10	25–40	45–65	60–80	70–85	75–90	80–95		85–100

Таблица 4.10 – Супесь (Г-22). Физико-механические характеристики

Наименование показателя	Един. изм.	Требования к испытываемому материалу		Результаты испытаний
		Нормативно-техническая документация	Нормативное значение	
1	2	3	4	5
Естественная влажность грунта	%	ГОСТ 5180-2015	не нормируется	1,31
Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	ГОСТ 25100-2020	–	3,25
Влажность на границе текучести	%	ГОСТ 5180-2015	–	19,75
Влажность на границе раскатывания	%	ГОСТ 5180-2015	–	14,32
Число пластичности	%	ГОСТ 25100-2020	$7 < I_p \leq 12$	5,43
Показатель текучести	д.е.	ГОСТ 25100-2020	$IL < 0$	–2,40
Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм), по массе	%	ГОСТ 25100-2020	≥ 40	82,20
Разновидность грунта	–	ГОСТ 25100-2020	–	супесь песчанистая твердая
Содержание частиц менее 0,005 мм, по массе	%	ГОСТ 23558-94	от 85 до 100	–
Максимальная плотность	г/см ³	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	1,83

Окончание таблицы 4.10

1	2	3	4	5
Оптимальная влажность	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	13,35
Оптимальная влажность (с учётом крупных частиц)	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	0,00
Набухание	д.е.	ГОСТ 25100-2020	–	–
pH	–	ГОСТ 23558-94	не нормируется	8,53
Содержание СаО, по массе	%	ГОСТ 5180-2015	не более 10	–

Гранулометрический состав и физико-механические характеристики крупнообломочного галечникового грунта приведены в таблицах 4.11–4.13.

Исходя из данных таблиц 4.11 и 4.13, грунт в соответствии с номенклатурой ГОСТ 25100-2020 классифицируется как крупнообломочный галечниковый.

Таблица 4.11 – Галечниковый (Г-18/1). Гранулометрический состав по ГОСТ 25100

Размер сит, мм	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	3868,00	2504,00	1670,12	1085,42	1102,44	1406,59	541,84	630,60
Частные остатки, %	18,76	12,15	8,10	5,27	5,35	6,82	2,63	3,06
Полные остатки, %	56,63	68,78	76,88	82,14	87,49	94,31	96,94	100,00
Полные проходы, %	43,37	31,22	23,12	17,86	12,51	5,69	3,06	0,00

Как видно из данных таблицы 4.12, гранулометрический состав не соответствует рекомендуемым требованиям к оптимальному гранулометрическому составу ГОСТ 23558-94.

Таблица 4.12 – Галечниковый (Г-18/1). Гранулометрический состав по ГОСТ 23558

Размер сит, мм	40	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14	0,005
Частные остатки, г	3464,00	4342,00	3868,00	2504,00	1640,49	798,36	1024,05	1407,77	758,98	807,36	–
Частные остатки, %	16,80	21,06	18,76	12,15	7,96	3,87	4,97	6,83	3,68	3,92	–
Полные остатки, %	16,80	37,87	56,63	68,78	76,73	80,61	85,57	92,40	96,08	100,0	–
Полные проходы, %	100,00	62,13	43,37	31,22	23,27	19,39	14,43	7,60	3,92	0,00	–
ГОСТ 23558-94	–	–	до 10	25-40	45-65	60-80	70-85	75-90	80-95	–	85-100

Таблица 4.13 – Галечниковый (Г-18/1). Физико-механические характеристики

Наименование показателя	Един. изм.	Требования к испытываемому материалу		Результаты испытаний
		Наименование нормативно-техническая документация	Нормативное значение показателя	
1	2	3	4	5
Естественная влажность грунта	%	ГОСТ 5180-2015	не нормируется	1,11
Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	ГОСТ 25100-2020	–	56,63
Влажность на границе текучести	%	ГОСТ 5180-2015	–	–
Влажность на границе раскатывания	%	ГОСТ 5180-2015	–	не раскатывается в жгут Ø 3 мм

Окончание таблицы 4.13

1	2	3	4	5
Число пластичности	%	ГОСТ 25100-2020	$7 < I_p \leq 17$	—
Показатель текучести	д.е.	ГОСТ 25100-2020	$IL < 0$	—
Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм), по массе	%	ГОСТ 25100-2020	≥ 40	76,88
Разновидность грунта	—	ГОСТ 25100-2020	—	крупнообломочный галечниковый
Содержание частиц менее 0,005 мм, по массе	%	ГОСТ 23558-94	от 85 до 100	—
Максимальная плотность	г/см ³	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	—
Оптимальная влажность	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	—
Оптимальная влажность (с учётом крупных частиц)	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	—
Набухание	д.е.	ГОСТ 25100-2020	—	—
pH	—	ГОСТ 23558-94	не нормируется	—

Гранулометрический состав и физико-механические характеристики крупнообломочного галечникового грунта, заполнителя песка гравелистого приведены в таблицах 4.14–4.16.

Таблица 4.14 – Галечниковый, заполнитель – песок гравелистый (Г-19/1). Гранулометрический состав по ГОСТ 25100

	Размер сит, мм	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Галечниковый грунт	Частные остатки, г	3508,00	1416,00	664,59	342,11	697,55	3328,23	2063,12	732,39
	Частные остатки, %	18,30	7,39	3,47	1,78	3,64	17,36	10,76	3,82
	Полные остатки, %	51,77	59,16	62,63	64,41	68,05	85,42	96,18	100,00
	Полные проходы, %	48,23	40,84	37,37	35,59	31,95	14,58	3,82	0,00

Окончание таблицы 4.14

Заполнитель	Частные остатки, г	–	–	–	56,03	114,25	545,12	337,91	119,95
	Частные остатки, %	–	–	–	4,78	9,74	46,46	28,80	10,22
	Полные остатки, %	–	–	–	4,78	14,51	60,98	89,78	100,00
	Полные проходы, %	–	–	–	95,22	85,49	39,02	10,22	0,00

Исходя из данных таблиц 4.14 и 4.16, грунт в соответствии с номенклатурой ГОСТ 25100-2020 классифицируется как крупнообломочный галечниковый, заполнитель – песок гравелистый.

Как видно из таблицы 4.15, гранулометрический состав не соответствует рекомендуемым требованиям к оптимальному гранулометрическому составу ГОСТ 23558-94.

Таблица 4.15 – Галечниковый, заполнитель – песок гравелистый (Г-19/1). Гранулометрический состав по ГОСТ 23558

Размер сит, мм	40	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14	0,005
Частные остатки, г	0,00	6416,00	3508,00	1416,00	649,22	261,75	351,08	2141,29	2886,94	1537,71	–
Частные остатки, %	0,00	33,47	18,30	7,39	3,39	1,37	1,83	11,17	15,06	8,02	–
Полные остатки, %	0,00	33,47	51,77	59,16	62,55	63,91	65,75	76,92	91,98	100,00	–
Полные проходы, %	100,00	66,53	48,23	40,84	37,45	36,09	34,25	23,08	8,02	0,00	–
ГОСТ 23558-94	–	–	до 10	25–40	45–65	60–80	70–85	75–90	80–95	–	85–100

Таблица 4.16 – Галечниковый, заполнитель – песок гравелистый (Г-19/1).**Физико-механические характеристики**

Наименование показателя	Един. изм.	Требования к материалу		Результаты испытаний
		Нормативно-техническая документация	Нормативное значение показателя	
Естественная влажность	%	ГОСТ 5180-2015	не нормируется	1,07
Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	ГОСТ 25100-2020	–	51,77
Влажность на границе текучести	%	ГОСТ 5180-2015	–	–
Влажность на границе раскатывания	%	ГОСТ 5180-2015	–	не раскатывается в жгут Ø 3 мм
Число пластичности	%	ГОСТ 25100-2020	$7 < I_p \leq 17$	–
Показатель текучести	д.е.	ГОСТ 25100-2020	$IL < 0$	–
Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм), по массе	%	ГОСТ 25100-2020	≥ 40	62,63
Разновидность грунта	–	ГОСТ 25100-2020	–	крупнообломочный галечниковый, заполнитель песок гравелистый
Содержание частиц менее 0,005 мм, по массе	%	ГОСТ 23558-94	от 85 до 100	–
Максимальная плотность	г/см ³	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	1,83
Оптимальная влажность	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	11,41
Оптимальная влажность (с учётом крупных частиц)	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	4,75

Гранулометрический состав и физико-механические характеристики песка приведены в таблицах 4.17–4.19.

Таблица 4.17 – Песок средней крупности (Г-19/2). Гранулометрический состав по ГОСТ 25100

Размер сит, мм	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	0,00	0,00	217,70	112,07	228,50	1090,23	675,82	239,92
Частные остатки, %	0,00	0,00	8,49	4,37	8,91	42,52	26,36	9,36
Полные остатки, %	0,00	0,00	8,49	12,86	21,77	64,29	90,64	100,00
Полные проходы, %	100,00	100,00	91,51	87,14	78,23	35,71	9,36	0,00

Таблица 4.18 – Песок средней крупности (Г-19/2). Гранулометрический состав по ГОСТ 23558

Размер сит, мм	40	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14	0,005
Частные остатки, г	0,00	0,00	0,00	0,00	212,67	85,74	115,01	701,42	945,68	503,72	–
Частные остатки, %	0,00	0,00	0,00	0,00	8,29	3,34	4,49	27,35	36,88	19,64	–
Полные остатки, %	0,00	0,00	0,00	0,00	8,29	11,64	16,12	43,48	80,36	100,00	–
Полные проходы, %	100,00	100,00	100,00	100,00	91,71	88,36	83,88	56,52	19,64	0,00	–
ГОСТ 23558-94	–	–	до 10	25–40	45–65	60–80	70–85	75–90	80–95		85–100

Как видно из таблицы 4.18, гранулометрический состав не соответствует рекомендуемым требованиям к оптимальному гранулометрическому составу ГОСТ 23558-94. ГОСТ Р 70452-2022 не приводит требований к гранулометрическому составу песка.

Таблица 4.19 – Песок средней крупности (Г-19/2). Физико-механические характеристики

Наименование показателя	Един. изм.	Требования к испытываемому материалу		Результаты испытаний
		Нормативно-техническая документация	Нормативное значение показателя	
Естественная влажность	%	ГОСТ 5180-2015	не нормируется	1,93
Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	ГОСТ 25100-2020	—	8,49
Влажность на границе текучести	%	ГОСТ 5180-2015	—	—
Влажность на границе раскатывания	%	ГОСТ 5180-2015	—	не раскатывается в жгут Ø 3 мм
Число пластичности	%	ГОСТ 25100-2020	$7 < I_p \leq 17$	—
Показатель текучести	д.е.	ГОСТ 25100-2020	$IL < 0$	—
Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм), по массе	%	ГОСТ 25100-2020	≥ 40	64,29
Разновидность грунта	—	ГОСТ 25100-2020	—	песок средней крупности
Содержание частиц менее 0,005 мм, по массе	%	ГОСТ 23558-94	от 85 до 100	—
Максимальная плотность	г/см ³	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	1,83
Оптимальная влажность	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	11,41
Оптимальная влажность (с учётом крупных частиц)	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	—

Исходя из данных таблиц 4.17 и 4.19, грунт в соответствии с номенклатурой ГОСТ 25100-2020 классифицируется как песок средней крупности.

Гранулометрический состав и физико-механические характеристики крупнообломочного гравийного грунта приведены в таблицах 4.20–4.22.

Таблица 4.20 – Гравийный, заполнитель – песок гравелистый (Г-21/1). Гранулометрический состав по ГОСТ 25100

	Размер сит, мм	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Гравийный грунт	Частные остатки, г	2686,00	1511,58	655,70	341,03	1030,35	3171,06	1290,36	895,47
	Частные остатки, %	18,01	10,14	4,40	2,29	6,91	21,26	8,65	6,00
	Полные остатки, %	40,35	50,49	54,88	57,17	64,08	85,34	94,00	100,00
	Полные проходы, %	59,65	49,51	45,12	42,83	35,92	14,66	6,00	0,00
Заполнитель	Частные остатки, г	—	—	—	46,85	141,55	435,64	177,27	123,02
	Частные остатки, %	—	—	—	5,07	15,31	47,13	19,18	13,31
	Полные остатки, %	—	—	—	5,07	20,38	67,51	86,69	100,00
	Полные проходы, %	—	—	—	94,93	79,62	32,49	13,31	0,00

Таблица 4.21 – Гравийный, заполнитель – песок гравелистый (Г-21/1). Гранулометрический состав по ГОСТ 23558

Размер сит, мм	40	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14	0,005
Частные остатки, г	0,00	3332,00	2686,00	1511,58	532,97	363,96	621,27	2767,36	1725,43	1372,98	–
Частные остатки, %	0,00	22,34	18,01	10,14	3,57	2,44	4,17	18,56	11,57	9,21	–
Полные остатки, %	0,00	22,34	40,35	50,49	54,06	56,50	60,67	79,22	90,79	100,00	–

Окончание таблицы 4.21

Полные проходы, %	100,00	77,66	59,65	49,51	45,94	43,50	39,33	20,78	9,21	0,00	–
ГОСТ 23558-94	–	–	до 10	25–40	45–65	60–80	70–85	75–90	80–95	–	85–100

Как видно из таблицы 4.21, гранулометрический состав не соответствует рекомендуемым требованиям к оптимальному гранулометрическому составу ГОСТ 23558-94.

**Таблица 4.22 – Гравийный, заполнитель – песок гравелистый (Г-21/1).
Физико-механические характеристики**

Наименование показателя	Един. изм.	Требования к испытываемому материалу		Результаты испытаний
		Нормативно-технической документации	Нормативное значение показателя	
1	2	3	4	5
Естественная влажность	%	ГОСТ 5180-2015	не нормируется	1,36
Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	ГОСТ 25100-2020	–	54,88
Влажность на границе текучести	%	ГОСТ 5180-2015	–	–
Влажность на границе раскатывания	%	ГОСТ 5180-2015	–	не раскатывается в жгут Ø 3 мм
Число пластичности		ГОСТ 25100-2020		
Показатель текучести	д.е.	ГОСТ 25100-2020	IL < 0	–
Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм), по массе	%	ГОСТ 25100-2020	≥ 40	54,88

Окончание таблицы 4.22

1	2	3	4	5
Разновидность грунта	—	ГОСТ 25100-2020	—	крупнообломочный гравийный, заполнитель песок гравелистый
Содержание частиц менее 0,005 мм, по массе	%	ГОСТ 23558-94	от 85 до 100	—
Максимальная плотность	г/см ³	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	1,86
Оптимальная влажность	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	10,16
Оптимальная влажность (с учётом крупных частиц)	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	5,13
pH	—	ГОСТ 23558-94	не нормируется	—

Исходя из данных таблиц 4.20 и 4.22, грунт в соответствии с номенклатурой ГОСТ 25100-2020 классифицируется как крупнообломочный гравийный, заполнитель — песок гравелистый.

На рисунках 4.1–4.6 приведены графики стандартного уплотнения проб грунтов. По результатам стандартного уплотнения определены значения максимальной плотности и оптимальной влажности проб грунтов.

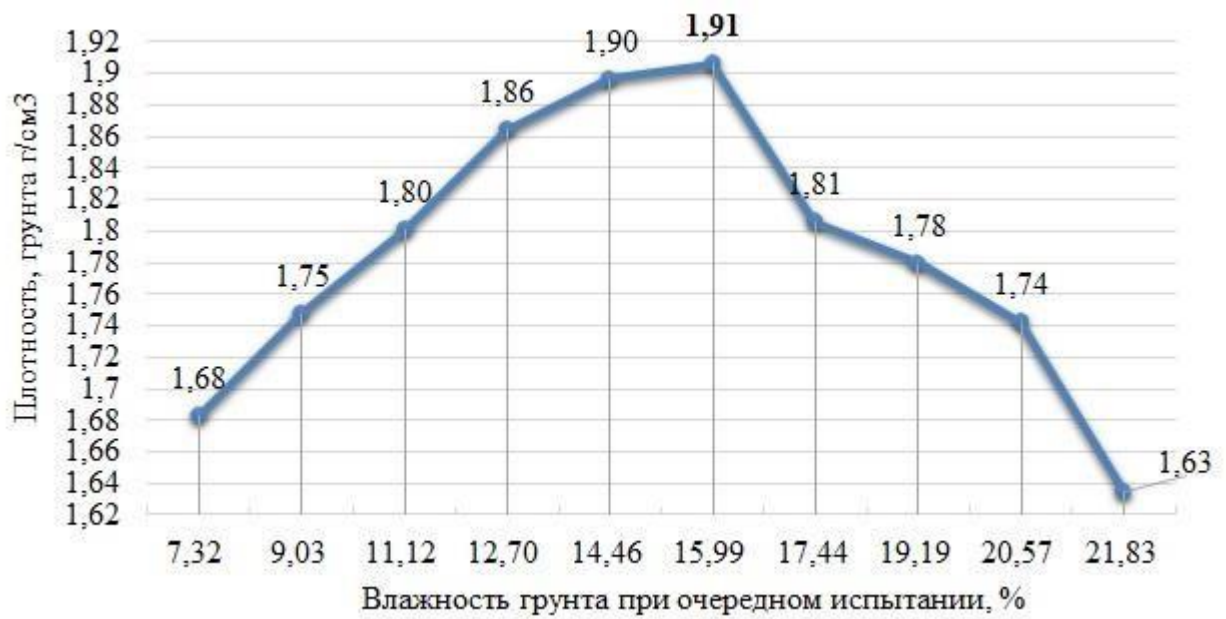


Рисунок 4.1 – Суглинок (Г-1). График зависимости значений плотности сухого грунта от влажности (график автора)



Рисунок 4.2 – Суглинок (Г-6). График зависимости значений плотности сухого грунта от влажности (график автора)

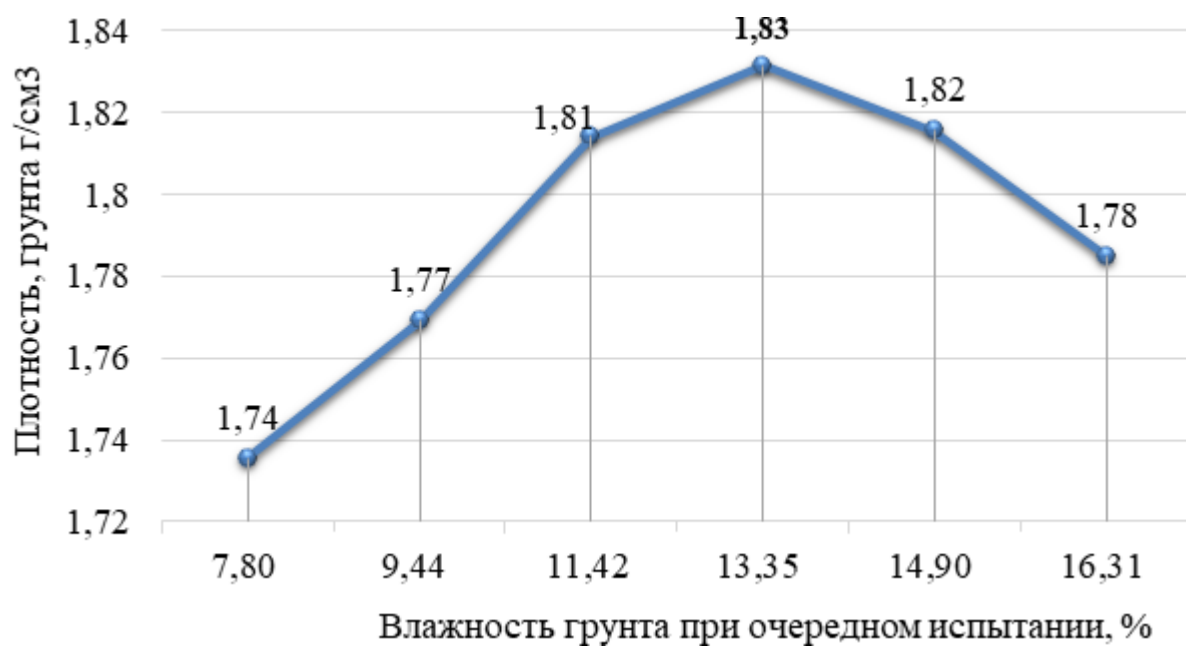


Рисунок 4.3 – Супесь (Г-22). График зависимости значений плотности сухого грунта от влажности (график автора)

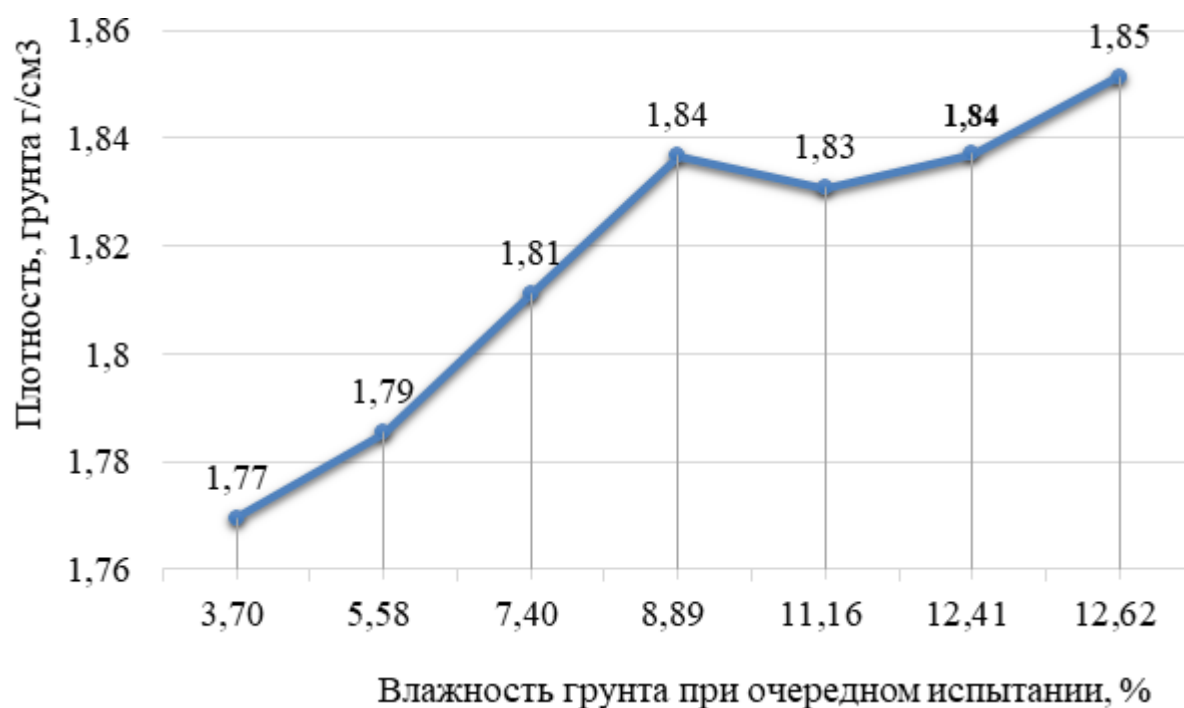


Рисунок 4.4 – Галечниковый, заполнитель песок гравелистый (Г-19/1) График зависимости значений плотности сухого грунта от влажности (график автора)

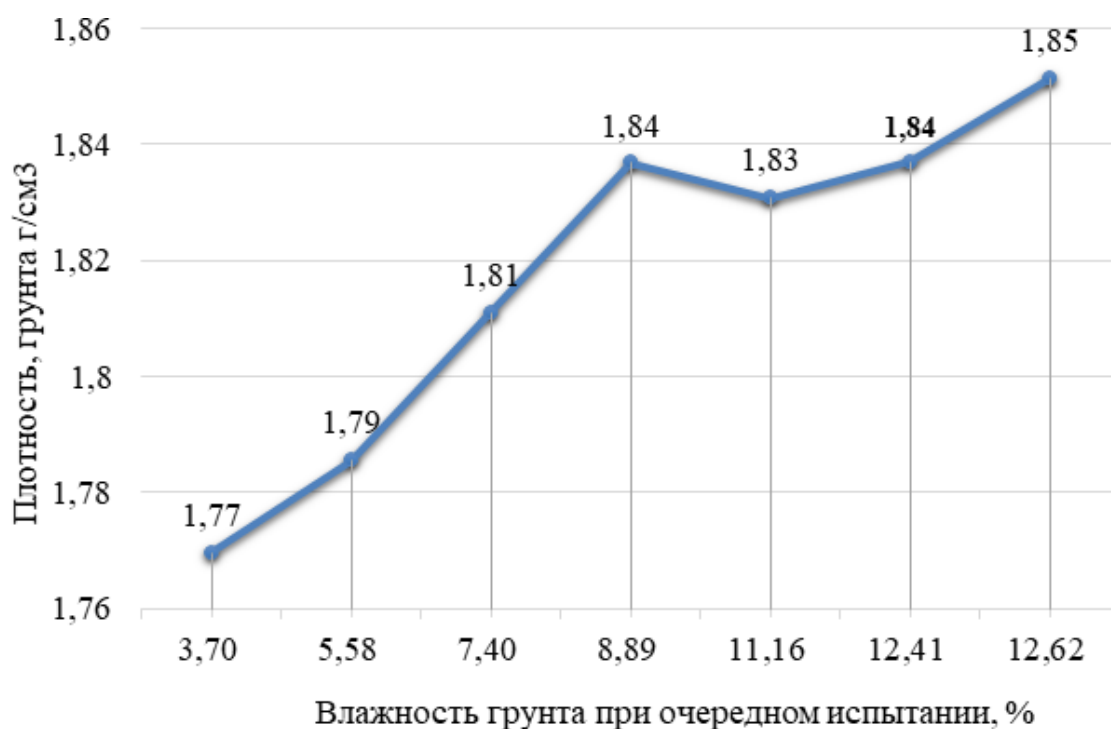


Рисунок 4.5 – Песок средней крупности (Г-19/2). График зависимости значений плотности сухого грунта от влажности (график автора)

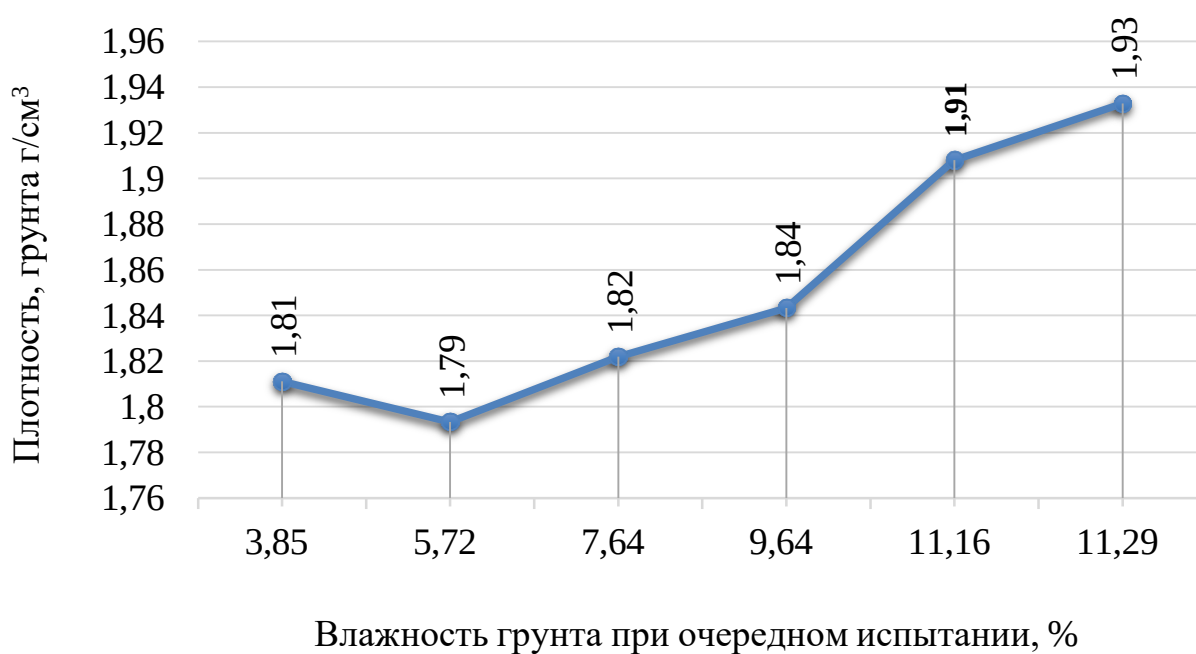


Рисунок 4.6 – Песок средней крупности (Г-19/2). График зависимости значений плотности сухого грунта от влажности (график автора)

4.2. Результаты исследования золошлаковых смесей ТЭЦ

1. Микроструктура золошлаковой смеси

Для детального исследования золошлаковой смеси проведено изучение микроструктуры на электронном микроскопе GEOL GIB-Z4500.

Проба золошлаковой смеси представлена частицами неправильной формы и частицами сферической формы (рисунок 4.7).

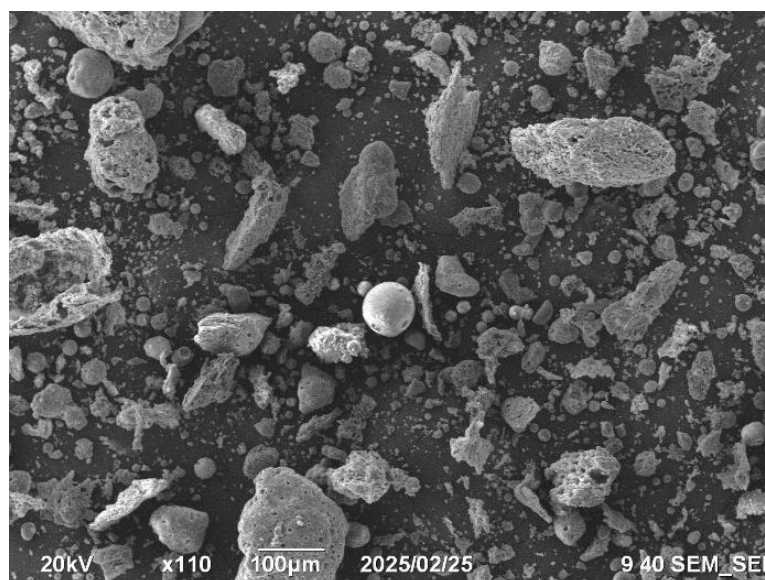


Рисунок 4.7 – Структура золошлаковой смеси ТЭЦ-12 (фото автора)

Частицы неправильной формы имеют пористую структуру (рисунок 4.8).

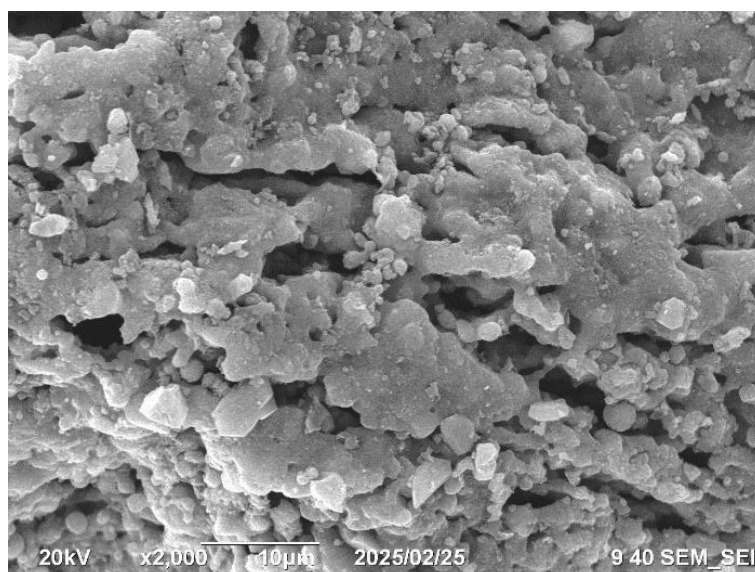


Рисунок 4.8 – Структура крупных агломератов неправильной формы золошлаковой смеси ТЭЦ-12 (фото автора)

Сферы имеют пористые стенки переменной толщины и пористые внутри (рисунки 4.9, 4.10).

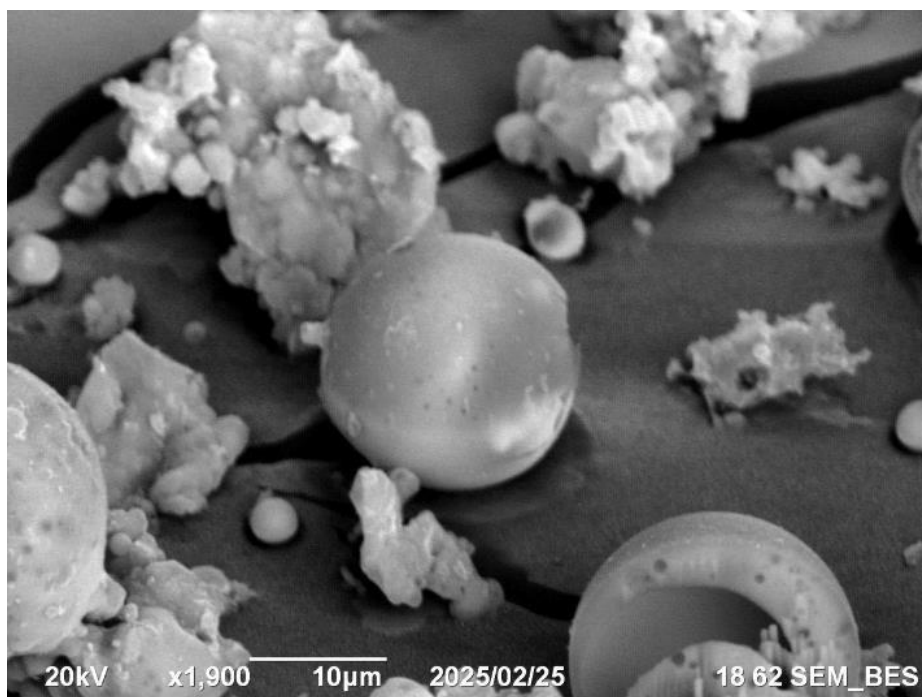


Рисунок 4.9 – Частицы сферической формы золошлаковой смеси ТЭЦ-1 (фото автора [219])

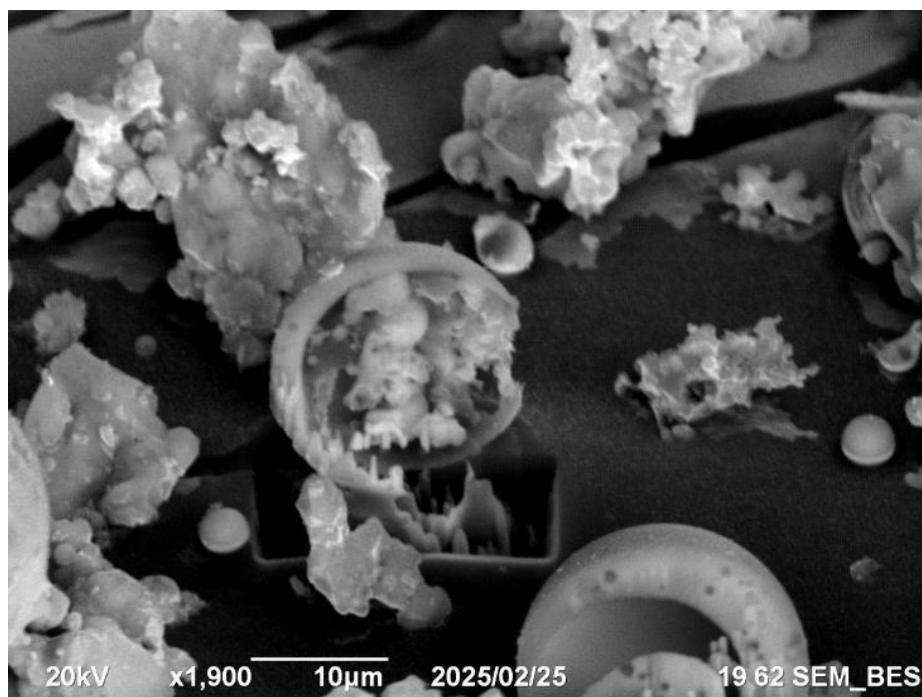


Рисунок 4.10 – Структура частицы сферической формы золошлаковой смеси ТЭЦ-12 (фото автора [219])

Минералогический состав золошлаковой смеси приведен в таблице 4.24 [200]. Золошлаковая смесь является алюмосиликатным материалом с 50-процентным содержанием стекловидных частиц шарообразной формы.

Таблица 4.24 – Минералогический состав золошлаковой смеси ТЭЦ-11 [200]

Наименование минерала	Содержание кристаллической фазы, %
Кварц	35
Муллит	15
Альбит + микроклин	10
Стеклофаза	50

Сложный неорганический состав золошлаковых смесей включает в себя преимущественно кислотные (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2) и основные (Fe_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O , MgO) компоненты.

Химический состав золошлаковых смесей приведен в таблице 4.25.

Для статистической обработки данных использованы следующие формулы.

Среднее арифметическое:

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4.1)$$

где: n – число наблюдений;

x_i – реализация случайной величины в каждом наблюдении.

Дисперсия:

$$D = (X - x_i)^2, \quad (4.2)$$

Среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{D}, \quad (4.3)$$

Физико-механические характеристики золошлаковых смесей приведены в таблице 4.26.

Таблица 4.25 – Химический состав золошлаковых смесей

ТЭЦ	Год отбора проб	Оксид алюминия	Оксид железа	Оксид кремния	Триоксид серы	Оксид титана	Оксид марганца	Оксид фосфора	Оксид магния	Оксид кальция	Оксид калия	Оксид натрия	Модуль основности M_o	Коэффицици-ент качества К	Кремнеземистый модуль M_c
		Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	SO_3	TiO_2	Mn_3O_4	P_2O_3	MgO	CaO	K_2O	Na_2O			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ТЭЦ-9 участка № 1	2019	26,8	5,6	62,5	0,056	0,56	0,032	0,068	1,9	2,7	1,8	0,23	0,1	0,5	1,9
	2020	24	6,4	59,7	0,1	0,54	0,041	0,083	1,9	3,1	1,4	0,17	0,1	0,5	2,0
	2021	23	5,1	61	0,23	0,47	–	–	2,1	2,9	1,2	0,19	0,1	0,5	2,2
	2022	27	6,8	59,2	0,22	0,5	–	–	1,9	4	1,5	0,24	0,1	0,6	1,8
	2023	22	6	59,7	0,18	0,49	–	–	2	4,7	1,4	0,37	0,1	0,5	2,1
	2024	22	6,3	62,4	0,18	0,47	–	–	1,8	3,3	1,4	0,21	0,1	0,4	2,2
	X	24,13	6,03	60,75	0,16	0,51	0,04	0,08	1,93	3,45	1,45	0,24	0,08	0,49	2,03
	D	4,29	0,31	1,74	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,48	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03
	σ	2,07	0,56	1,32	0,06	0,03	0,05	0,11	0,09	0,69	0,18	0,06	0,01	0,04	0,16
ТЭЦ 9	2019	21	13,8	51,6	0,26	0,66	0,1	0,09	1,3	4,4	0,71	0,14	0,1	0,5	1,5
	2020	25	6,1	57,8	0,14	0,63	0,067	0,14	1,8	5,4	0,9	0,2	0,1	0,6	1,9
	2021	24	6,3	56,3	0,11	0,65	0,073	0,11	1,6	4,6	0,76	0,17	0,1	0,5	1,9
	2022	29	8,2	55,5	0,2	0,6	–	–	1,4	4,8	1	0,18	0,1	0,6	1,5
	2023	24	6,7	55,3	0,19	0,7	–	–	1,5	5	0,73	0,24	0,1	0,6	1,8
	2024	23	6,5	60,1	0,19	0,65	–	–	1,2	3	0,78	0,064	0,1	0,5	2,0

Продолжение таблицы 4.25

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ТЭЦ 9	Х	24,33	7,93	56,10	0,18	0,65	0,08	0,11	1,47	4,53	0,81	0,17	0,09	0,54	1,75
	Д	5,89	7,35	6,70	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04	0,57	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04
	σ	2,43	2,71	2,59	0,05	0,03	0,08	0,12	0,20	0,75	0,10	0,05	0,01	0,05	0,20
Н-3 ТЭЦ	2024	29	6,3	51,1	0,95	0,74	–	–	1,2	4,9	0,69	0,039	0,1	0,7	1,4
ТЭЦ 6	2019	10,7	12,7	46	1,7	0,5	0,24	0,037	7,1	23,5	0,39	0,34	0,6	0,9	2,0
	2020	9,7	19	57,1	0,15	0,38	0,36	0,041	3,4	9,4	0,61	0,14	0,2	0,4	2,0
	2021	9,3	11	50,3	0,28	0,43	0,19	0,038	4,3	13	0,42	0,16	0,3	0,5	2,5
	2022	12	16	57,8	0,25	0,39	–	–	3,2	12	0,54	0,21	0,2	0,5	2,1
	2023	10	11	43,8	0,75	0,52	–	–	7,8	21	0,32	0,32	0,5	0,9	2,1
	2024	8,9	18	56,3	0,24	0,37	–	–	2,9	11	0,44	0,14	0,2	0,4	2,1
	Х	10,10	14,62	51,88	0,56	0,43	0,26	0,04	4,78	14,98	0,45	0,22	0,34	0,60	2,11
	Д	1,04	10,40	30,70	0,30	0,00	0,07	0,00	3,78	28,10	0,01	0,01	0,02	0,05	0,03
	σ	1,02	3,23	5,54	0,54	0,06	0,27	0,04	1,94	5,30	0,10	0,08	0,15	0,21	0,17
ТЭЦ 6 (ТИиТ С)	2019	19,5	8,4	53,7	0,65	0,76	0,15	0,08	3,4	6,8	1,5	0,2	0,2	0,6	1,9
	2020	10,5	13	58	0,9	0,45	0,22	0,053	3	11	0,8	0,15	0,2	0,4	2,5
	2021	10,2	9,6	61	0,5	0,42	0,18	0,048	2,6	7,4	0,68	0,14	0,2	0,3	3,1
	2022	13	14	57,4	0,6	0,46	–	–	2,3	11	0,76	0,17	0,2	0,5	2,1
	2023	13	10	57,9	0,82	0,47	–	–	4,1	12	0,9	0,32	0,2	0,5	2,5
	2024	14	12	65,1	0,49	0,53	–	–	2	6,7	0,97	0,094	0,1	0,3	2,5
	Х	13,37	11,17	58,85	0,66	0,52	0,18	0,06	2,90	9,15	0,94	0,18	0,18	0,44	2,44
	Д	9,42	3,93	12,32	0,02	0,01	0,03	0,00	0,49	4,93	0,07	0,00	0,00	0,01	0,13
	σ	3,07	1,98	3,51	0,15	0,11	0,19	0,06	0,70	2,22	0,27	0,07	0,04	0,08	0,36

Продолжение таблицы 4.25

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Н-И ТЭЦ	2019	25,9	11	47,5	1	0,71	0,17	0,18	2	8,1	0,77	0,1	0,1	0,8	1,3
	2020	15	33	40,8	0,62	0,51	0,23	0,12	1,4	6,7	0,66	0,09	0,2	0,6	0,9
	2021	22	5,2	59,4	0,55	0,5	–	–	1,6	6,7	0,5	0,094	–	–	–
	2022	27	9,3	50,2	0,61	0,59	–	–	0,81	5	0,98	0,13	0,1	0,7	1,4
	2023	22	8,8	53,3	0,49	0,68	–	–	3	10	0,8	0,21	0,2	0,7	1,7
	2024	21	5,7	60,1	0,21	0,79	–	–	1,4	4,3	1,3	0,046	0,1	0,4	2,3
	X	22,18	13,56	50,38	0,59	0,66	0,13	0,10	1,72	6,82	0,90	0,12	0,13	0,61	1,50
	D	18,01	97,41	40,62	0,06	0,01	0,02	0,01	0,55	4,29	0,05	0,00	0,00	0,01	0,22
	σ	4,24	9,87	6,37	0,25	0,10	0,15	0,11	0,74	2,07	0,22	0,05	0,04	0,10	0,47
Н-И ТЭЦ Шел. уч.	2019	28,8	9,4	54,3	0,6	0,78	0,08	0,03	1,3	0,7	0,72	0,15	0,0	0,6	1,4
	2020	29	9,3	52,5	0,26	0,83	0,07	0,11	1	4,4	0,8	0,11	0,1	0,7	1,4
	2021	28	6,8	50,8	0,44	0,81	0,11	0,17	1,1	5,5	0,56		0,1	0,7	1,5
	2022	28	9,6	50,8	0,63	0,59	–	–	0,88	5,3	1	0,13	0,1	0,7	1,4
	2023	25	7,8	52,3	0,28	1	–	–	1,2	5,5	0,9	0,25	0,1	0,6	1,6
	2024	25	10,3	52,1	0,61	0,67	–	–	1,1	4,4	0,62	0,046	0,1	0,6	1,5
	X	27,30	8,87	52,13	0,47	0,78	0,09	0,10	1,10	4,30	0,77	0,11	0,08	0,63	1,45
	D	2,78	1,41	1,40	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	2,81	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01
	σ	1,67	1,19	1,18	0,15	0,13	0,09	0,12	0,13	1,68	0,15	0,08	0,02	0,04	0,08
ТЭЦ- 10	2019	29,3	7,6	56	0,145	0,72	0,07	0,15	1,45	4,5	1	0,28	0,1	0,6	1,5
	2020	22	7,4	60,8	0,23	0,5	0,071	0,097	2	4,4	1,4	0,24	0,1	0,5	2,1
	2021	20	7,5	56,8	0,13	0,56	0,068	0,091	1,6	4,1	1,1	0,23	0,1	0,5	2,1
	2022	28	6,2	57,9	0,34	0,58	–	–	1,9	4,7	1,6	0,24	0,1	0,6	1,7
	2023	22	17	48,8	0,29	0,61	–	–	1,4	5,3	0,8	0,24	0,1	0,6	1,3

Окончание таблицы 4.25

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ТЭЦ-10	2024	19	6,7	61,2	0,19	0,47	–	–	1,6	3,5	1,2	0,15	0,1	0,4	2,4
	X	23,38	8,73	56,92	0,22	0,57	0,07	0,11	1,66	4,42	1,18	0,23	0,09	0,52	1,83
	D	15,13	13,91	16,85	0,01	0,01	0,00	0,01	0,05	0,30	0,07	0,00	0,00	0,01	0,14
	σ	3,89	3,73	4,11	0,08	0,08	0,07	0,12	0,22	0,55	0,26	0,04	0,01	0,09	0,38
ТЭЦ-11	2019	28,8	12,5	50,4	0,92	0,77	0,11	0,12	1,3	5,8	0,8	0,16	0,1	0,7	1,2
	2024	12	41	36,8	0,45	0,56	–	–	1,2	3,9	0,58	0,03	0,1	0,5	0,7
	X	20,40	26,75	43,60	0,69	0,67	–	–	1,25	4,85	0,69	0,09	0,11	0,59	0,96
	D	70,56	203,06	46,24	0,06	0,01	–	–	0,00	0,90	0,01	0,00	0,00	0,02	0,07
	σ	8,40	14,25	6,80	0,24	0,11	–	–	0,05	0,95	0,11	0,07	0,01	0,12	0,26
ТЭЦ-12	2019	23,6	51,7	47,8	1,68	0,52	0,066	0,03	1,2	3,5	0,84	0,22	0,1	0,6	0,6
	2024	14	26	48,1	0,94	0,35	–	–	1,5	5,6	1,6	0,15	0,1	0,4	1,2
	X	18,80	38,85	47,95	1,31	0,44	–	–	1,35	4,55	1,22	0,19	0,11	0,51	0,92
	D	23,04	165,12	0,02	0,14	0,01	–	–	0,02	1,10	0,14	0,00	0,00	0,01	0,08
	σ	4,80	12,85	0,15	0,37	0,09	–	–	0,15	1,05	0,38	0,04	0,03	0,08	0,28
Усть-Илим-ская ТЭЦ	2019	20,8	10,5	50,6	0,062	0,92	0,23	0,04	1,4	6	0,55	0,2	0,1	0,6	1,6
	2020	10,7	8,3	54,2	0,72	0,55	0,24	0,27	5,5	18	0,9	0,53	0,4	0,6	2,9
	2021	18	9,6	50,1	0,25	0,64	0,23	0,14	2,1	8,7	0,68	0,3	0,2	0,6	1,8
	2022	25	8,1	47,2	0,11	0,76	–	–	1,7	13	0,68	0,2	0,2	0,8	1,4
	2023	10,5	5,9	47,3	1,5	0,63	–	–	4,5	20	1,7	0,9	0,5	0,7	2,9
	2024	18	8,9	53,5	0,3	0,73	–	–	1,7	11	0,86	0,24	0,2	0,6	2,0
	X	17,17	8,55	50,48	0,49	0,71	0,23	0,15	2,82	12,78	0,90	0,40	0,26	0,65	2,10
	D	27,04	2,05	7,33	0,25	0,01	0,05	0,03	2,51	24,20	0,14	0,06	0,02	0,01	0,33
	σ	5,20	1,43	2,71	0,50	0,12	0,23	0,18	1,58	4,92	0,38	0,25	0,13	0,10	0,57

Таблица 4.26 – Результаты определения физико-механических свойств золошлаковых смесей

Наименование показателя	ТЭЦ-6	ТЭЦ-7	ТЭЦ-9	ТЭЦ-10	ТЭЦ-11	Ново-Иркутская ТЭЦ	Усть-Илимская ТЭЦ	Ново-Иркутская (Шелехов. уч.)	Ново-Зиминская ТЭЦ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Классификация	песок пылеватый и гравелистый	песок пылеватый	песок пылеватый	песок пылеватый	песок пылеватый	песок пылеватый	песок пылеватый и гравелистый	песок пылеватый	песок пылеватый
Содержание частиц <0,002 мм, %	6,70	5,60	8,60	–	2,40	2,50	5,00	4,90	–
Тип смеси	мелкозернистый	мелкозернистый	среднезернистый	среднезернистый	среднезернистый	среднезернистый	среднезернистый	мелкозернистый	–
Полный остаток на сите № 008, %	20,6	–	37,7–57,0	31,7	22,7	50,3	39,7	67,3	43,3
Удельная поверхность, м ² /кг	245,8	–	201,7–266,0	199,8	221,2	236,5	247,4	212,3	340,2
Потери массы при прокаливании, %	13,77–15,4	1,34	0,52–4,76	0,00–3,00	0-14,45	0	1,13–5,50	0,75–1,49	2,73

Продолжение таблицы 4.26

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Содержание горючих веществ	высокое	низкое	низкое	низкое	от низкого до высокого	–	низкое и среднее	низкое	низкое
рН	8,86	–	8,75	9,39	8,77	8,15	9,71	8,18	10,46
	0,019	0,043	0,022	–	0,0005–0,039	0,020	0,0015–0,028	0,038	–
Относительная деформация морозного пучения, д.е.	слабопучинистый	среднепучинистый	слабопучинистый	–	практически непучинистый и среднепучинистый	слабопучинистый	практически непучинистый и слабопучинистый	среднепучинистый	–
Насыпная плотность, кг/м ³	680–692	1060,00	740–1190	955–1010	950–1365	880–1430	1000–1170	610–832	740
Максимальная плотность, г/см ³	1,17–1,70	1,38	1,17–1,19	1,17–1,8	1,21–1,62	1,30–1,73	1,58–1,88	1,03–1,11	1,10
Оптимальная влажность, %	15,98–37,64	26,69	26,81–29,66	24,14–28,81	10,36–17,07	20,92–30,16	11,97–18,59	36,92–46,4	36,40
Коэффициент фильтрации при макс. плотности, м/сут	0,04	0,07	0,02	0,04	0,12	0,04	0,03	0,06	–
Модуль деформации, МПа	–	14,29	–	–	9,52	14,29	4,55	10,53	–

Окончание таблицы 4.26

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Угол внутреннего трения, °	–	17	–	–	22	23	19	14	–
Истинная плотность, г/см ³	2,46	–	2,02	2,01	2,21	2,35	2,47	–	2,16
Средняя плотность, г/см ³	1,46	–	1,16	1,15	1,54	1,56	1,49	–	1,34
Пористость, %	40,6	–	42,6	42,8	30,3	66,3	60,3	–	62,1
Стойкость против силикатного и железистого распадов	фр. отсут.	–	фр. отсут.	фр. отсут.	фр. отсут.	фр. отсут.	фр. отсут.	–	фр. отсут.
Морозостойкость шлакового щебня	фр. отсут.	–	фр. отсут.	фр. отсут.	фр. отсут.	фр. отсут.	фр. отсут.	–	фр. отсут.
Содержание засоряющих включений	отсутств.	–	отсутств.	отсутств.	отсутств.	отсутств.	отсутств.	–	отсутств.
Естественная влажность, %	16,8	15,0	7,4	14,6	35,2	17,7	9,2	22,1	34,4
Влажность на границе текучести, %	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Влажность на границе раскатывания, %	не раскатывается в жгут Ø 3 мм	не раскатывается в жгут Ø 3 мм	не раскатывается в жгут Ø 3 мм	не раскатывается в жгут Ø 3 мм	не раскатывается в жгут Ø 3 мм	не раскатывается в жгут Ø 3 мм	не раскатывается в жгут Ø 3 мм	не раскатывается в жгут Ø 3 мм	не раскатывается в жгут Ø 3 мм

По результатам химического анализа установлено, что основными компонентами являются оксид алюминия и оксид кремния.

По содержанию оксидов кальция почти все пробы золошлаковых материалов относятся к кислым. По значениям модуля основности M_o все пробы золошлаковых материалов относятся к сверхкислым и характеризуются низкой гидравлической активностью. Коэффициент качества не превышает единицы.

В соответствии с номенклатурой ГОСТ 25100 золошлаковые смеси ТЭЦ классифицируются:

- класс – техногенный грунт;
- тип – дисперсный несвязный;
- вид – отходы производств, бытовые отходы;
- подвид – отвалы и гидроотвалы шлаков, золошлаков и шламов.

По результатам анализа результатов лабораторных исследований золошлаковых смесей ТЭЦ установлено, что они характеризуются нижеследующими показателями.

2. Водородный показатель

По значению водородного показателя рН водной вытяжки золошлаковые смеси являются щелочными и сильнощелочными.

3. Максимальная плотность и оптимальная влажность

Графики стандартного уплотнения имеют несколько отчетливо выраженных максимума. Оптимальная влажность может достигать больших значений (рисунки 4.11–4.18).

Следует отметить, что значения оптимальной влажности близки к значениям влажности золошлаковых смесей в золоотвалах.

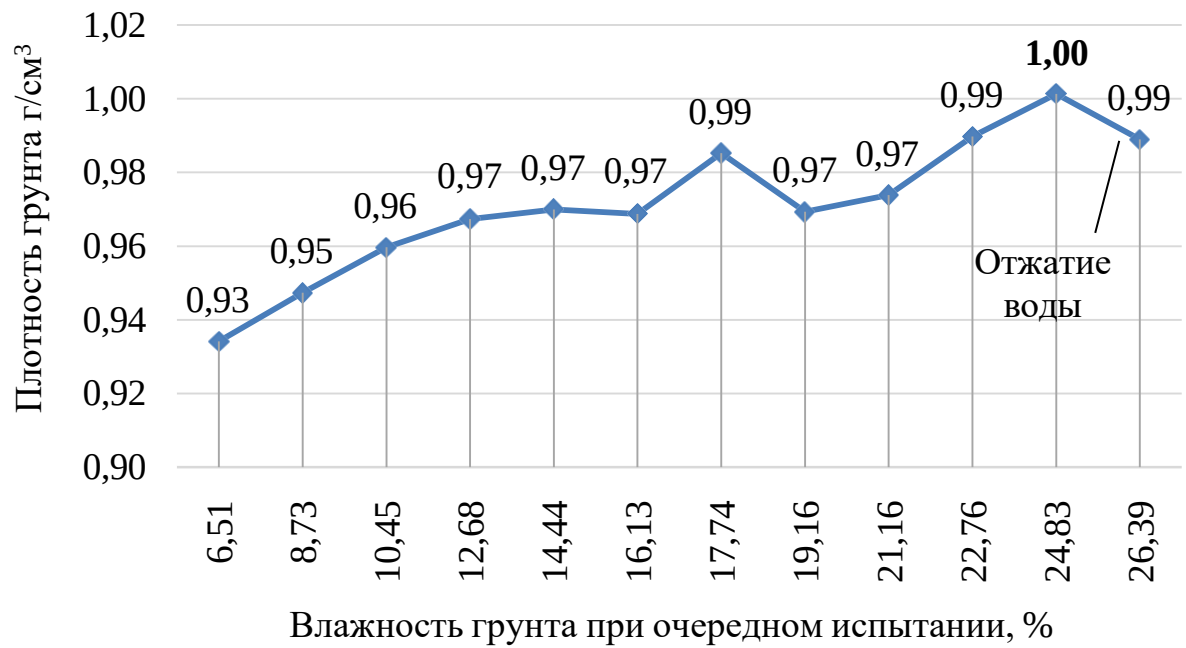


Рисунок 4.11 – Максимальная плотность пробы ТЭЦ-6
(график автора)

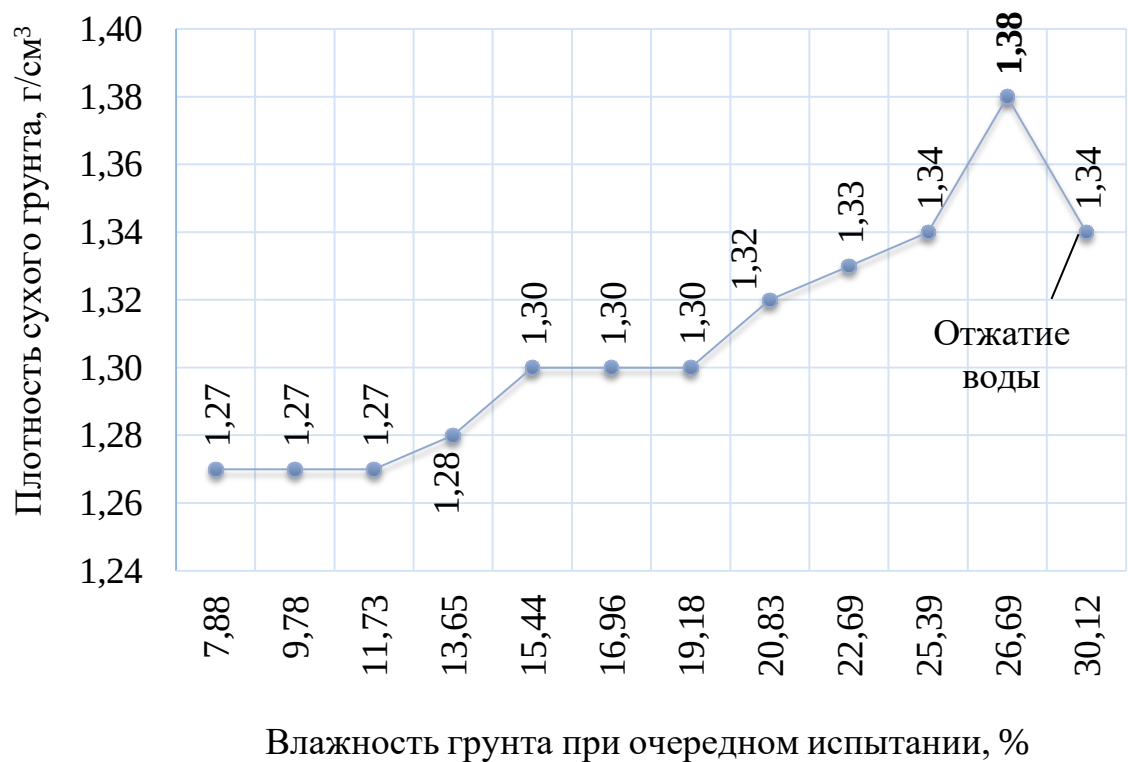


Рисунок 4.12 – Максимальная плотность пробы ТЭЦ-7
(график автора)

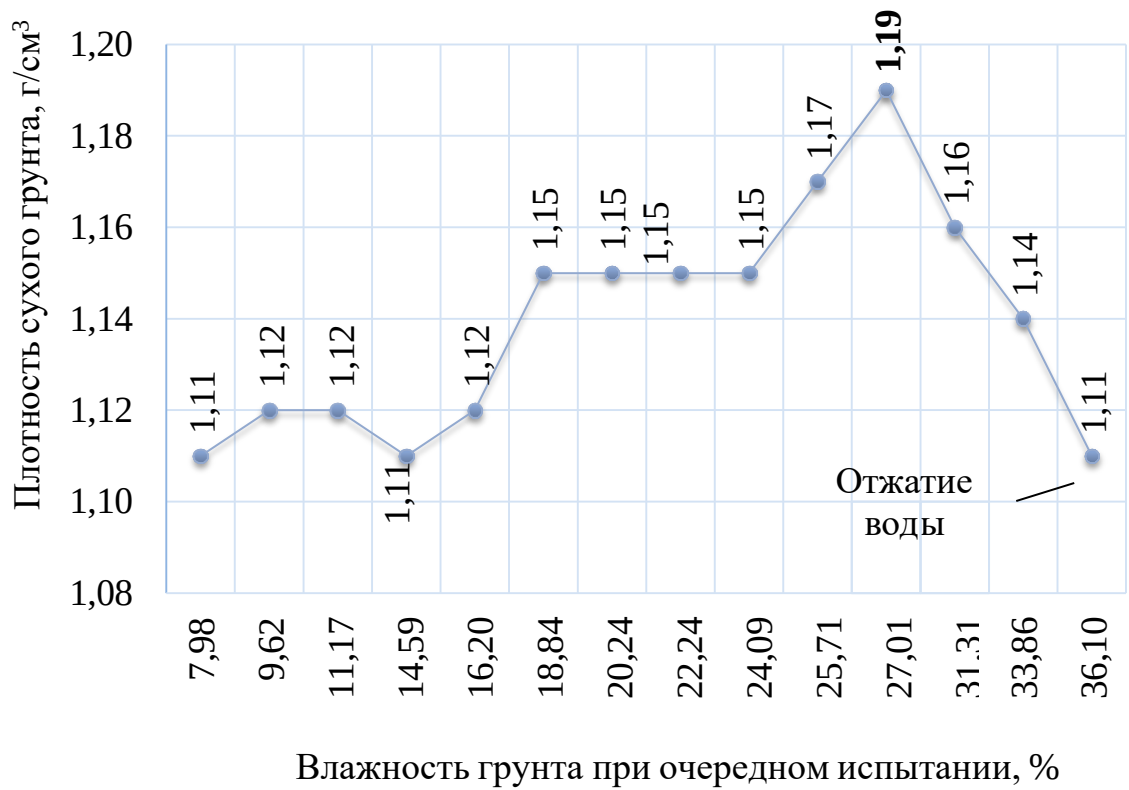


Рисунок 4.13 – Максимальная плотность пробы ТЭЦ-9
(график автора)

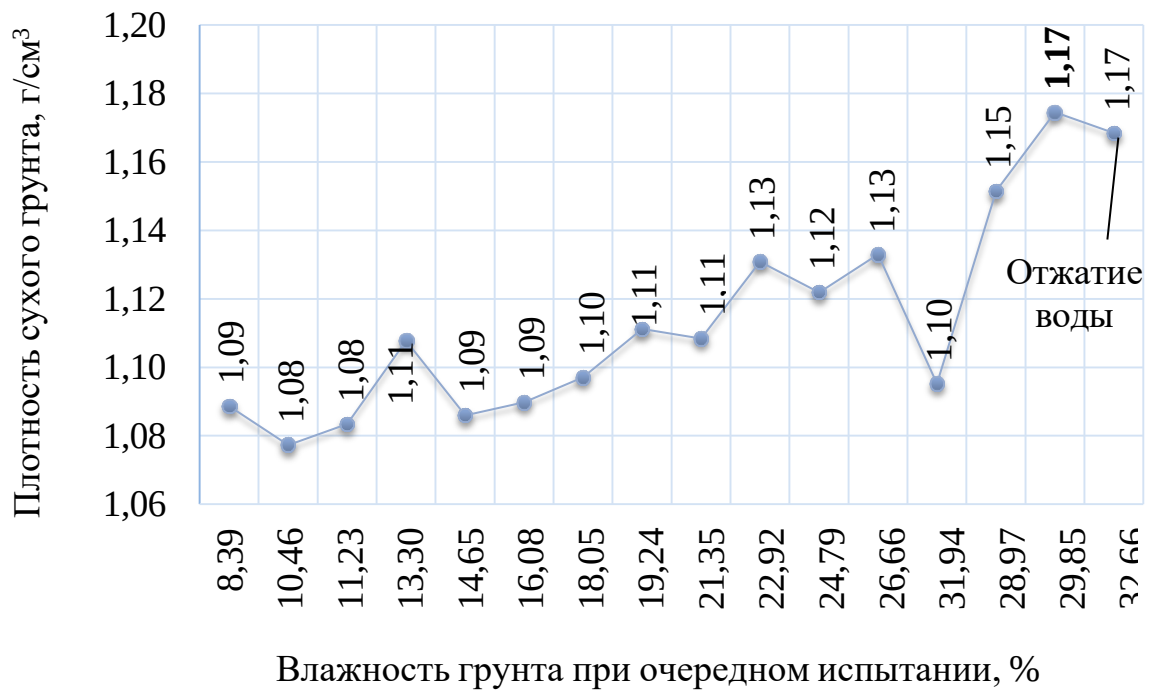


Рисунок 4.14 – Максимальная плотность пробы ТЭЦ-10
(график автора)

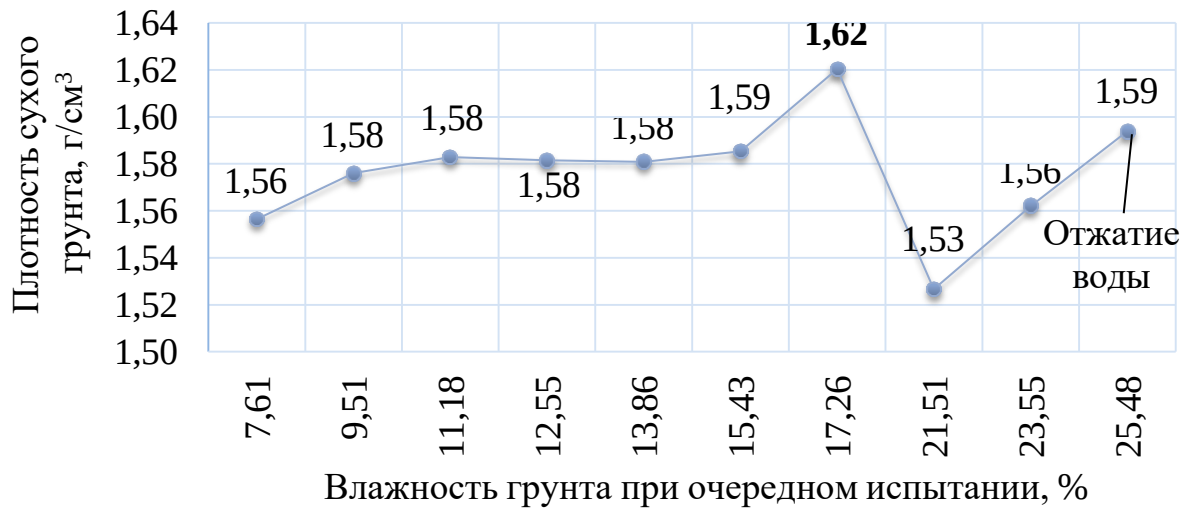


Рисунок 4.15 – Максимальная плотность пробы ТЭЦ-11 (график автора)

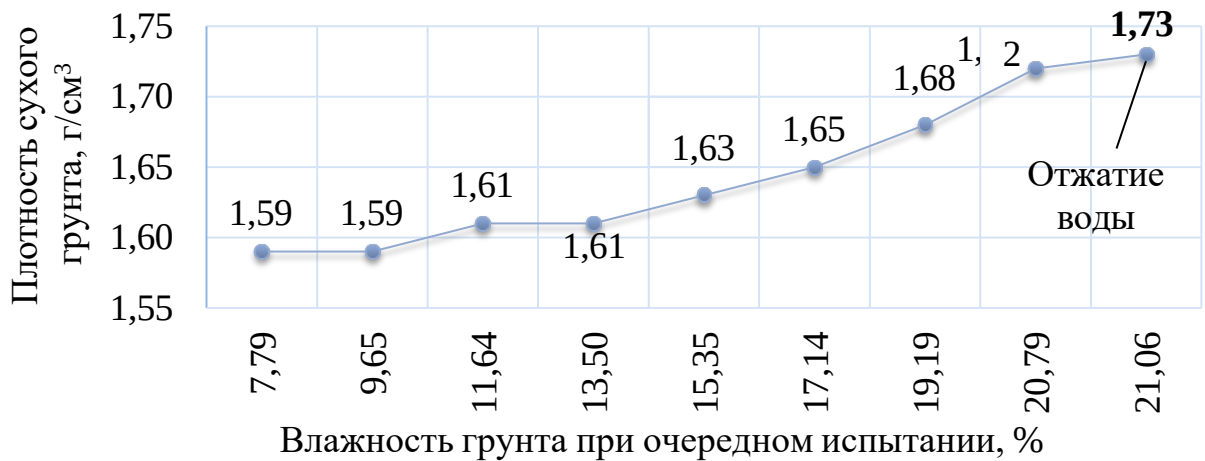


Рисунок 4.16 – Максимальная плотность пробы Ново-Иркутской ТЭЦ (график автора)



Рисунок 4.17 – Максимальная плотность пробы Усть-Илимской ТЭЦ (график автора)



**Рисунок 4.18 – Максимальная плотность пробы
Ново-Иркутской ТЭЦ Шелеховский участок
(график автора)**

Графики стандартного уплотнения характеризуются низкими значениями плотности сухого грунта при значениях влажности около 10 %, практически неизменными значениями плотности сухого грунта при промежуточных значениях влажности и резко увеличенной плотностью сухого грунта при значениях влажности, близких к оптимальной.

4. Гранулометрический состав

Золошлаковые смеси по зерновому составу согласно классификации ГОСТ 25100 представляют собой техногенные пески гравелистые, мелкие и пылеватые (таблицы 4.27–4.43).

Таблица 4.27 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси ТЭЦ-6 по ГОСТ 25100-2020

Размер сит, мм	200	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	0,00	522,0	364,0	223,39	557,82	333,46	148,42	116,90	554,03
Частные остатки, %	0,00	18,51	12,91	7,92	19,78	11,82	5,26	4,15	19,65
Полные остатки, %	0,00	18,51	31,42	39,34	59,12	70,95	76,21	80,35	100,00
Полные проходы, %	100,00	81,49	68,58	60,66	40,88	29,05	23,79	19,65	0,00

Золошлаковая смесь, согласно требованиям ГОСТ 25100-2020, классифицируется как песок гравелистый.

Таблица 4.28 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси ТЭЦ-6 по ГОСТ 23558-94

Размер сит, мм	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14
Частные остатки, г	0,00	522,00	364,00	213,12	365,47	460,95	180,81	98,24	615,43
Частные остатки, %	0,00	18,51	12,91	7,56	12,96	16,35	6,41	3,48	21,82
Полные остатки, %	0,00	18,51	31,42	38,98	51,94	68,28	74,69	78,18	100,00
Полные проходы, %	100,00	81,49	68,58	61,02	48,06	31,72	25,31	21,82	0,00
Требования ГОСТ 23558-94, табл. 2	–	до 10	25-40	45-65	60-80	70-85	75-90	80-95	–

Золошлаковая смесь по зерновому составу не соответствует требованиям ГОСТ 23558-94.

Таблица 4.29 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси ТЭЦ-9 по ГОСТ 25100-2020

Размер сит, мм	200	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	0,00	20,00	26,00	41,13	47,49	44,95	96,04	332,59	1406,41
Частные остатки, %	0,00	0,99	1,29	2,04	2,36	2,23	4,77	16,51	69,81
Полные остатки, %	0,00	0,99	2,28	4,32	6,68	8,91	13,68	30,19	100,00
Полные проходы, %	100,00	99,01	97,72	95,68	93,32	91,09	86,32	69,81	0,00

Таблица 4.30 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси ТЭЦ-9 по ГОСТ 23558-94

Размер сит, мм	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14	0,005
Частные остатки, г	0,00	20,00	26,00	30,19	43,24	45,10	63,98	193,74	1592,36	–
Частные остатки, %	0,00	0,99	1,29	1,50	2,15	2,24	3,18	9,62	79,04	–
Полные остатки, %	0,00	0,99	2,28	3,78	5,93	8,17	11,34	20,96	100,00	–
Полные проходы, %	100,00	99,01	97,72	96,22	94,07	91,83	88,66	79,04	0,00	–
Требования ГОСТ 23558-94, табл. 2	–	до 10	25-40	45-65	60-80	70-85	75-90	80-95	–	85-100

Золошлаковая смесь, согласно требованиям ГОСТ 25100-2020, классифицируется как песок пылеватый.

Золошлаковая смесь по зерновому составу не соответствует требованиям ГОСТ 23558-94.

Таблица 4.31 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси ТЭЦ-10 по ГОСТ 25100-2020

Размер сит, мм	200	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	0,00	0,00	5,55	6,43	14,20	22,50	61,88	433,71	1462,73
Частные остатки, %	0,00	0,00	0,28	0,32	0,71	1,12	3,08	21,61	72,88
Полные остатки, %	0,00	0,00	0,28	0,60	1,30	2,43	5,51	27,12	100,00
Полные проходы, %	100,0	100,00	99,72	99,40	98,70	97,57	94,49	72,88	0,00

Золошлаковая смесь, согласно требованиям ГОСТ 25100-2020, классифицируется как песок пылеватый.

Таблица 4.32 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси ТЭЦ-10 по ГОСТ 23558-94

Размер сит, мм	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14
Частные остатки, г	0,00	0,00	5,55	4,05	10,80	19,69	33,00	214,65	1719,26
Частные остатки, %	0,00	0,00	0,28	0,20	0,54	0,98	1,64	10,70	85,66
Полные остатки, %	0,00	0,00	0,28	0,48	1,02	2,00	3,64	14,34	100,00
Полные проходы, %	100,00	100,00	99,72	99,52	98,98	98,00	96,36	85,66	0,00
Требования ГОСТ 23558-94, табл. 2	–	до 10	25–40	45–65	60–80	70–85	75–90	80–95	–

Золошлаковая смесь по зерновому составу не соответствует требованиям ГОСТ 23558-94.

Таблица 4.33 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси ТЭЦ-11 по ГОСТ 25100-2020

Размер сит, мм	200	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	0,00	0,00	0,00	0,72	2,30	6,64	20,78	119,06	1853,14
Частные остатки, %	0,00	0,00	0,00	0,04	0,11	0,33	1,04	5,95	92,53
Полные остатки, %	0,00	0,00	0,00	0,04	0,15	0,48	1,52	7,47	100,00
Полные проходы, %	100,0	100,00	100,00	99,96	99,85	99,52	98,48	92,53	0,00

Золошлаковая смесь, согласно требованиям ГОСТ 25100-2020, классифицируется как песок пылеватый.

Таблица 4.34 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси ТЭЦ-11 по ГОСТ 23558-94

Размер сит, мм	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14
Частные остатки, г	0,00	0,00	0,00	0,64	1,12	4,92	12,83	42,60	1940,53
Частные остатки, %	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06	0,25	0,64	2,13	96,90
Полные остатки, %	0,00	0,00	0,00	0,03	0,09	0,33	0,97	3,10	
Полные проходы, %	100,0	100,0	100,0	99,97	99,91	99,67	99,03	96,90	
Требования ГОСТ 23558-94, табл. 2	–	до 10	25–40	45–65	60–80	70–85	75–90	80–95	

Золошлаковая смесь по зерновому составу не соответствует требованиям ГОСТ 23558-94.

Таблица 4.35 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси ТЭЦ-12 по ГОСТ 25100-2020

Размер сит, мм	200	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	0	3,47	2,26	3,41	2,60	2,00	19,55	80,04	87,95
Частные остатки, %	0	1,72	1,12	1,69	1,29	0,99	9,71	39,77	43,70
Полные остатки, %	0	1,72	2,85	4,54	5,83	6,83	16,54	56,30	100,00
Полные проходы, %	100	98,28	97,15	95,46	94,17	93,17	83,46	43,70	0,00

Золошлаковая смесь, согласно требованиям ГОСТ 25100-2020, классифицируется как песок пылеватый.

Таблица 4.36 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси Ново-Иркутской ТЭЦ (Шелеховский участок) по ГОСТ 25100-2020

Размер сит, мм	200	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	0,00	5,52	5,44	6,42	6,46	10,90	102,97	814,03	1058,42
Частные остатки, %	0,00	0,27	0,27	0,32	0,32	0,54	5,12	40,50	52,65
Полные остатки, %	0,00	0,27	0,55	0,86	1,19	1,73	6,85	47,35	100,00
Полные проходы, %	100,0	99,73	99,45	99,14	98,81	98,27	93,15	52,65	0,00

Золошлаковая смесь, согласно требованиям ГОСТ 25100-2020, классифицируется как песок пылеватый.

Таблица 4.37 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси Ново-Иркутской ТЭЦ (Шелеховский участок) по ГОСТ 23558-94

Размер сит, мм	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14
Частные остатки, г	0,00	5,52	5,44	5,00	5,94	8,06	43,21	374,88	1562,11
Частные остатки, %	0,00	0,27	0,27	0,25	0,30	0,40	2,15	18,65	77,71
Полные остатки, %	0,00	0,27	0,55	0,79	1,09	1,49	3,64	22,29	100,00
Полные проходы, %	100,0	99,73	99,45	99,21	98,91	98,51	96,36	77,71	0,00
Требования ГОСТ 23558-94, табл. 2	–	до 10	25–40	45–65	60–80	70–85	75–90	80–95	–

Золошлаковая смесь по зерновому составу не соответствует требованиям ГОСТ 23558-94.

Таблица 4.38 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси Ново-Иркутской ТЭЦ по ГОСТ 25100-2020

Размер сит, мм	200	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	0,00	4,40	4,61	15,83	23,92	62,62	245,93	624,15	1018,63
Частные остатки, %	0,00	0,22	0,23	0,79	1,20	3,13	12,30	31,21	50,93
Полные остатки, %	0,00	0,22	0,45	1,24	2,44	5,57	17,86	49,07	100,00
Полные проходы, %	100,0	99,78	99,55	98,76	97,56	94,43	82,14	50,93	0,00

Золошлаковая смесь, согласно требованиям ГОСТ 25100-2020, классифицируется как песок пылеватый.

Таблица 4.39 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси Ново-Иркутской ТЭЦ по ГОСТ 23558-94

Размер сит, мм	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14
Частные остатки, г	0,00	4,40	4,61	15,34	14,87	43,76	151,65	451,65	1313,81
Частные остатки, %	0,00	0,22	0,23	0,77	0,74	2,19	7,58	22,58	65,69
Полные остатки, %	0,00	0,22	0,45	1,22	1,96	4,15	11,73	34,31	100,00
Полные проходы, %	100,00	99,78	99,55	98,78	98,04	95,85	88,27	65,69	0,00
Требования ГОСТ 23558-94, табл. 2	–	до 10	25-40	45-65	60-80	70-85	75-90	80-95	–

Золошлаковая смесь по зерновому составу не соответствует требованиям ГОСТ 23558-94.

Таблица 4.40 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси Ново-Зиминской ТЭЦ по ГОСТ 25100-2020

Размер сит, мм	200	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	0,00	12,44	22,09	12,51	17,27	28,84	105,87	348,37	1490,70
Частные остатки, %	0,00	0,61	1,08	0,61	0,85	1,42	5,19	17,09	73,14
Полные остатки, %	0,00	0,61	1,69	2,31	3,16	4,57	9,77	26,86	100,00
Полные проходы, %	100,0	99,39	98,31	97,69	96,84	95,43	90,23	73,14	0,00

Золошлаковая смесь, согласно требованиям ГОСТ 25100-2020, классифицируется как песок пылеватый.

Таблица 4.41 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси Ново-Зиминской ТЭЦ по ГОСТ 23558-94

Размер сит, мм	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14
Частные остатки, г	0,00	12,44	22,09	7,58	15,73	26,93	63,53	206,42	1683,37
Частные остатки, %	0,00	0,61	1,08	0,37	0,77	1,32	3,12	10,13	82,60
Полные остатки, %	0,00	0,61	1,69	2,07	2,84	4,16	7,28	17,40	100,00
Полные проходы, %	100,0	99,39	98,31	97,93	97,16	95,84	92,72	82,60	0,00
Требования ГОСТ 23558-94, табл. 2	–	до 10	25–40	45–65	60–80	70–85	75–90	80–95	–

Золошлаковая смесь по зерновому составу не соответствует требованиям ГОСТ 23558-94.

Таблица 4.42 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси Усть-Илимской ТЭЦ по ГОСТ 25100-2020

Размер сит, мм	200	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	0,00	110,40	168,95	326,32	550,58	204,62	103,86	194,49	341,31
Частные остатки, %	0,00	5,52	8,45	16,31	27,52	10,23	5,19	9,72	17,06
Полные остатки, %	0,00	5,52	13,96	30,28	57,80	68,03	73,22	82,94	100,00
Полные проходы, %	100,0	94,48	86,04	69,72	42,20	31,97	26,78	17,06	0,00

Золошлаковая смесь, согласно требованиям ГОСТ 25100-2020, классифицируется как песок гравелистый.

Таблица 4.43 – Гранулометрический состав золошлаковой смеси Усть-Илимской ТЭЦ по ГОСТ 23558-94

Размер сит, мм	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14
Частные остатки, г	0,00	110,40	168,95	228,32	505,33	303,89	110,19	124,26	449,19
Частные остатки, %	0,00	5,52	8,45	11,41	25,26	15,19	5,51	6,21	22,45
Полные остатки, %	0,00	5,52	13,96	25,38	50,64	65,83	71,34	77,55	100,00
Полные проходы, %	100,0	94,48	86,04	74,62	49,36	34,17	28,66	22,45	0,00
Требования ГОСТ 23558-94, табл. 2	–	до 10	25–40	45–65	60–80	70–85	75–90	80–95	–

Золошлаковая смесь по зерновому составу не соответствует требованиям ГОСТ 23558-94.

5. Неоднородность гранулометрического состава

Представлена на рисунках 4.19–4.27.

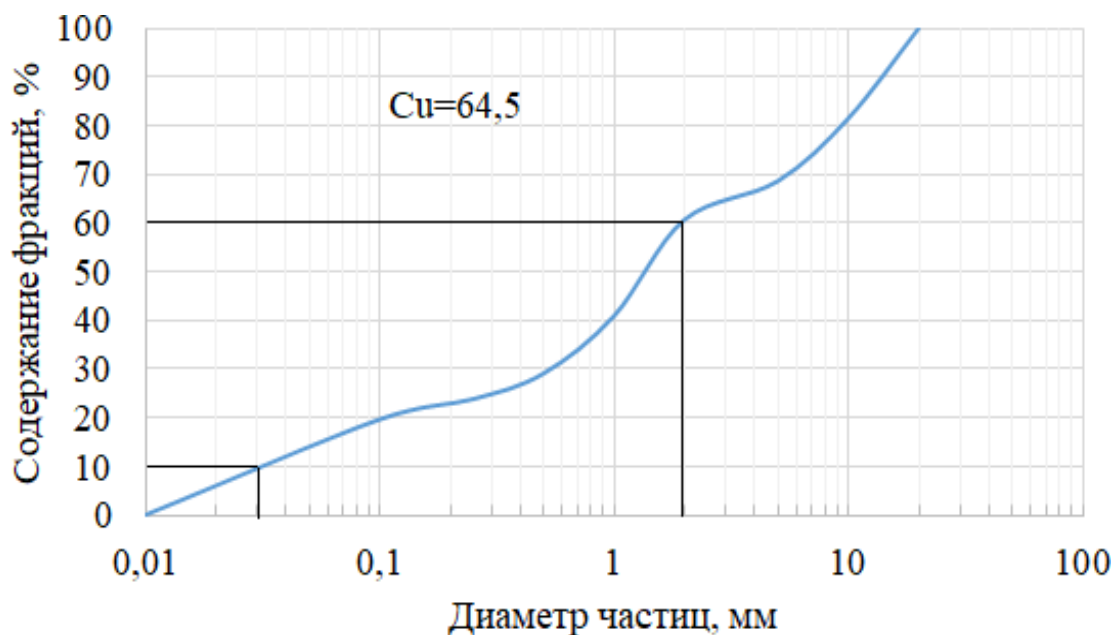


Рисунок 4.19 – Кумулятивная кривая гранулометрического состава золошлаковой смеси ТЭЦ-6 (график автора)

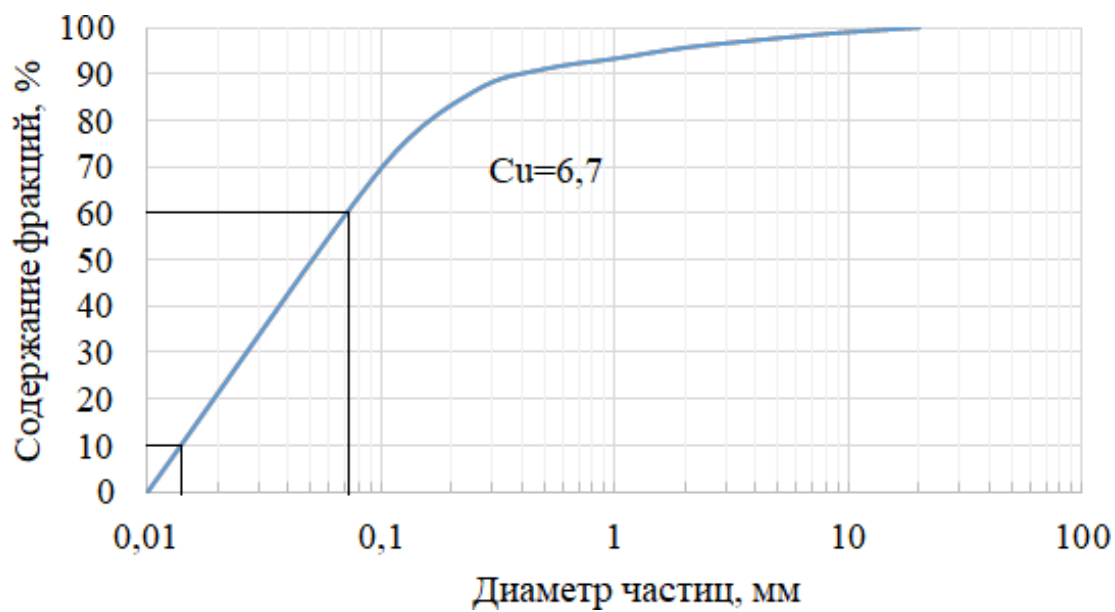


Рисунок 4.20 – Кумулятивная кривая гранулометрического состава золошлаковой смеси ТЭЦ-9 (график автора)

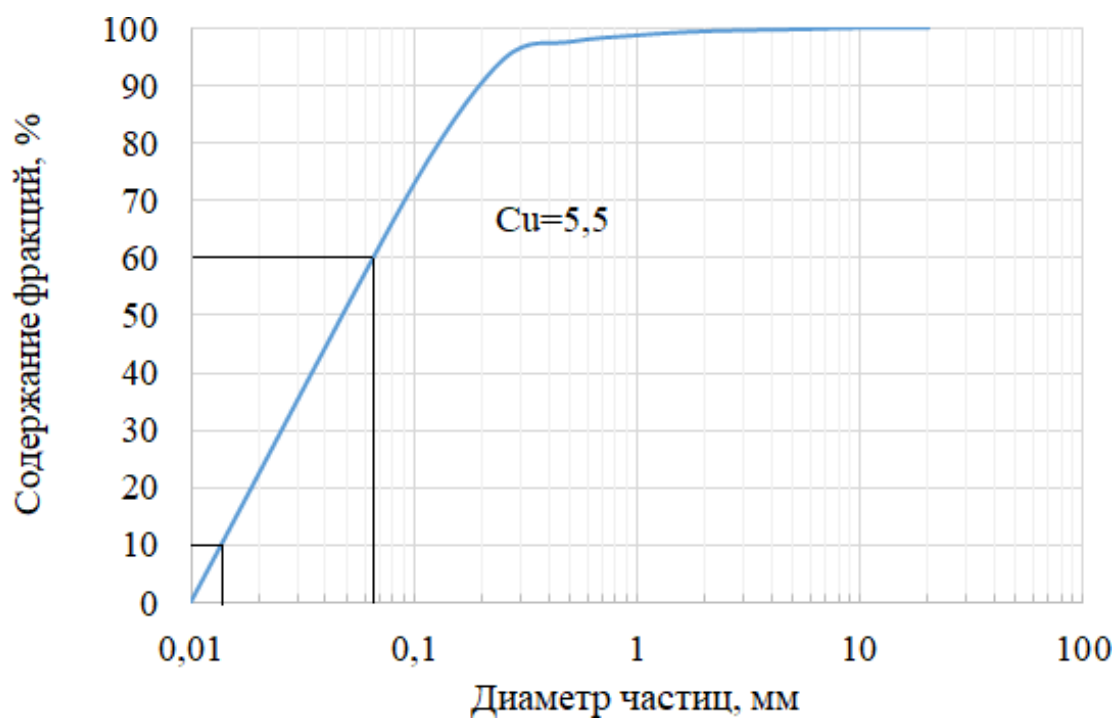


Рисунок 4.21 – Кумулятивная кривая гранулометрического состава золошлаковой смеси ТЭЦ-10 (график автора)

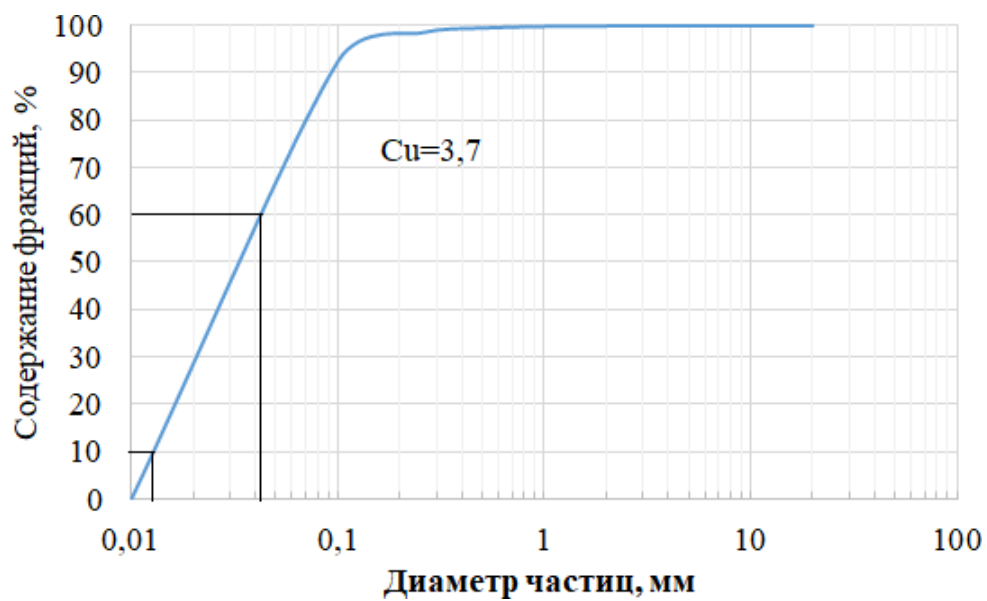


Рисунок 4.22 – Кумулятивная кривая гранулометрического состава золошлаковой смеси ТЭЦ-11 (график автора)

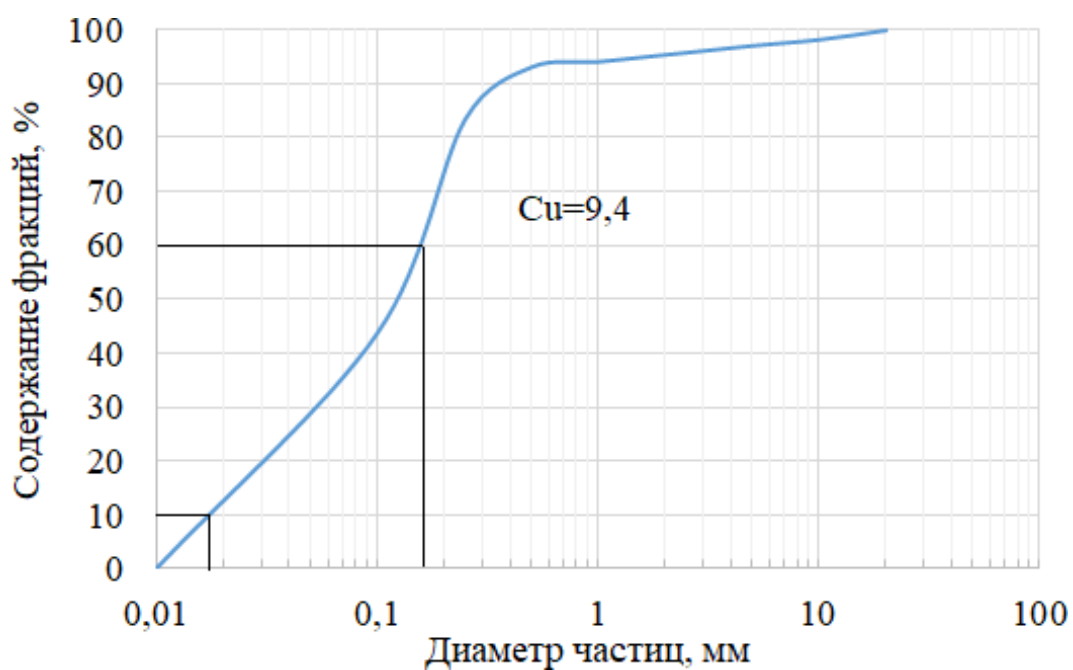


Рисунок 4.23 – Кумулятивная кривая гранулометрического состава золошлаковой смеси ТЭЦ-12 (график автора)

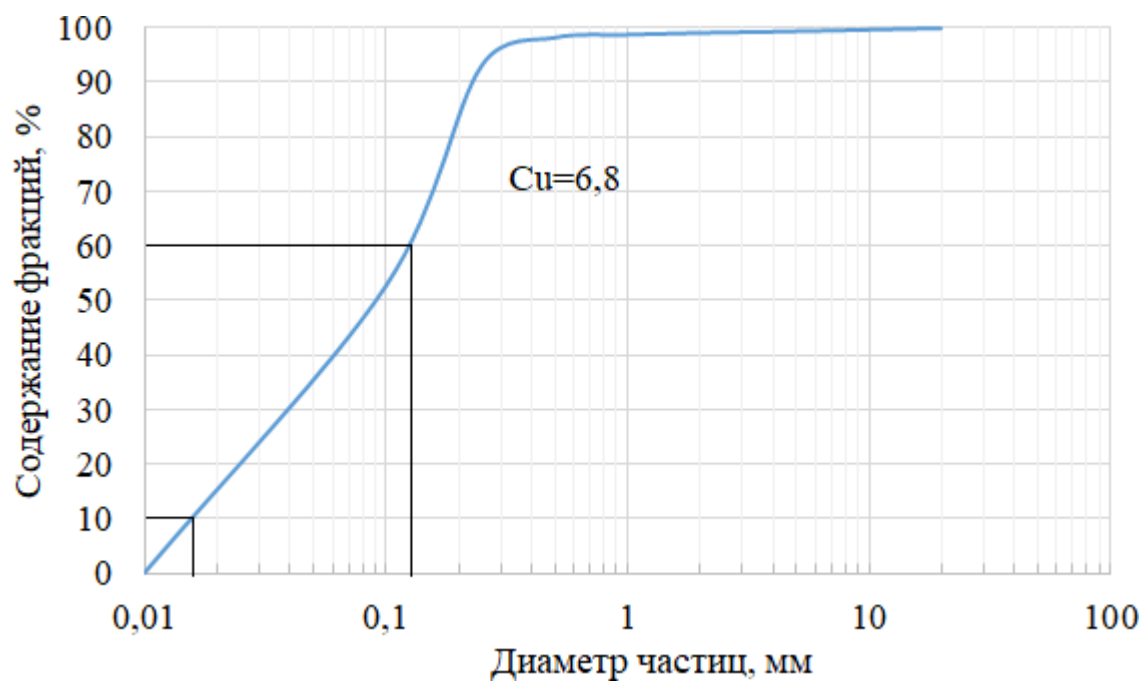


Рисунок 4.24 – Кумулятивная кривая гранулометрического состава золошлаковой смеси Ново-Иркутской ТЭЦ (Шелеховский участок)
(график автора)

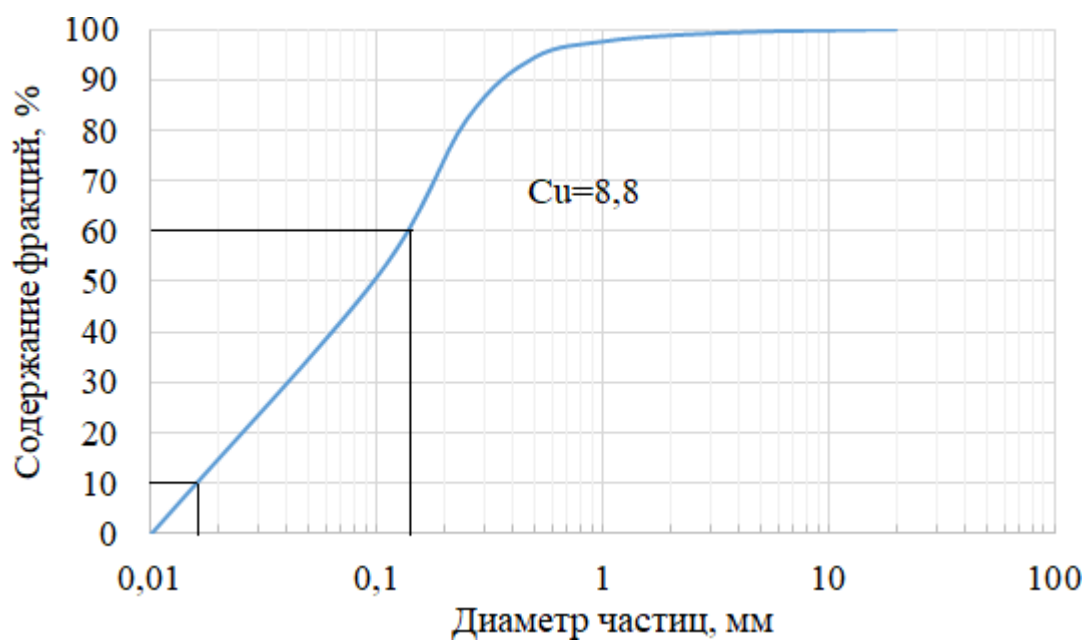


Рисунок 4.25 – Кумулятивная кривая гранулометрического состава золошлаковой смеси Ново-Иркутской ТЭЦ
(график автора)

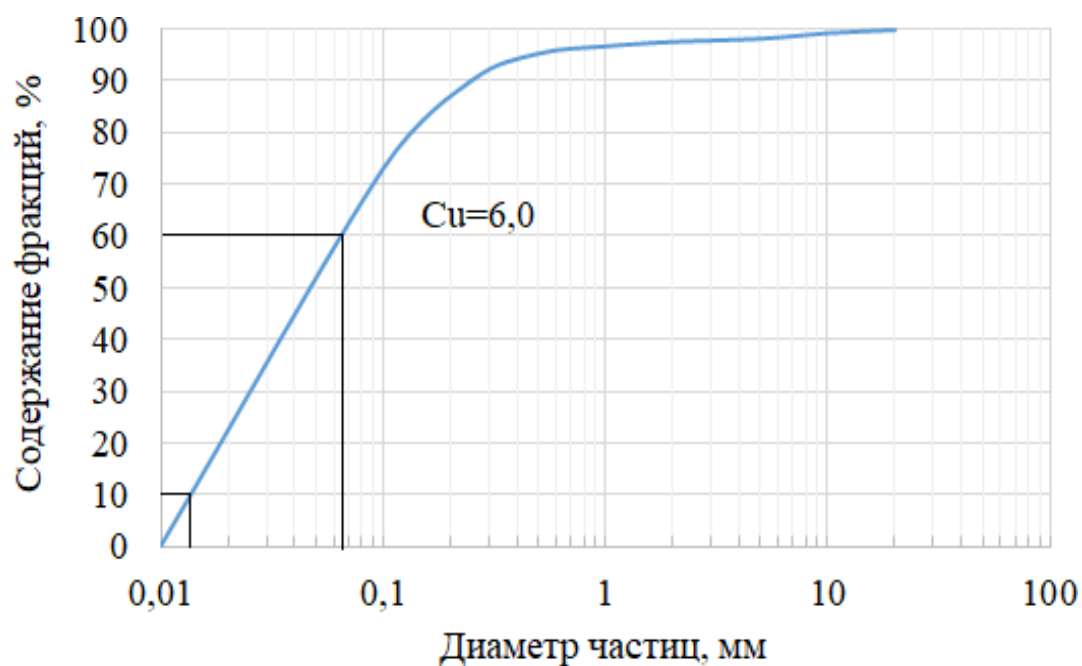


Рисунок 4.26 – Кумулятивная кривая гранулометрического состава золошлаковой смеси Ново-Зиминской ТЭЦ
(график автора)

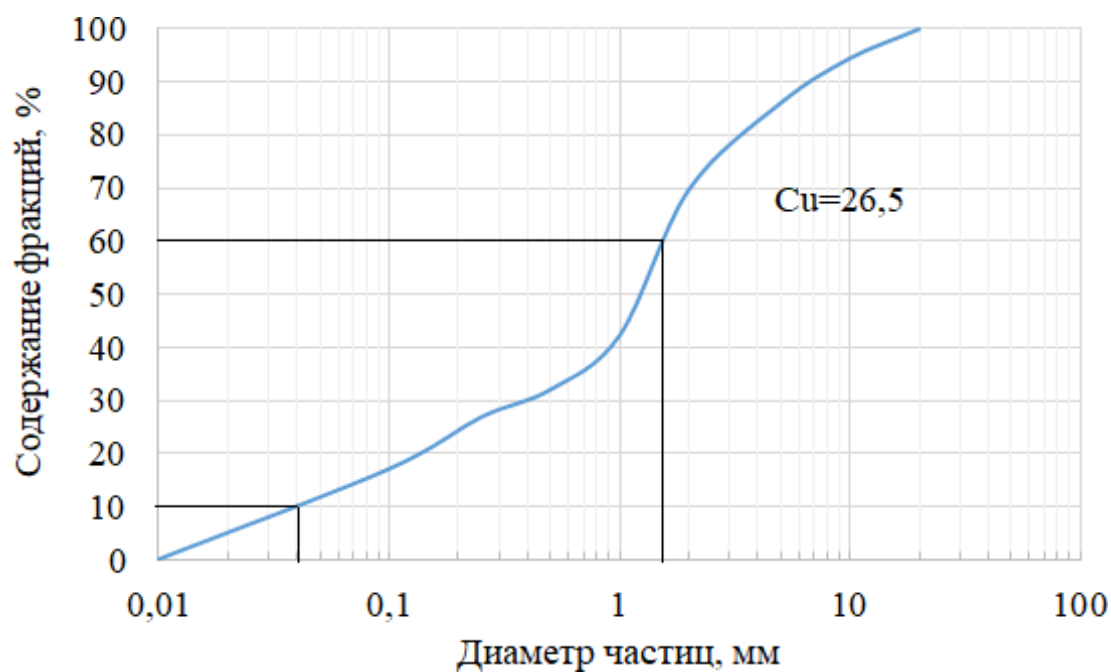


Рисунок 4.27 – Кумулятивная кривая гранулометрического состава золошлаковой смеси Усть-Илимской ТЭЦ
(график автора)

Кривые гранулометрического состава в основном имеют крутой наклон, с большим содержанием фракций 0,1–1 мм. В соответствии с классификацией ГОСТ 25100-2020 золошлаковые смеси являются неоднородными по гранулометрическому составу (таблица 4.44).

Таблица 4.44 – Разновидность в соответствии с классификацией ГОСТ 25100-2020 [217]

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

6. Дробимость частиц

Частицы золошлаковых смесей вследствие их хрупкости дробятся при уплотнении. Что существенно изменяет первоначальный гранулометрический состав, и как следствие оказывает влияние на физико-механические характеристики укрепленного грунта (плотность, водостойкость, морозостойкость, прочность). Результаты исследования изменения гранулометрического состава приведены на рисунках 4.28–4.33.

Для количественной оценки степени дробления частиц при уплотнении вводится показатель «Степень измельчения», который определяется путем расчета среднего размера частиц до и после уплотнения и выражения степени дробления

как процентного снижения между двумя средними величинами начального среднего размера.

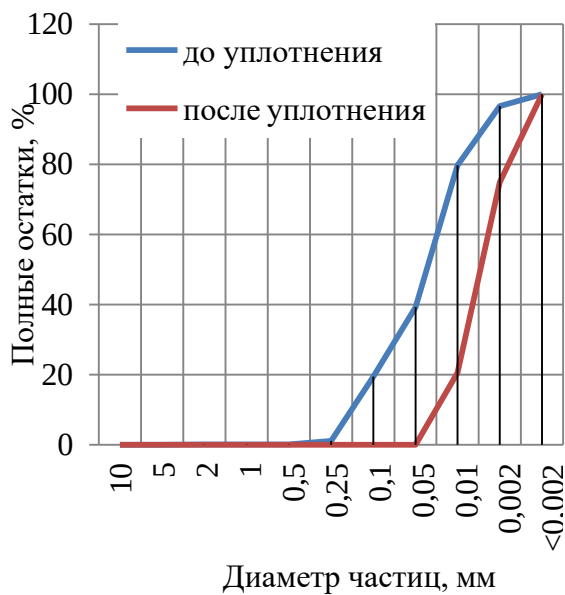


Рисунок 4.28 – Гранулометрический состав пробы Ново-Иркутской ТЭЦ [Шелеховский участок] (рисунок автора)

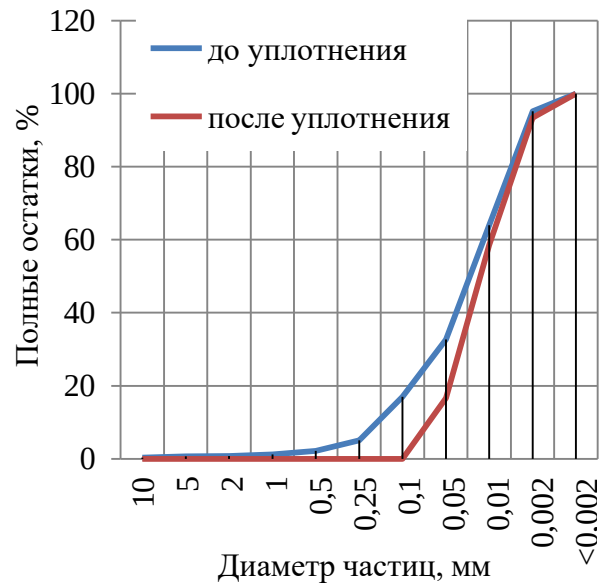


Рисунок 4.29 – Гранулометрический состав пробы ТЭЦ-9 (рисунок автора)



Рисунок 4.30 – Гранулометрический состав пробы ТЭЦ-11 (рисунок автора)

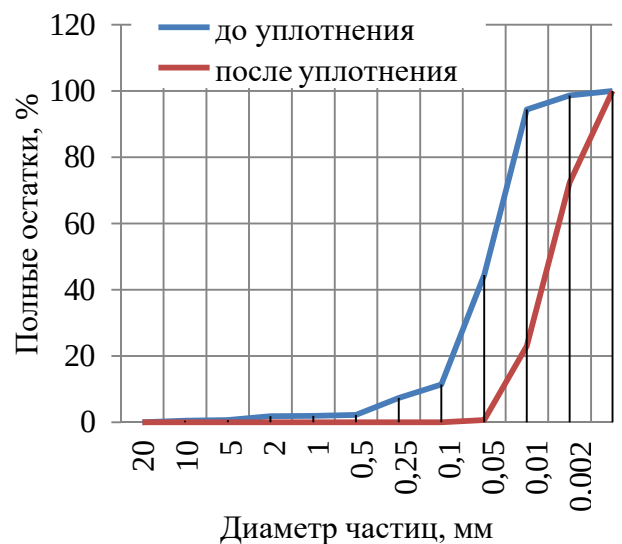


Рисунок 4.31 – Гранулометрический состав пробы Ново-Иркутской ТЭЦ (рисунок автора)

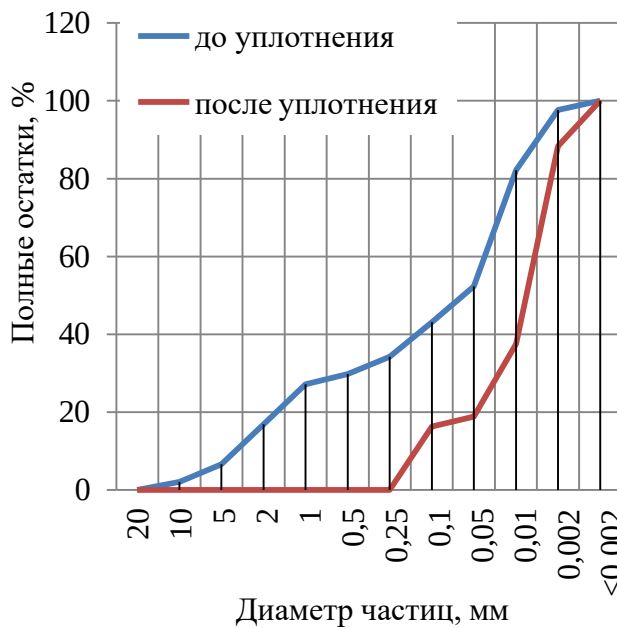


Рисунок 4.32 – Гранулометрический состав пробы Усть-Илимской ТЭЦ (рисунок автора)

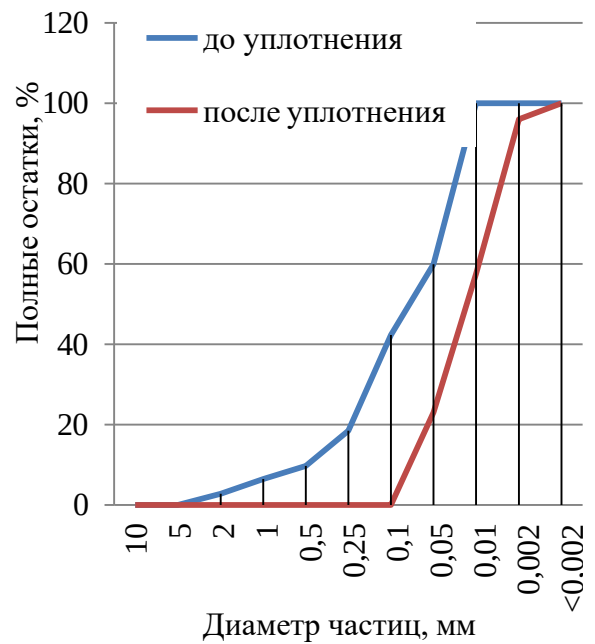


Рисунок 4.33 – Гранулометрический состав пробы ТЭЦ 10 (рисунок автора)

Степень измельчения:

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

так как $\sum a_i = \sum a_j = 100 \%$,

$$I = \frac{\sum a_i \cdot d_i}{\sum a_j \cdot d_j}, \quad (4.4)$$

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 4.45.

Таблица 4.45 – 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

7. Результаты компрессионных испытаний

Компрессионные испытания проведены на образцах золошлаковых смесей, уплотненных до максимальной плотности. Результаты приведены в рисунках 4.34–4.39 и таблицах 4.46–4.51.

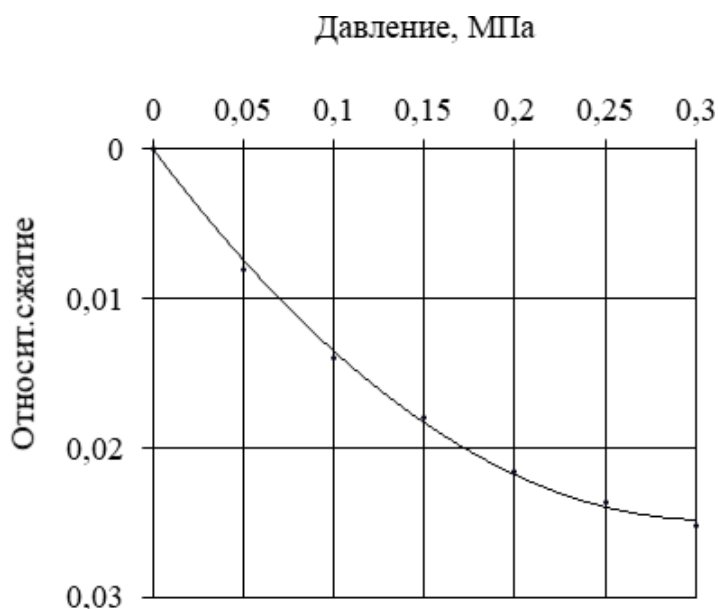


Рисунок 4.34 – График зависимости относительного сжатия от давления пробы золошлаковой смеси ТЭЦ-6 (рисунок автора)

Таблица 4.46 – Результаты компрессионных испытаний пробы золошлаковой смеси ТЭЦ-6

Давление, МПа	Деформация, мм	Относительное сжатие	Коэффициент пористости, д.е.	Коэффициент уплотнения, МПа ⁻¹	Модуль деформации, МПа
<i>В естественном состоянии</i>					
0	0	0	0	0	0
0,050	0,20	0,008	1,511	0,405	4,96
0,10	0,35	0,014	1,495	0,304	6,57
0,15	0,45	0,018	1,485	0,202	9,82
0,20	0,54	0,022	1,476	0,182	10,87
0,25	0,59	0,024	1,471	0,101	19,53
0,30	0,63	0,025	1,467	0,081	24,37
Относительное свободное набухание без нагрузки, д.е.					–
Рбыт. МПа					0,014
Полная влагоемкость, д.е.					0,575
Плотность при полной влагоемкости, д.е.					1,656
Консистенция при полной влагоемкости, д.е.					–
Модуль деформации ест. (0,1–0,2 МПа)					10,53
Коэффициент упл., МПа ⁻¹ (ест.0,1–0,2 МПа)					0,192

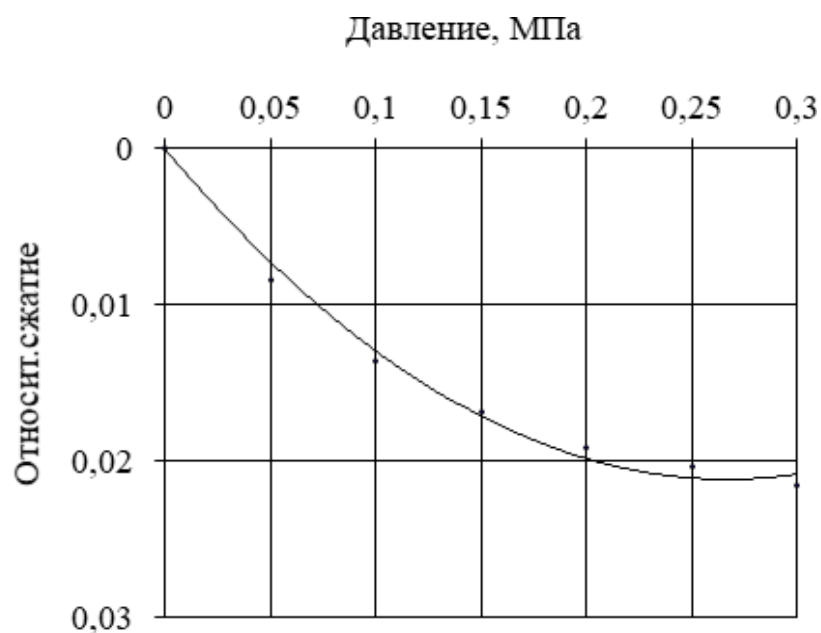


Рисунок 4.35 – График зависимости относительного сжатия от давления пробы золошлаковой смеси ТЭЦ-7 (рисунок автора)

Таблица 4.47 – Результаты компрессионных испытаний пробы золошлаковой смеси ТЭЦ-7

Давление, МПа	Деформация, мм	Относительное сжатие	Коэффициент пористости, д.е.	Коэффициент уплотнения, МПа ⁻¹	Модуль деформации, МПа
<i>В естественном состоянии</i>					
0	0	0	0	0	0
0,050	0,21	0,008	0,939	0,329	4,72
0,10	0,34	0,014	0,929	0,203	7,59
0,15	0,42	0,017	0,923	0,125	12,29
0,20	0,48	0,019	0,918	0,094	16,35
0,25	0,51	0,020	0,916	0,047	32,65
0,30	0,54	0,022	0,914	0,047	32,61
Относительное свободное набухание без нагрузки, д.е.					–
Рбыт. МПа					0,017
Полная влагоемкость, д.е.					0,359
Плотность при полной влагоемкости, д.е.					1,849
Консистенция при полной влагоемкости, д.е.					–
Модуль деформации ест. (0,1–0,2 МПа)					14,29
Коэффициент уплотнения, МПа ⁻¹ (ест. 0,1–0,2 МПа)					0,110

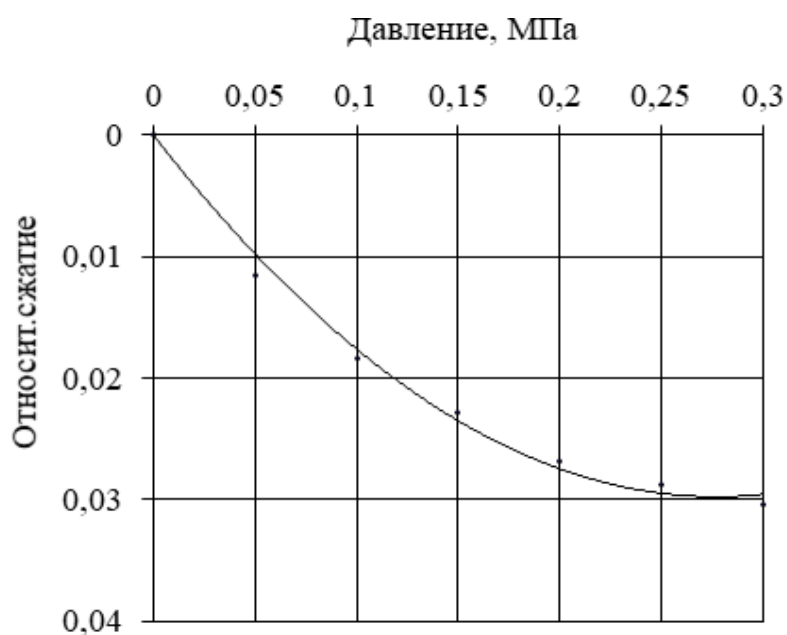


Рисунок 4.36 – График зависимости относительного сжатия от давления пробы золошлаковой смеси ТЭЦ-11 (рисунок автора)

Таблица 4.48 – Результаты компрессионных испытаний пробы золошлаковой смеси ТЭЦ-11

Давление, МПа	Деформация образца, мм	Относительное сжатие	Коэффициент пористости, д.е.	Коэффициент уплотнения, МПа ⁻¹	Модуль деформации, МПа
<i>В естественном состоянии</i>					
0	0	0	0	0	0
0,050	0,29	0,012	0,817	0,426	3,41
0,10	0,46	0,018	0,804	0,250	5,77
0,15	0,57	0,023	0,796	0,162	8,88
0,20	0,67	0,027	0,789	0,147	9,73
0,25	0,72	0,029	0,785	0,074	19,42
0,30	0,76	0,030	0,782	0,059	24,24
Относительное свободное набухание без нагрузки, д.е.					–
Рбыт. МПа					0,017
Полная влагоёмкость, д.е.					0,315
Плотность при полной влагоемкости, д.е.					1,903
Консистенция при полной влагоемкости, д.е.					–
Модуль деформации ест. (0,1–0,2 МПа)					9,52
Коэффициент уплотнения, МПа ⁻¹ (ест. 0,1–0,2 МПа)					0,154

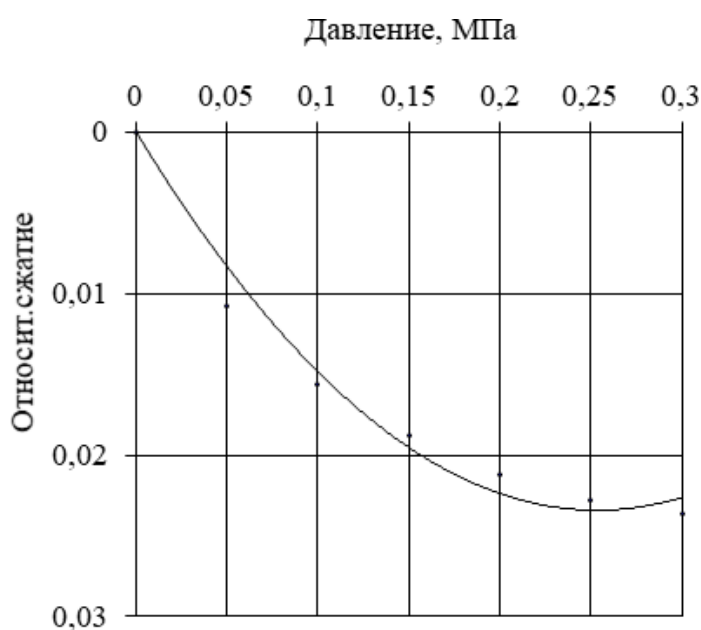


Рисунок 4.37 – График зависимости относительного сжатия от давления пробы золошлаковой смеси Ново-Иркутской ТЭЦ (рисунок автора)

Таблица 4.49 – Результаты компрессионных испытаний пробы золошлаковой смеси Ново-Иркутской ТЭЦ

Давление, МПа	Деформация образца, мм	Относительное сжатие	Коэффициент пористости, д.е.	Коэффициент уплотнения, МПа ⁻¹	Модуль деформации, МПа
<i>В естественном состоянии</i>					
0	0	0	0	0	0
0,050	0,27	0,011	0,638	0,358	3,66
0,10	0,39	0,016	0,630	0,159	8,20
0,15	0,47	0,019	0,624	0,106	12,27
0,20	0,53	0,021	0,620	0,079	16,31
0,25	0,57	0,023	0,618	0,053	24,43
0,30	0,59	0,024	0,617	0,026	48,82
Относительное свободное набухание без нагрузки, д.е.					–
Рбыт. МПа					0,019
Полная влагоемкость, д.е.					0,246
Плотность при полной влагоемкости, д.е.					2,003
Консистенция при полной влагоемкости, д.е.					–
Модуль деформации ест. (0,1–0,2 МПа)					14,29
Коэффициент уплотнения, МПа ⁻¹ (ест. 0,1–0,2 МПа)					0,093

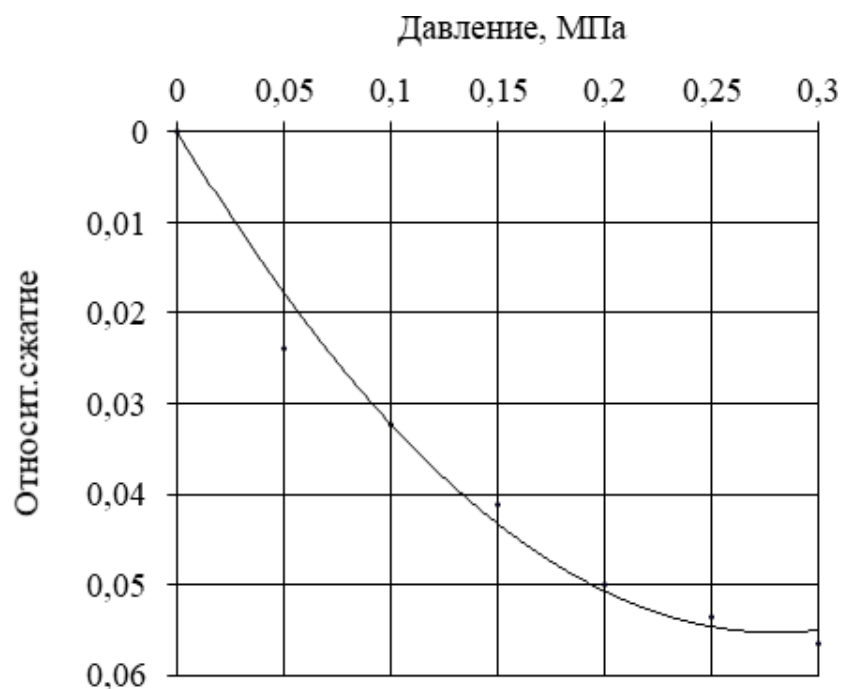


Рисунок 4.38 – График зависимости относительного сжатия от давления пробы золошлаковой смеси Усть-Илимской ТЭЦ (рисунок автора)

Таблица 4.50 – Результаты компрессионных испытаний пробы золошлаковой смеси Усть-Илимской ТЭЦ

Давление, МПа	Деформация образца, мм	Относительное сжатие	Коэффициент пористости, д.е.	Коэффициент уплотнения, МПа ⁻¹	Модуль деформации, МПа
<i>В естественном состоянии</i>					
0	0	0	0	0	0
0,050	0,60	0,024	0,830	0,900	1,63
0,10	0,81	0,032	0,814	0,315	4,61
0,15	1,03	0,041	0,798	0,330	4,36
0,20	1,25	0,050	0,781	0,330	4,32
0,25	1,34	0,054	0,774	0,135	10,52
0,30	1,41	0,056	0,769	0,105	13,48
Относительное свободное набухание без нагрузки, д.е.					–
Рбыт. МПа					0,017
Полная влагоёмкость, д.е.					0,329
Плотность при полной влагоемкости, д.е.					1,885
Консистенция при полной влагоемкости, д.е.					–
Модуль деформации ест. (0,1–0,2 МПа)					4,55
Коэффициент уплотнения, МПа ⁻¹ (ест. 0,1–0,2 МПа)					0,330

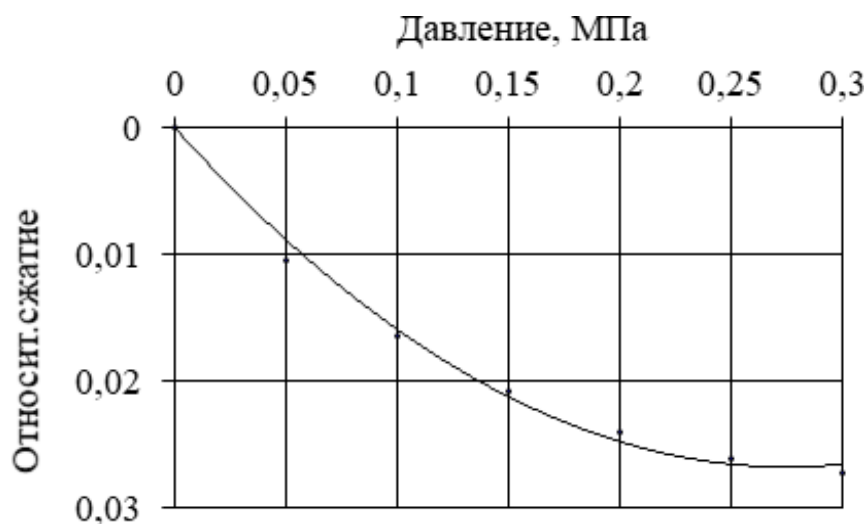


Рисунок 4.39 – График зависимости относительного сжатия от давления пробы золошлаковой смеси Ново-Иркутской ТЭЦ Шелеховский участок (рисунок автора)

Таблица 4.51 – Результаты компрессионных испытаний пробы золошлаковой смеси Ново-Иркутской ТЭЦ (Шелеховский участок)

Давление, МПа	Деформация образца, мм	Относительное сжатие	Коэффициент пористости, д.е.	Коэффициент уплотнения, МПа ⁻¹	Модуль деформации, МПа
<i>В естественном состоянии</i>					
0	0	0	0	0	0
0,050	0,26	0,010	1,586	0,544	3,81
0,10	0,41	0,016	1,570	0,314	6,56
0,15	0,52	0,021	1,559	0,230	8,90
0,20	0,60	0,024	1,550	0,167	12,20
0,25	0,65	0,026	1,545	0,105	19,48
0,30	0,68	0,027	1,542	0,063	32,43
Рбыт. МПа					0,014
Полная влагоемкость, д.е.					0,606
Плотность при полной влагоемкости, д.е.					1,635
Модуль деформации ест. (0,1–0,2 МПа)					10,53
Коэффициент уплотнения, МПа⁻¹ (ест. 0,1–0,2 МПа)					0,199

Золошлаковые смеси имеют модуль деформации E_0 в пределах 5–14 МПа и в зависимости от действующих нагрузок относятся к сильно- и среднесжимаемым.

8. Угол внутреннего трения

Характеристики золошлаковых смесей при сдвиге определены на образцах, уплотненных на приборе СОЮЗДОРНИИ до максимальной плотности при оптимальной влажности. Значения угла внутреннего трения сильно варьируются (таблицы 4.52–4.57).

Невысокие значения угла внутреннего трения и окатанная форма частиц уменьшают контакты зацепления. При повышенной влажности это приводит к выдавливанию золошлаковой смеси из-под вальца катка при уплотнении. Как следствие, увеличивается ширина уплотняемого слоя и уменьшается его толщина.

Таблица 4.52 – Результаты испытаний на сдвиг пробы ЗШС ТЭЦ 6

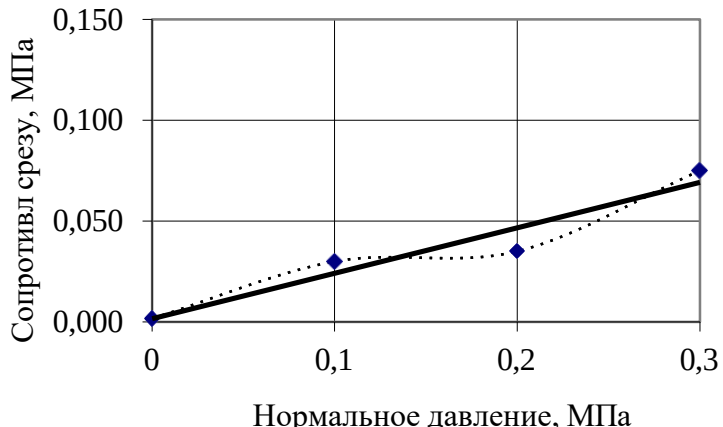
Сопротивление срезу, МПа		Нормальное давление, МПа		Коэф. внутр. трения	Угол внутр. трения (град)	Уд. сцепление грунта (МПа)	Уд. сцепление грунта (КПа)
<i>Вест.</i>	<i>W в/н</i>	<i>Вест.</i>	<i>W в/н</i>				
0,002	—	0	—	0,225	13	0,002	1,7
0,030	—	0,10	—	0,225	13	0,002	1,7
0,035	—	0,20	—				
0,075	—	0,30	—				
График зависимости сопротивления срезу от нормального давления							

Таблица 4.53 – Результаты испытаний на сдвиг пробы ЗШС ТЭЦ 7

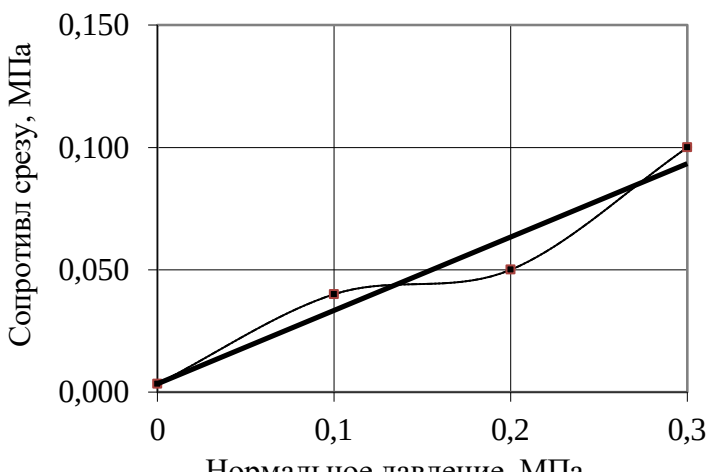
Сопротивление срезу, МПа		Нормальное давление, МПа		Коэф. внутр. трения	Угол внутр. трения (град)	Уд. сцепление грунта (МПа)	Уд. сцепление грунта (КПа)
<i>Вест.</i>	<i>W в/н</i>	<i>Вест.</i>	<i>W в/н</i>				
0,040	—	0,10	—	0,300	17	0,003	3,3
0,050	—	0,20	—				
0,100	—	0,30	—				
График зависимости сопротивления срезу от нормального давления							

Таблица 4.54 – Результаты испытаний на сдвиг пробы ЗШС ТЭЦ 11

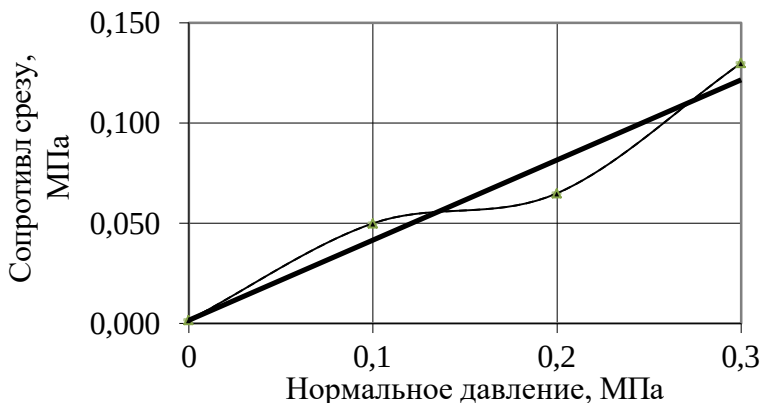
Сопротивление срезу, МПа		Нормальное давление, МПа		Коэф. внутр. трения	Угол внутр трения (град)	Уд. сцепление грунта (МПа)	Уд. сцепление грунта (КПа)
<i>Вест.</i>	<i>W в/н</i>	<i>Вест.</i>	<i>W в/н</i>				
0,050	—	0,10	—	0,400	22	0,002	1,7
0,065	—	0,20	—				
0,130	—	0,30	—				
График зависимости сопротивления срезу от нормального давления							

Таблица 4.55 – Результаты испытаний на сдвиг пробы золошлаковой смеси Ново-Иркутской ТЭЦ

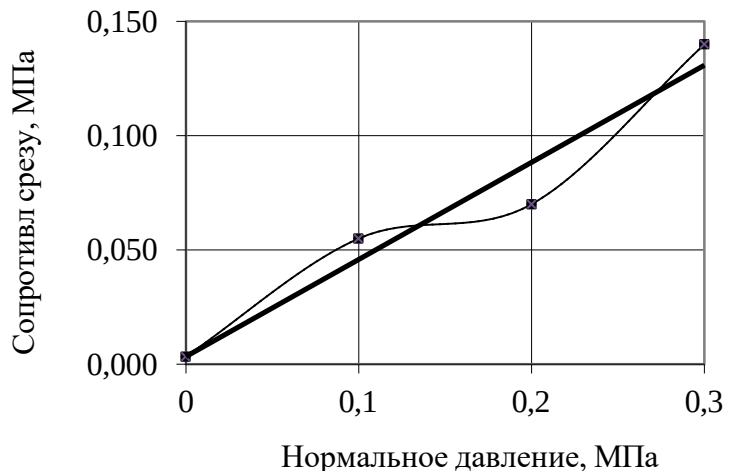
Сопротивление срезу, МПа		Нормальное давление, МПа		Коэф. внутр. трения	Угол внутр трения (град)	Уд. сцепление грунта (МПа)	Уд. сцепление грунта (КПа)
<i>Вест.</i>	<i>W в/н</i>	<i>Вест.</i>	<i>W в/н</i>				
0,055	—	0,10	—	0,425	23	0,003	3,3
0,070	—	0,20	—				
0,140	—	0,30	—				
График зависимости сопротивления срезу от нормального давления							

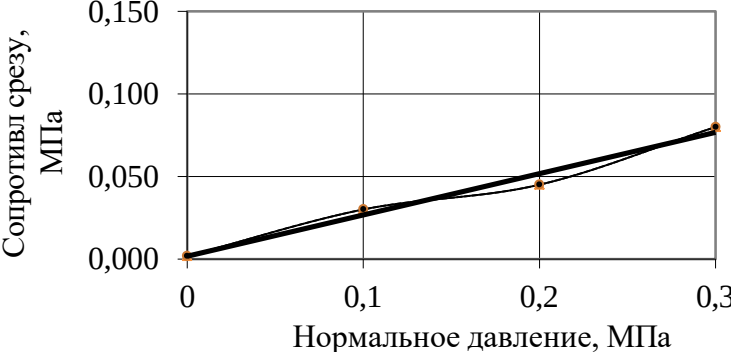
Таблица 4.56 – Результаты испытаний на сдвиг пробы золошлаковой

смеси Усть-Илимской ТЭЦ

Сопротивление срезу, МПа		Нормальное давление, МПа		Коэф. внутр. трения	Угол внутр трения (град)	Уд. сцепление грунта (МПа)	Уд. сцепление грунта (КПа)
<i>Wест.</i>	<i>W в/н</i>	<i>Wест.</i>	<i>W в/н</i>				
0,050	—	0,10	—	0,350	19	0,007	6,7
0,060	—	0,20	—				
0,120	—	0,30	—				

График зависимости сопротивления срезу от нормального давления

Таблица 4.57 – Результаты испытаний на сдвиг пробы золошлаковой смеси Ново-Иркутской ТЭЦ (Шелеховский участок)

Сопротивление срезу, МПа		Нормальное давление, МПа		Коеф. внутр. трения	Угол внутр трения (град)	Уд. сцепление грунта (МПа)	Уд. сцепление грунта (КПа)
Вест.	W в/н	Вест.	W в/н				
0,030	—	0,10	—	0,250	14	0,002	1,7
0,045	—	0,20	—				
0,080	—	0,30	—				
График зависимости сопротивления срезу от нормального давления							

9. Относительная деформация морозного пучения

Золошлаковые смеси Иркутской области по показателю величина морозно-

го пучения относятся слабопучинистым и непучинистым. Низкие значения величины деформации морозного пучения позволяют применять эти смеси для возведения автомобильных дорог практически без ограничений. Причем значения деформации морозного пучения можно снизить при укреплении/стабилизации золошлаковых смесей неорганическими вяжущими.

10. Удельная эффективность активность природных радионуклидов

По степени негативного воздействия на окружающую среду золошлаковые смеси относятся к пятому классу «Практически неопасные отходы» (таблица 4.58).

Таблица 4.58 – Класс опасности для окружающей природной среды, удельная эффективность активность природных радионуклидов золошлаковых смесей

Наименование ТЭЦ	Класс опасности	Удельная эффективная активность природных радионуклидов, Бк/кг
Иркутский участок		
Ново-Иркутская ТЭЦ	V	224–382
Ново-Иркутская ТЭЦ (Шелеховский участок)	V	213–312
Ангарский участок		
ТЭЦ-10 (г. Ангарск)	V	250–408
ТЭЦ-9 (г. Ангарск)	V	215–376
ТЭЦ-11 (г. Усолье-Сибирское)	V	242–259
Братский участок		
ТЭЦ-6 (г. Братск)	V	45–110
ТЭЦ-6 ТИиТС (ТЭЦ-7) (г. Братск)	V	61–327
Усть-Илимская ТЭЦ	V	31–259

Согласно СанПиН 2.6.1.2523-09 п. 5.3.4, эффективная удельная активность ($A_{эфф}$) природных радионуклидов не должна превышать:

- для материалов, используемых при строительстве автомобильных дорог в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных сооружений (II класс) (II класс) – $A_{эфф} \leq 740$ Бк/кг;

- для материалов, используемых при строительстве автомобильных дорог вне населенных пунктов (III класс) – $A_{эфф} \leq 1500$ Бк/кг.

Исследованные пробы золошлаковых смесей относятся ко II и III классу по эффективной удельной активности природных радионуклидов, поэтому они могут применяться без ограничений во всех конструкциях автомобильных дорог.

11. Содержание посторонних загрязняющих включений

Для использования золошлаковых смесей в конструкциях автомобильных дорог они не должны содержать посторонних загрязняющих включений (строительного мусора, грунта, древесных остатков и др.).

4.3. Результаты разработки составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами

Укрепление портландцементом

В лабораторных условиях подобраны составы грунтов, укрепленных портландцементом:

- 1) суглинок легкий песчанистый твердый, укрепленный портландцементом;
- 2) золошлаковая смесь, укрепленная портландцементом;
- 3) песок средней крупности, укрепленный портландцементом;
- 4) супесь, укрепленная портландцементом;
- 5) гравийный грунт, укрепленный портландцементом.
- 6) зологрунтовые смеси, укрепленные портландцементом.

Расход цемента составляет 4–10 % общей массы и зависит от гранулометрического состава.

Результаты лабораторных испытаний этих составов укрепленных грунтов отражены в таблице 4.59.

Таблица 4.59 – Результаты подбора состава грунтов, укрепленных портландцементом

Наименование грунта	Содер- жание вяжу- щего, %	Прочность на сжатие в су- хом состоянии в возрасте 7 сут., МПа	Прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии в проект- ном возрасте 28 сут., МПа	Прочность на растяже- ние при изгибе в водо- насыщенном состоянии в проектном возрасте 28 сут., МПа	Водо- стой- кость	Прочность на сжатие после замораживания/ оттаивания		
						25 цик- лов	50 цик- лов	Марка
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Суглинок легкий песчанистый	4	2,58	4,58	1,93	0,51	3,25	0,63	F25
	6	2,62	—	—	—	—	—	—
	8	2,02	—	—	—	—	—	—
	10	1,75	—	—	—	—	—	—
	12	2,89	—	—	—	—	—	—
ЗШС Усть- Илимской ТЭЦ	4	0,96	—	—	—	—	—	—
	6	1,64	7,96	1,80	0,79	9,33	5,73	F50
	8	2,09	—	—	—	—	—	—
Песок средней крупности	4	—	6,45	-	0,64	—	—	—
	6	—	5,23	0,56	0,81	5,46	-	F25
	8	—	7,83	—	0,87	—	—	—
Супесь	4	2,39	2,85	—	0,79	—	—	—
	6	3,26	3,84	0,72	0,81	3,98	-	F25
	8	3,24	4,76	—	0,84	—	—	—
Крупнообломоч- ный гравийный	4	1,49	—	—	—	—	—	—
	6	2,37	5,79	1,40	0,66	4,48	4,17	F50
	8	3,01	—	—	—	—	—	—

Окончание таблицы 4.59

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ЗШС Ново-Иркутской ТЭЦ Шел. уч.	8	–	5,27	1,12	0,99	4,24	3,43	F50
Гравийный, заполнитель – суглинок песчанистый + ЗШС Ново-Иркутской ТЭЦ Шел. уч.	6	–	7,54	1,32	0,92	5,05	3,34	F50
Галечниковый + ЗШС Ново-Иркутской ТЭЦ Шел. уч.	6	5,24	7,6	1,32	0,86	5,12	3,43	F50
Гравийный, заполнитель – песок гравелистый + ЗШС Ново-Иркутской ТЭЦ Шел. уч.	6	–	6,15	1,03	0,67	3,69	0,81	F25

Гранулометрический состав золоминеральных смесей приведен в таблице 4.60.

Таблица 4.60 – Гранулометрический состав золоминеральных смесей

№ состава	Размер сит, мм							
	10,00	5,00	2,00	1,00	0,50	0,25	0,10	< 0,1
Состав 1	28,38	33,45	36,81	39,38	43,83	61,16	80,91	100,00
Состав 2	52,61	61,63	67,78	71,91	76,77	86,34	93,13	100,00
Состав 3	35,61	44,57	48,54	50,70	57,16	77,36	88,68	100,00

По результатам анализа полученных результатов можно сделать выводы.

1. Золошлаковые смеси, укрепленные портландцементом, в процессе твердения проявляют гидравлическую активность. В процессе структурообразования выделяется оксид кальция, который вступает в реакцию с кремнеземом и глиноземом золошлаковой смеси и образует новые соединения, которые повышают прочностные характеристики и морозостойкость укрепленного грунта. При этом следует отметить, что при испытании на морозостойкость золошлаковой смеси, укрепленной цементом, в первые 25 циклов замораживания/оттаивания наблюдался прирост прочности на сжатие. Увеличение значения составило 17 % (рисунок 4.40).

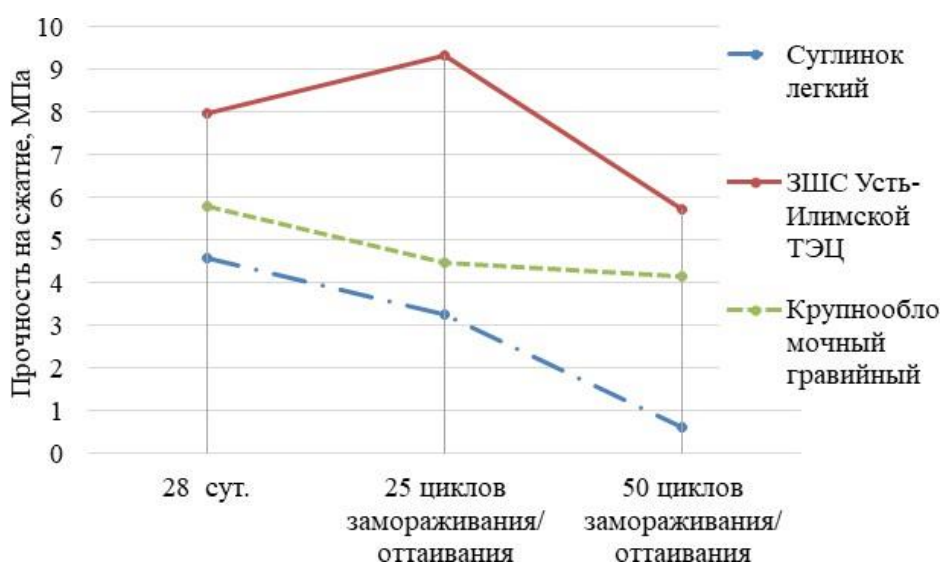


Рисунок 4.40 – Морозостойкость грунтов, укрепленных портландцементом (рисунок автора)

2. Грунты, укрепленные портландцементом, обладают значительной водостойкостью (рисунки 4.41–4.42).



Рисунок 4.41 – Определение прочности при сжатии (рисунок автора)



Рисунок 4.42 – Водонасыщение образцов (фото автора)

3. Оптимальное рекомендуемое значение содержания портландцемента в составе при укреплении кислых грунтов составляет 4–7 %. При введении извести это значение может быть снижено. В зависимости от технологии производства работ указанное значение может быть увеличено. В частности, смешение компонентов укрепленного грунта на месте производства работ (ресайклинг или

грунтовыми фрезами) не позволяет обеспечить такую же высокую однородность смеси как при смешении в смесительной установке. На расход вяжущих материалов также оказывает влияние способ распределения вяжущих при смешении на месте производства работ.

4. Как видно из данных таблицы 4.59, зологрунтовые смеси обладают лучшими прочностными характеристиками по сравнению с золошлаковой смесью, укрепленной портландцементом. Это объясняется наличием в составах обломочной фракции (более 2 мм), содержание которой составляет 36–67 %.

5. Разработанные составы можно применять для устройства слоев оснований дорожных одежд и рабочего слоя земляного полотна.

Исследования микроструктуры золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом, проводилось с помощью электронного микроскопа GEOL GIB-Z4500. Структура золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом, приведена на рисунке 4.43.

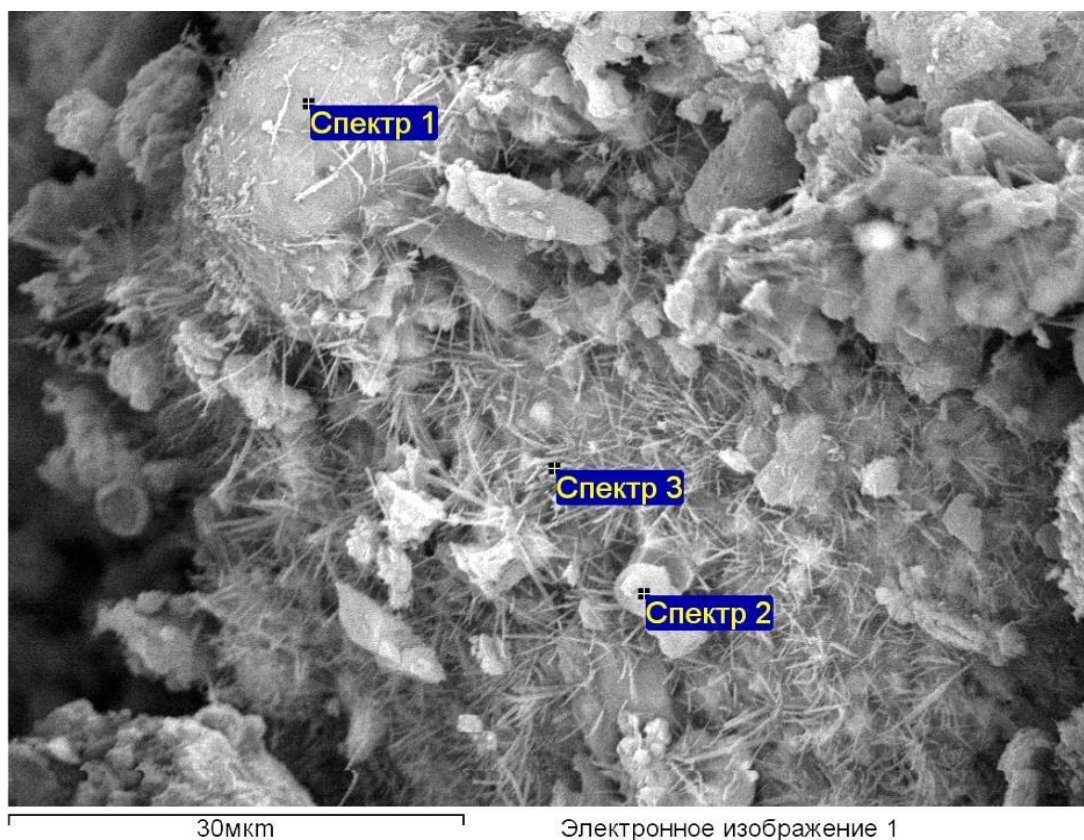


Рисунок 4.43 – Микроструктура золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом (рисунок автора [219])

Структура изучаемого образца является пористой, размер пор – в пределах 1–4 мкм.

Элементный состав образца золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом, представлен в таблице 4.61.

Таблица 4.61. Элементный состав образца золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом

Спектр	В стат.	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Fe	Итог
Спектр 1	Да	16.25	59.81	0.59	2.07	18.39	1.45	0.63	0.82	100.00
Спектр 2	Да	20.13	54.65	2.25	2.89	6.12	10.15	–	3.82	100.00
Спектр 3	Да	18.91	55.03	1.56	3.57	5.71	11.16	–	4.06	100.00
Макс.	–	20.13	59.81	2.25	3.57	18.39	11.16	0.63	4.06	–
Мин.	–	16.25	54.65	0.59	2.07	5.71	1.45	0.63	0.82	–

Микропоры, видимые на этом участке, заполнены игольчатыми кристаллами. Диаметр кристаллов в пределах 0,5 мкм нанометров (рисунок 4.44).

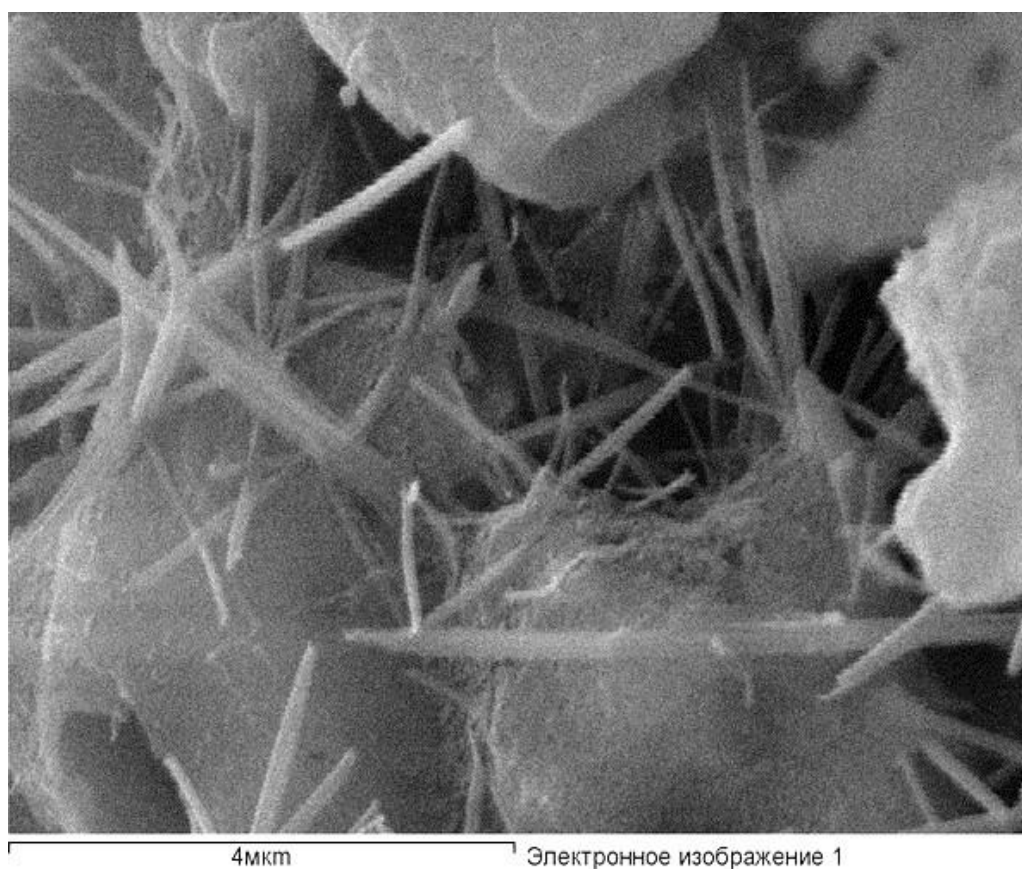


**Рисунок 4.44 – Игольчатые кристаллы гидратированного цемента
(рисунок автора [219])**

Экспериментальные исследования показали, что при укреплении золошлаковой смеси портландцементом образуется микроструктура, аналогично образованию микроструктуры в бетонах.

Сформированная структура является пористой, поры заполнены связующим веществом в виде игольчатых кристаллов гидратированного цемента.

Укрепление известью

В лабораторных условиях произведен подбор составов грунтов, укрепленных известью с различным процентным содержанием извести:

- 1) суглинок легкий, укрепленный известью;
- 2) золошлаковая смесь Усть-Илимской ТЭЦ, укрепленная известью;
- 3) песок средней крупности, укрепленный известью;
- 4) супесь, укрепленная известью.

Подбор составов проведен с использованием метода Eades and Grim. Процентное содержание извести в составе грунтоизвестковой смеси, имеющей значение водородного показателя наиболее близкое к 12,4, соответствует процентному содержанию извести в составе смеси, имеющей наибольшие значения прочности на сжатие в возрасте образцов 28 сут. (таблица 4.62).

Таблица 4.62 – Прочность на сжатие грунтоизвестковой смеси в зависимости от водородного показателя

Наименование грунта	Количество извести, %	Водородный показатель (рН) грунтоизвестковой смеси	Предел прочности образцов на сжатие в возрасте 28 сут., МПа
1	2	3	4
Суглинок легкий песчанистый	3	11,75	–
	4	11,93	0,27
	5	12,00	0,18
	6	12,01	2,71
	7	12,00	1,15
Супесь песчанистая	3	11,70	–
	4	11,84	–
	5	11,87	–

Окончание таблицы 4.62

1	2	3	4
Супесь песчанистая	6	11,90	–
	7	11,97	0,46
	8	11,94	0,32
	3	12,49	0,61
Золошлаковая смесь	3	12,49	0,61
	4	12,26	0,92
	5	12,54	1,13
	6	12,02	2,23
	7	12,60	1,43

Определение значений водородного показателя (рН) позволяет значительно упростить и ускорить процедуру подбора состава и снизить трудоемкость работ в лаборатории.

Результаты лабораторных испытаний этих составов укрепленных грунтов отражены в таблице 4.63.

По результатам анализа полученных результатов можно сделать выводы:

1. Укрепленные золошлаковые смеси, так же как и при укреплении портландцементом, проявляют в процессе твердения гидравлическую активность, что позволяет увеличить прочность на сжатие и морозостойкость.

2. Структурообразование грунтов, укрепленных известью, протекает относительно медленно (по сравнению с грунтами, укрепленными цементом), поэтому физико-механические характеристики целесообразно оценивать через 90 и 180 сут. твердения.

3. Составы имеют марку по морозостойкости менее F25, поэтому применение извести как самостоятельного вяжущего материала для укрепления местных грунтов в условиях континентального климата нецелесообразно (рисунок 4.45).

Таблица 4.63 – Результаты подбора состава грунтов, укрепленных известью

Наименование грунта	Содержание вяжущего, %	Прочность на сжатие в возрасте 7 сут. в сухом сост., МПа	Прочность на сжатие в возрасте 28 сут., МПа		Прочность на сжатие в возрасте 90 сут. во влажном состоянии, МПа	Прочность на растяжение при изгибе, МПа		Водостойкость		Прочность на сжатие после замораживания/оттаивания, МПа		
			в сухом состоянии	во влажном состоянии		28 сут.	90 сут.	28 сут.	90 сут.	25 циклов	50 циклов	марка по морозостойкости
Грунт суглинок легкий	4	—	—	0,27	—	—	—	—	—	—	—	—
	5	3,81	—	0,18	—	—	—	—	—	—	—	—
	6	4,06	3,9	2,71	2,57	0,28	-	0,70		2,42	-	F25
	7	3,55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ЗШС Усть-Илимской ТЭЦ	2	—	—	0,73	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	—	—	0,61	—	—	—	—	—	—	—	—
	4	—	—	0,92	—	—	—	—	—	—	—	—
	5	1,59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	6	1,23	2,43	2,23	—	0,39	-	0,92	-	2,01	-	-
	7	2,43	—	—	—	0,21	—	—	—	—	—	—
Супесь	7	—	0,67	0,46	—	0,0	—	0,69	—	—	—	—
Гравийный + ЗШС	5	—	2,08	1,13	1,22	—	0,11	—	0,59	—	—	—
	6	—	—	—	1,02	—	0,09	—	0,49	—	—	—

Таблица 4.64 – Количественный фазовый анализ

Фазовый состав		Количество, %					
		ЗШС ТЭЦ- 11 [198]	ЗШС ТЭЦ- 12	Составы			
Наименование	Формула			ЗШС ТЭЦ- 12, укреп- ленная порт- ландцемен- том	ЗШС Ново- Иркут. ТЭЦ (Шел. уч.), укрепленная портландцемен- том	ЗШС Ново-Иркут. ТЭЦ (Шел. уч.) с грунтом, укреп- ленная известью	ЗШС Усть- Илимской ТЭЦ, укрепленная портландцемен- том
1	2	3	4	5	6	7	8
Кварц	SiO ₂	35	50	48	29,58	20,95	16,17
Муллит 3:2	от 3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ до 2Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	15	17	13	25,94 %	–	17,50
Полевой шпат (альбит)	Na(AlSi ₃ O ₈)	10	13	15	–	17,10	–
Микроклин мак- симум	K[AlSi ₃ O ₈]		–	–	–	6,06	12,78
Силлиманит	(Al ₂ O ₃)(SiO ₂)	–	–	–	23,91 %	-	3,94
Кальцит	CaCO ₃	–	5	6	7,48 %	3,16	24,39
Анортит	Ca[Al ₂ Si ₂ O ₈]	–	–	–	9,75 %	3,78	–
Гетит	FeO(OH)	–	5	–	–	–	–
Маггемит	Fe ₂ O ₃	–	8	18	–	–	1,56
Волластонит 2М	Ca ₃ (Si ₃ O ₉)	–	–	–	3,34 %	4,32	–
Санидин NaO,1	K(AlSi ₃)O ₈	–	–	–	–	6,56	–

Окончание таблицы 4.64

1	2	3	4	5	6	7	8
Каолинит-1А(БИШ)	$\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$	—	—	—	—	2,37	—
ИЛЛИТ2М1	$(\text{K}_{0.75}(\text{H}_3\text{O})_{0.25})\text{Al}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}((\text{H}_2\text{O})_{0.75}(\text{OH})_{0.25})_2$	—	—	—	—	30,50	—
Нордстрандит	$\text{Al}(\text{OH})_3$	—	—	—	—	3,62	—
Периклаз	MgO	—	—	—	—	1,59	—
Витерит	BaCO_3	—	—	—	—	—	10,78
Доломит	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	—	—	—	—	—	2,20
Анортит	$\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$	—	—	—	—	—	10,67
Стеклофаза		50	—	—	—	—	—



Рисунок 4.45 – Испытание образцов на морозостойкость (фото автора [221])

Результаты рентгенофазового анализа

По результатам рентгенофазового анализа определен минералогический состав отдельных составов укрепленных материалов (таблица 4.64).

Дифракционная картина показана на рисунках 4.46–4.50.

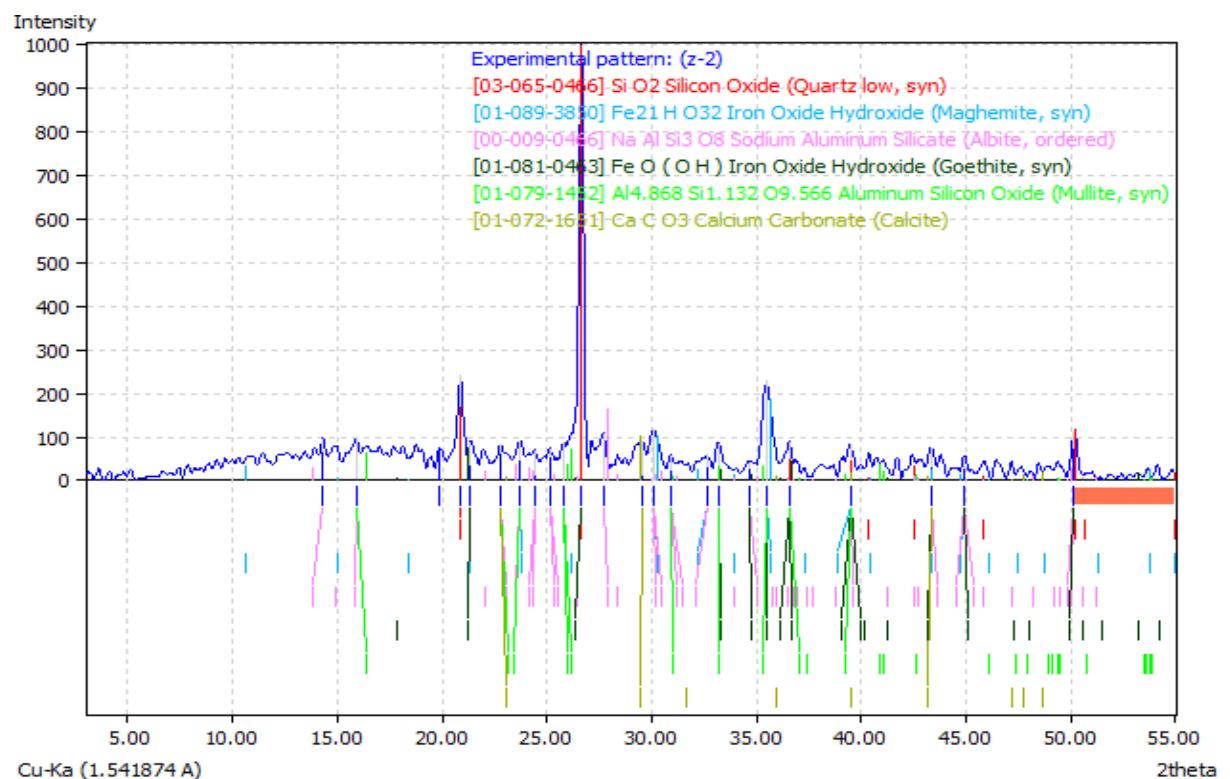


Рисунок 4.46 – ТЭЦ-12. Рентгенограмма золошлаковой смеси (рисунок автора)

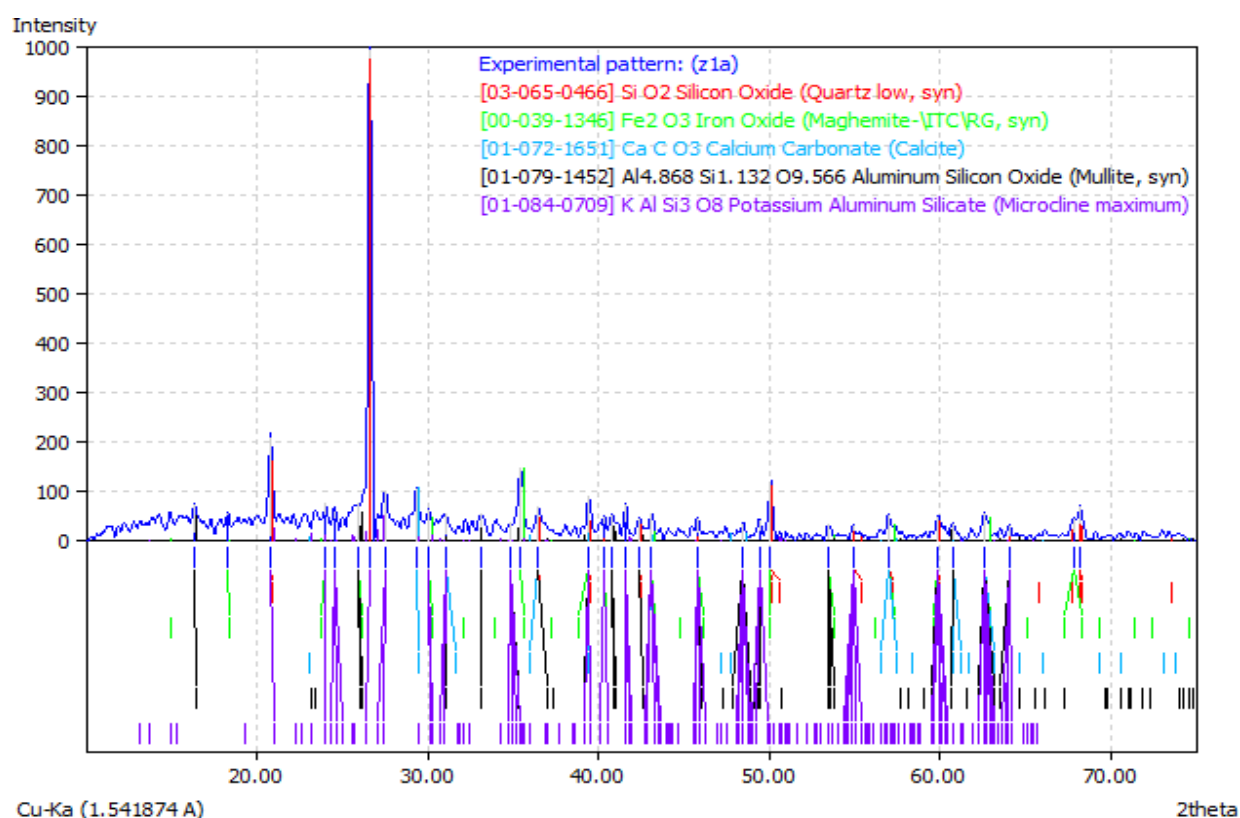


Рисунок 4.47 – ТЭЦ-12. Рентгенограмма золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом (рисунок автора)

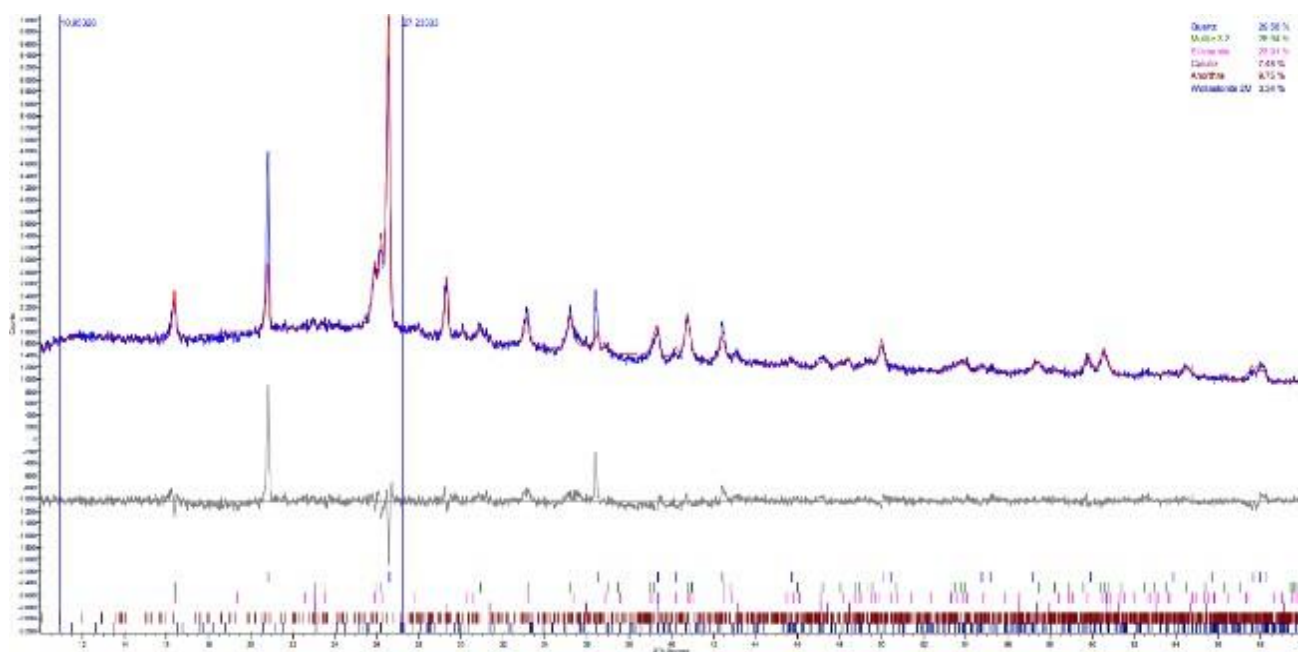


Рисунок 4.48 – Ново-Иркутская ТЭЦ. Рентгенограмма золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом (рисунок автора)

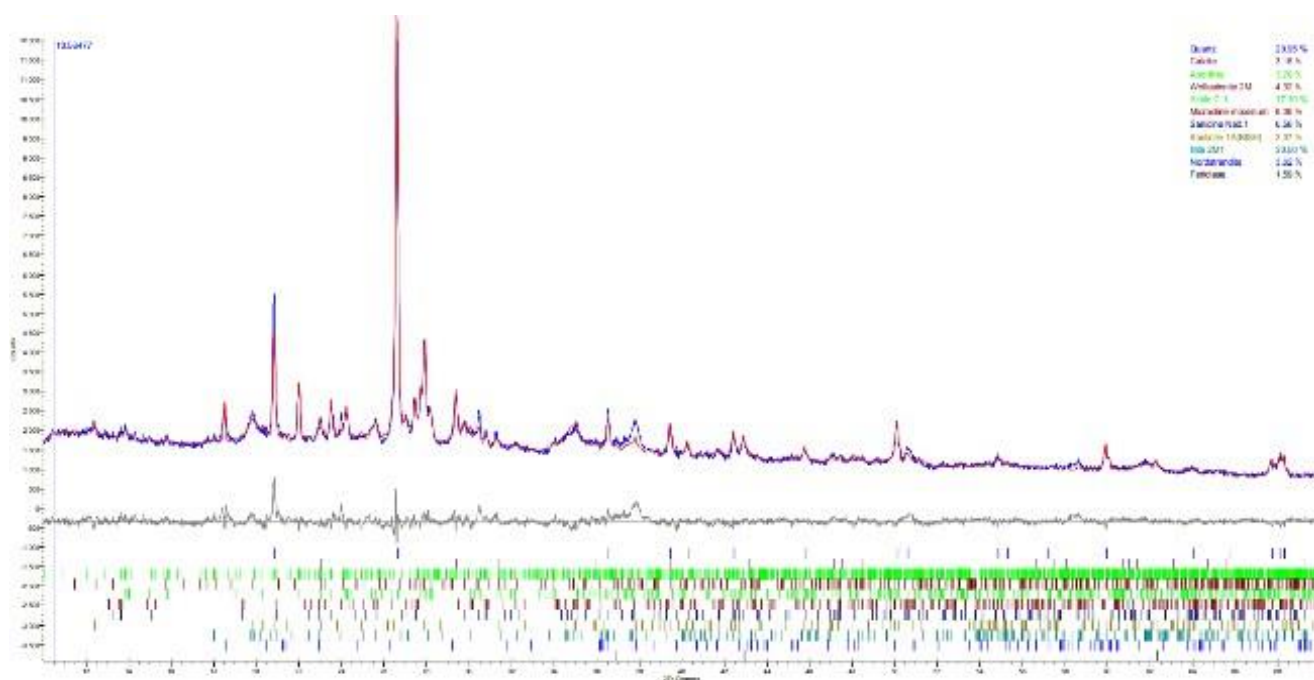


Рисунок 4.49 – Ново-Иркутская ТЭЦ. Рентгенограмма золошлаковой смеси, укрепленной известью (рисунок автора)

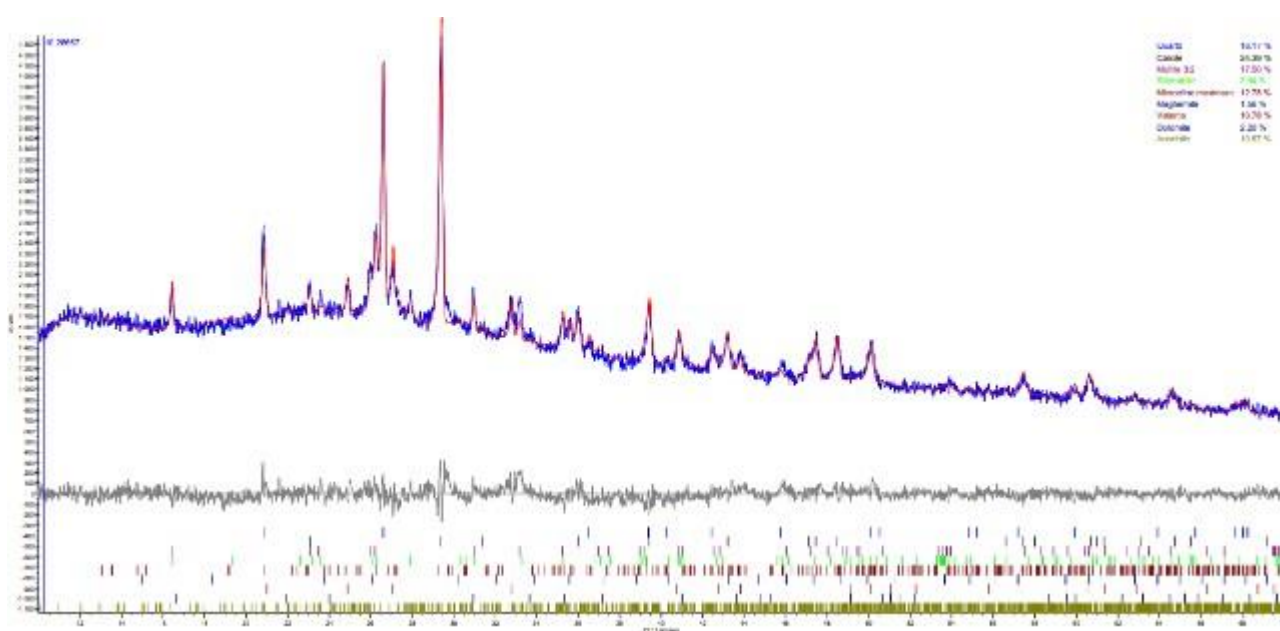


Рисунок 4.50 – Усть-Илимская ТЭЦ. Рентгенограмма золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом (рисунок автора)

Данные рентгенографии показывают, что интенсивности кристаллических фаз очень низкие. Основным минералом, присутствующим в золошлаковых сме-

сях исследуемых проб, является кварц. Другие фазы включают муллит и полевой шпат.

Несмотря на высокое содержание оксидов алюминия и кремния, глинистых минералов в золошлаковых смесях нет. Это объясняет отсутствие пластичности и низкие значения относительной деформации морозного пучения.

4.4. Результаты применения микроволнового излучения для сокращения сроков подбора составов укрепленных грунтов

Для исследования использованы следующие материалы и грунты:

- портландцемент;
- супесь песчанистая (Г-22);
- суглинок легкий песчанистый (Г-6);
- песок средней крупности (Г-19/2);
- золошлаковые смеси.

Для приготовления смеси укрепленного грунта в сухой грунт добавлялось неорганическое вяжущее, после тщательного перемешивания добавлялась вода для обеспечения влажности смеси, соответствующей значению оптимальной влажности, и опять проводилось перемешивание.

Изготовление образцов-цилиндров осуществлено путем прессования до достижения значений максимальной плотности при оптимальной влажности. Высота и диаметр образцов составили 70,4 мм.

Твердение образцов осуществлено двумя параллельными способами:

- 1) образцы выдерживались в нормальных условиях твердения при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха 95 ± 5 %;
- 2) образцы обрабатывались микроволновым излучением, для этого использована обычная микроволновая печь (частота электромагнитного излучения в печи составляет 2,45 ГГц).

Второй способ демонстрирует рисунок 4.51.

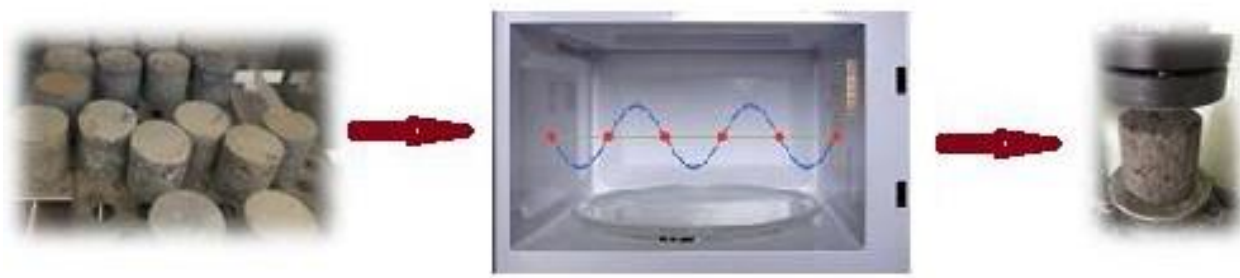


**Рисунок 4.51 – Испытание образцов укрепленного грунта
(рисунок автора)**

Для анализа результатов набора прочности в нормальных условиях и в условиях обработки микроволновым излучением использована качественная характеристика укрепленного грунта – прочность на сжатие образцов в сухом и водонасыщенном состоянии.

Определение прочности на сжатие проведено на гидравлическом прессе. Образцы нагружались до разрушения при постоянной скорости нарастания нагрузки 0,6 МПа/с.

В таблице 4.65 приведены результаты определения прочности на сжатие грунтов, укрепленных различными неорганическими вяжущими материалами, после обработки микроволновым излучением и после твердения в нормальных условиях.

Прочность на сжатие образцов грунта, укрепленного неорганическими вяжущими, после обработки их микроволновым излучением близка к прочности на сжатие в сухом состоянии в проектном возрасте, определенной после нормальных условий твердения. Коэффициент корреляции Пирсона составил $r_{XY} = 0,84$, что свидетельствует о сильной положительной связи.

Путем оптимизации параметров микроволнового излучения и времени обработки в зависимости от влажности, содержания крупных частиц и размера образца, можно обеспечить лучшую сходимость результатов твердения при обработке микроволновым излучением и при твердении в нормальных условиях.

Обработка образцов укрепленного грунта микроволновым излучением обеспечивает набор прочности в течение одного часа.

Таблица 4.65 – Результаты определения прочности на сжатие грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, после обработки микроволновым излучением

Наименование грунта	Вяжущее	Содержание вяжущего, %	Предел прочности на сжатие после обработки образцов микроволновым излучением, МПа	Предел прочности на сжатие в соответствии с действующей нормативно-технической документацией, МПа		
				В возрасте 28 сут.		В возрасте 90 сут.
				В сухом состоянии	В водонасыщенном состоянии	В водонасыщенном состоянии
Супесь	Известково-зольное	10	0,47	1,97	1,28	–
Суглинок	Известково-зольное	20	2,21	2,95	–	3,5
Суглинок	Известь	6	4,06	3,90	2,71	3,89
Супесь	Цемент	6	3,26	4,76	3,85	–
Песок средней крупности	Цементозольное	8	0,70	2,12	–	–
Суглинок	Цемент	4	4,69	9,05	4,58	–

Мощное микроволновое излучение способствует быстрому нагреву, разрушению образца укрепленного грунта и снижению точности и достоверности полученных результатов. Поэтому при обработке образцов укрепленного грунта микроволновым излучением важно учитывать влажность смеси и увеличение температуры образцов.

Использование микроволнового излучения для подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, позволяет значительно сократить сроки и трудоемкость работ по подбору составов укрепленных грунтов в строительных лабораториях.

4.5. Результаты определения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами в лабораторных условиях

Определение модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, проведено на образцах 11 различных составов (таблица 4.66, рисунок 4.52, Приложение Б).

Таблица 4.66 – Сводная таблица результатов определения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами

Наименование грунта	Вяжущее	Содержание вяжущего, %	Прочность на сжатие, МПа	Модуль упруго- сти E, МПа
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Гравийный грунт с добав- лением зо- лошлаковой смеси	Портландцемент	6	5,58	1466
			7,6	1500
			5,64	1555
			7,57	1416
			6,35	1461
			6,14	1625
			6,65	1400
			6,81	1600
			6,58	1400
Золошлаковая смесь (песок пылеватый)	Портландцемент	6	0,99	666
			0,81	500
			0,77	500
			0,62	500
			0,96	666
Золошлаковая смесь (песок средней круп- ности)	Портландцемент	7	3,77	1196
			2,68	1200
			2,31	1196
Суглинок	Портландцемент	4	1,29	1000
			1,21	1000
			2	1000
			1,42	1000

Окончание таблицы 4.66

1	2	3	4	5
Супесь	Портландцемент	6	2,1	1000
			2,4	743
Песок средней крупности	Портландцемент	6	4,27	1200
			3,85	1200
			4,57	1327
			4,17	1429
			3,92	1473
			3,77	1473
Супесь	Известь	6	0,11	100
			0,27	100
			0,21	100
Супесь	Известь	7	3,86	1333
			3,37	1200
Суглинок	Известь	6	3,28	775
			4,26	1300
			4,12	1175
			4,79	1233
			4,03	1360
			4,38	1429
			4,03	1529
			4,11	1617
			3,72	1289
			4,76	1167
Золошлаковая смесь (песок средней крупности)	Известь	7	4,01	1428
			4,39	1400
			4,28	1428
			5,69	1480
			5,56	2000
			5,07	1778
			5,39	1684
Золошлаковая смесь (песок средней крупности)	Известь	6	4,22	1000
			3,1	1200
			3,82	1168
			3,71	1122

Из графиков лабораторных испытаний (рисунки 4.53–4.60) видно, что линейная зависимость закона Гука справедлива при нагружении до относительно небольших нагрузок. Однако даже при разгрузке в грунтах возникают пластические деформации. При значительных нагрузках деформации нелинейно зависят от напряжений.



**Рисунок 4.52 – Определение модуля упругости в лабораторных условиях
(фото автора [220])**

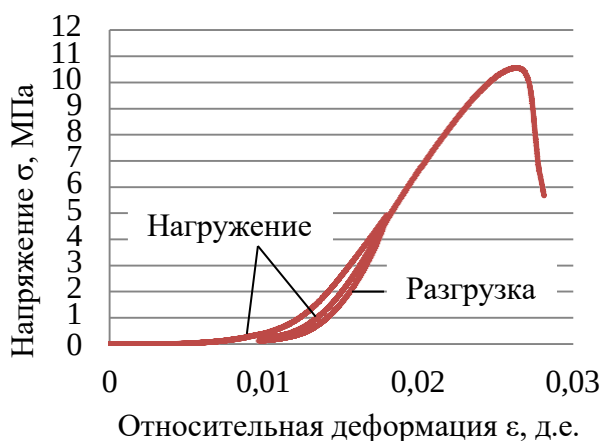


Рисунок 4.53 – Определение модуля упругости суглинка, укрепленного портландцементом (рисунок автора)

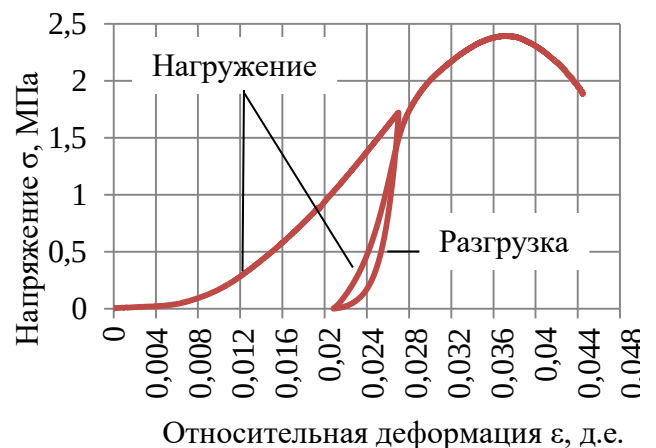


**Рисунок 4.54 – Определение модуля упругости супеси, укрепленной портландцементом 6 %
(рисунок автора)**



Рисунок 4.55 – Определение модуля упругости песка средней крупности, укрепленного портландцементом 6 %
(рисунок автора)



Рисунок 4.56 – Определение модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом 6 %
(рисунок автора)

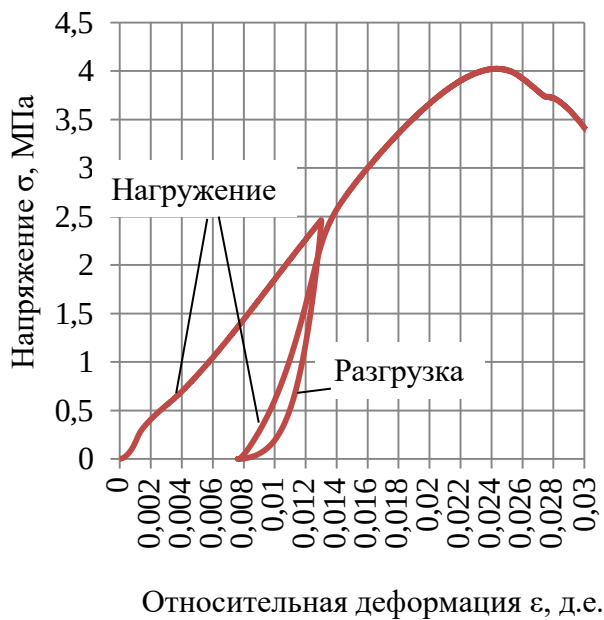


Рисунок 4.57 – Определение модуля упругости суглинка, укрепленного известью 6 %
(рисунок автора)

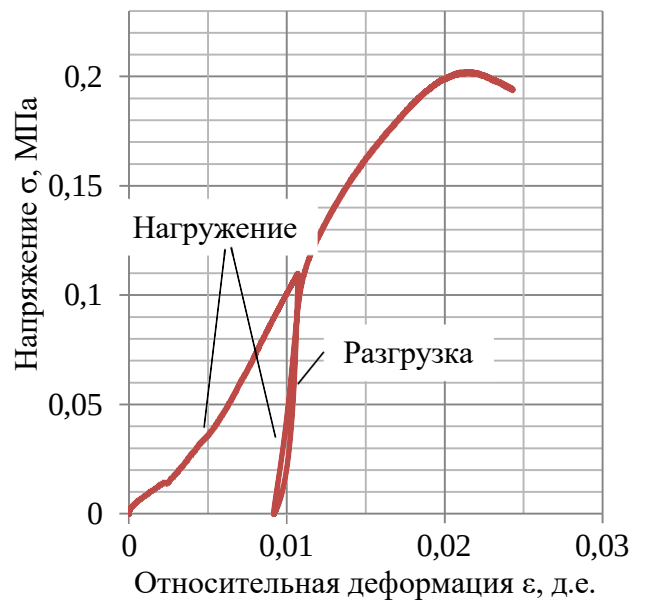


Рисунок 4.58 – Определение модуля упругости супеси, укрепленного известью 7 %
(рисунок автора)

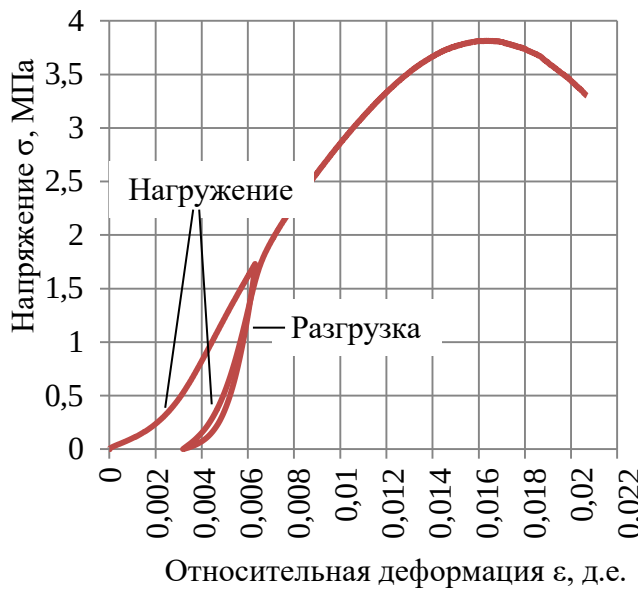


Рисунок 4.59 – Определение модуля упругости золотшляковой смеси, укрепленной известью 6 % (рисунок автора)

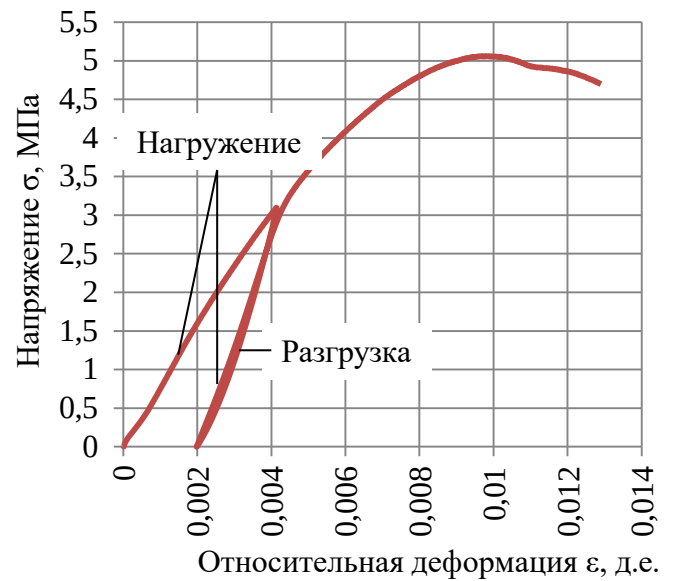


Рисунок 4.60 – Определение модуля упругости золотшляковой смеси, укрепленной известью 7 % (рисунок автора)

На основе полученных результатов построена регрессионная модель зависимости модуля упругости от прочности на сжатие для грунтов, укрепленных портландцементом (рисунок 4.61).

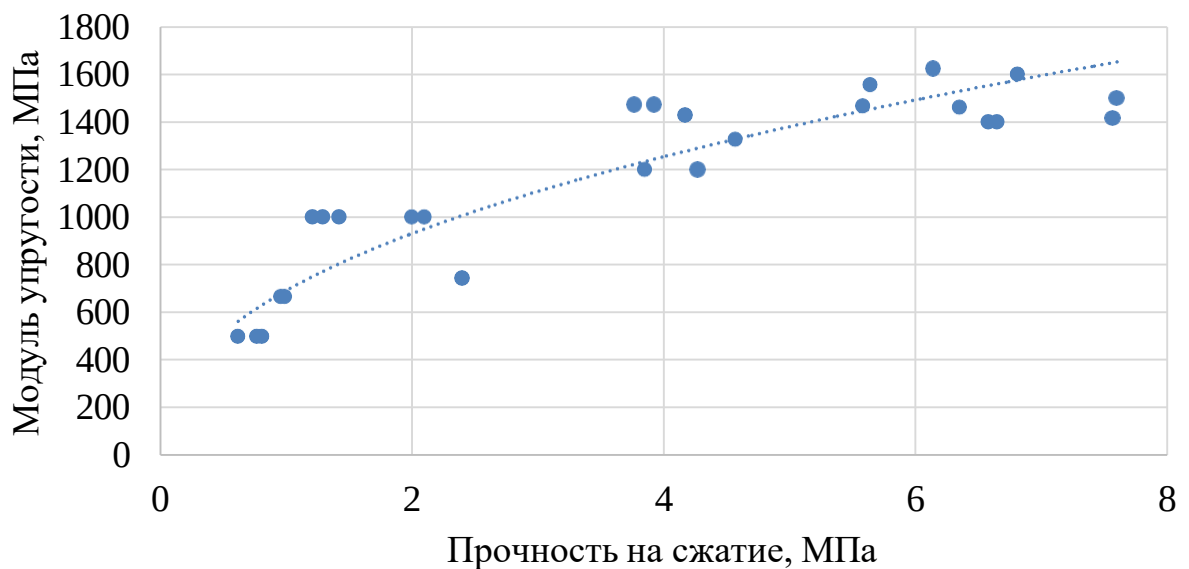


Рисунок 4.61 – График зависимости модуля упругости от прочности на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом (рисунок автора)

$$E = 691,57R_{сж}^{0,4292}, \quad (4.5)$$

где 691,57 и 4292 – параметры регрессии;

$R_{сж}$ – прочность на сжатие, МПа.

Коэффициент детерминации R^2 составил 0,85.

Зависимость модуля упругости от прочности на сжатие для грунтов, укрепленных известью, приведена на рисунке 4.62.

На основе полученных результатов построена регрессионная модель модуля упругости от прочности на сжатие грунтов, укрепленных известью

$$E = 429,7R_{сж}^{0,7805}, \quad (4.6)$$

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

$R_{сж}$ – прочность на сжатие, МПа.

Коэффициент детерминации R^2 составил 0,96.

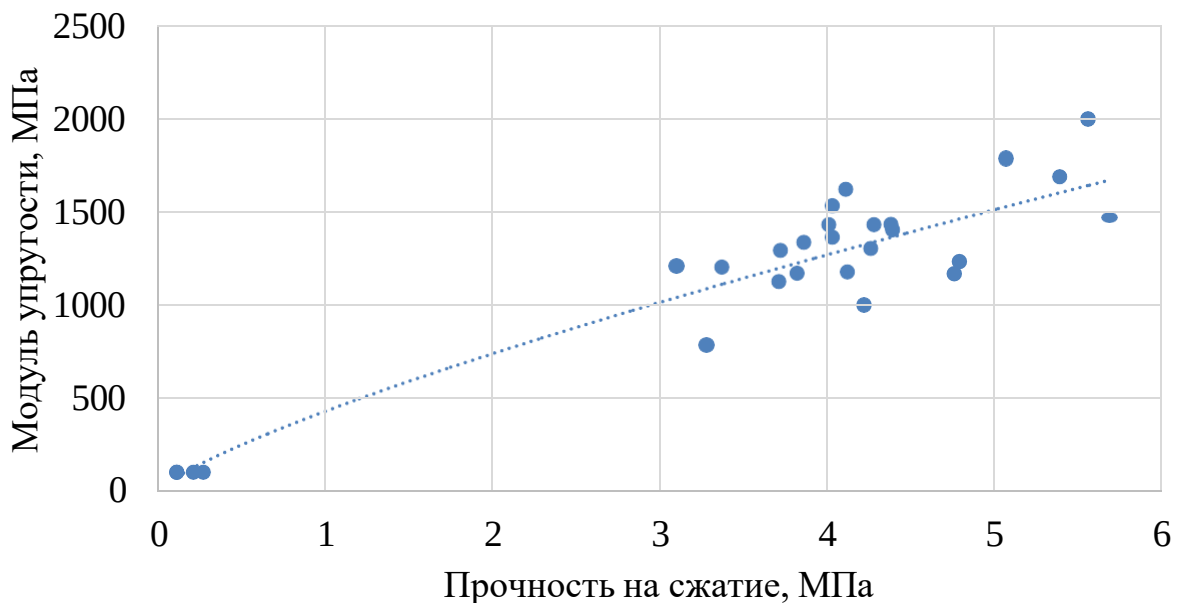


Рисунок 4.62 – График зависимости модуля упругости от прочности на сжатие грунтов, укрепленных известью (рисунок автора)

По результатам проведенных исследований определены рекомендуемые расчетные значения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами E_p , для проектирования конструкций автомобильных дорог (таблица 4.67).

Таблица 4.67 – 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	Портланд-цемент	M60	1340	0,5	670
ЗШС (песок средней крупности)	Известь	M40	1380	0,5	690
ЗШС (песок средней крупности)	Портланд-цемент	M20	1200	0,5	600
ЗШС (песок пылеватый)	Портланд-цемент	M10	600	0,5	300

Предлагаемые расчетные значения модуля упругости золошлаковых смесей, укрепленных портландцементом и известью, и зологрунтовых смесей позволят повысить надежность проектных решений автомобильных дорог, а также расширят возможности применения золошлаковых смесей ТЭЦ в автомобильных дорогах.

4.6. Результаты моделирования значений прочности на сжатие укрепленных материалов во времени

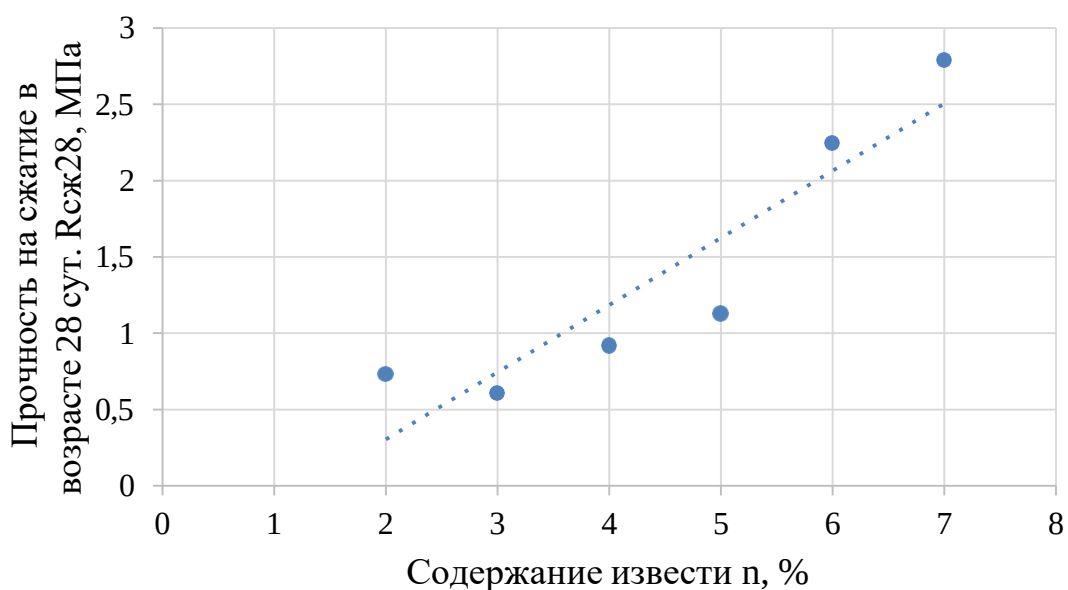


Рисунок 4.63 – График зависимости прочности на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной известью, от содержания извести (рисунок автора)

Результаты определения прочности на сжатие и график зависимости прочности на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной известью, от содержания извести приведен на рисунке 4.63.

На основе полученных результатов построена регрессионная модель прочности на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной известью, от содержания извести в возрасте 28 сут.

$$R_{сж28} = 0,441n - 0,578, \quad (4.7)$$

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

n – содержание извести, %.

Коэффициент детерминации R^2 составил 0,84.

График зависимости прочности на сжатие ЗШС в зависимости от содержания портландцемента приведен на рисунке 4.64.

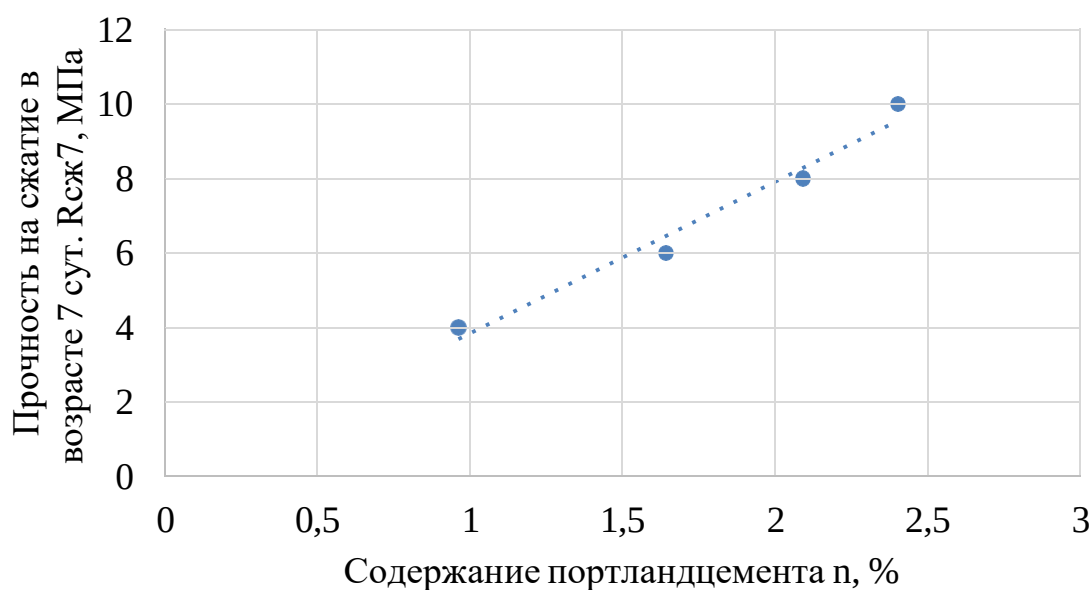


Рисунок 4.64 – График зависимости прочности на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом, от содержания портландцемента (рисунок автора)

На основе полученных результатов построена регрессионная модель прочности на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом, от содержания портландцемента в возрасте 7 сут.

$$R_{сж7} = 4,069n - 0,212, \quad (4.8)$$

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

n – содержание портландцемента, %.

Коэффициент детерминации R^2 составил 0,97.

Учитывая огромное количество факторов, влияющих на процесс структурообразования в укрепленном материале (минералогический состав, гранулометрический состав и т. д.), прогнозирование свойств укрепленных золошлаковых смесей целесообразно осуществлять путем разработки математических моделей для каждого отдельно взятого золоотвала.

4.7. Предложения по актуализации методов ГОСТ 23558-94 и ГОСТ Р 70452-2022

Рекомендуемые значения начального ориентировочного количества вяжущего в смеси назначаются в зависимости от вида грунта, физико-механических характеристик грунта, вида вяжущего материала в соответствии с таблицей 4.68.

Таблица 4.68 – Рекомендуемое ориентировочное содержание вяжущих материалов в смесях

Грунты	Дозировка вяжущего, % от массы сухого грунта		
	Портландцемент	Известь	
		I и II сорт	III сорт, известьсодержащие отходы
1	2	3	4
Крупнообломочные	5–8	–	–
Песчаные	5–8	–	–
Супеси легкие	4–8	4–7	5–8
Супеси тяжелые пылеватые; суглинки легкие и легкие пылеватые с числом пластичности I_p не более 12	4–10	4–6	5–8
Суглинки тяжелые, тяжелые пылеватые с числом пластичности I_p не более 12	8–14	4–6	5–8

Окончание таблицы 4.68

1	2	3	4
Глины легкие песчанистые и пылеватые с числом пластичности менее 22	10–14	4–7	5–8
Золошлаковые смеси ТЭЦ	4–8	4–6	6–8

Следует учитывать, что при наличии в грунтах гумусовых веществ, при pH менее 5,5, необходимо либо увеличивать количество портландцемента, либо вводить добавки.

Изготовление образцов укрепленного грунта

Согласно ГОСТ 23558-94 и ГОСТ Р 70452-2022 образцы изготавливаются на приборе стандартного уплотнения СОЮЗДОРНИИ и уплотнителе Проктора. Для снижения большой трудоемкости работ, изготовление образцов возможно с использованием статической нагрузки (прессованием) при условии достижения плотности образцов, соответствующей максимальной плотности, которая определяется на приборе стандартного уплотнения СОЮЗДОРНИИ и уплотнителе Проктора. Ориентировочное давление пресса – 15–30 МПа.

Определение прочности на сжатие в неводонасыщенном состоянии

Определение значений прочности позволит:

- оценивать работу конструкции автомобильных дорог при отсутствии увлажнения,
- оценивать возможность использования укрепленных грунтов с низкими значениями водостойкости и устройством гидроизоляции.

Кроме того, при подборе состава испытание образцов в промежуточном возрасте только подвергнутых полному или капиллярному водонасыщению, увеличивает сроки подбора состава смеси и трудоемкость работ.

Оценка воздействия воды

Для оценки долговечности необходимо определение прочности на сжатие после длительного водонасыщения.

Попеременное увлажнение и высушивание образцов позволяет оценивать долговечность материалов от воздействия воды. С учетом результатов исследова-

ния [325] можно предложить следующий метод:

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

Ускоренный метод набора прочности образцов, укрепленных портландцементом, на основе использования микроволнового излучения

В общем случае метод подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, с использованием микроволнового излучения сводится к следующему порядку:

- 1) назначают 3–4 состава с различным содержанием вяжущих материалов;
- 2) изготавливают образцы укрепленного грунта;
- 3) обрабатывают образцы укрепленного грунта микроволновым излучением 2,4 ГГц с попеременным охлаждением образцов (режим обработки необходимо уточнять по мере накопления статистических данных);
- 4) определяют прочность на сжатие;
- 5) выбирают состав с наибольшим значением прочности на сжатие;
- 6) изготавливают образцы с выбранным составом в количестве, необходимом для определения всех физико-механических характеристик;
- 7) выдерживают образцы в нормальных условиях до достижения ими проектного возраста;
- 8) проводят лабораторные испытания образцов для определения всех требуемых физико-механических характеристик.

Прогнозирование прочностных характеристик

Учитывая огромное количество факторов, влияющих на процесс структурообразования в укрепленном материале: минералогический состав, гранулометрический состав и т. д., прогнозирование свойств укрепленных золошлаковых смесей, целесообразно осуществлять путем разработки математических моделей для каждого отдельно взятого золоотвала.

В качестве примера можно использовать:

- регрессионная модель прочности на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной известью, от содержания извести в возрасте 28 сут. (формула 4.7)

$$R_{сж28} = 0,441n - 0,578,$$

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

n – содержание извести, %.

- регрессионная модель прочности на сжатие золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом, от содержания портландцемента в возрасте 7 сут. (формула 4.8)

$$R_{сж7} = 4,069n - 0,212,$$

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

n – содержание портландцемента, %.

- зависимость модуля упругости от прочности на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом (формула 4.5)

$$E = 691,57R_{сж}^{0,4292},$$

где: 691,57 и 4292 – параметры регрессии;

$R_{сж}$ – прочность на сжатие, МПа.

Зависимость модуля упругости от прочности на сжатие для грунтов, укрепленных известью (формула 4.6)

$$E = 429,7R_{сж}^{0,7805},$$

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

$R_{сж}$ – прочность на сжатие, МПа.

4.8. Результаты определения коэффициента запаса на уплотнение золошлаковых смесей, укрепленных неорганическими вяжущими

По результатам лабораторных испытаний установлено, что для достижения толщины слоя золошлаковой смеси ТЭЦ, укрепленной портландцементом, 15 см необходимо осыпать слой толщиной 23 см. Следовательно, значение коэффициента запаса на уплотнение составило $K_{\text{зап}} = 1,5$.

Полученное рекомендуемое значение коэффициента запаса на уплотнение золошлаковой смеси ТЭЦ, укрепленной портландцементом, позволит повысить эффективность работ по распределению и уплотнению слоев автомобильных дорог, а также определять количество золошлаковой смеси, которое необходимо транспортировать для возведения слоев.

4.9. Результаты расчета экспериментальных конструкций с применением грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, и золошлаковых смесей ТЭЦ

Разработанные типовые конструкции дорожных одежд приведены в Приложении В.

Для оценки эффективности применения конструкций дорожных одежд с золошлаковыми смесями ТЭЦ используется значение уменьшения общей толщины конструкции дорожной одежды. Сопоставление общей толщины конструкций с применением и без применения ЗШС приведено в таблице 4.69 [224].

Таблица 4.69 – Оценка эффективности применения дорожных одежд со слоями из ЗШС ТЭЦ по показателю «Толщина конструкции» [224]

Техническая категория автомобильной дороги	Тип дорожной одежды	№ конструкции	Общая толщина для схемы увлажнения		Снижение толщины конструкции для схемы увлажнения, %	
			1,2	3	1,2	3
1	2	3	4	5	6	7
V	Переходный	1	42	43	11,9	11,6

Продолжение таблицы 4.69

1	2	3	4	5	6	7
V	Переходный	2	37	38	–	–
		3	40	42	7,5	9,5
	Облегченный	4	38	38	7,9	7,9
		5	35	35	–	–
		6	36	37	2,8	5,4
IV	Переходный	1	56	56	48,2	48,2
		2	29	29	–	–
		3	33	33	12,1	12,1
	Переходный	4	60	60	46,7	46,7
		5	32	32	–	–
		6	37	37	13,5	13,5
	Переходный	7	50	50	14,0	14,0
		8	43	43	–	–
		9	46	46	6,5	6,5
	Облегченный	10	74	74	27,0	27,0
		11	54	54	–	–
		12	58	58	6,9	6,9
IV	Облегченный	13	66	66	18,2	18,2
		14	54	54	–	–
		15	57	57	5,3	5,3
	Облегченный	16	55	55	41,8	41,8
		17	32	32	–	–
		18	35	35	8,6	8,6
	Облегченный	19	23	23	21,7	21,7
		20	18	18	–	–
		21	18	18	0,0	0,0
	Облегченный	22	56	56	42,9	42,9
		23	32	32	–	–
		24	36	36	11,1	11,1
	Облегченный	25	25	25	28,0	28,0
		26	18	18	–	–
		27	21	21	14,3	14,3
	Капитальный	28	78	81	28,2	29,6
		29	56	57	–	–
		30	69	73	18,8	21,9
	Капитальный	31	67	69	10,4	8,7
		32	60	63	–	–
		33	68	62	11,8	-1,6

Окончание таблицы 4.69

1	2	3	4	5	6	7
IV	Облегченный	34	52	52	48,1	48,1
		25	27	27	—	—
		36	36	36	25,0	25,0
III	Капитальный	1	85	87	11,8	10,3
		2	75	78	—	—
		3	86	89	12,8	12,4
	Капитальный	4	81	85	12,3	12,9
		5	71	74	—	—
		6	76	76	6,6	2,6
	Капитальный	7	70	74	5/14/13	14/17
		8	65/56/57	60/57	—	—
		9	67	69	2/11/10	9/12
	Облегченный	10	63/66	66	11/14	16,7
		11	52	55	—	—
		12	57/61	59	5/9	6,8
	Капитальный	13	76	78	7,9	9,0
		14	70	71	—	—
		15	82	83	14,6	14,5
II	Капитальный	1	81	83	4,9	6,0
		2	77	78	—	—
		3	77	80	0,0	2,5
	Капитальный	4	75	76	9,3	7,9
		5	68	70	—	—
		6	82	83	17,1	15,7
	Капитальный	7	59	59	32,2	32,2
		8	40	40	—	—
		9	47	47	14,9	14,9

Как видно из таблицы 4.69, снижение общей толщины дорожной одежды одежд со слоями из золошлаковых смесей ТЭЦ по сравнению со слоями из традиционных материалов составило до 48 %.

Выводы

1. Направления использования золошлаковых отходов определяются их химическими и физико-механическими свойствами. Кислые ЗШС ТЭЦ Иркутской области в пределах выполненных измерений относительно однородны по химическому составу. По физико-механическим характеристикам, с точки зрения применения в автомобильных дорогах, строительно-технические свойства золошлаковых смесей примерно одинаковы в пределах золоотвалов.

2. Золошлаковые смеси возможно применять для возведения слоев земляного полотна практически без ограничений. Минеральные частицы ЗШС обладают значительной хрупкостью, что приводит к существенному изменению гранулометрического состава при уплотнении. Для количественной оценки степени дробления частиц при уплотнении введено понятие степени измельчения, которая определяется как отношение средневзвешенных величин среднего размера частиц до и после уплотнения.

3. Золошлаковые смеси имеют значения угла внутреннего трения $13\text{--}23^\circ$, что необходимо учитывать при производстве работ по строительству слоев автомобильных дорог. Сниженные значения угла внутреннего трения и окатанная форма частиц обуславливают при повышенной влажности сниженное количество контактов зацепления, что приводит к выдавливанию золошлаковой смеси из-под вальца катка при уплотнении. В результате увеличивается ширина слоя и уменьшается его толщина.

4. Усовершенствован метод подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, который позволяет:

- снижать трудоемкость работ по изготовлению образцов;
- получать образцы значительно лучшего качества, чем при изготовлении образцов с использованием ударной нагрузки.

5. Подбор составов грунтов, укрепленных известью, на основе значений водородного показателя (рН) значительно упрощает процедуру и снижает трудоемкость работ.

6. Применение золошлаковых смесей в составах укрепленных грунтов позволяет повысить марки по морозостойкости и прочности. При этом увеличение значений морозостойкости происходит после достижения образцов укрепленного грунта проектного возраста.

По результатам выполненной работы разработаны эффективные составы зологрунтовых смесей на основе золошлаковой смеси Ново-Иркутской ТЭЦ (Шелеховский участок), крупнообломочных грунтов и портландцемента. Разработанные составы обладают высокими марками по прочности и морозостойкости и могут использоваться для возведения автомобильных дорог, в том числе в условиях континентального климата.

Зологрунтовые композиции обладают лучшими прочностными характеристиками по сравнению со золошлаковой смесью, укрепленной портландцементом, что объясняется наличием в составах обломочной фракции (более 2 мм).

7. Обработка образцов укрепленного грунта микроволновым излучением обеспечивает набор прочности в течение 1 час. Использование микроволнового излучения для подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, позволяет значительно сократить сроки и трудоемкость работ в строительных лабораториях.

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

9. 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.).

10. На основе выполненных исследований разработаны эмпирические модели, отражающие зависимость значений модуля упругости от значений прочности

на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом и известью. Также разработаны эмпирические модели прогнозирования прочности на сжатие в зависимости от содержания вяжущего.

11. Получено рекомендуемое значение коэффициента запаса на уплотнение золошлаковой смеси ТЭЦ, укрепленной портландцементом, которое позволит повышать эффективность работ по распределению и уплотнению слоев автомобильных дорог, а также определять количество золошлаковой смеси, которое необходимо транспортировать для возведения слоев.

12. Применение типовых конструкций дорожных одежд автомобильных дорог позволяет повысить эффективность применения золошлаковых отходов ТЭЦ. Такие конструкции применяются на участках автомобильных дорог с одинаковыми условиями проектирования и воздействия нагрузок от транспортных средств. Для оценки эффективности применения конструкций дорожных одежд с использованием золошлаковых материалов ТЭЦ разработаны типовые конструкции дорожных одежд с использованием золошлаковых и традиционных материалов.

13. Конструкции дорожных одежд разработаны в период производства работ по строительству опытно-экспериментальных конструкций с учетом требований действовавших нормативных документов.

14. Применение золошлаковых смесей ТЭЦ в основаниях дорожных одежд позволяет снизить общую толщину конструкции дорожной одежды до 48 % в сравнении с конструкциями из традиционных материалов. Экономическая целесообразность применения золошлаковых смесей в конструкциях дорожных одежд зависит от дальности транспортировки, категории автомобильной дороги, величины нагрузок от транспортных средств.

Глава 5. АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Строительство экспериментальных конструкций

5.1.1. Характеристика участка работ

В качестве объекта апробации выбраны автомобильные дороги, так как слои автомобильных дорог 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 результаты и разработанные составы в разных условиях работы и при разных воздействиях.

Строительство экспериментальных конструкций дорожных одежд проведено на участке автомобильной дороги «Егоровщина – Рязановщина» км 0+000 – км 1+000. Участок относится к IV технической категории (рисунок 5.1).

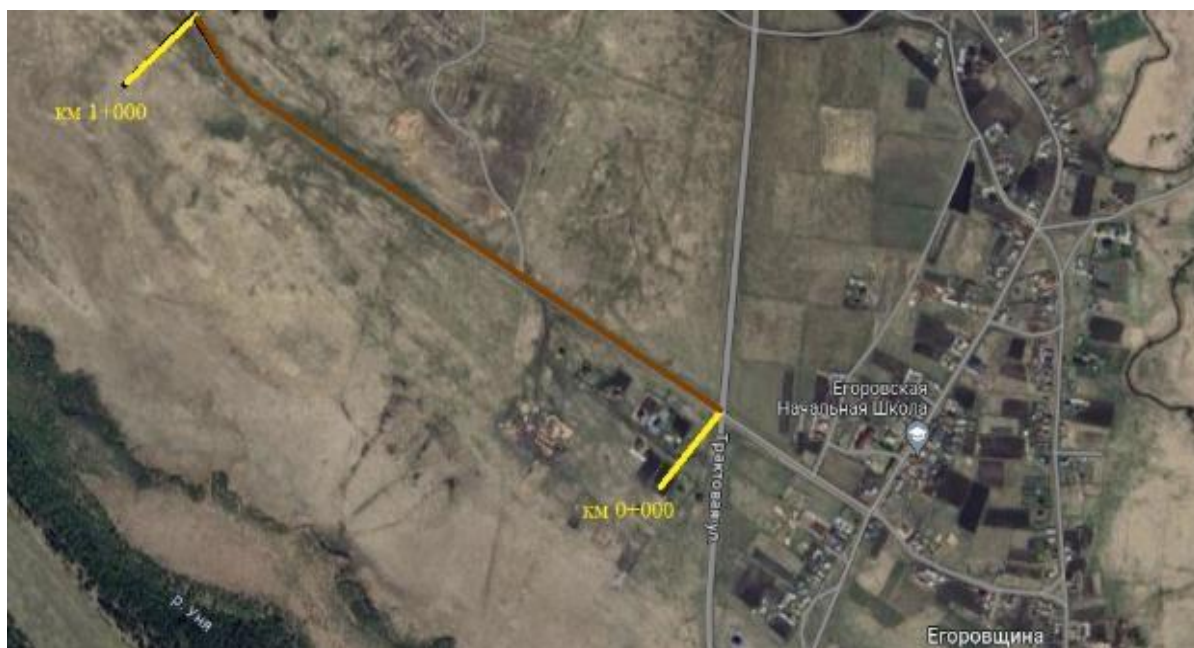


Рисунок 5.1 – Участок автомобильной дороги «Егоровщина – Рязановщина»
(рисунок автора)

Существующая дорожная одежда представлена гравийным грунтом с заполнителем суглинком твёрдым песчанистым лёгким. Материал дорожной одежды неоднороден, он содержит более 10 % органических примесей.

Результаты лабораторных испытаний материала дорожной одежды и грунта земляного полотна приведены в таблицах 5.1–5.3.

Таблица 5.1 – Материал дорожной одежды автомобильной дороги «Егоровщина – Рязановщина». Гранулометрический состав по ГОСТ 25100

Размер сит, мм	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Частные остатки, г	722,10	278,89	171,55	119,55	185,74	721,48	478,38	47,40
Частные остатки, %	20,15	7,78	4,79	3,34	5,18	20,14	13,35	1,32
Полные остатки, %	44,09	51,88	56,67	60,00	65,19	85,33	98,68	100,00
Полные проходы, %	55,91	48,12	43,33	40,00	34,81	14,67	1,32	0,00

Исходя из данных таблицы 6.1, грунт в соответствии с номенклатурой ГОСТ 25100-2020 классифицируется как крупнообломочный гравийный.

Таблица 5.2 – Материал дорожной одежды автомобильной дороги «Егоровщина – Рязановщина». Гранулометрический состав по ГОСТ 23558

Размер сит, мм	40	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14	0,005
Частные остатки, г	–	857,75	722,10	278,89	70,71	114,69	183,83	497,40	612,23	188,38	–
Частные остатки, %	0,00	24,33	20,48	7,91	2,01	3,25	5,21	14,11	17,36	5,34	–
Полные остатки, %	0,00	24,33	44,81	52,72	54,72	57,97	63,19	77,29	94,66	100,00	–
Полные проходы, %	100,00	75,67	55,19	47,28	45,28	42,03	36,81	22,71	5,34	0,00	–
ГОСТ 23558-94	–	–	до 10	25–40	45–65	60–80	70–85	75–90	80–95	85–100	–

**Таблица 5.3 – Материал дорожной одежды автомобильной дороги
«Егоровщина – Рязановщина». Физико-механические характеристики**

Наименование показателя	Един. изм.	Требования к испытываемому материалу		Результаты испытаний
		Наименование нормативно-техн. документации	Нормативное значение показателя	
Естественная влажность грунта	%	ГОСТ 5180-2015	не нормируется	4,13
Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	ГОСТ 25100-2020	–	56,67
Влажность на границе текучести	%	ГОСТ 5180-2015	–	27,02
Влажность на границе раскатывания	%	ГОСТ 5180-2015	–	18,32
Число пластичности	%	ГОСТ 25100-2020	$7 < I_p \leq 17$	8,7
Показатель текучести	д.е.	ГОСТ 25100-2020	$IL < 0$	–1,63
Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм), по массе	%	ГОСТ 25100-2020	≥ 40	–
Разновидность грунта	–	ГОСТ 25100-2020	–	крупнообломочный гравийный
Содержание частиц менее 0,005 мм, по массе	%	ГОСТ 23558-94	от 85 до 100	–
Максимальная плотность	г/см ³	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	2,25
Оптимальная влажность	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	9,57
Оптимальная влажность (с учётом крупных частиц)	%	ГОСТ 22733-2016	не нормируется	9,33
pH	–	ГОСТ 23558-94	не нормируется	8,55

Грунт, согласно требованиям ГОСТ 25100, классифицируется как гравийный, заполнитель – суглинок твёрдый песчанистый лёгкий.

До проведения работ по строительству экспериментальных конструкций дорожных одежд проведено измерение модуля упругости установкой динамического нагружения «ДИНА-3» (рисунки 5.2–5.3).



**Рисунок 5.2 – Автомобильная дорога «Егоровщина – Рязановщина»
Состояние до устройства опытно-экспериментальных конструкций
дорожных одежд (фото автора)**



**Рисунок 5.3 – Автомобильная дорога «Егоровщина – Рязановщина»
Измерение модуля упругости до устройства опытно-экспериментальных конструкций
дорожных одежд (фото автора)**

Результаты определения модуля упругости на поверхности приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Результаты определения модуля упругости на поверхности дорожной одежды до проведения опытно-экспериментальных работ

Местоположение	Прогиб, мм	Значение прочности, МПа
км 0+700	3,836	46,924
км 0+300	4,467	40,296

Графики стандартного уплотнения приведены на рисунках. 5.4–5.5.

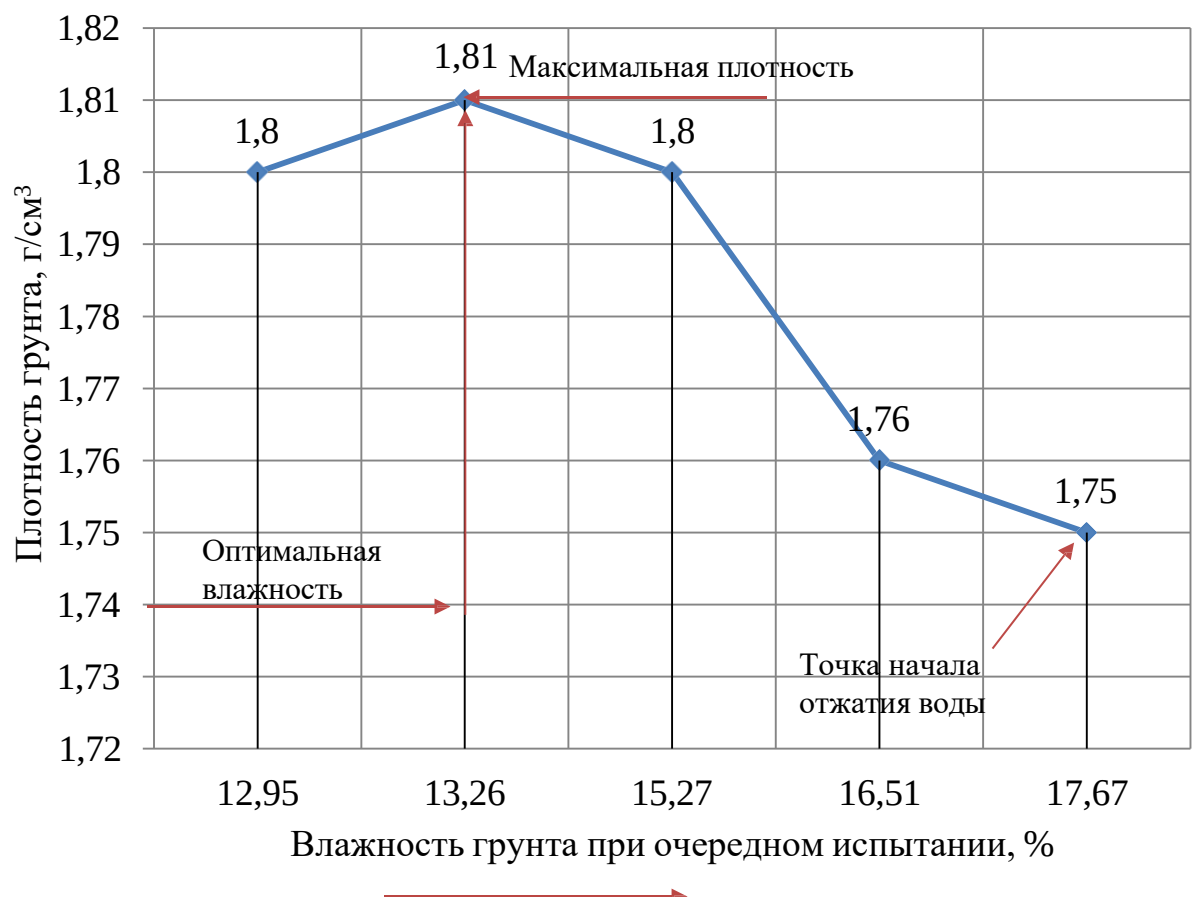


Рисунок 5.4 – График стандартного уплотнения. Состав 1
(график автора)

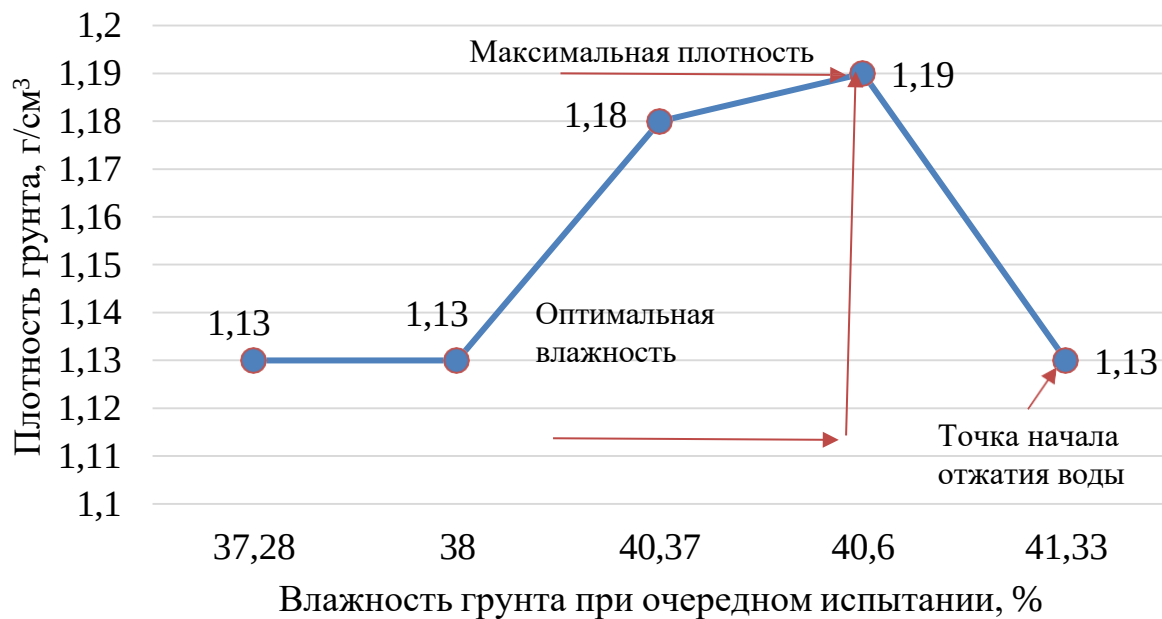


Рисунок 5.5 – График стандартного уплотнения. Состав 2
(график автора)

Для строительства опытно-экспериментальных конструкций дорожных одежд автомобильной дороги в лабораторных условиях подобраны составы грунтов, укрепленных портландцементом (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Составы укрепленного грунта

Наименование компонента	Рег. № пробы	Место отбора	Содержание компонента в смеси, %	
			Состав 1	Состав 2
Грунт	Г-25	а/д «Егоровщина – Рязановщина»	75,2	—
ЗШС	Г-16/1	Ново-Иркутская ТЭЦ (Шелеховский участок)	18,8	92
Портландцемент	ЦЕМ-2	АО «Ангарскцемент»	6	8
Вода	—	—	13,26 (от массы сухого грунта)	37,72 (от массы сухого грунта)

В лабораторных условиях определены физико-механические характеристики разработанных составов (таблица 5.6).

Таблица 5.6 – Физико-механические характеристики составов укрепленного грунта

Наименование показателя	Ед. изм.	Наименование нормативно-технической документации	Нормативное значение показателя	Результаты испытаний	
				Состав 1	Состав 2
1	2	3	4	5	6
Максимальная плотность	г/см ³	ГОСТ 22733-2016	—	1,83	1,19
Оптимальная влажность	%	ГОСТ 22733-2016	—	13,26	37,72
Прочность на сжатие в возрасте 7 сут (в водонасыщенном состоянии)	МПа	ГОСТ 23558-94	не менее 2,0	5,12	2,12
Прочность на сжатие в возрасте 28 сут (в водонасыщенном состоянии)	МПа	ГОСТ 23558-94	не менее 4,0	7,54	5,27
Прочность на сжатие в возрасте 28 сут (в сухом состоянии)	МПа	ГОСТ 23558-94	-	8,23	5,34
Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 сут (в водонасыщенном состоянии)	МПа	ГОСТ 23558-94	не менее 0,8	1,32	1,12
Марка по прочности	—	ГОСТ 23558-94	M40	M40	M40

Окончание таблицы 5.6

1	2	3	4	5	6
Водостойкость	—	—	не менее 0,6	0,92	0,99
Морозостой- кость: проч- ность на сжа- тие 25 циклов	МПа	ГОСТ 23558-94	не менее 3,0	5,05	4,24
Морозостой- кость: проч- ность на сжа- тие 50 циклов	МПа	ГОСТ 23558-94		3,34	3,43
Марка по мо- розостойкости	—	ГОСТ 23558-94	F25	F50	F50

По результатам лабораторных испытаний составы укрепленных грунтов соответствуют: марке по прочности М40, согласно требованиям п. 4.1.1 табл. 1 ГОСТ 23558-94; марке по морозостойкости F25, согласно требованиям п. 4.1.2 табл. 1 ГОСТ 23558-94.

5.1.2. Расчет экспериментальных конструкций

Расчет конструкций дорожных одежд участков автомобильных дорог выполнен с применением программного комплекса «Топоматик Robur – Дорожная одежда».

По результатам проектирования приняты варианты конструкций дорожных одежд, приведенные в таблице 5.7 [224, 229].

Таблица 5.7 – Варианты опытно-экспериментальных конструкций дорожных одежд автомобильной дороги «Егоровщина – Рязановщина» общей протяженностью 1000 м

Конструк- тивный элемент	Вариант 1		Вариант 2	
	<i>материал</i>	<i>толщина h, м</i>	<i>материал</i>	<i>толщина h, м</i>
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 (существующая дорожная одежда 80 % + золошлаковая смесь [техногенный грунт, песок пылеватый] 20 % + портландцемент 6 %)	0,20	золошлаковая смесь (техногенный грунт песок пылеватый) + портландцемент 8 % (от массы смеси грунтов)	0,20
Грунт земляного полотна	суглинок		суглинок	

Конструкции дорожных одежд приведены на рисунке 5.6.

Наименование конструкции и условия применения		ЧЕРТЕЖ	Наименование конструктивных слоев	Схема конструкции и толщина слоев, м	Расчетные характеристики слоев, МПа	Расчет по упругому прогибу, МПа	Расчет на сдвиг / изгиб
Вариант 1	Однослойное покрытие – Асфальтобетон плотный из горячей мелкозернистой смеси марки I тип Б по ГОСТ 9128–2009 толщиной 0,04 м	Присыпные обочины из ПГС Существующая дорожная одежда Галечниковый грунт с песчаным заполнителем (существующая ДО) 80% + золошлаковая смесь (техногенный грунт песок пылеватый) 20% + портландцемент 6% (от массы смеси грунтов) $h=0.20\text{м}$ Асфальтобетон плотный из горячей мелкозернистой смеси марки I тип Б по ГОСТ 9128–2009 $h=0.04\text{м}$	Асфальтобетон плотный из горячей мелкозернистой смеси марки I тип Б Галечниковый грунт с песчаным заполнителем (существующая ДО) 80% + золошлаковая смесь (техногенный грунт песок пылеватый) 20% + портландцемент 6% (от массы смеси грунтов) Существующая дорожная одежда		$E_{тр}=150$; $E_1=2400$ $E_2=700$ $E_0=43,92$ $\varphi=19^\circ$ $c=0.0097$	$K_n=0,70$; $K_{пр. мин}=0,90$; $E_{обш}=136,28$; $K_{пр. мин} \leq \frac{E_{обш}}{E_{тр}}$; $\frac{136,28}{150,0}=0,91$; $K_{пр} < \frac{E_{обш}}{E_{тр}}$; $0,90 < 0,91$	$K_{пр}=0,80$; $K_{пр. расч} = \frac{E_{тр. расч}}{E_{тр. наст}} = \frac{0,05163}{0,04258} = 1,21$; $0,80 < 1,21$; $K_{пр}=1,00$; $K_{пр} = \frac{R \cdot n}{S_r} = \frac{4,47}{2,051} = 2,18$; $1,00 < 2,18$
	Основа – галечниковый грунт с песчаным заполнителем (существующая ДО) 80% + золошлаковая смесь (техногенный грунт песок пылеватый) 20% + портландцемент 6% (от массы смеси грунтов) толщиной 0,20м						
Вариант 2	Однослойное покрытие – Асфальтобетон плотный из горячей мелкозернистой смеси марки I тип Б по ГОСТ 9128–2009 толщиной 0,04 м	Присыпные обочины из ПГС Существующая дорожная одежда Золошлаковая смесь (техногенный грунт песок пылеватый) +8% портландцемента $h=0.20\text{м}$ Асфальтобетон плотный из горячей мелкозернистой смеси марки I тип Б по ГОСТ 9128–2009 $h=0.04\text{м}$	Асфальтобетон плотный из горячей мелкозернистой смеси марки I тип Б Золошлаковая смесь (техногенный грунт песок пылеватый) +8% портландцемента Существующая дорожная одежда		$E_{тр}=150$; $E_1=2400$ $E_2=700$ $E_0=43,92$ $\varphi=19^\circ$ $c=0.0097$	$K_n=0,70$; $K_{пр. мин}=0,90$; $E_{обш}=136,28$; $K_{пр. мин} \leq \frac{E_{обш}}{E_{тр}}$; $\frac{136,28}{150,0}=0,91$; $K_{пр} < \frac{E_{обш}}{E_{тр}}$; $0,90 < 0,91$	$K_{пр}=0,80$; $K_{пр. расч} = \frac{E_{тр. расч}}{E_{тр. наст}} = \frac{0,05009}{0,04258} = 1,18$; $0,80 < 1,18$; $K_{пр}=1,00$; $K_{пр} = \frac{R \cdot n}{S_r} = \frac{4,47}{2,051} = 2,18$; $1,00 < 2,18$
	Основа – золошлаковая смесь (техногенный грунт песок пылеватый) +8% портландцемента толщиной 0,20м						

Рисунок 5.6 – Опытно-экспериментальные конструкции дорожных одежд
(рисунок автора [224])

5.1.3. Строительство экспериментальных конструкций

Для возведения слоев дорожной одежды использована золошлаковая смесь золоотвала Ново-Иркутской ТЭЦ (Шелеховский участок). Начало работ демонстрируют рисунки 5.7 и 5.8.



**Рисунок 5.7 – Золоотвал Шелеховского участка Ново-Иркутской ТЭЦ
(фото автора)**



**Рисунок 5.8 – Погрузка золошлаковой смеси. Шелеховский участок
Ново-Иркутской ТЭЦ (фото автора)**

При производстве строительных работ использованы следующие дорожно-строительные машины:

- каток дорожный BOMAG BW 203 AD-4, массой 12 т;
- ресайклер МРН 122-2;
- погрузчик фронтальный XCMG LW300F;
- автогрейдер ГС-14.02;
- машина дорожная комбинированная ЭД600АК КАМАЗ 6520.

Работы по строительству оснований дорожных одежд проведены с использованием технологии холодной регенерации. Данная технология подразумевает проведение работ на дороге и включает следующие технологические операции.

1. Распределение и уплотнение золошлаковой смеси

ЗШС после транспортировки на участок автомобильной дороги распределялась и профилировалась автогрейдером с учетом проектной толщины слоя. Затем была проведена прикатка слоя катками (рисунки 5.9–5.10).



Рисунок 5.9 – Автомобильная дорога «Егоровщина – Рязановщина»

Устройство слоя из золошлаковой смеси

(фото автора)



**Рисунок 5.10 – Автомобильная дорога «Егоровщина – Рязановщина»
Распределение и прикатка золошлаковой смеси
(фото автора)**

2. Дозирование и распределение вяжущих материалов

Перед проходом грунтосмесительной машины по поверхности грунта на всю ширину прохода ресайклера вручную распределялся портландцемент (рисунок 5.11).

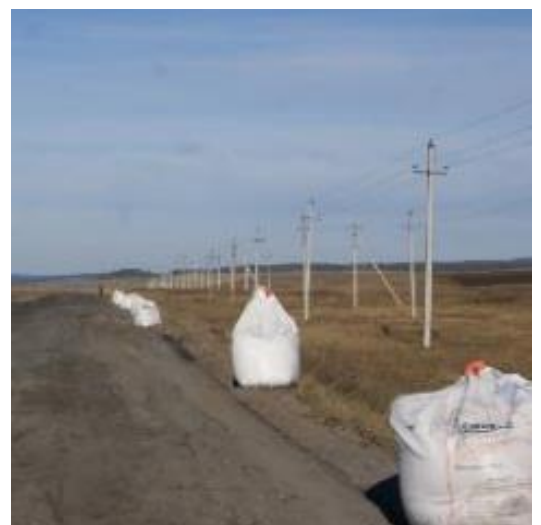


**Рисунок 5.11 – Автомобильная дорога «Егоровщина – Рязановщина»
Распределение портландцемента (фото автора)**

3. Перемешивание грунта с вяжущими материалами

Добавление воды не производилось, так как влажность золошлаковой смеси в золоотвале соответствовала оптимальному значению. Машина перемешивает все компоненты смеси за один проход (рисунок 5.12 и 5.13).



**Рисунок 5.12 – Автомобильная дорога «Егоровщина – Рязановщина»
Состав звена по устройству слоев укрепленных грунтов (фото автора)**

Минимальная ширина перекрытия смежных полос не менее 15 см.



**Рисунок 5.13 – Автомобильная дорога «Егоровщина – Рязановщина»
Перемешивание грунта с портландцементом (фото автора)**

Длина захватки (L) назначается, исходя из производительности ресайклера. Примерная длина захватки определяется по формуле (СТО НОСТРОЙ 2.25.1592014):

$$L = \frac{60m \cdot C \cdot V}{n}, \quad (5.1)$$

где: m – количество часов в световом дне;

C – коэффициент использования рабочего времени (заправка, замена зубьев и др.);

V – скорость ведущей машины, м/мин;

n – число проходов ведущей машины.

Рисунок 5.14 демонстрирует этап уплотнения смеси. При выполнении работ профилирование не выполнялось, так как оно приводило к нарушению структуры материала.

Оптимальная длина захватки работы катка составила 120–150 м. Движение катка осуществлено от краев к оси дороги, а затем в обратной последовательности с перекрытием каждого следа.

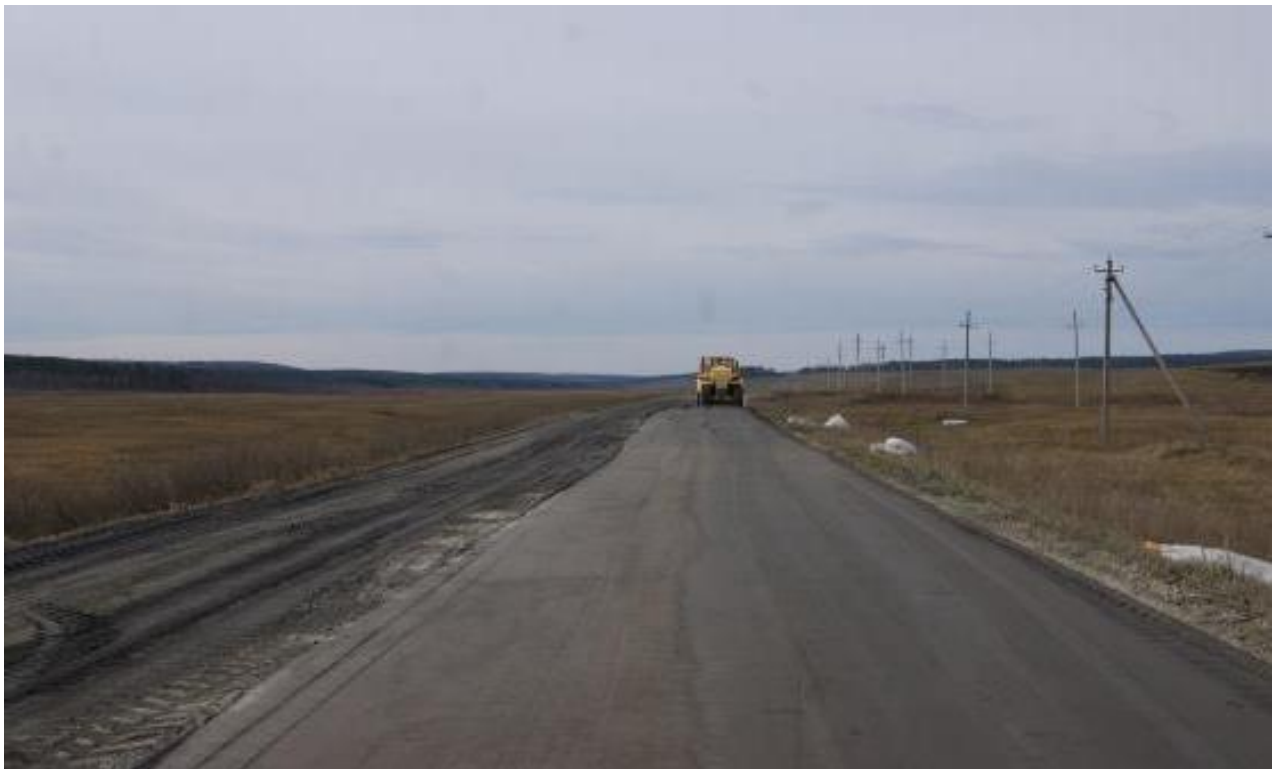


**Рисунок 5.14 – Автомобильная дорога «Егоровщина – Рязановщина»
Уплотнение слоя укрепленного грунта (фото автора)**

Уплотнение первой полосы производилось таким образом, чтобы вальцы катка находились на расстоянии 15–20 см от кромки сопряжения. Уплотнение второй полосы производилось с сопряжения. Для исключения устройства поперечных швов необходимо было обеспечивать безостановочное движение машин по захватке.

При проведении работ выполнено пробное уплотнение слоев основания. По его результатам установлено, что фактическое значение коэффициента запаса на уплотнение золошлаковой смеси ТЭЦ, укрепленной портландцементом, соответствует определенному в лабораторных условиях:

$$K_{\text{зап}} = 1,5.$$

4. Уход за слоем основания

Уход состоит в обеспечении твердения материала при благоприятном термовлажностном режиме в течение 3–10 сут. до достижения им 70 % проектной прочности.

Обеспечение оптимального режима твердения осуществлено путем розлива пленкообразующих материалов (битумной эмульсии по ГОСТ Р 52128-2003 в количестве от 0,8 до 1,5 л/м²). Процесс продемонстрирован на рисунке 5.15.



**Рисунок 5.15 – Автомобильная дорога «Егоровщина – Рязановщина»
Розлив вяжущих материалов (фото автора)**

5. Устройство асфальтобетонного покрытия

Этап изображен на рисунке 5.16.



**Рисунок 5.16 – Устройство покрытия из асфальтобетонной смеси
Автомобильная дорога «Егоровщина – Рязановщина»
(фото автора)**

6. Контроль качественных характеристик материалов

При входном контроле материалов определено соответствие характеристик поставленных материалов требованиям нормативных документов.

При операционном контроле определено несколько показателей.

Коэффициент уплотнения укрепленного грунта. Контроль плотности устройства слоев – одно из важнейших мероприятий по обеспечению качества, так как степень уплотнения укрепленного грунта напрямую влияет на другие характеристики: прочность, водостойкость и морозостойкость. Коэффициент уплотнения K_y вычисляют (с точностью до второго десятичного знака) по формуле

$$k_y = \frac{\rho_c}{\rho_{max}}, \quad (5.2)$$

где: ρ_c – средняя плотность укрепленного грунта, г/см³;

ρ_{max} – максимальная плотность сухого грунта, г/см³.

Отбор образцов проведен не позднее, чем через 1 час с момента окончания уплотнения слоя из укрепленного грунта. Для определения фактической плотности укрепленного грунта использован метод режущего кольца (рисунок 5.17).



**Рисунок 5.17 – Контроль плотности устроенного слоя из золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом
Автомобильная дорога «Егоровщина – Рязановщина» (фото автора)**

Определение влажности устраиваемого слоя. Контроль влажности смеси укрепленного грунта имеет очень большое значение:

- при избыточном значении влажности повышается пористость устроенного слоя, что приводит к снижению прочности, водостойкости и морозостойкости;
- при значении влажности ниже оптимальной снижается коэффициент уплотнения, что также приводит к снижению прочности устраиваемого слоя.

Влажность определяется в соответствии с требованиями ГОСТ 5180 методом высушивания до постоянной массы

$$W = \frac{m_{\text{вл}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} \cdot 100 \%, \quad (5.3)$$

где: $m_{\text{вл}}$ – масса образца во влажном состоянии, г;

$m_{\text{сух}}$ – масса образца после высушивания до постоянной массы, г.

Приемочный контроль при устройстве слоя основания проведен после устройства слоя в возрасте 7 и 28 сут.

Для оценки прочностных характеристик отбор проб грунта, укрепленного неорганическими вяжущими, предлагается осуществлять в соответствии со следующей последовательностью.

Выбирается участок на расстоянии не менее 0,5 м от края покрытия или оси дороги и размером не более 0,5х0,5 м. На данном участке производится отбор пробы, делаются вырубки прямоугольной конфигурации (рисунок 5.18).



Рисунок 5.18 – Отбор проб укрепленного грунта
Автомобильная дорога «Егоровщина – Рязановщина» (фото автора)

Размеры вырубки установлены, исходя из необходимости изготовления требуемого количества образцов лабораторных образцов-кубов с размерами сторон 100х100х100 мм: прочность на сжатие – три образца; водостойкость – шесть образцов (включая образцы, отобранные для испытания на прочность).

Результаты лабораторных исследований приведены в таблице 5.8.

При приемочном контроле были определены:

- прочность на сжатие на образцах укрепленного грунта, подвергнутых полному или капиллярному водонасыщению;
- прочность на сжатие в неводонасыщенном состоянии (позволяет уточ-

нить время открытия движения построенного транспорта по уложенному слою и осуществить оценку работы конструкции дорожной одежды, имеющей в своем составе укрепленные грунты, при отсутствии увлажнения и, как следствие, дает возможность разрабатывать конструкции дорожных одежд с использованием укрепленных грунтов с низкими значениями водостойкости и устройством гидроизоляции).

Таблица 5.8 – Результаты лабораторных исследований

Состав	Место отбора проб	Возраст, сут.	Прочность на сжатие (в водонасыщенном состоянии)	Плотность, г/см ³		Коэффициент уплотнения	
				максимальная	средняя	СП 78.13330	фактический
Грунт с добавлением золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом 6 %	км 0+792 (право, 0,5 м от оси)	7	1,13	1,93	1,92	0,98	0,99
	км 0+543 (право, 0,5 м от оси)	7	1,18	1,93	1,90		0,98
Золошлаковая смесь, укрепленная портландцементом 8 %	км 0+100 (право, 0,5 м от оси)	7	1,03	1,29	1,27		0,98
	км 0+314 (право, 0,5 м от оси)	7	1,09	1,29	1,29		1,00

5.1.4. Мониторинг опытно-экспериментальных конструкций с использованием золошлаковых смесей ТЭЦ

В ходе мониторинга состояния конструкций дорожных одежд проведен отбор проб и лабораторные испытания укрепленного грунта после 8 месяцев эксплуатации.

Для сопоставления результатов с данными, полученными при определении модуля упругости с использованием установки динамического нагружения

«ДИНА-3», необходимо лабораторные испытания проводить при одинаковой влажности конструктивного слоя. Для этого отбор осуществляется сразу после определения модуля упругости на поверхности конструктивного слоя. Пробы-вырубки были герметично упакованы для недопущения изменения влажности в процессе доставки в лабораторию.

Перед началом отбора проб в этих определенных местах произведено измерение модуля упругости с использованием установки динамического нагружения ДИНА-3. Результаты определения модуля упругости на поверхности дорожной одежды приведены в таблице 5.9. Модуль упругости на поверхности дорожной одежды увеличился с 40–46 до 79–128 МПа.

Таблица 5.9 – 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

По результатам лабораторных испытаний установлено следующее.

1. Предел прочности на сжатие в водонасыщенном состоянии образцов-вырубок укрепленного местного грунта с добавлением техногенного (золошлаковой смеси) и 6 % портландцемента составил 1,08 МПа, что соответствует марке по прочности М10.

2. Предел прочности на сжатие в водонасыщенном состоянии образцов-вырубок укрепленного местного грунта 8% портландцемента составил 6,88 МПа, что соответствует марке по прочности М60.

3. Расчетное значение модуля упругости укрепленного материала, определенное с использованием установки динамического нагружения «ДИНА-3», составляет 300–350 МПа. Значение модуля упругости, определенное в лаборатор-

ных условиях, – 365 МПа. Отклонение составляет 4–17 %. Увеличение модуля упругости в период эксплуатации вызвано продолжением развития процессов структурообразования после достижения материала проектного возраста (28 сут.)

5.2. Строительство экспериментальной конструкции земляного полотна

5.2.1. Расчет конструкции

Строительство опытно-экспериментального участка земляного полотна выполнено на объекте «Строительство автомобильной дороги Р-255 «Сибирь. Новосибирск – Кемерово – Красноярск – Иркутск» на участке км 1797+000 – км 1842+000 (обход г. Усолье-Сибирское), Иркутская область, при строительстве объездной дороги № 2 с ПК 1+00 по ПК 2+50 (рисунок 5.19).

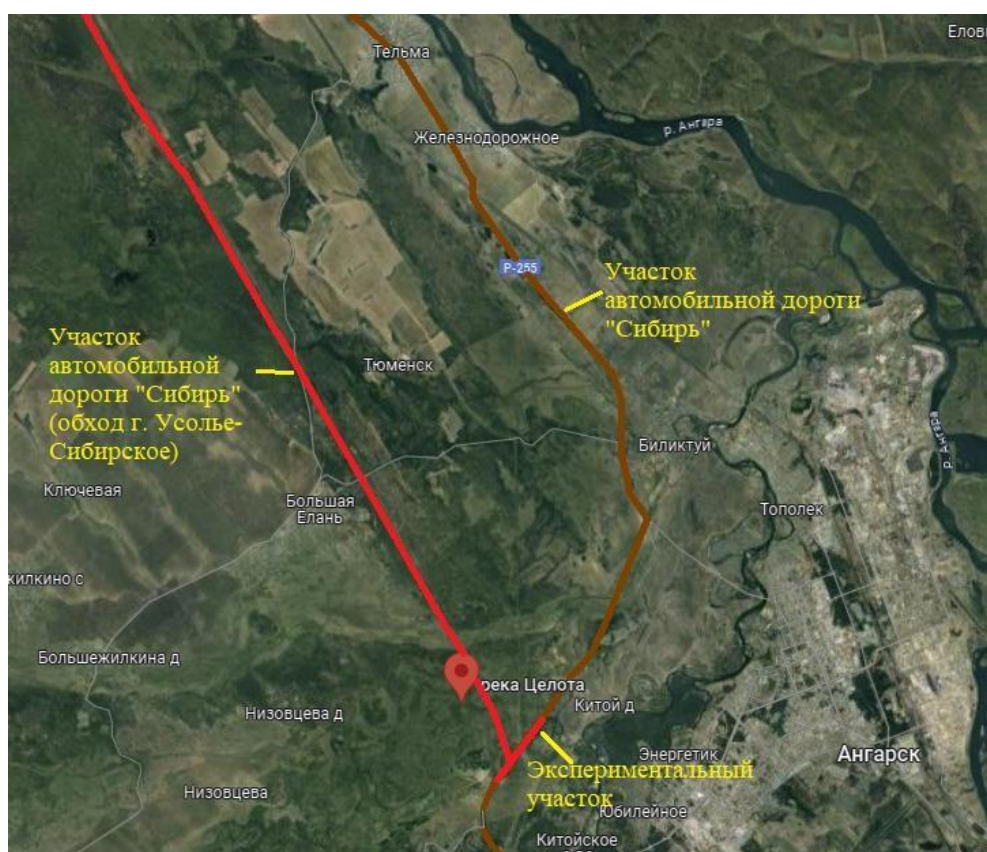


Рисунок 5.19 – Автомобильная дорога Р-255 «Сибирь. Новосибирск – Кемерово – Красноярск – Иркутск» на участке км 1797+000 – км 1842+000 (фото автора)

Основные технические параметры автомобильной дороги:

- 1) техническая категория автомобильной дороги – III;
- 2) дорожно-климатическая зона – I_з;
- 3) схема увлажнения рабочего слоя – 1;
- 4) тип дорожной одежды – капитальный;
- 5) тип нагрузки A1(AK10): давление на покрытие, $P = 0,60$ МПа; расчетный диаметр следа колеса, $D = 37,00$ см;
- 6) требуемый уровень надежности – 0,90;
- 7) глубина промерзания грунта – 2,7 м;
- 8) расчетное количество дней в году – 150;
- 9) суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки – 377 894.

При расчетах земляного полотна необходимо обеспечивать его прочность и устойчивость, а также невозможность развития деформаций, влияющих на безопасность автомобильной дорог как сооружения в течение срока ее службы.

Для обеспечения прочности и устойчивости рабочего слоя земляного полотна необходимо проводить мероприятия по укреплению грунтов рабочего слоя неорганическими вяжущими, гранулометрическими добавками и др. Введение неорганических вяжущих или гранулометрических добавок позволяет использовать в верхней части земляного полотна грунты, предрасположенные к значительному влагонакоплению и морозной пучинистости.

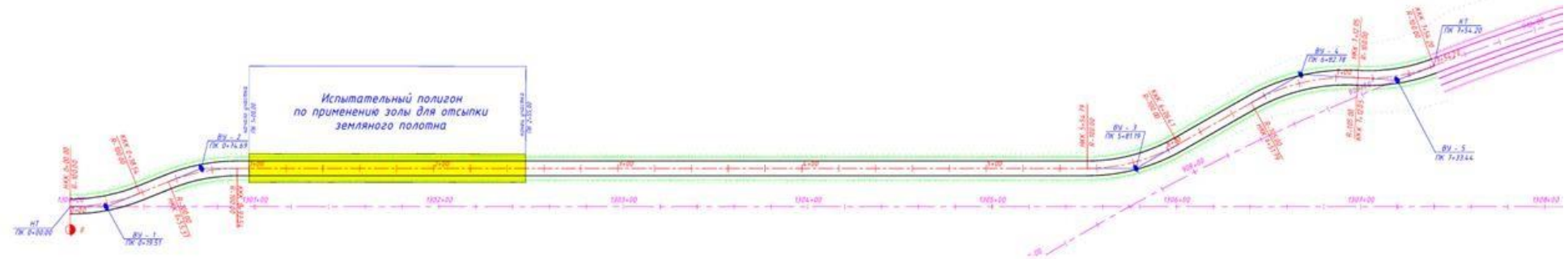
Разработано пять вариантов конструкций дорожных одежд с рабочим слоем земляного полотна из золошлаковой смеси и из местного грунта. При всех четырех вариантах конструкций с рабочим слоем из золошлаковой смеси прочность конструкции дорожной одежды обеспечена. Разработанные варианты конструкций дорожной одежды приведены в таблице 5.10.

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. План экспериментального участка приведен на рисунке 5.20.

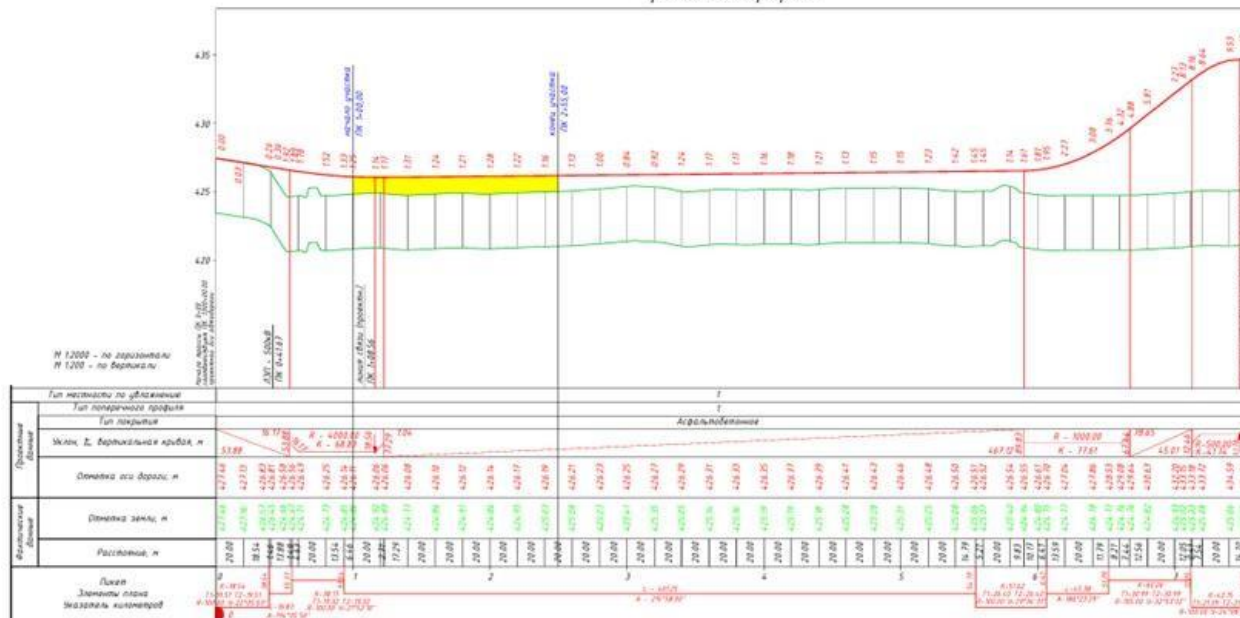
Таблица 5.10 – Варианты конструкций дорожных одежд опытно-экспериментального участка

Вариант 1 (рекомендуемый)	Тол- щина h, см	Вариант 2	Тол- щина h, см	Вариант 3	Тол- щина h, см	Вариант 4	Тол- щина h, см	Вариант 5	Тол- щина h, см
Горячий плотный асфальтобетон, тип Б, II марки (щебень М1000) по ГОСТ 9128-2013	0,05	Горячий плотный асфальтобетон, тип Б, II марки (щебень М1000) по ГОСТ 9128-2013	0,05	Горячий плотный асфальтобетон, тип Б, II марки (щебень М1000) по ГОСТ 9128-2013	0,05	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 М8000) по ГОСТ 9128-2013	0,07	Горячий пористый асфальтобетон II марки (щебень М8000) по ГОСТ 9128-2013	0,07	Горячий пористый асфальтобетон II марки (щебень М8000) по ГОСТ 9128-2013	0,07	Горячий пористый асфальтобетон II марки (щебень М8000) 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	Щебень М1000 по ГОСТ 8267-93	0,40	Щебень М1000 по ГОСТ 8267-93	0,34	Щебень М1000 по ГОСТ 8267-93	0,47	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	Геосинтетический материал ($R_p \geq 20$ Кн/м, $E_{ps} \leq 20\%$)	–	Геосинтетический материал ($R_p \geq 20$ Кн/м, $E_{ps} \leq 20\%$)	–	Песок по ГОСТ 8736-2014	0,30
–	–	Геосинтетический материал ($R_p \geq 20$ Кн/м, $E_{ps} \leq 20\%$)	–	Песок по ГОСТ 8736-2014	–	–	–	–	–
Грунт рабочего слоя – ЗШС ТЭЦ 10		Грунт рабочего слоя – ЗШС ТЭЦ 10		Грунт рабочего слоя – ЗШС ТЭЦ 10		Грунт рабочего слоя – ЗШС ТЭЦ 10		Грунт рабочего слоя – песчаный	

План автодороги.



Продольный профиль



Условные обозначения

- ось реконструируемой автодороги
- ось временной объездной автодороги
- кромка проезжей части
- откосы насыпи
- подойща

Поперечный профиль земляного полотна.

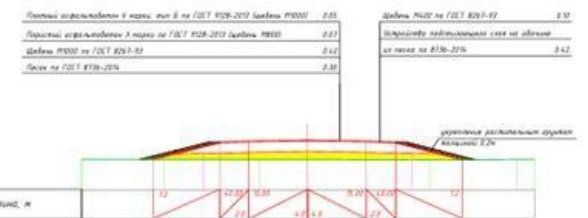


Рисунок 5.20 – План экспериментального участка автомобильной дороги (рисунок автора)

Определена стоимость строительства разработанных вариантов конструкций дорожных одежд. Наиболее экономичным является вариант № 1 (таблица 5.11).

Таблица 5.11 – Стоимость вариантов конструкции дорожной одежды

Стоимость конструкции при устройстве земляного полотна из местного грунта, руб.	Стоимость вариантов, руб.		Отклонение, руб.
20 177 403,00	<i>Вариант № 1 (рекоменд.)</i>	<i>20 135 116,91</i>	<i>– 42 286,19</i>
	Вариант № 2	20 848 659,95	671 256,85
	Вариант № 3	20 605 034,88	427 631,79
	Вариант № 4	20 641 930,53	466 231,52

Примечание. При расчете стоимости вариантов не учтена стоимость работ по разработке золошлаковой смеси в золоотвале и транспортировке.

5.2.2. Производство работ по возведению экспериментальной конструкции земляного полотна

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

- из золошлаковой смеси ТЭЦ-10 (лабораторная проба № 4) общей протяженностью 150 м;
- из местного грунта.

Технология производства работ аналогична технологии возведения слоев из местных грунтов.

1. Подготовительные работы

В состав подготовительных работ вошли работы по расчистке от кустарника и мелколесья и замена переувлажнённых грунтов основания (рисунок 6.21).

2. Возведение слоев насыпи

Отсыпка нижнего слоя из золошлаковой смеси на подготовленное естественное основание проведена по схеме «от себя» при помощи автомобильного транспорта (рисунок 5.22).



Рисунок 5.21 – Замена грунтов основания (фото автора)



Рисунок 5.22 – Отсыпка слоев земляного полотна (фото автора)

Разравнивание нижнего слоя проведено при помощи бульдозеров равномерно на всю ширину земляного полотна.

Уплотнение золошлаковых смесей целесообразно осуществлять при помощи тяжелых виброкатков (гладковальцовых или грунтовых) или тяжелых катков

на пневматических шинах. При этом влажность уплотняемых слоев была близка к оптимальной. Порядок процессов отображен на рисунках 5.23–5.26.



**Рисунок 5.23 – Распределение золошлаковой смеси
(фото автора)**

Насыпь устроена с уширением 0,5 м с каждой стороны с таким расчетом, чтобы после окончания сооружения насыпи осуществить срезку неуплотненной золошлаковой смеси с откосной части земляного полотна.

Далее выполнена планировка поверхности откосов, устройство защитных слоев из почвенно-растительного грунта с посевом трав. Защитный слой предохраняет откосы земляного полотна от воздействия воды и ветра и предотвращает развитие эрозионных процессов.

При отсыпке слоев из золошлаковой смеси каждый слой тщательно планируется и уплотняется с приданием поперечных уклонов не менее 30–40 %.



Рисунок 5.24 – Уплотнение слоев земляного полотна из золошлаковой смеси (фото автора)



Рисунок 5.25 – Отсыпка последующих слоев земляного полотна из золошлаковой смеси (фото автора)



**Рисунок 5.26 – Планировка слоев земляного полотна из золошлаковой смеси
(фото автора)**

3. Контроль качества золошлаковых смесей

Проводился в соответствии с требованиями СП 78.13330, ОДМ 218.2.031.

При операционном контроле проверены:

- плотность грунта в основании земляного полотна;
- влажность используемых золошлаковых смесей;
- толщина отсыпаемых слоев;
- плотность в каждом технологическом слое через 50 м в трех точках по поперечному профилю.

При приемочном контроле проверены:

- толщина и плотность слоев из золошлаковых смесей (рисунок 5.27);
- наличие и качество выполненных защитных мероприятий на откосной части;
- толщина рабочего слоя;
- устройство водоотводных сооружений.



Рисунок 5.27 – Контроль качества уплотнения слоев земляного полотна методом режущего кольца (фото автора)

Также в процессе строительстве слоев выполнено измерение модуля упругости с помощью установки динамического нагружения «ДИНА-3М» (рисунок 5.28).



Рисунок 5.28 – Определение модуля упругости (фото автора)

Результаты измерения модуля упругости приведены в таблице 5.12.

Таблица 5.12 – Результаты измерений модуля упругости слоя земляного полотна из золошлаковой смеси

Местоположение км/ПК	Температура, °С		Измеренный упругий прогиб, мм	Модуль упругости, МПа
	окружающий воздух	слой		
2 (ПК2+00) прямо	5,8	–	2,762	66,16
3 (ПК2+50) обратно	12,2	–	3,915	45,98

5.2.3. Итоговый мониторинг конструкции земляного полотна

После завершения строительства проведен мониторинг работы построенной конструкции. Эксплуатация опытно-экспериментальной конструкции земляного полотна производится в сложных условиях:

1) 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.

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

Конструкция автомобильной дороги с земляным полотном из золошлаковых смесей имеет эксплуатационные характеристики не ниже чем конструкция смежного участка дороги с земляным полотном из местных грунтов (таблица 5.13).

Для оценки водно-теплового режима земляного полотна в тело земляного полотна установлены датчики измерения температуры и влажности грунта (рисунок 5.29).

По результатам измерения температуры и влажности земляного полотна установлено значительное влагонакопление слоев из золошлаковой смеси в сравнении со слоями из местных грунтов (рисунки 5.30–5.31).

Таблица 5.13 – Результаты измерения продольной ровности IRI покрытия экспериментального участка автомобильной дороги

Дата проведения измерений	Требования СП 78.13330 / ГОСТ Р 50597	Конструкция с земляным полотном из золошлаковой смеси			Конструкция с земляным полотном из местного грунта		
		<i>прямое направление</i>	<i>обратное направление</i>	<i>итоговое значение</i>	<i>прямое направление</i>	<i>обратное направление</i>	<i>итоговое значение</i>
15.11.2021 г.	до 2,6	2,55	2,51	2,53	—	—	—
21.06.2022 г.	не более 5,5	2,83	2,46	2,80	2,79	2,64	2,72



Рисунок 5.29 – Этапы установки датчиков контроля температуры и влажности (фото автора)

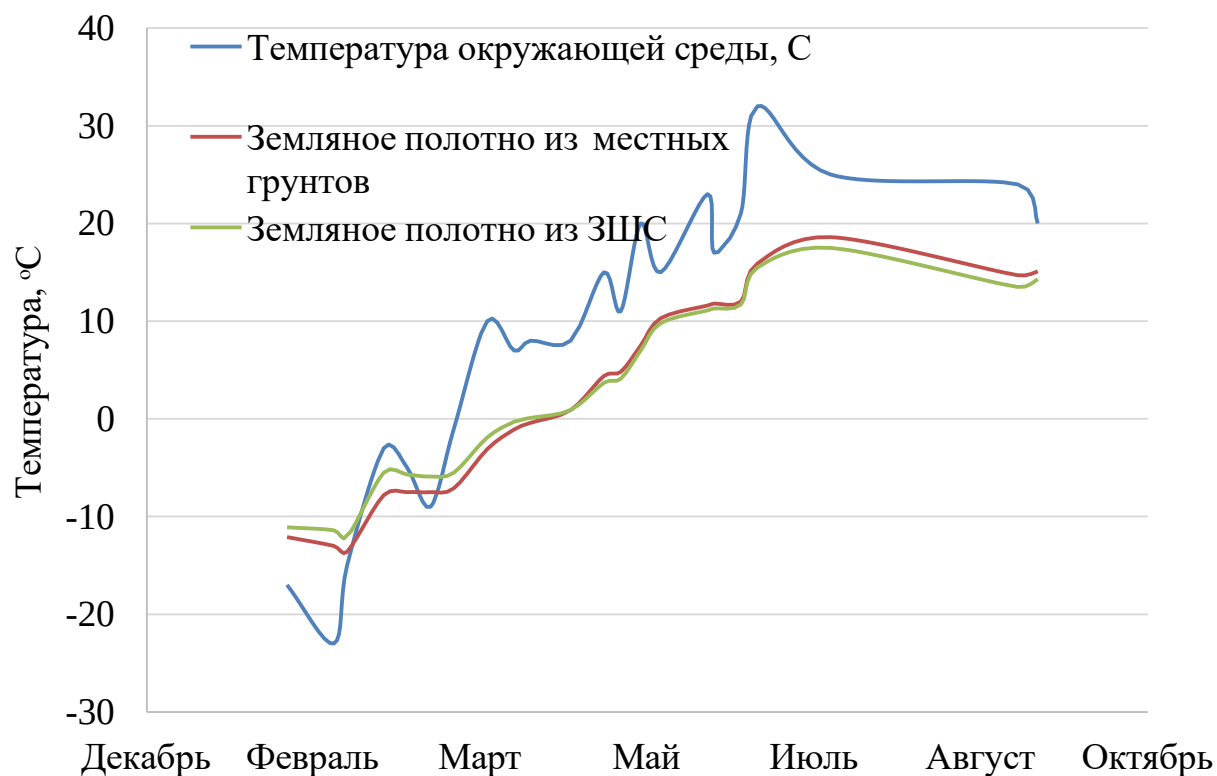


Рисунок 5.30 – Результаты измерения температуры экспериментальной конструкции земляного полотна (фото автора)

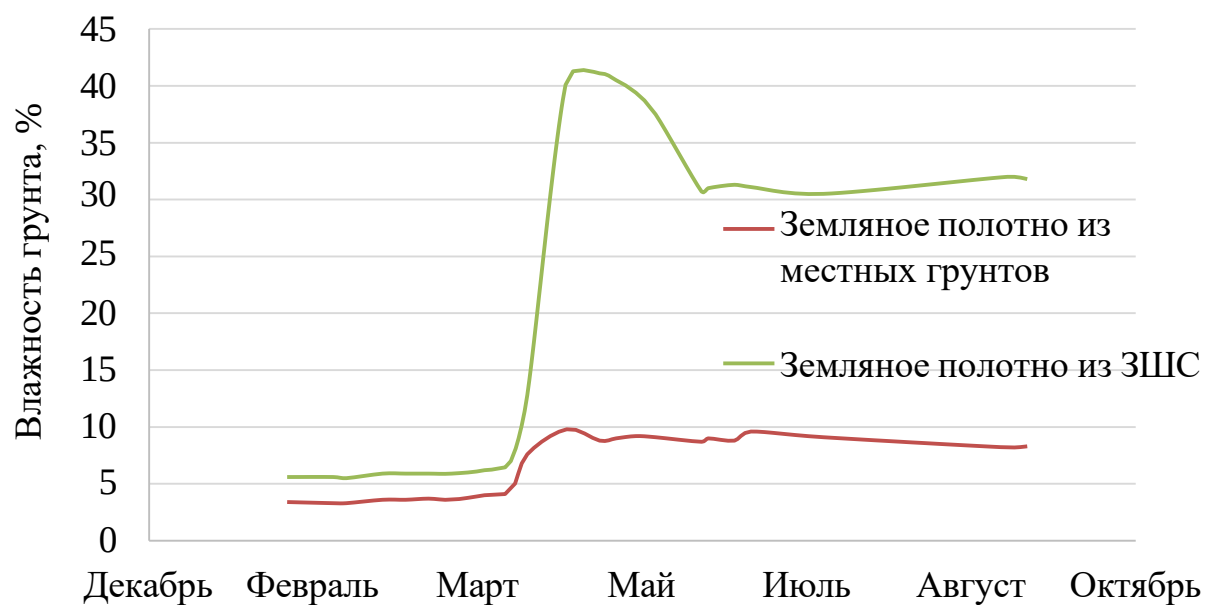


Рисунок 5.31 – Результаты измерения влажности экспериментальной конструкции земляного полотна (фото автора)

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

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

Выводы

1. Результаты лабораторных исследований апробированы на автомобильных дорогах Иркутской области. По результатам выполненных работ построены экспериментальные конструкции дорожной одежды и земляного полотна с применением золошлаковых смесей на следующих участках автомобильных дорог:

- «Егоровщина – Рязановщина» на участке км 0+000 – км 1+000;
- «Сибирь. Новосибирск – Кемерово – Красноярск – Иркутск» на участке км 1797+000 – км 1842+000 (обход г. Усолье-Сибирское).

2. Конструкция участка автомобильной дороги с земляным полотном из золошлаковых смесей имеет уровень эксплуатационного состояния не ниже чем конструкция участка автомобильной дороги с земляным полотном из местных грунтов.

3. Рассмотрены технологические особенности проведения работ по возведению земляного полотна и дорожной одежды автомобильных дорог из золошлаковых смесей. При производстве работ необходимо учитывать следующие моменты.

3.1. Золошлаковые смеси в сухом состоянии имеют значительную пыльность. Поэтому при необходимости временного складирования и хранения ЗШС в буртах важно производить периодическое увлажнение или укрывать неткаными материалами. Также не допускается устройство покрытий из укрепленных неорганическими вяжущими золошлаковых смесей без устройства защитных слоев.

3.2. Золошлаковые смеси по гранулометрическому составу представляют собой техногенные песчаные грунты. Однако в отличие от последних, уплотнение ЗШС сопровождается выдавливанием смеси из-под вальца катка, увеличением ширины слоя и уменьшением его толщины. Поэтому при возведении земляного полотна контроль влажности золошлаковой смеси имеет особенно большое значение. Для исключения выпора золошлаковой смеси также рекомендуется предварительное устройство обочин или валиков по кромке проезжей части из материала обочин дорожной одежды, которые выступают в роли упора при уплотнении слоя.

3.3. Золошлаковые смеси имеют низкие значения модуля упругости и угла внутреннего трения. При необходимости движения строительной техники по устроенному слою земляного полотна из золошлаковой смеси или при длительных технологических перерывах рекомендуется устройство слоя из песка.

3.4. При устройстве земляного полотна из золошлаковых смесей обязательно проведение работ по укреплению откосов, которые предотвращают развитие эрозионных процессов под действием воды и ветра, а также предотвращают пыление земляного полотна.

4. Установлено, что фактическое значение коэффициента запаса на уплотнение золошлаковых смесей ТЭЦ, укрепленных портландцементом, соответствует определенному в лабораторных условиях и составляет 1,5. Значение коэффициента запаса позволит повышать эффективность работ по распределению и уплотнению слоев дорожной одежды, а также позволит определять количество ЗШС, которое необходимо транспортировать для возведения слоев.

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

Глава 6. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ СМЕСЕЙ ТЭЦ

6.1. Анализ стоимости строительства конструкций с применением золошлаковых смесей ТЭЦ

Для оценки эффективности применения золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях дорожных одежд по показателю «Стоимость строительства» проведен расчет стоимости типовых конструкций, указанных в таблицах 6.1 и 6.2 [224]. Для определения стоимости строительных работ использованы:

- МДС 81-35.2004 «Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации»;
- МДС 81-34.2004 «Методические указания по определению величины накладных расходов в строительстве, в соответствии с Постановлением Госстроя России от 12.01.2004 г. № 5»;
- МДС 81-25.2001 «Методические указания по определению величины сметной прибыли в строительстве, в соответствии с Постановлением Госстроя России от 28.02.2001 г. № 15»;
- Письмо от 18.11.2004 г. № АП-5536/06 «О порядке применения нормативов сметной прибыли в строительстве»;
- сборники федеральных единичных расценок.

Стоимость определена в базисном уровне цен (по состоянию на 1.01.2000 г.) на основе локальных смет. Стоимость материалов включает доставку автотранспортом на расстояние до 30 км. Стоимость указана без НДС.

Расчет сметной стоимости приведен в таблицах 6.3–6.6.

Снижение стоимости при применении золошлаковых смесей ТЭЦ, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, составляет до 21 %.

Таблица 6.1 – Типовые конструкции дорожной одежды для определения стоимости строительства (варианты 2.1–2.4)

Кон- струк- тив- ный слой	Вариант 2.1		Вариант 2.2		Вариант 2.3		Вариант 2.4	
	Материал слоя дорож- ной одежды	Тол- щина, см	Материал слоя дорожной одеж- ды	Тол- щина, см	Материал слоя до- рожной одежды	Тол- щина, см	Материал слоя дорожной одеж- ды	Тол- щина, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9
По- крытие	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	10	Щебень, обрабо- танный органиче- ским вяжущим, уложенный по способу заклинки	13	Щебень, обработан- ный органическим вяжущим, уложен- ный по способу за- клинки	13	Щебень, обрабо- танный органиче- ским вяжущим, уложенный по способу заклинки	13
По- крытие	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по пропитке	14	—	—	—	—	—	—
Осно- вание	Смеси щебеночно- песчаные, гравийно- песчаные, обработанные вязким, жидким или эмульгированным орга- ническим вяжущим	15	Гравийно- песчаная смесь, обработанная це- ментом 6 % (ГОСТ 23558), марка М20	13	Легкая песчанистая супесь, обработан- ная цементом 6 % (ГОСТ 23558), мар- ка М20	13	Золошлаковая смесь, обрабо- танная цементом 6 % (ГОСТ 23558), марка М20	13
Осно- вание	Гравийно-песчаные сме- си для оснований по ПНСТ 327	17	Гравийно- песчаные смеси для оснований по ГОСТ 23735	25	Гравийно-песчаные смеси для основа- ний по ГОСТ 23735	25	Гравийно- песчаные смеси для оснований по ГОСТ 23735	25

Окончание таблицы 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Доп. слой основания	Песок средний по ГОСТ 32824	25	Песок средний по ГОСТ 32824	35	Песок средний по ГОСТ 32824	35	Песок средний по ГОСТ 32824	35
Грунт земельного полотна	Тяжелый суглинок	—	Тяжелый суглинок	—	Тяжелый суглинок	—	Тяжелый суглинок	—
Стоимость, руб.	27 444		21 205		21 958		21 551	

Таблица 6.2 – Типовые конструкции дорожной одежды для определения стоимости строительства (варианты 3.1–3.4)

Конструктивный слой	Вариант 3.1		Вариант 3.2		Вариант 3.3		Вариант 3.4	
	Материал слоя дорожной одежды	Толщина, см	Материал слоя дорожной одежды	Толщина, см	Материал слоя дорожной одежды	Толщина, см	Материал слоя дорожной одежды	Толщина, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Покрытие	—	—	Защитный слой: АБ А11ВЛ на БНД 100/130	4	Защитный слой: АБ А11ВЛ на БНД 100/130	4	Защитный слой: АБ А11ВЛ на БНД 100/130	4
Покрытие	Крупнообломочный грунт, укрепленный жидким или эмульгированным органическим вяжущим	15	Гравийно-песчаная смесь, обработанная цементом 6 % (ГОСТ 23558), соответствующая марке М20	10	Легкая песчанистая супесь, обработанная цементом 6 % (ГОСТ 23558), соответствующая марке М20	10	Золотшлаковая смесь, обработанная цементом 6 % (ГОСТ 23558), соответствующая марке М20	10

Окончание таблицы 6.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Основание	Щебеночно-гравийно-песчаные смеси для оснований	22	Щебеночно-гравийно-песчаные смеси для оснований	15	Щебеночно-гравийно-песчаные смеси для оснований	15	Щебеночно-гравийно-песчаные смеси для оснований	15
Доп. слой основания	Песчано-гравийные смеси по ГОСТ 23735	30	Песчано-гравийные смеси по ГОСТ 23735	27	Песчано-гравийные смеси по ГОСТ 23735	27	Песчано-гравийные смеси по ГОСТ 23735	27
Грунт земляного полотна	Супесь легкая	—	Супесь легкая	—	Супесь легкая	—	Супесь легкая	—
Стоимость, руб.	18 271		16 294		16 875		16 559	

Таблица 6.3 – Сопоставительный расчет стоимости строительства дорожных одежд (конструкции 2.1–2.2)

Конструкция 2.1				Конструкция 2.2			
Наименование работ и затрат	Количество	Сметная стоимость, руб.		Наименование работ и затрат	Количество	Сметная стоимость, руб.	
		<i>на единицу</i>	<i>всего</i>			<i>на единицу</i>	<i>всего</i>
1	2	3	4	5	6	7	8
Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований: из песка (100 м³)	0,25 <i>(100*0,25) / 100</i>	2281,99 126,07	570	Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований: из песка (100 м³)	0,35 <i>(100*0,35) / 100</i>	2281,99 126,07	799
Песок природный для строительных работ средний (м³)	27,5 <i>25*1,1</i>	55,26	1520	Песок природный для строительных работ средний (м³)	38,5 <i>35*1,1</i>	55,26	2128

Продолжение таблицы 6.3

1	2	3	4	5	6	7	8
Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований: из песчано-гравийной смеси, дресвы (100 м³)	0,17 <i>(100*0,17) / 100</i>	2381,84 126,07	405	Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований: из песчано-гравийной смеси, дресвы (100 м³)	0,25 <i>(100*0,25) / 100</i>	2381,84 126,07	595
Смесь песчано-гравийная природная обогащенная с содержанием гравия: 15–25 % (м³)	20,74 <i>17*1,22</i>	60	1244	Смесь песчано-гравийная природная обогащенная с содержанием гравия: 15–25 % (м³)	30,5 <i>25*1,22</i>	60	1830
Розлив вяжущих материалов (т)	0,08	39,1	3	Добавка гравия, песка или песчано-гравийной смеси (100 м³)	0,237068 <i>(100*0,13*1,94*0,94) / 100</i>	475,01	113
Битумы нефтяные дорожные марки: БНД-60/90, БНД 90/130 (т)	0,0824	1690	139	Смесь песчано-гравийная природная (м³)	23,7068 <i>100*0,13*1,94*0,94</i>	60	1422
Устройство оснований и покрытий с применением автогрейдера из готовой битумно-грунтовой смеси толщиной 15 см, приготовленной: из щебеночных, гравийных, гравийно(щебеночно)-песчаных и золошлаковых смесей (1000 м²)	0,1 <i>100 / 1000</i>	5211,39 162,92	521	Устройство основания ресайклом с укреплением цементом и полимерными добавками после предварительного фрезерования и выравнивания профиля (1000 м²)	0,1 <i>100 / 1000</i>	23540,39 86,07	2354
Смесь битумно-грунтовая с содержанием щебеночных, гравийно-песчаных, щебеночно-песчаных смесей до 80 % (м³)	29,1 <i>100*0,15*1,94</i>	309,84	9016	Портландцемент общестроительного назначения бездобавочный, марки 400 (т)	1,665 <i>100*0,13*1,94*0,06*1,1</i>	412	686
Укладка и пропитка с применением битума щебеночных оснований толщиной 8 см (1000 м²)	0,1 <i>100 / 1000</i>	18869,34 473,8	1887	Розлив вяжущих материалов (т)	0,08	39,1	3

Продолжение таблицы 6.3

1	2	3	4	5	6	7	8
На каждый 1 см изменения толщины щебеночных оснований добавлять или исключать к расценке 27-06-024-06 (1000 м ²) (добавление толщины до 14 см ПЗ=6 (ОЗП=6; ЭМ=6 к расх.; ЗПМ=6; МАТ=6 к расх.; ТЗ=6; ТЗМ=6))	0,1 100 / 1000	10038,12 15,84	1004	Битумы нефтяные дорожные марки: БНД-60/90, БНД 90/130 (т)	0,0824	1690	139
Битумы нефтяные дорожные марки: БНД-60/90, БНД 90/130 (т)	1,442 0,824+0, 618	1690	2437	Устройство покрытия из черного щебня толщиной 13 см с плотностью каменных материалов 2,5-2,9 т/м ³ (1000 м ²) до 13 см ПЗ=2,17 (ОЗП=2,17; ЭМ=2,17 к расх.; ЗПМ=2,17; МАТ=2,17 к расх.; ТЗ=2,17; ТЗМ=2,17)	0,1 100 / 1000	8385,77 1128,7	839
Устройство покрытия из черного щебня толщиной 10 см с плотностью каменных материалов: 2,5–2,9 т/м ³ (1000 м ²) ПЗ=1,67 (ОЗП=1,67; ЭМ=1,67 к расх.; ЗПМ=1,67; МАТ=1,67 к расх.; ТЗ=1,67; ТЗМ=1,67)	0,1 100 / 1000	6453,56 868,63	645	Щебень черный горячий, фракция 5–10 мм (т)	1,736	354,6	616
Щебень черный горячий, фракция 5–10 мм (т)	1,336	354,6	474	Щебень черный горячий, фракция 15–20 мм (т)	2,387	312,4	
Щебень черный горячий, фракция 15–20 мм (т)	1,837	312,4	574	Щебень черный горячий, фракция 20–25 мм (т)	25,389	312,4	7932

Окончание таблицы 6.3

1	2	3	4	5	6	7	8
Щебень черный горячий, фракция 20–25 мм (т)	19,539	312,4	6104	–	–	–	–
Итого прямые затраты по смете в базисных ценах		26 543		Итого прямые затраты по смете в базисных ценах		20 202	
Накладные расходы		540		Накладные расходы		601	
Сметная прибыль		361		Сметная прибыль		402	
ВСЕГО по смете		27 444		ВСЕГО по смете		21 205	

Таблица 6.4 – Сопоставительный расчет стоимости строительства дорожных одежд (конструкции 2.3–2.4)

Конструкция 2.3				Конструкция 2.4			
Наименование работ и затрат	Количество	Сметная стоимость, руб.		Наименование работ и затрат	Количество	Сметная стоимость, руб.	
		<i>на единицу</i>	<i>всего</i>			<i>на единицу</i>	<i>всего</i>
1	2	3	4	5	6	7	8
Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из песка (100 м³)	0,35 (100*0,35) / 100	2281,99 126,07	799	Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из песка (100 м³)	0,35 (100*0,35) / 100	2281,99 126,07	799
Песок природный для строительных работ средний (м³)	38,5 35*1,1	55,26	2128	Песок природный для строительных работ средний (м³)	38,5 35*1,1	55,26	2128
Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из песчано-гравийной смеси, дресвы (100 м³)	0,25 (100*0,25) / 100	2381,84 126,07	595	Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из песчано-гравийной смеси, дресвы (100 м³)	0,25 (100*0,25) / 100	2381,84 126,07	595

Продолжение таблицы 6.4

1	2	3	4	5	6	7	8
Смесь песчано-гравийная природная обогащенная с содержанием гравия 15–25 % (м³)	30,5 25*1,22	60	1830	Смесь песчано-гравийная природная обогащенная с содержанием гравия 15–25 % (м³)	30,5 25*1,22	60	1830
Добавка супеси (100 м³)	0,214 (100*0,13*1,75*0,94) / 100	475,01	102	Добавка золошлаковой смеси (100 м³)	0,237 (100*0,13*1,94*0,94) / 100	475,01	113
Грунт песчаный, супесчаный (м³)	21,385 100*0,13*1,75*0,94	105,6	2258	Золошлаковая смесь (м³)	23,707 100*0,13*1,94*0,94	74,58	1768
Устройство основания ресайклером с укреплением цементом и полимерными добавками после предварительного фрезерования и выравнивания профиля (1000 м²)	0,1 100 / 1000	23540,39 86,07	2354	Устройство основания ресайклером с укреплением цементом и полимерными добавками после предварительного фрезерования и выравнивания профиля (1000 м²)	0,1 100 / 1000	23540,39 86,07	2354
Портландцемент общестроительного назначения бездобавочный, марки 400 (т)	1,502 100*0,13*1,75*0,06*1,1	412	619	Портландцемент общестроительного назначения бездобавочный, марки 400 (т)	1,665 100*0,13*1,94*0,06*1,1	412	686
Розлив вяжущих материалов (т)	0,08	39,1	3	Розлив вяжущих материалов (т)	0,08	39,1	3
Битумы нефтяные дорожные марки: БНД-60/90, БНД 90/130 (т)	0,0824	1690	139	Битумы нефтяные дорожные марки: БНД-60/90, БНД 90/130 (т)	0,0824	1690	139

Окончание таблицы 6.4

1	2	3	4	5	6	7	8
Устройство покрытия из черного щебня толщиной 13 см с плотностью каменных материалов 2,5–2,9 т/м ³ (1000 м ²) до 13 см ПЗ=2,17 (ОЗП=2,17; ЭМ=2,17 к расх.; ЗПМ=2,17; МАТ=2,17 к расх.; ТЗ=2,17; ТЗМ=2,17)	0,1 100 / 1000	8385,77 1128,7	839	Устройство покрытия из черного щебня толщиной 13 см с плотностью каменных материалов 2,5–2,9 т/м ³ (1000 м ²) до 13 см ПЗ=2,17 (ОЗП=2,17; ЭМ=2,17 к расх.; ЗПМ=2,17; МАТ=2,17 к расх.; ТЗ=2,17; ТЗМ=2,17)	0,1 100 / 1000	8385,77 1128,7	839
Щебень черный горячий, фракция 5–10 мм (т)	1,736	354,6	616	Щебень черный горячий, фракция 5–10 мм (т)	1,736	354,6	616
Щебень черный горячий, фракция 15–20 мм (т)	2,387	312,4	746	Щебень черный горячий, фракция 15–20 мм (т)	2,387	312,4	746
Щебень черный горячий, фракция 20–25 мм (т)	25,389	312,4	7932	Щебень черный горячий, фракция 20–25 мм (т)	25,389	312,4	7932
Итого прямые затраты по смете в базисных ценах			20 960	Итого прямые затраты по смете в базисных ценах			20 548
Накладные расходы			598	Накладные расходы			601
Сметная прибыль			400	Сметная прибыль			402
ВСЕГО по смете			21 958	ВСЕГО по смете			21 551

Таблица 6.5 – Сопоставительный расчет стоимости строительства дорожных одежд (конструкции 3.1–3.2)

Конструкция 3.1				Конструкция 3.2			
Наименование работ и затрат	Количество	Сметная стоимость, руб.		Наименование работ и затрат	Количество	Сметная стоимость, руб.	
		на единицу	всего			на единицу	всего
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из песчано-гравийной смеси, дресвы (100 м³)	0,3 (100*0,3) / 100	2381,84 126,07	715	Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из песчано-гравийной смеси, дресвы (100 м³)	0,27 (100*0,27) / 100	2381,84 126,07	643
Смесь песчано-гравийная природная обогащенная с содержанием гравия 15-25 % (м³)	36,6 30*1,22	60	2196	Смесь песчано-гравийная природная обогащенная с содержанием гравия 15–25 % (м³)	32,94 27*1,22	60	1976
Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из щебня (100 м³)	0,22 (100*0,22))/ 100	3551,63 195,7	781	Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из щебня (100 м³)	0,15 (100*0,15) / 100	3551,63 195,7	533
Смеси готовые щебеночно-песчаные (ГОСТ 25607-2009) номер С6, размер зерен 0–20 мм (м³)	27,72 22*1,26	157,78	4374	Смеси готовые щебеночно-песчаные (ГОСТ 25607-2009) номер С6, размер зерен 0–20 мм (м³)	18,9 15*1,26	157,78	2982
Розлив вяжущих материалов (т)	0,08	39,1	3	Добавка гравия, песка или песчано-гравийной смеси (100 м³)	0,18236 (100*0,1* 1,94*0,94) / 100	475,01	87

Продолжение таблицы 6.5

1	2	3	4	5	6	7	8
Битумы нефтяные дорожные марки БНД-60/90, БНД 90/130 (т)	0,0824	1690	139	Смесь песчано-гравийная природная (м³)	18,236 <i>100*0,1* 1,94*0,94</i>	60	1094
Устройство оснований и покрытий с применением автогрейдера из готовой битумно-грунтовой смеси толщиной 15 см, приготовленной: из щебеночных, гравийных, гравийно(щебеночно)-песчаных и золошлаковых смесей (1000 м²)	0,1 <i>100 / 1000</i>	5211,3 9 162,92	521	Устройство основания ресайклером с укреплением цементом и полимерными добавками после предварительного фрезерования и выравнивания профиля (1000 м²)	0,1 <i>100 / 1000</i>	23540,39 86,07	2354
Смесь битумно-грунтовая с содержанием щебёночных, гравийно-песчаных, щебеночно-песчаных смесей до 80 % (м³)	29,1 <i>100*0,15*1,94</i>	309,84	9016	Портландцемент общестроительного назначения бездобавочный марки 400 (т)	1,28 <i>100*0,1* 1,94*0,06 *1,1</i>	412	527
—	—	—	—	Розлив вяжущих материалов (т)	0,08	39,1	3
—	—	—	—	Битумы нефтяные дорожные марки: БНД-60/90, БНД 90/130 (т)	0,0824	1690	139
—	—	—	—	Устройство покрытия толщиной 4 см из горячих асфальтобетонных смесей плотных мелкозернистых типа АБВ, плотность каменных материалов 2,5–2,9 т/м³ (1000 м²)	0,1 <i>100 / 1000</i>	2984,49 368,45	298

Окончание таблицы 6.5

1	2	3	4	5	6	7	8
—	—	—	—	Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон (горячие для плотного асфальтобетона мелко и крупнозернистые, песчаные), марка I, тип Б (т)	9,66	519	5014
—	—	—	—	Битумы нефтяные дорожные марки: БНД-60/90, БНД 90/130 (т)	0,00108	1690	2
Итого прямые затраты по смете в базисных ценах			17 745	Итого прямые затраты по смете в базисных ценах			15 652
Накладные расходы			315	Накладные расходы			385
Сметная прибыль			211	Сметная прибыль			257
ВСЕГО по смете			18 271,00	ВСЕГО по смете			16 294,00

Таблица 6.6 – Сопоставительный расчет стоимости строительства дорожных одежд (конструкции 3.3–3.4)

Конструкция 3.3				Конструкция 3.4			
Наименование работ и затрат	Количество	Сметная стоимость, руб.		Наименование работ и затрат	Количество	Сметная стоимость, руб.	
		на единицу	всего			на единицу	всего
1	2	3	4	5	6	7	8
Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из песчано-гравийной смеси, дресвы (100 м³)	0,27 (100*0,27) / 100	2381,84 126,07	643	Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из песчано-гравийной смеси, дресвы (100 м³)	0,27 (100*0,27) / 100	2381,84 126,07	643
Смесь песчано-гравийная природная обогащенная с содержанием гравия 15–25 % (м³)	32,94 27*1,22	60	1976	Смесь песчано-гравийная природная обогащенная с содержанием гравия 15–25 % (м³)	32,94 27*1,22	60	1976

Продолжение таблицы 6.6

1	2	3	4	5	6	7	8
Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из щебня (100 м³)	0,15 <i>(100*0,15)/100</i>	3551,63 195,7	533	Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из щебня (100 м³)	0,15 <i>(100*0,15)/100</i>	3551,63 195,7	533
Смеси готовые щебеночно-песчаные (ГОСТ 25607-2009) номер С6, размер зерен 0–20 мм (м³)	18,9 <i>15*1,26</i>	157,78	2982	Смеси готовые щебеночно-песчаные (ГОСТ 25607-2009) номер С6, размер зерен 0–20 мм (м³)	18,9 <i>15*1,26</i>	157,78	2982
Добавка супеси (100 м³)	0,165 <i>(100*0,1*1,75*0,94)/100</i>	475,01	78	Добавка золошлаковой смеси (100 м³)	0,182 <i>(100*0,1*1,94*0,94)/100</i>	475,01	86
Грунт песчаный, супесчаный (м³)	16,45 <i>100*0,1*1,75*0,94</i>	105,6	1737	Золошлаковая смесь (м³)	18,236 <i>100*0,1*1,94*0,94</i>	74,58	1360
Устройство основания ресайклером с укреплением цементом и полимерными добавками после предварительного фрезерования и выравнивания профиля (1000 м²)	0,1100 / 1000	23540,3986,07	2354	Устройство основания ресайклером с укреплением цементом и полимерными добавками после предварительного фрезерования и выравнивания профиля (1000 м²)	0,1 <i>100 / 1000</i>	23540,386,07	2354
Портландцемент общестроительного назначения бездобавочный, марки: 400 (т)	1,155 <i>100*0,1*1,75*0,06*1,1</i>	412	476	Портландцемент общестроительного назначения бездобавочный, марки: 400 (т)	1,28 <i>100*0,1*1,94*0,06*1,1</i>	412	527
Розлив вяжущих материалов (т)	0,08	39,1	3	Розлив вяжущих материалов (т)	0,08	39,1	3
Битумы нефтяные дорожные марки: БНД-60/90, БНД 90/130 (т)	0,0824	1690	139	Битумы нефтяные дорожные марки: БНД-60/90, БНД 90/130 (т)	0,0824	1690	139

Окончание таблицы 6.6

1	2	3	4	5	6	7	8
Устройство покрытия толщиной 4 см из горячих асфальтобетонных смесей плотных мелкозернистых типа АБВ, плотность каменных материалов: 2,5–2,9 т/м ³ (1000 м ²)	0,1 100 / 1000	2984,49 368,45	298	Устройство покрытия толщиной 4 см из горячих асфальтобетонных смесей плотных мелкозернистых типа АБВ, плотность каменных материалов: 2,5–2,9 т/м ³ (1000 м ²)	0,1 100 / 1000	2984,49 368,45	298
Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон (горячие для плотного асфальтобетона мелко и крупнозернистые, песчаные), марка: I, тип Б (т)	9,66	519	5014	Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон (горячие для плотного асфальтобетона мелко и крупнозернистые, песчаные), марка: I, тип Б (т)			
Битумы нефтяные дорожные марки: БНД-60/90, БНД 90/130 (т)	0,00108	1690	2	Битумы нефтяные дорожные марки: БНД-60/90, БНД 90/130 (т)	0,00108	1690	2
Итого прямые затраты по смете в базисных ценах		16 235		Итого прямые затраты по смете в базисных ценах		15 917	
Накладные расходы		383		Накладные расходы		385	
Сметная прибыль		257		Сметная прибыль		257	
ВСЕГО по смете		16 875		ВСЕГО по смете		16 559	

6.2. Анализ стоимости применения золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях земляного полотна в сравнении с местными грунтами и материалами

Для анализа стоимости строительства автомобильных дорог с земляным полотном из золошлаковых смесей в сравнении со стоимостью строительства автомобильных дорог с земляным полотном из местных грунтов и материалов произведены следующие расчеты:

- сметная стоимость на устройство временной объездной дороги протяженностью 150 м с использованием местного грунта;
- сметная стоимость на устройство временной объездной дороги протяженностью 150 м с использованием золошлаковых материалов.

В качестве местного грунта для расчета принят песчаный, так как по своим физико-механическим характеристикам он наиболее близок к золошлаковым материалам.

Для определения стоимости строительных работ использованы:

- МДС 81-35.2004 «Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации»;
- МДС 81-34.2004 «Методические указания по определению величины накладных расходов в строительстве, в соответствии с Постановлением Госстроя России от 12.01.2004 г. № 5»;
- МДС 81-25.2001 «Методические указания по определению величины сметной прибыли в строительстве, в соответствии с Постановлением Госстроя России от 28.02.2001 г. № 15»;
- Письмо от 18.11.2004 г. № АП-5536/06 «О порядке применения нормативов сметной прибыли в строительстве»;
- сборники федеральных единичных расценок.

Сметная стоимость определена базисно-индексным методом (базы ФЕР 2001 г.) в ценах 2020 г. (с изменениями 1–9) с пересчетом на 4 квартал 2021 г. на дату строительства опытно-экспериментального участка.

Для пересчета в текущий уровень цен в 4 квартал 2021 г. применен индекс на строительно-монтажные работы 9,60 согласно письму Минстроя России от 30.12.2021 г. № 58231-ИФ/09 Прил. 3 «Автомобильные дороги».

Стоимость в текущем уровне цен на 4 квартал 2021 г. на дату строительства опытно-экспериментального участка:

1) устройство временной объездной дороги протяженностью 150 м с использованием грунта песчаного (пескогрунта) – 4677,651 тыс. руб.

2) устройство временной объездной дороги протяженностью 150 м с использованием золошлаковых смесей ТЭЦ – 3999,511 тыс. руб.

Расчет стоимости приведен в таблице 6.7.

Несмотря на необходимость устройства дорожной одежды большей толщины, стоимость строительства конструкции автомобильной дороги с земляным полотном из золошлаковых смесей ТЭЦ ниже, чем с земляным полотном из местных грунтов. Снижение стоимости строительства составляет 14,5 %.

Таблица 6.7 – Сопоставительный расчет стоимости строительства опытно-экспериментального участка автомобильной дороги

Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество	Сметная стоимость, руб.		Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество	Сметная стоимость, руб.	
			на единицу	всего				на единицу	всего
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Земляное полотно</i>									
Грунт песчаный (пескогрунт)	м³	1616,4	44,94	72 641,02	Золошлаковая смесь	м³	1347	1,00	140,31
Разработка грунта с погрузкой на автомобили-самосвалы экскаваторами с ковшем вместимостью 1 (1–1,2) м³, группа грунтов 2	1000 м³	1,6164	–	4435,21	Разработка грунта с погрузкой на автомобили-самосвалы экскаваторами с ковшем вместимостью 1 (1–1,2) м³, группа грунтов 2	1000 м³	1,347	–	3696,02
Перевозка грузов автомобилями-самосвалами грузоподъемностью 10 т, работающими вне карьера на расстояние: I класс груза до 30 км	1 т груза	-2828,7	19,29	-54 565,62	Перевозка грузов автомобилями-самосвалами грузоподъемностью 10 т, работающими вне карьера на расстояние: I класс груза до 30 км	1 т груза	– 2303,37	19,29	–44 432,01
Перевозка грузов автомобилями-самосвалами грузоподъемностью 10 т, работающими вне карьера на расстояние: I класс груза до 35 км	1 т груза	2828,7	21,26	60 138,16	Перевозка грузов автомобилями-самосвалами грузоподъемностью 10 т, работающими вне карьера на расстояние: I класс груза до 35 км	1 т груза	2303,37	21,26	48 969,65

Продолжение таблицы 6.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Устройство дорожных насыпей бульдозерами с перемещением грунта до 20 м, группа грунтов 2	1000 м³	1,6164	–	2258,29	Устройство дорожных насыпей бульдозерами с перемещением грунта до 20 м, группа грунтов 2	1000 м³	1,347	–	1881,91
Уплотнение грунта вибрационными катками 2,2 т на первый проход по одному следу при толщине слоя 30 см	1000 м³	1,6164	–	1998,74	Уплотнение грунта вибрационными катками 2,2 т на первый проход по одному следу при толщине слоя 30 см	1000 м³	1,347	–	1665,61
На каждый последующий проход по одному следу добавлять к расценке 01-02-003-02	1000 м³	1,6164	–	1702,74	На каждый последующий проход по одному следу добавлять к расценке 01-02-003-02	1000 м³	1,347	–	1418,94
Сопутствующие работы									
Укрепление откосов земляных сооружений посевом многолетних трав: механизированным способом	100 м²	6,48	–	1 930,87	Укрепление откосов земляных сооружений посевом многолетних трав: механизированным способом	100 м²	6,48		1930,87
Земля растительная	м³	102,384	135,60	13 883,27	Земля растительная	м³	102,384	135,60	13 883,27
Семена трав: райграс	кг	17,496	57,99	1014,59	Семена трав: райграс	кг	17,496	57,99	1014,59
Укрепительные работы									
Укрепление обочин щебнем толщиной 10 см	1000 м²	0,6		3152,82	Укрепление обочин щебнем толщиной 10 см	1000 м²	0,6		3152,82
Щебень М 400, фракция 40–80(70) мм, группа 2	м³	75,6	45,25	3420,90	Щебень М 400, фракция 40–80(70) мм, группа 2	м³	75,6	45,25	3420,90

Продолжение таблицы 6.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из песка	100 м ³	2,62		10 700,90	Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из песка	100 м ³	2,62		10 700,90
Песок природный для строительных: работ средний с крупностью зерен размером свыше 5 мм-до 5 % по массе	м ³	288,2	27,63	7962,97	Песок природный для строительных работ средний с крупностью зерен размером свыше 5 мм до 5 % по массе	м ³	288,2	27,63	7962,97
Устройство дорожной одежды									
Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований из песка	100 м ³	3,6			Устройство подстилающих и выравнивающих слоев оснований: из песка	100 м ³	3,6		14 703,52
Песок природный для строительных: работ средний с крупностью зерен размером свыше 5 мм до 5 % по массе	м ³	396	27,63	10 941,48	Песок природный для строительных: работ средний с крупностью зерен размером свыше 5 мм до 5 % по массе	м ³	396	27,63	10 941,48
Устройство оснований толщиной 15 см из щебня фракции 40–70 мм при укатке каменных материалов с пределом прочности на сжатие свыше 68,6 до 98,1 МПа (свыше 700 до 1000 кгс/см ²) нижнего слоя двухслойных	1000 м ²	1,2		31 224,33	Устройство оснований толщиной 15 см из щебня фракции 40-70 мм при укатке каменных материалов с пределом прочности на сжатие свыше 68,6 до 98,1 МПа (свыше 700 до 1000 кгс/см ²): нижнего слоя двухслойных	1000 м ²	1,2		31 224,33

Продолжение таблицы 6.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Устройство оснований толщиной 15 см из щебня фракции 40-70 мм при укатке каменных материалов с пределом прочности на сжатие свыше 68,6 до 98,1 МПа (свыше 700 до 1000 кгс/см ²): верхнего слоя двухслойных	1000 м ²	1,2	—	38 601,44	Устройство оснований толщиной 15 см из щебня фракции 40–70 мм при укатке каменных материалов с пределом прочности на сжатие свыше 68,6 до 98,1 МПа (свыше 700 до 1000 кгс/см ²): верхнего слоя двухслойных	1000 м ²	1,2	—	38 601,44
На каждый 1 см изменения толщины слоя добавлять или исключать к расценкам 27-04-006-01, 27-04-006-02, 27-04-006-03 (до 31 см)	1000 м ²	1,2	—	2200,88	На каждый 1 см изменения толщины слоя добавлять или исключать к расценкам 27-04-006-01, 27-04-006-02, 27-04-006-03 (до 31 см)	1000 м ²	1,2	—	22 008,76
Щебень М 800, фракция 10–20 мм, группа 2	м ³	–18	185,49	–3338,82	Щебень М 800, фракция 10–20 мм, группа 2	м ³	–18	185,49	–3338,82
Щебень М 800, фракция 40–80(70) мм, группа 2	м ³	–468,72	103,00	–48 278,16	Щебень М 800, фракция 40–80(70) мм, группа 2	м ³	–604,8	103,00	–62 294,40
Щебень М 1000, фракция 40–80(70) мм, группа 2	м ³	486,72	77,97	37 949,56	Щебень М 1000, фракция 40–80(70) мм, группа 2	м ³	622,8	77,97	48 559,72
Подгрунтовочные работы путем розлива битумной эмульсии с применением автогудронатора	т	0,96	—	1664,91	Подгрунтовочные работы путем розлива битумной эмульсии с применением автогудронатора	т	0,96	—	1664,91

Продолжение таблицы 6.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Устройство покрытия из горячих асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиками второго типоразмера, толщина слоя 4 см	1000 м ²	1,2	—	11 453,67	Устройство покрытия из горячих асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиками второго типоразмера, толщина слоя 4 см	1000 м ²	1,2	—	11 453,67
При изменении толщины покрытия на 0,5 см добавлять или исключать к расценке 27-06-029-01	1000 м ²	1,2	—	2 041,07	При изменении толщины покрытия на 0,5 см добавлять или исключать к расценке 27-06-029-01	1000 м ²	1,2	—	2041,07
Смеси асфальтобетонные пористые крупнозернистые марка II	т	203	451,06	91 565,18	Смеси асфальтобетонные пористые крупнозернистые марка II	т	203	451,06	91 565,18
Подгрунтовочные работы путем розлива битумной эмульсии с применением автогудронатора	т	0,36	—	624,34	Подгрунтовочные работы путем розлива битумной эмульсии с применением автогудронатора	т	0,36	—	624,34
Устройство покрытия из горячих асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиками второго типоразмера, толщина слоя 4 см	1000 м ²	1,2	—	11 453,67	Устройство покрытия из горячих асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиками второго типоразмера, толщина слоя 4 см	1000 м ²	1,2	—	11 453,67
При изменении толщины покрытия на 0,5 см добавлять или исключать к расценке 27-06-029-01	1000 м ²	1,2		680,37	При изменении толщины покрытия на 0,5 см добавлять или исключать к расценке 27-06-029-01	1000 м ²	1,2		680,37

Окончание таблицы 6.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Смеси асфальтобетонные плотные мелкозернистые тип Б марка П	т	146,4	491,01	71 883,86	Смеси асфальтобетонные плотные мелкозернистые тип Б марка П	т	146,4	491,01	71 883,86
Итого прямые затраты (справочно)				392 593,53	Итого прямые затраты (справочно)				333 284,85
Итого накладные расходы (справочно)				8291,91	Итого накладные расходы (справочно)				8543,71
Итого сметная прибыль (справочно)				5160,72	Итого сметная прибыль (справочно)				5351,29
НДС 20%				81 209,23	НДС 20%				69 435,97
ВСЕГО по смете				487 255,39	ВСЕГО по смете				416 615,82
ВСЕГО по смете на 4 квартал 2021 г.				4 677 651,60	ВСЕГО по смете на 4 квартал 2021 г.				3 999 511,20

Выводы

1. Для оценки эффективности применения конструкций дорожных одежд с золошлаковыми смесями ТЭЦ используются такие показатели как уменьшение общей толщины конструкции дорожной одежды и стоимость строительства конструкций.

2. Снижение общей толщины дорожной одежды со слоями из золошлаковых смесей ТЭЦ по сравнению со слоями из традиционных материалов составило до 48 %.

Снижение стоимости строительства конструкций дорожных одежд со слоями из укрепленных неорганическими вяжущими материалами золошлаковых смесей ТЭЦ в сравнении со слоями из традиционных материалов составило до 21 %.

3. Для анализа стоимости строительства автомобильных дорог с земляным полотном из золошлаковых смесей в сравнении со стоимостью строительства из местных грунтов и материалов произведены расчеты сметной стоимости строительства опытно-экспериментального участка в текущем уровне цен на 4 квартал 2021 г. на дату производства работ:

- устройство временной объездной дороги протяженностью 150 м с использованием грунта песчаного составляет 4677,651 тыс. руб.;
- устройство временной объездной дороги протяженностью 150 м с использованием золошлаковых смесей ТЭЦ составляет 3999,511 тыс. руб.

Несмотря на необходимость устройства дорожной одежды бóльшей толщины, стоимость строительства конструкции автомобильной дороги с земляным полотном из золошлаковых смесей ТЭЦ ниже. Снижение стоимости строительства составляет 14,5 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В инженерной деятельности человека широко представлено строительство различных видов земляных сооружений: дамб, плотин, автомобильных и железных дорог, обратных засыпок траншей и котлованов, искусственных оснований и т. п.

Для возведения земляных сооружений, так же как и для других сооружений и зданий, необходимы экономичные и эффективные технологии. К таковым относятся укрепление местных грунтов неорганическими вяжущими материалами, в том числе на основе использования техногенных отходов. Методы укрепления грунтов неорганическими вяжущими материалами позволяют эффективно использовать отходы промышленного производства и потребления. В частности, в конструкциях автомобильных дорог можно эффективно применять золошлаковые смеси ТЭЦ.

Несмотря на имеющиеся наработки по применению различных золошлаковых материалов ТЭЦ в строительстве, исследования их использования в регионах континентального климата ограничены. Автомобильные дороги, построенные с применением золошлаковых материалов, в этих климатических условиях практически отсутствуют.

Для эффективного практического использования укрепленных грунтов необходимо правильно подбирать их оптимальный состав и проектировать конструкцию автомобильных дорог. На сегодня в практике лабораторных испытаний сложились следующие тенденции.

1) Нет подробных рекомендаций по определению модуля упругости слоев автомобильных дорог из грунтов, укрепленных неорганическим вяжущим в лабораторных условиях. Их отсутствие не позволяет осуществлять подбор состава смеси укрепленных грунтов с заданными проектной документацией значениями модуля упругости, что приводит к невозможности обеспечения требуемых значений модуля упругости при строительстве автомобильных дорог.

2) Отсутствуют ориентировочные качественные характеристики и описания областей применения укрепленных грунтов в зависимости от вида вяжущего материала, климатических особенностей района строительства и конструктивного слоя автомобильных дорог.

3) Существующие методы лабораторных испытаний очень трудоемки и длительны, что приводит к большой потере времени при подборе состава (от 2 мес.) и уменьшает область применения материалов.

4) Отсутствуют ускоренные методы оценки качественных характеристик грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами.

5) Нет четких требований к подбору составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами.

Перечисленные недостатки являются одной из основных причин ограниченного применения этих материалов в условиях континентального климата, где продолжительность строительного сезона небольшая.

В настоящее время не сформулированы теоретические основы применения золошлаковых смесей ТЭЦ в составах грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими. Для эффективного применения укрепленных грунтов необходимо развитие методологических подходов к подбору состава и методов определения физико-механических характеристик в лабораторных условиях, а также развитие и разработка методов контроля качества устроенных слоев.

В работе обоснована методика проведения экспериментальных исследований. Определены места отбора проб грунтов и золошлаковых смесей ТЭЦ. Рассмотрены математические модели прогнозирования во времени прочностных характеристик грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими. Применение этих уравнений на практике затруднительно, так как на процессы структурообразования и, как следствие, на конечную прочность на сжатие влияет много факторов: характеристики вяжущего материала, минералогия грунта, число пластичности, значение оптимальной влажности и др. Прогнозирование конечных свойств укрепленных золошлаковых смесей ТЭЦ осложняется тем, что на процессы структурообразования будет также влиять содержание в материалах оксидов

кальция и магния, количество стекловидной фазы и др. Поэтому с учетом крупнотоннажного накопления ЗШС в золоотвалах, которое исчисляется млн т, целесообразно построение математических зависимостей для каждого золоотвала в отдельности.

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) образцов 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 модуля упругости 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. Конструкции дорожных одежд разработаны в период производства работ по строительству опытно-экспериментальных конструкций с учетом требований действовавших нормативных документов. 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 одедами 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. Новосибирск – Кемерово – Красноярск – Иркутск» на участке км 1797+000 – км 1842+000 с применением золошлаковых смесей ТЭЦ.

Конструкция участка автомобильной дороги с земляным полотном из золошлаковых смесей имеет уровень эксплуатационного состояния не ниже чем конструкция 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 одедами со слоями из традиционных материалов составляет до 21 %.

Для анализа стоимости строительства автомобильных дорог с земляным полотном из золошлаковых смесей в сравнении со стоимостью строительства автомобильных дорог с земляным полотном из местных грунтов и материалов произведены расчеты сметной стоимости строительства опытно-экспериментального участка в текущем уровне цен на 4 квартал 2021 г. на дату производства работ:

– устройство временной объездной дороги протяженностью 150 м с использованием грунта песчаного составляет **4677,651 тыс. руб.;**

– устройство временной объездной дороги протяженностью 150 м с использованием золошлаковых смесей ТЭЦ составляет **3999,511 тыс. руб.**

Несмотря на необходимость устройства дорожной одежды большей толщины, стоимость строительства конструкции автомобильной дороги с земляным полотном из золошлаковых смесей ТЭЦ ниже чем у земляного полотна из местных грунтов. Снижение стоимости строительства 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 изучения процессов структурообразования в грунтах, укрепленных различными неорганическими вяжущими, в том числе комплексными, при воздействии на них микроволнового излучения различной частоты.

Список литературы

1. Abaza, K.A. Empirical Markovian-based models for rehabilitated pavement performance used in a life cycle analysis approach / K.A. Abaza // *Structure and Infrastructure Engineering*. – 2017. – Vol. 13, Is. 5. – Pp. 625–636. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1187180>.
2. Abdelhadi, M. Efficiency of albumin and eggshell powder in soil stabilization / M. Abdelhadi, K. Gotoh // *Soils Found.* – 1998. – Vol. 38, Is. 3. – Pp. 109–114. https://doi.org/10.3208/sandf.38.3_109.
3. Abed, M.H. Experimental feasibility study of using eco- and user-friendly mechanochemically activated slag/fly ash geopolymer for soil stabilization / M.H. Abed, F.H. Abed, S.A. Zareei [et al.] // *Cleaner Materials*. – 2024. – Vol. 11. – P. 11. – ISSN 2772-3976. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100226>.
4. Ahmad, S. Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review / S. Ahmad, M.S.A. Ghazi, M. Syed, M.A. Al-Osta // *Results in Engineering*. – 2024. – Vol. 22. – ISSN 2590-1230. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102079>.
5. Alawi, A.A.S. Enhancement of the existing soil strength using the waste materials as a stabilization resource for sustainable development / A.A.S. Alawi, K. Gopalakrishnan, K. Parameswari, R. Nirmala // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.191>.
6. Alhaji, M.M. Optimal density for effective chemical stabilization of deficient soils for road structures / M.M. Alhaji, M.A. Muazu, M. Alhassan [et al.] // *Materials Today: Proceedings*. – 2024. – Vol. 105. – Pp. 62–71. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.230>.
7. Al-Janabi, A.T. Evaluation the swelling soil stabilized by waste corn ash (WCA) / A.T. Al-Janabi, A.A. Al-Saedi // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 13. – P. 10742–10746. – ISSN 1816-949X.
8. Al-kutti, W. Potential use of date palm ash in cement-based materials / W. Al-kutti, A.B.M.S. Islam, M. Nasir // *Journal of King Saud University*. – Engineer-

ing Sciences. – 2019. – Vol. 31, Is. 1. – Pp. 26–31. – ISSN 1018-3639. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.01.004>.

9. Al-Mukhtar, M. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil / M. Al-Mukhtar, S. Khat tab, J.-F. Alcover // Engineering Geology. – 2012. – Vol. 139–140. – Pp. 17–27. – ISSN 0013-7952. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>.

10. Al-Subari, B.L. Life cycle assessment of soil stabilization using cement and waste additives / B.L. Al-Subari, A. Hilal, A. Ekin ci // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 403. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133045>.

11. Alzhanova, G.Z. Development of Environmentally Clean Construction Materials Using Industrial Waste / G.Z. Alzhanova, Y.K. Aibul dinov, Z.B. Iskakova, S.M. Khabidolda // Materials. – 2022. – Vol. 15(16). DOI: 10.3390/ma15165726 P. 15.

12. Amândio, A.M. Intelligent planning of road pavement rehabilitation processes through optimization systems / A.M. Amândio, J.M.C. Neves, M. Parente // Transportation Engineering. – 2021. – Vol. 5. – ISSN 2666-691X. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100081>.

13. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice // American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). – 2008. – P. 218.

14. Amin, M.S.R. The pavement performance modeling: deterministic vs. stochastic approaches / M.S.R. Amin // Springer International Publishing. – 2015. – Pp. 179–196.

15. Araújo, M.T. Mechanical behavior, mineralogy, and microstructure of alkali-activated wastes-based binder for a clayey soil stabilization / M.T. Araújo, S.T. Ferrazzo, H.M. Chaves [et al.] // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 362 – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129757>.

16. Arulrajah, A. Recycled concrete aggregate/municipal glass blends as a low-carbon resource material for footpaths / A. Arulrajah, M. Imteaz, S. Horpibulsuk

[et al.] // Road Mater. Pavement Des. – 2018. – Vol. 19, Is. 3. – Pp. 727–740. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1267660/>.

17. Atahu, M.K. Strength and compressibility behaviors of expansive soil treated with coffee husk ash / M.K. Atahu, F. Saathoff, A. Gebissa // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2019. – Vol. 11, Is. 2. – Pp. 337–348. – ISSN 1674-7755. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1267660/>.

18. Bakaiyang, L. Re-use in road construction of a Karal-type clay-rich soil from North Cameroon after a lime/cement mixed treatment using two different limes / L. Bakaiyang, J. Madjadoumbaye, Y. Boussafir [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2021. – Vol. 15. – ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00626>.

19. Balagosa, J. Dynamic property growth of weathered granite soils stabilized with wood pellet fly ash based binders / J. Balagosa, I.J. Navea, M.J. Lee [et al.] // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2024. – Vol. 180. – ISSN 0267-7261. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108627>.

20. Baldovino, J.A. Insight on characterization through porosity-to-lime index of a stabilized soil for the long-term / J.A. Baldovino, Y.E.N. Rosa, O.P. Calabokis // Case Studies in Construction Materials. – 2024. – Vol. 20. – ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02718>.

21. Bashkarev, A. A model for assessing the quality of the granulometric composition of an asphalt concrete mixture / A. Bashkarev, A. Novik, A. Ismailov // Technical and technological problems of the service. – 2023. – Pp. 34–42.

22. Bazarbekova, A. One-part alkali-activated soil stabilization with sodium metasilicate: Mechanical-geochemical-mineralogical characterization / A. Bazarbekova, S.R. Naik, Y.-R. Kim [et al.] // Transportation Geotechnics. 2024. – Vol. 44. – ISSN 2214-3912. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101163>.

23. Behera, R. An experimental study on evaluation of fiber Reinforced-Fly ash stabilized black cotton soil as a sustainable subgrade material / R. Behera, M. Ranjan // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 62, Part 10. – Pp. 6182–6188. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.044>.

24. Bera, A.K. Influence of fly ash content on compaction characteristics of fly ash clay mixture / A.K. Bera, S. Kundu // *Jordan Journal of Civil Engineering*. – 2016. – Vol. 10(1). – Pp. 55–66. DOI:10.14525/JJCE.10.1.3405.
25. Besche, E. Determination of water-to-cement ratio in freshly mixed rapid-setting calcium sulfoaluminate concrete using 2.45 GHz microwave radiation / E. Besche, M. Sambol, E.K. Rice, J.D. Mackenzie // *Cement and Concrete Research*. – 2001. – Vol. 34. – Pp. 807–812.
26. Boobalan, S.C. Utilization of waste plastic sheets as soil stabilization materials / S.C. Boobalan, P.K. Anandakumar, M. Sathasivam // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – P. 10. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.184>.
27. Boobalan, S.C. Investigational study on the influence of lime and coir fiber in the stabilization of expansive soil / S.C. Boobalan, M.S. Devi // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 60, Part 1. – Pp. 311–314. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.230>.
28. Brooks, R.M. Soil stabilization with fly ash and rice husk ash / R.M. Brooks // *Int. J. Res. Rev. Appl. Sci*. – 2009. – Vol. 1. – Pp. 209–217.
29. Brown, S.F. The Relationship between California Bearing Ratio and Elastic Stiffness for Compacted Clays / S.F. Brown, M.P. O'Reilly // *Ground Engineering*. – 1990. – Pp. 27–31.
30. Carey, A.S. Backcasting and forecasting stabilized soil mechanical properties for mechanistic-empirical pavement design / A.S. Carey, I.L. Howard // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 324. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126645>.
31. Castaneda-Lopez, M. Evaluation and prediction of tensile properties of cement stabilized soils / M. Castaneda-Lopez, T. Lenoir, L. Thorel // *Transportation Research Procedia*. – 2023. – Vol. 72. – Pp. 1597–1604. – ISSN 2352-1465. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.630>.
32. Celauro, B. Design Procedures for Soil-Lime Stabilization for Road and Railway Embankments. Part 1. Review of Design Methods. *Procedia* / B. Celauro,

A. Bevilacqua, D.L. Bosco, C. Celauro // Social and Behavioral Sciences. – 2012. – Vol. 53. – Pp. 754–763. – ISSN 1877-0428. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.925>.

33. Chen, K. Modeling and optimization of fly ash–slag–based geopolymer using response surface method and its application in soft soil stabilization / K. Chen, D. Wu, Z. Zhang [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 315. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125723>.

34. Chindaprasirt, P. Estimation of modulus of elasticity of compacted loess soil and lateritic-loess soil from laboratory plate bearing test / P. Chindaprasirt, A. Sriyorch, A. Arngbunta [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2022. – Vol. 16. – ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00837>.

35. Darikandeh, F. Small-scale laboratory test on expansive soil stabilized by CCR-Fly ash columns / F. Darikandeh, B. Viswanadham, M. Arabani // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement. – 2020. – Vol. 175, Is. 1. – Pp. 64–72. – ISSN 1755-0750. <https://doi.org/10.1680/jgrim.18.00002>.

36. Deng, C. Resilient modulus and influencing factors of vertical vibration compacted cement-stabilized macadam / C. Deng, Y. Jiang, T. Tian // Int. J. Pavement Eng. – 2021. – 22 (11). – Pp. 1435–1445.

37. Design Procedures for Soil Modification or Stabilization // Production Division Office of Geotechnical Engineering 120 South Shortridge Road Indianapolis. – 2008. – P. 13.

38. Dhawale, A.W. Laterite soil stabilization using cellulose biopolymer / A.W. Dhawale, S.P. Banne // Materials Today: Proceedings. – 2023. – P. 9. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.062>.

39. Diana, J. Improvement of subgrade clayey soil using eggshell / J. Diana, J. Naveena, S.N. Prasath // Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol. – 2017. – 5. – Pp. 983–989.

40. Díaz-López, J.L. Geotechnical and engineering properties of expansive clayey soil stabilized with biomass ash and nanomaterials for its application in structural road layers / J.L. Díaz-López, M. Cabrera, F. Agrela, J. Rosales // Geomechanics for Energy and the Environment. – 2023. – Vol. 36. – ISSN 2352-3808. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2023.100496>.

41. Espinosa, A.B. Analysis of the deformational behavior of a clayey foundation soil stabilized with ladle furnace slag (LFS) using a finite element software / A.B. Espinosa, V. López-Ausín, F. Fiol [et al.] // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.721>.
42. Fedrigo, W. A study on the resilient modulus of cement-treated mixtures of RAP and aggregates using indirect tensile, triaxial and flexural tests / W. Fedrigo, W.P. Núñez, M.A.C. López // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 171. – Pp. 161–169. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.119>.
43. Field Manual No. 5-410 Headquarters Department of the Army Washington, DC, Chapter 9 FHWA. – 1997. – P. 344.
44. Gajewska, B. Significance of cement-stabilized soil grain size distribution in determining the relationship between strength and resilient modulus / B. Gajewska, C. Kraszewski, L. Rafalski // *Road. Mater. Pavement Des.* – 2018. – 19 (7). – Pp. 1692–1701.
45. Gamage, N. An Investigation of Usability of Brown Coal Fly Ash for Building Materials / N. Gamage, S. Setunge, K. Liyanage // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Pp. 30–35.
46. Gao, M. Investigation of the performance of cement-stabilized magnesium slag as a road base material / M. Gao, J. Dai, H. Jing [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 403. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133065>.
47. Gao, Z. Impacts of microwave on hydration evolution of Portland cement in the perspective of composition and microstructure of hydrates / Z. Gao, Y. He, M. Li [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 360. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129569>.
48. George, A.M. Performance evaluation of geocell-reinforced reclaimed asphalt pavement (RAP) bases in flexible pavements / A.M. George, A. Banerjee, A.J. Puppala, M. Saladhi // *Int. J. Pavement Eng.* – 2021. – 22 (2). – Pp. 181–191.

49. Gerald, A. Miller. Empirical method for predicting time-dependent strength and resilient modulus of chemically treated soil / A. Miller Gerald, B. Cerato Amy, R. Donald [et al.] // *Transportation Geotechnics*. – 2021. – Vol. 29. – ISSN 2214-3912. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100551>.
50. Green, J.L. Nondestructive Vibratory Testing of Airport Pavements Volume I: Experimental Test Results and Development of Evaluation Methodology and Procedure / J.L. Green, J.W. Hall // *Federal Aviation Administration Report No. FAA-RD-73-205-1*. – 1975. – P. 214.
51. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final document appendix CC-1: correlation of CBR values with soil index properties // *Illinois: Ara, Inc.* – 2001. – P. 204.
52. Gupta, A. Clayey soil stabilization using flyash and jute fibre / A. Gupta, M. Kumar // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 48, Part 5. – Pp. 1205–1210. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.246>.
53. Hadbaatar, A. Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction / A. Hadbaatar, N.A. Mashkin, N.G. Stenina // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150. – Pp. 1558–1562. – ISSN 1877-7058. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.111>.
54. Hasan, H. Remediation of expansive soils using agricultural waste bagasse ash / H. Hasan, L. Dang, H. Khabbaz [et al.] // *Procedia Eng.* – 2016. – Vol. 143. – Pp. 1368–1375. – ISSN 1877-7058. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.161>.
55. Hasanzadeh, A. Prediction of the Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced High-Performance Concrete Using Machine Learning Techniques / A. Hasanzadeh, N.I. Vatin, M. Hematibahar [et al.] // *Materials*. – 2022. – P. 15.
56. Heidrich, C. Ash Utilisation-an Australian Perspective / C. Heidrich // *International Ash Utilization Symposium*. – 2003. – Pp. 1–13.
57. Heukelom, W. Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction / W. Heukelom, A.J.G. Klomp // *Proc., of 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*. – 1962. – P. 203.

58. Ho, L.S. Machine learning approach for predicting and evaluating California bearing ratio of stabilized soil containing industrial waste / L.S. Ho, V.Q. Tran // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – P. 370.
59. Hoy, Me. Wetting-drying durability performance of cement-stabilized recycled materials and lateritic soil using natural rubber latex / Me. Hoy, N.Q. Tran, A. Suddeepong [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 403. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133108>.
60. Total waste generation : An official website of the European Union. – 2022. – https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation.
61. Soil Stabilization Methods with Different Materials : Geotechnical Engineering. – 2021. – <https://theconstructor.org/geotechnical/soil-stabilization-methods-and-materials/9439/>.
62. Ikechukwu, A.F. Resilient modulus and microstructure of unsaturated expansive subgrade stabilised with activated fly ash / A.F. Ikechukwu, M.M. Hassan, A. Moubarak // *Int. J. Geotech. Eng.* – 2021. – 15 (8) – Pp. 915–938.
63. Indraratna, B. Engineering Behaviour of a Low Carbon Pozzolanic Fly Ash and its Potential as a Construction Fill / B. Indraratna, P. Nutalaya, K.S. Koo // *Canadian Geotechnical journal*. – 2011. – Pp. 542–555.
64. Issa, A. Predicting pavement condition index using artificial neural networks approach / A. Issa, H. Samaneh, M. Ghanim // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 13, Is. 1. – ISSN 2090-4479. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.04.033>.
65. Jabar, M. Rasul. Consideration of the deterioration of stabilised subgrade soils in analytical road pavement design / Jabar M. Rasul, Michael P.N. Burrow, Gurmeh S. Ghataora // *Transportation Geotechnics*. – 2016. – Vol. 9. – Pp. 96–109. – ISSN 2214-3912. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.08.002>.
66. Jakka, R.S. Shear Strength Characteristics of Loose and Compacted Pond Ash / R.S. Jakka, M. Datta, G.V. Ramana // *J. Geotech. and Geol.* – Vol. 28(6). – Pp. 763–778.

67. James, J. Performance study on soil stabilisation using natural materials / J. James, P.K. Pandian // *Int. J. Earth Sci. Eng.* – 2013. – 6 (1). – Pp. 194–203.
68. Jha, M.K. Markovian approach for optimizing highway life-cycle with genetic algorithms by considering maintenance of roadside appurtenances / M.K. Jha, J.A. Abdullah // *Journal of the Franklin Institute.* – 2006. – Vol. 343, Is. 4–5. – Pp. 404–419. – ISSN 0016-0032. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2006.02.027>.
69. Joy, A. Effect of organic matter on the shear strength of lime-stabilised clayey soils / A. Joy, B.M. Abraham, A. Sridharan // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement.* – 2023. – Vol. 176, Is. 2. – Pp. 99–107. – ISSN 1755-0750. <https://doi.org/10.1680/jgrim.20.00055>.
70. Kaloush, K. Development of PCI-based Pavement Performance Model for Management of Road Infrastructure System by Kan Wu / K. Kaloush, C.X. Zhou, S. Underwood. – Arizona State University. – 2015. – P. 89.
71. Karami, H. Use of secondary additives in fly ash based soil stabilization for soft subgrades / H. Karami, J. Pooni, D. Robert [et al.] // *Transportation Geotechnics.* – 2021. – Vol. 29. – ISSN 2214-3912. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100585>.
72. Kasehchi, E. Experimental investigation of the feasibility of stabilizing in-shore silty sand soil using geopolymers based on ceramic waste powder: An approach to upcycling waste material for sustainable construction / E. Kasehchi, M.A. Arjomand, M.H.A. Elizei // *Case Studies in Construction Materials.* – 2024. – Vol. 20. – ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02979>.
73. Kassa, A. Insights into water absorption characteristics of various waste-based inorganic additives and their application for soil stabilization / A. Kassa, R. Sekine, T. Dorji [et al.] // *Journal of Cleaner Production.* – 2024. – Vol. 446. – ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141470>.
74. Kavussi, A. A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results / A. Kavussi, A. Modarres // *Construction and Building Materials.* – 2010. – Vol. 24, Is. 11. – Pp. 2252–2259. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.031>.

75. Kestler, M.A. Stabilization Selection Guide for Aggregate and Native-Surfaced Low Volume Roads / M.A. Kestler // Department of transportation. – U.S. Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas Technology and Development Center. – 2009. – P. 93.
76. Kim, B. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments / B. Kim, M. Prezzi, R. Salgaro // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. – 2021. – Is. 7. – Pp. 914–924.
77. Kong, Y. Effects of microwave curing on the compressive strength development and hydration of cement-granulated blast furnace slag composite system / Y. Kong, S. Liu, P. Wang // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 270. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121432>.
78. Konovalova, N. Road soil concrete based on stone grinder waste and wood waste modified with environmentally safe stabilizing additive / N. Konovalova, P. Pankov, D. Bespolitov [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2023. – Vol. 19. – ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02318>.
79. Koohmishi, M. Mechanical Properties of Clayey Soil Reinforced with PET Considering the Influence of Lime-Stabilization / M. Koohmishi, M. Palassi // Transportation Geotechnics. – 2022. – Vol. 33. – ISSN 2214-3912. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100726>.
80. Kozubal, J.V. Ultrasonic assessment of cement-stabilized soils: Deep learning experimental results / J.V. Kozubal, T. Kania, A.S. Tarawneh [et al.] // Measurement. – 2023. – Vol. 223. – ISSN 0263-2241. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113793>.
81. Kumar, A. Influence of fly ash, lime, and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soil / A. Kumar, B.S. Walia, A. Bajaj // J. Mater. Civ. Eng. – 2007. – 19 (3). – Pp. 242–248.
82. Kumar, D. Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions / D. Kumar, N. Kumar, A. Gupta // International Journal of Science and Research (IJSR). – 2014. – Pp. 1487–1494.
83. Kumar, S. Subgrade soil stabilization using geosynthetics: A critical review /

S. Kumar, S.K. Singh // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.266>.

84. Laguna-Torres, C.A. Effect of physical, chemical, and mineralogical properties for selection of soils stabilized by alkaline activation of a natural pozzolan for earth construction techniques such as compressed earth blocks / C.A. Laguna-Torres, J.R. González-López, M.Á. Guerra-Cossío [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2024. – P. 419.

85. Lee, S.H. Effect of particle size distribution of fly ash-cement system on the fluidity of cement pastes / S.H. Lee, H.J. Kim, E. Sakai, M. Daimon // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Vol. 33, Is. 5. – Pp. 763–768. – ISSN 0008-8846. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01054-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01054-2).

86. Leung, C.K.Y. Freeze-thaw durability of microwave cured air-entrained concrete / C.K.Y. Leung, T. Pheeraphan // *Cement and Concrete Research*. – 1997. – Vol. 27, Is. 3. – Pp. 427–435. – ISSN 0008-8846. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00014-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00014-8).

87. Liang, S. Utilization of pretreated municipal solid waste incineration fly ash for cement-stabilized soil / S. Liang, J. Chen, M. Guo [et al.] // *Waste Management*. – 2020. – Vol. 105. – Pp. 425–432. – ISSN 0956-053X. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.017>.

88. Lim, S. Estimation of the compressive strength and modulus of elasticity of cement-treated aggregate base materials / S. Lim, D.G. Zollinger // *Transp. Res. Rec.* – 2003. – 1837 (1). – Pp. 30–38.

89. Lime-treated soil construction manual lime stabilization & lime modification. – National Lime Association Lime The Versatile Chemical. – 2004. – P. 41.

90. Linares, A. Metodología Para el Avance en la Caracterización del Suelo cemento de Aplicación en Firmes Semirrígidos / A. Linares // Universidad de Burgos, Burgos, Spain. – 2015. – P. 17.

91. Lu, J. Fabrication of superhydrophobic soil stabilizers derived from solid wastes applied for road construction: A review / J. Lu, Sabrina Y. Jiang, J. Chen [et al.] // *Transportation Geotechnics*. – 2023. – Vol. 40. – ISSN 2214-3912. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100974>.

92. Luo, Z. Pavement performance modelling with an auto-regression approach / Z. Luo // *International Journal of Pavement Engineering*. – 2013. – № 1. – Pp. 85–94.
93. Mahmood, A. An assessment of lime-cement stabilization on the elastic and resilient moduli of a clayey soil / A. Mahmood, R. Hassan, A. Fouad // *Int. J. Pavement Eng.* 2021. – P. 12.
94. Makul, N. Innovative hybrid curing method for accelerating the strength of high-performance cement paste using microwave heating coupling with low-pressure processing / N. Makul // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 105. – Pp. 245–252. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.084>.
95. Makul, N. Microwave curing at an operating frequency of 2.45GHz of Portland cement paste at early-stage using a multi-mode cavity: Experimental and numerical analysis on heat transfer characteristics / N. Makul, P. Rattanadecho, D.K. Agrawal // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2010. – Vol. 37, Is. 10. – Pp. 1487–1495. – ISSN 0735-1933. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.09.001>.
96. Makusa, G.P. State of the art review soil stabilization methods and materials in engineering practice / G.P. Makusa // *Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering Division of Mining and Geotechnical Engineering Luleå University of Technology*. – Sweden Luleå. – 2012. – P. 35.
97. Mangat, P.S. Microwave curing parameters of in-situ concrete repairs / P.S. Mangat, K. Grigoriadis, S. Abubakri // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 112 – Pp. 856–866. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.007>.
98. Manlin, L. Evaluation of brown coal fly ash for stabilising expansive clay subgrade: A sustainable solution for pavement construction / L. Manlin, S. Mohammad, L. Jie [et al.] // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2024. – Vol. 204. – ISSN 0921-3449. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107533>.
99. Marto, A. Compaction Characteristics and Permeability of Tanjung Bin Coal Ash Mixtures / A. Marto, A.R. Awang, A.M. Makhtar // *International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE*. – Pp. 134–137.

100. Mir, B.A. Mechanical behaviour of fly-ash-treated expansive soil / B.A. Mir, A. Sridharan // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*. – 2018. – Vol. 172, Is. 1. – Pp. 12–24. – ISSN 1755-0750. <https://doi.org/10.1680/jgrim.16.00024>.
101. Mishra, A. Strength, deformation, and environmental impact assessment of cement stabilized mine overburden soil / A. Mishra, A. Dixit, A.K. Singh, S.K. Das // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. – Vol. 447. – ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141475>.
102. Mishra, P. Stabilization of subgrade with expansive soil using agricultural and industrial By-products: A review / P. Mishra, S. Shukla, A. Mittal // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 65, Part 2. – Pp. 1418–1424. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.397>.
103. Mohajerani, A. Physical, mechanical and chemical properties of biosolids and raw brown coal fly ash, and their combination for road structural fill applications / A. Mohajerani, S. Lound, G.K. Liassos [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Pp. 1–11.
104. Mohamed, A.A.M.S. Improvement of expansive soil characteristics stabilized with sawdust ash, high calcium fly ash and cement / A.A.M.S. Mohamed, J. Yuan, M. Al-Ajamee [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 18. – ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01894>.
105. Mohamed, S.F.W. Analysis of thermal power plant fly ash and lime in increasing shear strength of soft clay / S.F.W. Mohamed, S. Yahya // *In IOP Confer. Series Earth Environ. Sci.* – 2020. – 476 (1). – P. 12.
106. Mohanty, S. Geotechnical characterization of Panki and Panipat pond ash in India / S. Mohanty, N.R. Patra // *Geo-Engineering*. – 2015. – 13. – Pp. 1–18.
107. Muhandi. Engineering Characteristics of Tanjung Bin Coal Ash / Muhandi, A. Marto, K.A. Kassim [et al.] // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2010. – Pp. 1117–1129.
108. Munir, A. Utilization of palm oil fuel ash (POFA) in producing lightweight foamed concrete for non-structural building material / A. Munir, Abdullah, Sofyan

[et al.] // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 125. – Pp. 739–746. – ISSN 1877-7058. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.119>.

109. Munirwan, R.P. Utilization of coffee husk ash for soil stabilization: A systematic review / R.P. Munirwan, A.M. Taib, M.R. Taha [et al.] // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. – 2022. – Vol. 128. – ISSN 1474-7065. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103252>.

110. Munirwan, R.P. Study of coffee husk ash addition for clay soil stabilization / R.P. Munirwan, D. Sundary, M. Munirwansyah, B. Bunyamin // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* – 2020. – P. 1087.

111. Munirwan, R.P. Performance of eggshell powder addition to clay soil for stabilization / R.P. Munirwan, R.P. Jaya, R. Munirwansyah // *Int. J. Recent Technol. Eng.* – 2019. – Pp. 532–535.

112. Munirwan, R.P. Performance of coir fiber addition for clay as a sub-grade for pavement design / R.P. Munirwan, M. Munirwansyah, M. Marwan [et al.] // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* – 2020. – P. 9.

113. Murmu, A.L. Studies on the properties of fly ash–rice husk ash-based geopolymer for use in black cotton soils / A.L. Murmu, A. Patel // *Int. J. Geosynth. Ground Eng.* – 2020. – 6 (3). – Pp. 1–14.

114. Nafees, A. Forecasting the Mechanical Properties of Plastic Concrete Employing Experimental Data Using Machine Learning Algorithms: DT, MLPNN, SVM, and RF / A. Nafees, S. Khan, M.F. Javed [et al.] // *Polymers*. – 2022. – № 8. – P. 12.

115. Naik, R. Novel framework for assessing economic viability and environmental impacts: Use of waste products in soil stabilization / R. Naik, S. Kumar, G. Saha // *Construction and Building Materials*. – 2024. – Vol. 411. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134329>.

116. Nan, J. Investigation on the microstructural characteristics of lime-stabilized soil after freeze-thaw cycles / J. Nan, D. Chang, J. Liu [et al.] // *Transportation Geotechnics*. – 2024. – Vol. 44. – ISSN 2214-3912. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101175>.

117. Niraj, B. Experimental study on stabilization of clayey soil using agricultural and industrial waste / B. Niraj, T. Sharma // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – P. 14. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.290>.
118. Novianto, D. The experimental procedures of sand and lime as base soil stabilization materials on the modified proctor values for flexible pavement construction / D. Novianto, T. Rochman // *MethodsX*. – 2023. – Vol. 11. – ISSN 2215-0161. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102473>.
119. Novik, A. Study of physical and mechanical properties of asphalt concrete with the addition of artificial asphaltite / A. Novik, A. Ismailov, I. Sentsov // *IOP Conference Series: Proceedings of STCCE. International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering 2022 : Lecture Notes in Civil Engineering*. – Switzerland, 2022. – Pp. 15–30. – ISBN 978-3-031-14622-0. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7_2.
120. Ogurtsov, G. Concrete Beams with External Reinforcement of Composite Materials / G. Ogurtsov, G. Averchenko, S. Alekseev // *Proceedings of STCCE: International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering 2022: Lecture Notes in Civil Engineering*. – Kazan, 2022. – Vol. 291. – ISBN 978-3-031-14622-0. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7_31.
121. Oyedepo, O.J. Performance of coconut shell ash and palm kernel shell ash as partial replacement for cement in concrete / O. J. Oyedepo, L.M. Olanitori, S.P. Akande // *J. Build. Mater. Struct.* – 2015. – 2. – Pp. 18–24. – ISSN 2353-0057.
122. Ojuri, O.O. Eco-friendly stabilization of highway lateritic soil with cow bone powder admixed lime and plastic granules reinforcement / O.O. Ojuri, P.O. Osagie, B.D.s Oluyemi-Ayibiowu, O.G. Fadugba // *Cleaner Waste Systems*. – 2022. – Vol. 2. – ISSN 2772-9125. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100012>.
123. Oke, J.A. Stabilization of laterite soil with eggshell powder and sodium silicate used as fill material in road construction / J.A. Oke, M.K. Olowoyo // *Arid Zone Journal of Engineering, Technology & Environment*. – 2019. – Vol. 15 (3). – Pp. 586–597. – ISSN 1596-2490.

124. Owino, A.O. The influence of basalt fiber filament length on shear strength development of chemically stabilized soils for ground improvement / A.O. Owino, Z. Hossain // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 374. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130930>.
125. Pal, S.K. Shear strength behavior of Indian flu ashes / S.K. Pal, A. Ghosh // *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEO-TIDE)*. – 2009. – Vol. 1. – Pp. 18–22.
126. Pericleous, M.I. Resilient modulus of cement-stabilized phosphogypsum / M.I. Pericleous, J.B. Metcalf // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 1996. – Vol. 8, Is. 1. – Pp. 7–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1996\)8:1\(7\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1996)8:1(7)).
127. Phanikumar, B. Behaviour of expansive clay beds with fly-ash-stabilised clay cushion / B. Phanikumar // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*. – 2020. – Vol. 175, Is. 1. – Pp. 73–81. – ISSN 1755-0750. <https://doi.org/10.1680/jgrim.18.00081>.
128. Pokharel, B. Effect of calcium bentonite clay and fly ash on the stabilization of organic soil from Alberta, Canada / B. Pokharel, S. Siddiqua // *Engineering Geology*. – 2021. – Vol. 293. – ISSN 0013-7952. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106291>.
129. Pourakbar, S. Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement / S. Pourakbar, A. Asadi, B.B.K. Huat, M.H. Fasihnikoutalab // *Transportation Geotechnics*. – 2015. – Vol. 3. – Pp. 24–35. – ISSN 2214-3912. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.01.002>.
130. Puppala, A.J. Estimating Stiffness of Subgrade and Unbound Materials for Pavement Design / A.J. Puppala. – Washington D.C. : The National Academies Press, 2008. – P. 139.
131. Puppala, A.J. Resilient moduli response of moderately cement-treated reclaimed asphalt pavement aggregates / A.J. Puppala, L.R. Hoyos, A.K. Potturi // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2011. – Vol. 23(7). – Pp. 990–998. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000268.

132. Putilova, I.V. Current state of the coal ash handling problem in Russia and abroad, aspects of the coal ash applications in hydrogen economy / I.V. Putilova // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48, Is. 80. – P. 31040–31048. – ISSN 0360-3199. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.230>.

133. Putri, E.E. Evaluation of Modulus of Elasticity and Modulus of Subgrade Reaction of Soils Using CBR Test / E.E. Putri, N.S.V. Kameswara Rao, M.A. Mannan // *Journal of Civil Engineering Research*. – 2012. – Vol. 2(1). – Pp. 34–40. DOI: 10.5923/j.jce.20120201.05.

134. Rabab'ah, S.R. Effect of using Oil Shale Ash on geotechnical properties of cement-stabilized expansive soil for pavement applications / S.R. Rabab'ah, A.A. Sharo, M.M. Alqudah [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 19. – ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02508>.

135. Rahmat, M.N. Effects of mellowing sulfate-bearing clay soil stabilized with wastepaper sludge ash for road construction / M.N. Rahmat, J.M. Kinuthia // *Engineering Geology*. – 2011. – Vol. 117, Is. 3–4. Pp. 170–179. – ISSN 0013-7952. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.015>.

136. Raja, K. A review on soil stabilization using rice husk ash and lime sludge / K. Raja, S. Venkatachalam, K. Vishnuvardhan [et al.] // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Part 2. – Pp. 1205–1212. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.178>.

137. Rao, T.S. Strength properties of soil stabilization with banana leaves ash / T.S. Rao, U. Lokesh, K. Suresh [et al.] // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – Vol. 92, Part 2. – Pp. 955–959. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.558>.

138. Rasul, J.M. Consideration of the deterioration of stabilised subgrade soils in analytical road pavement design / J.M. Rasul, M.P.N. Burrow, G.S. Ghataora // *Transportation Geotechnics*. – 2016. – Vol. 9. – Pp. 96–109. – ISSN 2214-3912. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.08.002>.

139. Razali, R. Shear strength and durability against wetting and drying cycles of lime-stabilised laterite soil as subgrade / R. Razali, S.A.A. Rashid, D.C. Lat [et al.] //

Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. – 2023. – Vol. 132. – ISSN 1474-7065. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103479>.

140. Rebello, N. Hydraulically manufactured cement and fly ash stabilized compressed soil block / N. Rebello, K. Deekshitha, S. Shetty // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – Vol. 88, Part 1. – Pp. 29–34. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.483>.

141. Renjith, R. Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction / R. Renjith, D. Robert, S. Setunge [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 294. – ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126264>.

142. Reyes Lizcano, F.A. Diseño Racional de Pavimentos / F.A. Reyes Lizcano // Pontificia Universidad Javeriana y Escuela Colombiana de Ingeniería. – 2003. – P. 12. – ISBN 958-683-622-3.

143. Rios, S. Colombian Soil Stabilized with Geopolymers for Low Cost Roads / S. Rios, C. Ramos, A.V. Fonseca [et al.] // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 143. – Pp. 1392–1400. – ISSN 1877-7058. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.164>.

144. Sadeeq, J. Assessment of bagasse ash effect on the California bearing ratio of used oil contaminated lateritic soils / J. Sadeeq, J. Ochepo, A. Salahudeen // *Nigerian Journal of Technology*. – 2015. – Vol. 34(2). – Pp. 223–231. DOI: 10.4314/njt.v34i2.2.

145. Safi, W. Efficient & effective improvement and stabilization of clay soil with waste materials / W. Safi, S. Singh // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 51, Part 1. – Pp. 947–955. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.333>.

146. Sahu, G. Studies on improvement of shear strength of sandy soil using egg shell powder and quarry dust / G. Sahu, I. Kumar, A. Singh, D. Gupta // *International Journal of Engineering Research Tech.* – 2017. – Vol. 6(05). – Pp. 440–443. DOI: 10.17577/IJERTV6IS050251.

147. Salahudeen, A. Stabilization of highway expansive soils with high loss on ignition content kiln dust / A. Salahudeen, I. Akiije // *Nigerian Journal of Technology*. – 2014. – Vol. 33(2). – Pp. 141–148. – ISSN 0331-8443. DOI: 10.4314/njt.v33i2.1.

148. Santhikala, R. Stabilization of expansive soil using flyash based geopolymer / R. Santhikala, K. Chandramouli, N. Pannirselvam // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 68, Part 1. – Pp. 110–114. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.006>.
149. Sawangsuriya, A. Evaluating Stiffness and Strength of Pavement Materials / A. Sawangsuriya, T.B. Edil // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*. – 2005. – Pp. 217–230.
150. Schafer, P.L. Low-technology class A processes: WERF documentation / P.L. Schafer, D.T. Merrill, J.B. Farrell // *Proc. Water Environ. Fed.* – 2005. – Pp. 712–721.
151. Sengul, T. Investigating the effects of stabilization carried out using fly ash and polypropylene fiber on the properties of highway clay soils / T. Sengul, N. Akray, Y. Vitosoglu // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 400. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132590>.
152. Shi, X. Strength and microscopic pore structure characterization of cement-fly ash stabilized organic soil under freeze-thaw cycles / X. Shi, P. Yang, L. Li [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2024. – Vol. 420. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135635>.
153. Shigematsu, Y. Experimental study on properties of liquefied stabilized soil produced with different types of solidifiers and thickeners / Y. Shigematsu, S. Inazumi, R. Hashimoto, H. Yamauchi // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 19. – ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02407>.
154. Singh, S.R. Utilization of fly ash in geotechnical construction / S.R. Singh, A.P. Panda // *Proc. Indian Geotechnical Conf., Madras*. – 2019. – Pp. 547–550.
155. Slobodchikova, N. Selection of a composition of reinforced soils / N. Slobodchikova, A. Bashkarev // *Construction of Unique Buildings and Structures*. – 2024. – № 11006. – P. 12. DOI: 10.4123/CUBS.110.6.
156. Sosahab, J.S. Resilient response and strength of highly expansive clay subgrade stabilized with recycled concrete aggregate and granulated blast furnace slag / J.S. Sosahab, A. Ardakani, M. Hassanlourad // *Construction and Building Materials*. –

2023. – Vol. 408. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133816>.

157. Sukmak, G. Generalized strength prediction equation for cement stabilized clayey soils / G. Sukmak, P. Sukmak, S. Horpibulsuk [et al.] // *Applied Clay Science*. – 2023. – Vol. 231. – ISSN 0169-1317. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106761>.

158. Sukumaran, B. Suitability of Using California Bearing Ratio Test to Predict Resilient Modulus / B. Sukumaran, V. Kyatham, A. Shah, D. Sheth // *Proceedings: Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference*. – 2002. – P. 9.

159. Sundary, D. Shear strength performance of dredged sediment soil stabilized with lime / D. Sundary, R.P. Munirwan, N. Al-Huda [et al.] // *Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C*. – 2022. – Vol. 128. – ISSN 1474-7065. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103299>.

160. Syed, M. A laboratory investigation and numerical modeling on fiber reinforced lime and alkaline binder stabilized pavement subgrade soil / M. Syed, A. GuhaRay, S.K. Chukka, S. Ahmad // *Case Studies in Construction Materials*. – 2024. – Vol. 20. – ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03000>.

161. Tabassum, T. Thermal-mechanical properties of stabilized clayey sand subgrade soils / T. Tabassum, R. Rahman, T.V. Bheemasetti // *Transportation Geotechnics*. – 2022. – Vol. 37. – ISSN 2214-3912. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100880>.

162. Tamassoki, S. CBR of stabilized and reinforced residual soils using experimental, numerical, and machine-learning approaches / S. Tamassoki, N.N.N. Daud, S. Wang, M.J. Roshan // *Transportation Geotechnics*. – 2023. – Vol. 42. – ISSN 2214-3912. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101080>.

163. Tanyıldızı, M. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review / M. Tanyıldızı, V.E. Uz, İ. Gökalp // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 398. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132435>.

164. Thanushan, K. Mechanical performance and durability of banana fibre and coconut coir reinforced cement stabilized soil blocks / K. Thanushan, Na. Sathiparan //

Materialia, – 2022. – Vol. 21. – ISSN 2589-1529. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101309>.

165. Tiwari, N. Strength and durability assessment of expansive soil stabilized with recycled ash and natural fibers / N. Tiwari, N. Satyam, A.J. Puppala // Transportation Geotechnics. – 2021. – Vol. 29. – ISSN 2214-3912. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100556>.

166. Tran, V.Q. Hybrid gradient boosting with meta-heuristic algorithms prediction of unconfined compressive strength of stabilized soil based on initial soil properties, mix design and effective compaction / V.Q. Tran // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 355. – ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131683>.

167. Turkane, S.D. Design of low volume road pavement of stabilized low plastic soil using fly ash geopolymers / S.D. Turkane, S.K. Chouksey // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Part 2. – P. 1154–1160. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.167>.

168. Umu, S.U. Assessment of sustainable expanded glass granules for enhancing shallow soil stabilization and dynamic behaviour of clay through resonant column tests / S.U. Umu // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2023. – Vol. 42. – ISSN 2215-0986. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101415>.

169. Vakili, A.H. A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure / A.H. Vakili, M. Salimi, İ. Keskin, M. Jamalimoghadam // Soil and Tillage Research. – 2024. – Vol. 239. – ISSN 0167-1987. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106036>.

170. Vamsi Krishna, S.H. Prediction of UCS and CBR of a stabilized Black-cotton soil using artificial intelligence approach: ANN / S.H. Vamsi Krishna, B. Sai Santosh, B.H.S. Sai Prasanth // Materials Today: Proceedings. – 2023. – ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.097>.

171. Varner, R.L. Variability of Cement-Treated Layers in MDOT Road Projects / R.L. Varner. – Publication FHWA/MS-DOT-RD-11-227. – 2011.

172. Vijayan, D.S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil- A review / D.S. Vijayan, D. Parthiban // Environmental Tech-

nology & Innovation. – 2020. – Vol. 20. – ISSN 2352-1864. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101108>.

173. Wen, H. Characterization of cementitiously stabilized layers for use in pavement design and analysis / H. Wen, B. Muhunthan, J. Wang [et al.] // NCHRP Rep. – 2014. – 789. – P. 73.

174. Witczak, M.W. Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure / M.W. Witczak, X. Qi, M.W. Mirza // Journal of Transportation Engineering. – 1995. – Vol. 121(3). – Pp. 273–282. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1995\)121:3\(273\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1995)121:3(273)).

175. Woodhead, A. Road Base Applications Using Victorian Power Station Ash / A. Woodhead, C. Heidrich. – Ash Development Association of Australia & Link Strategy, 2010. – P. 12.

176. Xie, J. Feasibility of using building-related construction and demolition waste-derived geopolymers for subgrade soil stabilization / J. Xie, J. Zhang, Z. Cao [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 450. – ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142001>.

177. Yadav, A.K. Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads / A.K. Yadav, K. Gaurav, R. Kishor, S.K. Suman // International Journal of Pavement Research and Technology. – 2017. – Vol. 10, Is. 3. – Pp. 254–261. – ISSN 1996-6814. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.02.001>.

178. Zada, U. Recent advances in expansive soil stabilization using admixtures: current challenges and opportunities / U. Zada, A. Jamal, M. Iqbal [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2023. – Vol. 18. – ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01985>.

179. Zeng, L. Wetting-drying effect on the strength and microstructure of cement-phosphogypsum stabilized soils / L. Zeng, X. Bian, J. Weng, T. Zhang // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2024. – Vol. 16, Is. 3. – Pp. 1049–1058. – ISSN 1674-7755. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.06.022>.

180. Zeynali, Y. Stabilizing cohesive soils with Micro- and Nano- fly ash as Eco-friendly Materials: An experimental study / Y. Zeynali, H. Niroumand, R.Z. Moayed // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 399. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132490>.

181. Zhang, C. Efficient machine learning method for evaluating compressive strength of cement stabilized soft soil / C. Zhang, Z. Zhu, F. Liu [et al.] // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 392. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131887>.

182. Zhang, J. Simultaneous determination of cement stabilized macadam's dynamic resilient modulus in compression and tension by bending beam test / J. Zhang, S. Wang, J. Cui, H. Chu // Case Studies in Construction Materials. – 2024. – Vol. 20. – ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03008>.

183. Zheng, Y. Thermal behaviors of cement and mortar under microwave treatment and the influencing factors: An experimental study / Y. Zheng, Z. Su, H. Fu [et al.] // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 411. – ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134191>.

184. Баранов, А. Ю. Определение коэффициента фильтрации геосинтетических материалов в системе «грунт – геосинтетический материал – грунт» / А. Ю. Баранов // Modern Science. – 2020. – № 12–3. – С. 199–202.

185. Безрук, В.М. Основные принципы укрепления грунтов / В.М. Безрук. – М. : Транспорт. – 1987. – С. 32.

186. Бирюков, В.В. Энергопроизводство и утилизация золошлаковых отходов / В.В. Бирюков, С.Е. Метелев, В.В. Сиротюк, В.Р. Шевцов // Вестник Российского государственного торгово-экономического университета. – М., 2008. – № 2(23) – С. 221–229.

187. Бондаренко, С.Н. Комплексное минеральное вяжущее для укрепления грунтов : автореферат дис. ... канд. техн. наук / С.Н. Бондаренко. – Белгород, 2023. – С. 223.

188. Бунтова, О.С. Обработка результатов эксперимента / О.С. Бунтова // Физико-математические науки и информационные технологии: проблемы и тенден-

ции развития : сб. ст. по матер. II Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : СибАК. – 2012. – С. 30–40.

189. Ватин, Н.И. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве / Н.И. Ватин, Д.В. Петросов, А.И. Калачев, П. Лахтинен // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 4. – С. 16–21.

190. Ватин, Н.И., Барабанщиков Ю.Г., Усанова К.Ю. Патент № 2798801 С1 Российская Федерация, МПК C04B 7/28. Вяжущее вещество на основе высококальциевой золы уноса : № 2022125078 : заявл. 23.09.2022 : опубл. 27.06.2023; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». – EDN QYOFAX.

191. Виноградов, А.Ю. Модуль деформации как основная характеристика деформационной способности грунтов при проектировании сооружений лесного комплекса / А.Ю. Виноградов, В.И. Каширский, И.Ю. Лободенко [и др.] // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2022. – № 4(1). – С. 52–67.

192. Егорова, Е.С. Модели грунтов, реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D / Е.С. Егорова, А.В. Иоскевич, В.В. Иоскевич [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 3 (42). – С. 31–60.

193. Жуков, Е.А. Модернизация дорожного хозяйства России на основе инновационных технологий / Е.А. Жуков, С.В. Ильин // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). – 2017. – Т. 8, № 2 (30). – С. 196–202.

194. Золотова, И.Ю. Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС / И.Ю. Золотова // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 7. – С. 6.

195. Казаринов, А.Е. Использование местных материалов и отходов промышленности Дальнего Востока и Восточной Сибири в дорожном строительстве : текст лекций / А.Е. Казаринов, Н.И. Ярмолинская – Хабаровск : Хабаровский политехн. ин-т. – 1990. – С. 60.

196. Карацупа, С.В. Грунтобетоны на основе техногенного сырья КМА для строительства автомобильных дорог : дис. канд. техн. наук / С.В. Карацупа. – Белгород. – 2006. – С. 250.
197. Кулижников, А.М. Требования к деформационным характеристикам рабочего слоя земляного полотна / А.М. Кулижников // Дороги и мосты. – 2017. – № 37/1. – С. 81–92.
198. Лунёв, А.А. Обоснование расчетных значений механических характеристик золошлаковых смесей для проектирования земляного полотна : дис. ... канд. техн. наук / А.А. Лунёв. – Омск, 2019. – С. 192.
199. Лунёв, А.А. Несущая способность инертных золошлаковых смесей различного генезиса / А.А. Лунёв, А.В. Явинский // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2021. – Т. 12, № 2. – С. 26–41. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.2.03.
200. Макаренко, С.В. Золошлаковые и известь содержащие отходы Иркутской области – эффективные материалы для получения силикатных изделий автоклавного твердения / С.В. Макаренко, К.Ю. Вабищевич, О.В. Хохряков [и др.] // Техника и технология силикатов. – 2023. – Т. 30, № 3. – С. 264–271.
201. Мингалеева, Г.Р. Современные тенденции переработки и использования золошлаковых отходов ТЭС и котельных [Электронный ресурс]: Современные проблемы науки и образования / Г.Р. Мингалеева, Э.В. Шамсутдинов, О.В. Афанасьева [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16475>.
202. Пичугин, Е.С. Предпроектное обоснование программы строительства региональной сети автомобильных дорог : дисс. ... канд. наук 08.00 05. – 2014.
203. Подольский, В.П. О возможности расширения ресурсной базы дорожного строительства за счет стабилизации и укрепления грунтов / В.П. Подольский, В.Л. Нгуен, Д.Ш. Нгуен // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. – 2014. – Вып. 1(33). – С. 102.

204. Прокопец, В.С. Влияние механоактивационного воздействия на активность вяжущих веществ / В.С. Прокопец // Строительные материалы. – 2003. – № 9. – С. 28–29.

205. Пугачев, И.Н. Системное взаимодействие автомобильных дорог с окружающей средой / И.Н. Пугачев, Ю.И. Куликов, А.Я. Маркелов [и др.] // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : Междунар. сб. науч. тр. / под ред. А.В. Каменчукова. – Хабаровск, 2019. – С. 250–259.

206. Путилин, Е.И. Применение зол-уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог / Е.И. Путилин, В.С. Цветков // Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. – М. : СОЮЗДОРНИИ. – 2003. – С. 61.

207. Путилов, В.Ю. Угольная зола – термины и определения / В.Ю. Путилов, И.В. Путилова, Н.А. Зройчиков, Х.-Дж. Фейерборн // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2017. – С. 73–83.

208. Радовский, Б.С. Первые представления о прочности и расчете дорожных одежд: дорожные одежды до XX века / Б.С. Радовский // Дорожная техника. – 2012. – С. 120–133.

209. Райхель, В. Бетон : В 2-х ч. // Ч. 1. Свойства. Проектирование. Испытание / В. Райхель, Д. Конрад ; пер. с нем. ; под ред. В.Б. Ратинова. – М. : Стройиздат, 1979. – С. 111.

210. Рахимбаев, Ш.М. Кинетические константы твердения цемента / Ш.М. Рахимбаев, Т.В. Аниканова, А.С. Погромский // Химия, физика и механика материалов. – 2022. – № 1(32). – С. 5-14.

211. Семенова, Т.В. Применение калифорнийского числа несущей способности и динамического конусного пенетрометра для оценки качества уплотнения грунта / Т.В. Семенова, Г.В. Долгих, Б.Н. Полугородник // Вестник СибАДИ. – 2014. – № 1 (35). – С. 59–66.

212. Сипицына, И.Н. Физико-химические основы технологии композиционных материалов на основе гипсовых вяжущих и сланцевой золы : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 02.00.16 / И.Н. Сипицына. – Саратов, 2000. – С. 19.

213. Сиротюк, В.В. Особенности свойств зол уноса Экибастузских углей в связи с их применением в дорожном строительстве / В.В. Сиротюк // Строительство и эксплуатация дорог : Меж. вуз. сб. – Новосибирск : НИСИ. – 1977. – С. 78–86.

214. Сиротюк, В.В. Влияние гранулометрического состава на механические характеристики золошлаковой смеси / В.В. Сиротюк, А.А. Лунев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2021. – № 4. – С. 20–26.

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

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

217. 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. – 2023. – № 1(49). – С. 223–237.

218. Слободчикова, Н.А. Использование отходов промышленности для получения вяжущих в дорожной отрасли / Н.А. Слободчикова // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2015. – № 1(12). – С. 116–120.

219. Слободчикова, Н.А. Микроструктура золошлаковой смеси ТЭЦ, укрепленной портландцементом / Н.А. Слободчикова, С.С. Шабуров, Н.М. Полонов, С.В. Ключев // Инженерный вестник Дона : научный журнал, 2025. – № 5. – С. 13.

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

221. Слободчикова, Н.А. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства / Н.А. Слободчикова, М. Лофлер //

Известия вузов инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 141–147.

222. 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.

223. Слободчикова, Н.А. Опытное применение золошлаковых материалов в Иркутской области / Н.А. Слободчикова, С.С. Шабуров, К.В. Плюта // Экономика замкнутого цикла в дорожном строительстве. Вторичные ресурсы, экономика, экология. – 2022. – С. 25. URL:<https://rosdornii.ru/upload/iblock/c2d/9ahwox60a55hnckk66abl3qhqbvv28x4/Slobodchikova-N.A..pdf>.

224. Слободчикова, Н.А. Оценка эффективности применения золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях автомобильных дорог / Н.А. Слободчикова, С.В. Ключев, А.А. Степаненко // Инженерный вестник Дона : научный журнал, 2025. – № 2. – С. 11.

225. Слободчикова, Н.А. Патент на изобретение № 2779688. Зологрунт для дорожного строительства / Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта. – Оpubл. 12.09.2022. – Бюл. № 26.

226. Слободчикова, Н.А. Патент на изобретение № 2803756. Состав для укрепления грунтов оснований при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог / Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта.

227. Слободчикова, Н.А. Перспективы использования отходов производства и потребления при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог / Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта, А.А. Дзогий // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 8 (103). – С. 126–131.

228. Слободчикова, Н.А. Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства / Н.А. Слободчикова, М. Лофлер, К.В. Плюта // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2017. – Т. 7, № 2. – С. 62–67.

229. Слободчикова, Н.А. Применение золошлаковых смесей в дорожных одеждах / Н.А. Слободчикова, А.А. Степаненко, К.В. Плюта // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2022. – С. 35–37.

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

231. 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.

232. Слободчикова, Н.А. Теоретические основы укрепления грунтов портландцементом / Н.А. Слободчикова, С.В. Ключев, А.В. Горелов // Инженерный вестник Дона : научный журнал, 2025. – № 2. – С. 14.

233. Слободчикова, Н.А. Состояние сети автомобильных дорог регионального и местного значения Байкальского региона / Н.А. Слободчикова // Известия вузов. Инвестиции, строительство, недвижимость. – 2021 – Т. 11. – № 1(36). – С. 74–84.

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

235. Фурсов, В.В. Исследование морозоустойчивости золошлаковых отходов тепловых электростанций для целей строительства / В.В. Фурсов, М.В. Балюра // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 1. – С. 242–252.

236. Фурсов, В.В. Исследование свойств золошлаковых отходов тепловых электростанций для целей строительства / В.В. Фурсов, М.В. Балюра // Труды Междунар. конф. по геотехнике «Развитие городов и геотехническое строительство». – СПб., 2008. – № 4. – С. 673–677.

237. Чудинов, С.А. Повышение эффективности укрепления грунтов портландцементом со стабилизирующей добавкой / С.А. Чудинов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 8.

238. Шейнин, А.М. Об эффективности использования суперпластификатора С-3 в дорожном бетоне / А.М. Шейнин // Повышение долговечности цементобетонных покрытий и совершенствование технологии их строительства. – 1981. – С. 65–74.

239. Шуваев, А.Н. Применение цементогрунта при строительстве дорожных одежд автомобильных дорог / А.Н. Шуваев, С.А. Куюков, М.В. Панова, А.А. Жигайлов // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог : сб. науч. тр. ОАО ГИПРОДОРНИИ. – 2013. – № 4(63). – С. 130–137.

Словарь терминов

Автомобильные дороги общего пользования местного значения – автомобильные дороги, которые не относятся к дорогам федерального и регионального или межмуниципального значения (дороги городских и сельских поселений, муниципального или городского округа, муниципального района).

Автомобильные дороги регионального или межмуниципального значения – автомобильные дороги, которые относятся к собственности субъектов Российской Федерации. Строительство, реконструкция, капитальный ремонт, ремонт и содержание этих дорог финансируется в основном из бюджетов субъектов Российской Федерации.

Земляные сооружения – инженерные сооружения, которые устраиваются в грунтовом массиве или возводятся из грунта на поверхности.

Зола уноса – частицы размером 0,005–0,1 мм, которые выносятся дымовыми газами из топки котлового агрегата с осаждением в циклонах и электрофильтрах, либо вместе с водой и шлаком удаляется на золоотвал.

Зологрунтовые смеси – материалы, получаемые путем смешения природных грунтов, золошлаковых смесей и неорганических вяжущих материалов.

Золошлаковая смесь – гидратированная смесь золы и шлака, образующаяся из золошлаковой суспензии.

Золошлаковые смеси – гидратированная смесь золы уноса и шлака, которая образуется в котле и в виде пульпы направляется в золоотвал.

Золошлаковые отходы ТЭЦ – продукты, оставшиеся от сжигания угля на тепловых электростанциях.

Коэффициент уплотнения – отношение фактической плотности грунта устроенного слоя к максимальной плотности скелета грунта, определенного методом стандартного уплотнения.

Максимальная плотность грунта – значение наибольшей плотности скелета грунта, которая определяется методом стандартного уплотнения СОЮЗДОРНИИ или Проктора.

Морозное пучение – процесс объемного увеличения грунта в условиях отрицательных температур, вызванный миграцией воды, возрастающим образованием льда, и как следствие, деформацией скелета грунта.

Набухание глинистых грунтов – процесс объемного увеличения грунта при увлажнении.

Нормальные условия твердения образцов укрепленного грунта – хранение и твердение образцов при относительной влажности воздуха $95 \pm 5 \%$ и температуре 20 ± 2 °С.

Оптимальная влажность грунта – значение влажности грунта, соответствующее максимальной плотности сухого грунта.

Стабилизация – улучшение водно-физических свойств и предохранение существующих структурных связей между частицами и агрегатами грунта от разрушения под действием воды. Методы стабилизации увеличивают гидрофобность, снижают коэффициент фильтрации и высоту капиллярного поднятия, снижают пластичность, набухание и относительную деформацию морозного пучения.

Степень измельчения частиц грунта – отношение средневзвешенных величин среднего размера частиц грунта до и после уплотнения

Техногенные грунты – грунты, которые образуются в результате хозяйственной деятельности человека.

Техногенные отходы (отходы производства и потребления) – остатки сырья, материалов и полуфабрикатов, которые образованы в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления.

Топливные шлаки – частицы минерального остатка угля размером до 40 мм, которые образуются при плавлении минеральной части топлива.

Укрепление грунтов – технологические операции, направленные на формирование структурно-механических свойств грунта путем введения неорганических вяжущих, в результате чего изменяются структурные связи грунта, увеличиваются прочностные характеристики грунта в сухом и в водонасыщенном состоянии.

Протоколы определения модуля упругости укрепленных грунтов

Измерение параметров осуществлено через каждые 0,1 сек. В приложении приведены результаты испытаний через 10 сек.

Таблица П.А1 – Протокол определения модуля упругости суглинка (Г6), укрепленного портландцементом

Образец 3					Образец 4					Образец 5				
Макс. нагрузка, Н – 74 282,843					Макс. нагрузка, Н – 85 889,41					Макс. нагрузка, Н 40 342,25				
Перемещение при макс. нагрузке, мм – 1,99776					Перемещение при макс. нагрузке, мм – 2,60605					Перемещение при макс. нагрузке, мм – 2,72624				
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Вре- мя	Пере- меще- ние	Нагрузка	Относи- тельная деформа- ция	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Относи- тельная деформа- ция	Напря- жение	Вре- мя	Пере- меще- ние	Нагруз- ка	Относи- тельная дефор- мация	Напр- яже- ние
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
1	0,01254	6,22639	0,0001	0,00	1	0,01271	27,90714	0,000128	0,00	1	0,01258	2,40442	0,000121	0,00
10	0,16263	74,33507	0,0016	0,01	10	0,16269	79,08195	0,001644	0,01	10	0,16275	75,29257	0,001569	0,01
20	0,32918	75,68423	0,0033	0,01	20	0,32936	72,12719	0,003328	0,01	20	0,32921	77,66116	0,003174	0,01
30	0,49602	104,9993	0,0049	0,01	30	0,49599	217,8082	0,005012	0,03	30	0,49617	78,55588	0,004783	0,01
40	0,66246	562,6732	0,0066	0,07	40	0,66269	718,2316	0,006696	0,09	40	0,66257	433,2513	0,006387	0,05
50	0,8293	3677,073	0,0083	0,45	50	0,8294	1720,555	0,00838	0,21	50	0,82949	1617,041	0,007997	0,20
60	0,99575	11539,58	0,0099	1,42	60	0,99594	3369,99	0,010063	0,41	60	0,99586	3609,064	0,009601	0,44
70	1,16271	23204,97	0,0116	2,86	70	1,1626	6555,258	0,011747	0,81	70	1,16279	6491,099	0,01121	0,80
80	1,1679	21189,09	0,0116	2,61	80	1,33616	13024,68	0,013501	1,60	80	1,33591	10444,6	0,012879	1,28
90	1,00122	8380,052	0,0100	1,03	90	1,49605	22008,92	0,015116	2,70	90	1,49607	14703,98	0,014423	1,80
100	0,83451	1308,348	0,0083	0,16	100	1,66242	32595,61	0,016797	4,00	100	1,66251	19563,32	0,016027	2,40
110	0,96421	7117,553	0,0096	0,88	110	1,7261	33099,82	0,017441	4,07	110	1,82943	24575,19	0,017636	3,02
120	1,13096	19265,65	0,0113	2,37	120	1,5594	17747,16	0,015756	2,18	120	1,99589	30400,89	0,019241	3,73
125	1,2143	26556,44	0,0121	3,27	125	1,47616	12326,04	0,014915	1,51	125	2,07925	32606,72	0,020045	4,00
130	1,29742	33979,1	0,0129	4,19	130	1,39282	8123,947	0,014073	1,00	130	2,16267	34600,27	0,020849	4,25
140	1,46438	47339,5	0,0146	5,83	140	1,22596	3172,709	0,012387	0,39	140	2,32926	38504,72	0,022455	4,73

Окончание таблицы П.А1

1						2					3			
150	1,63088	58843,27	0,0162	7,25	150	1,0596	1483,551	0,010706	0,18	150	2,36961	32033,18	0,022844	3,93
160	1,79743	68139,44	0,0179	8,39	160	1,00978	1763,279	0,010203	0,22	160	2,20288	17932,98	0,021237	2,20
170	1,96427	73909,94	0,0195	9,10	170	1,18148	3889,435	0,011938	0,48	170	2,03616	8712,242	0,019629	1,07
180	2,13094	61747,86	0,0212	7,61	180	1,34799	8975,828	0,01362	1,10	180	1,86963	3894,289	0,018024	0,48
Модуль упругости				1000	190	1,51488	18183,94	0,015306	2,23	190	1,70274	1441,211	0,016415	0,18
					200	1,68132	30824,21	0,016988	3,79	200	1,76603	3173,267	0,017025	0,39
					210	1,84814	44374,8	0,018674	5,45	210	1,93279	7543,327	0,018633	0,93
					220	2,01593	56533,65	0,020369	6,95	220	2,09938	14429,13	0,020239	1,77
					230	2,18266	67769,03	0,022054	8,33	230	2,26619	23783,84	0,021847	2,92
					240	2,34934	77641,86	0,023738	9,54	240	2,43272	32995,04	0,023452	4,05
					250	2,51579	84538,3	0,02542	10,39	250	2,59932	38521,5	0,025059	4,73
					260	2,68279	80979,29	0,027107	9,95	260	2,76622	39899,17	0,026668	4,90
					Модуль упругости, МПа				1153	270	2,93263	39933,3	0,028272	4,90
										280	3,09946	38571,77	0,02988	4,73
										300,	3,44772	33232,59	0,033237	4,08
										Модуль упругости, МПа				800

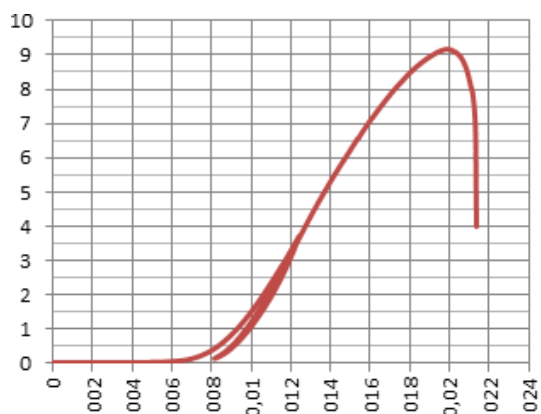


График зависимости относительной деформации от напряжения

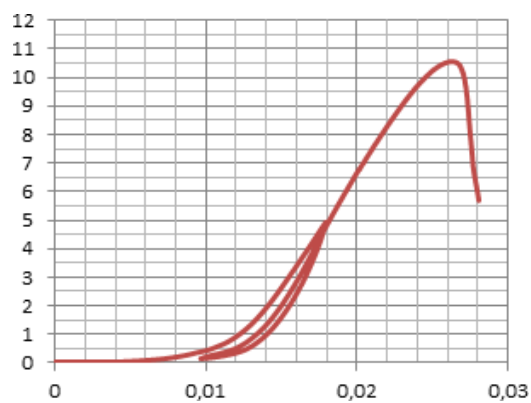


График зависимости относительной деформации от напряжения

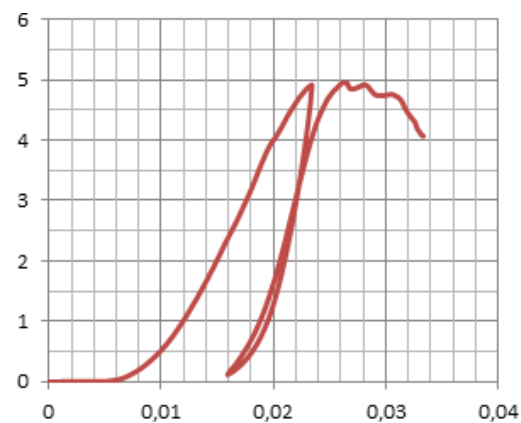


График зависимости относительной деформации от напряжения

Таблица П.А2 – Протокол определения модуля упругости суглинка (Г6), укрепленного известью 6 % (образцы 1–3)

Образец 1					Образец 2					Образец 3				
Макс. нагрузка, Н			26 571,36		Макс. нагрузка, Н			34 473,6		Макс. нагрузка, Н			33 366,0	
Перемещение при макс. нагрузке, мм			2,40293		Перемещение при макс. нагрузке, мм			2,06615		Перемещение при макс. нагрузке, мм			2,60437	
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Относи- тельная деформа- ция	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Относи- тельная дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ще- ние	Нагруз- ка	Относи- тельная дефор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0,00	0,00	-1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,51	0,00	0,00
10,00	0,16	1240,68	0,00	0,15	10,00	0,16	1950,35	0,00	0,24	10,00	0,16	686,59	0,00	0,08
20,00	0,33	3421,45	0,00	0,42	20,00	0,33	6251,27	0,00	0,77	20,00	0,33	1450,73	0,00	0,18
30,06	0,41	2177,82	0,00	0,27	30,00	0,50	10038,28	0,00	1,24	30,00	0,50	2302,88	0,00	0,28
40,04	0,37	1586,55	0,00	0,20	40,00	0,66	13436,44	0,01	1,66	40,00	0,66	3464,09	0,01	0,43
50,04	0,54	6007,74	0,01	0,74	50,02	0,56	3313,80	0,01	0,41	50,00	0,83	6830,42	0,01	0,84
60,04	0,70	8103,99	0,01	1,00	60,02	0,39	164,45	0,00	0,02	60,00	1,00	10234,04	0,01	1,26
70,04	0,87	10342,87	0,01	1,28	70,10	0,48	2827,68	0,00	0,35	70,00	1,16	13287,25	0,01	1,64
80,04	1,04	12667,43	0,01	1,57	80,10	0,64	10024,88	0,01	1,24	80,00	1,08	4034,18	0,01	0,50
90,04	1,20	15000,59	0,01	1,85	90,10	0,81	16169,03	0,01	2,00	90,00	0,91	313,51	0,01	0,04
100,04	1,37	17290,53	0,01	2,14	100,10	0,98	19511,64	0,01	2,41	100,02	0,97	2428,85	0,01	0,30
110,04	1,54	19477,57	0,01	2,41	110,10	1,14	22668,40	0,01	2,80	110,02	1,14	9345,19	0,01	1,15
120,04	1,70	21543,07	0,02	2,66	120,10	1,31	25601,95	0,01	3,16	120,02	1,31	15680,65	0,01	1,94
130,04	1,87	23431,48	0,02	2,90	130,10	1,48	28372,17	0,01	3,51	130,02	1,47	18854,21	0,01	2,33
140,04	2,04	24987,18	0,02	3,09	140,10	1,64	30825,55	0,02	3,81	140,02	1,64	21819,59	0,02	2,70
150,04	2,20	26065,59	0,02	3,22	150,10	1,81	32918,28	0,02	4,07	150,02	1,81	24591,34	0,02	3,04
160,04	2,37	26531,13	0,02	3,28	160,10	1,98	34206,86	0,02	4,23	160,02	1,97	27251,14	0,02	3,37
170,04	2,54	26039,93	0,02	3,22	170,10	2,14	34259,53	0,02	4,23	170,02	2,14	29606,27	0,02	3,66
Модуль упругости, МПа				775	180,10	2,31	32704,25	0,02	4,04	180,02	2,31	31610,91	0,02	3,91
					190,10	2,48	30524,15	0,02	3,77	190,02	2,47	32963,40	0,02	4,07
					Модуль упругости, МПа				1300	200,02	2,64	33322,37	0,03	4,12
										210,02	2,81	32218,80	0,03	3,98
										220,02	2,97	30378,15	0,03	3,75
										Модуль упругости, МПа				1175

Окончание таблицы П.А2

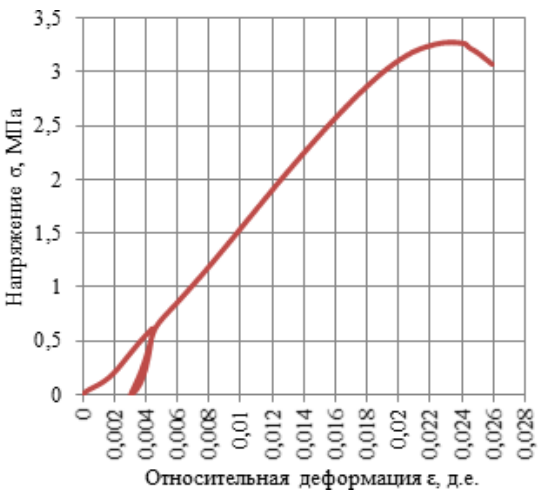
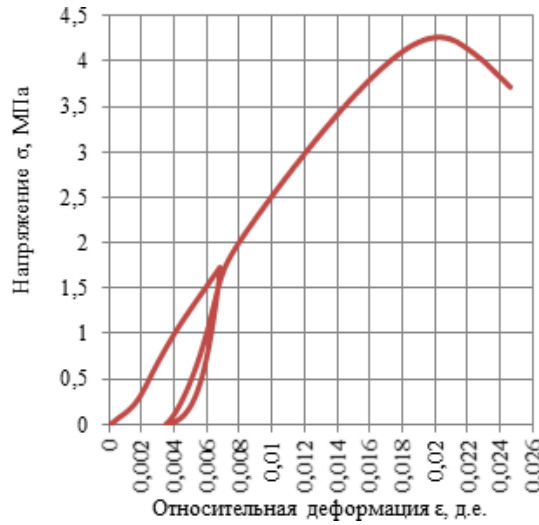
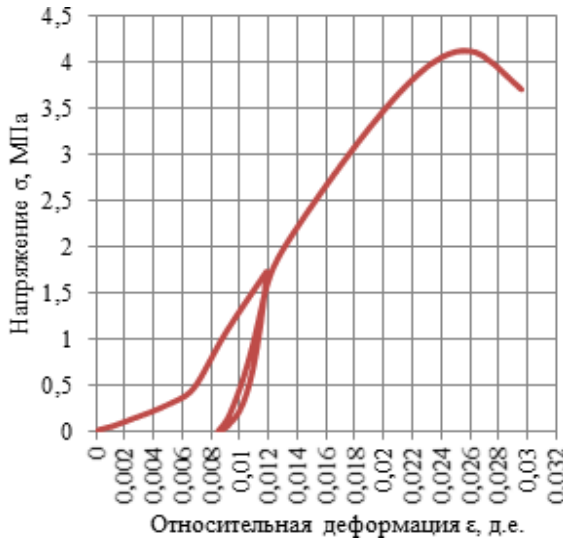
1		2		3	
Максимум нагрузка, Н	26571,36	Максимум нагрузка, Н	34473,69	Максимум нагрузка, Н	33366,0
Перемещение при максимум нагрузке, мм	2,40293	Перемещение при максимум нагрузке, мм	2,06615	Перемещение при максимум нагрузке, мм	2,60437
Диаметр, мм	101,53	Диаметр, мм	101,53	Диаметр, мм	101,53
Площадь сечения, мм ²	8092,047	Площадь сечения, мм ²	8092,047	Площадь сечения, мм ²	8092,04
Высота образца, мм	102,93	Высота образца, мм	101,8	Высота образца, мм	101,47
Прочность на сжатие, МПа		Прочность на сжатие, МПа		Прочность на сжатие, МПа	
					
График зависимости относительной деформации от напряжения		График зависимости относительной деформации от напряжения		График зависимости относительной деформации от напряжения	

Таблица П.А3 – Протокол определения модуля упругости суглинка (Г6), укрепленного известью 6 % (образцы 12–14)

Образец 12					Образец 13					Образец 14				
Макс. нагрузка, Н			38 714,72		Макс. нагрузка, Н			32 683,3		Макс. нагрузка, Н			35 367,9	
Перемещение при макс. нагрузке, мм			2,61031		Перемещение при макс. нагрузке, мм			2,44997		Перемещение при максимум нагрузке, мм			2,57646	
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Вре- мя	Пере- реме- ще- ние	Нагруз- ка	Отн. дефор- мация	Напряже- ние	Время	Пере- реме- ще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагруз- ка	Отн. де- формация	Напря- жение
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
0,00	0,00	-1,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00
10,00	0,16	1101,24	0,00	0,14	10,00	0,16	2779,67	0,00	0,34	10,00	0,16	466,24	0,00	0,06
20,00	0,33	2932,47	0,00	0,36	20,00	0,33	4805,23	0,00	0,59	20,00	0,33	900,71	0,00	0,11
25,00	0,41	3946,50	0,00	0,49	25,00	0,41	5795,27	0,00	0,71	25,00	0,41	1248,13	0,00	0,15
30,00	0,50	5003,72	0,00	0,62	30,00	0,50	6909,45	0,00	0,85	30,00	0,50	1726,40	0,00	0,21
40,00	0,66	7390,21	0,00	0,91	40,00	0,66	9429,22	0,01	1,16	40,00	0,66	3279,52	0,01	0,41
50,00	0,83	10474,55	0,00	1,30	50,00	0,83	12084,85	0,01	1,49	50,00	0,83	5809,35	0,01	0,72
60,00	1,00	14124,04	0,00	1,75	60,00	1,00	14896,20	0,01	1,83	60,00	1,00	9387,06	0,01	1,16
70,00	1,16	18070,13	0,01	2,23	70,00	1,16	17652,63	0,01	2,17	70,00	1,16	13401,94	0,01	1,66
80,06	1,16	10650,30	0,01	1,32	80,03	1,29	17416,33	0,01	2,15	80,00	1,33	17353,25	0,01	2,15
80,16	1,16	10500,98	0,01	1,30	80,13	1,29	17212,86	0,01	2,12	80,10	1,33	17406,03	0,01	2,16
90,06	0,99	2107,33	0,00	0,26	90,03	1,12	4871,08	0,01	0,60	90,04	1,40	14338,16	0,01	1,78
100,06	0,83	169,50	0,00	0,02	100,03	0,96	891,32	0,01	0,11	100,04	1,24	3232,69	0,01	0,40
110,06	0,90	2358,63	0,00	0,29	110,03	0,79	15,56	0,01	0,00	110,04	1,07	568,32	0,01	0,07
120,06	1,07	8249,14	0,01	1,02	120,01	0,90	2252,23	0,01	0,28	120,04	0,90	17,05	0,01	0,00
130,06	1,24	17752,52	0,01	2,20	130,01	1,07	6983,89	0,01	0,86	129,77	1,04	1325,07	0,01	0,16
135,06	1,32	21195,32	0,01	2,62	135,01	1,15	10335,01	0,01	1,27	134,77	1,12	2930,48	0,01	0,36
140,06	1,40	23448,67	0,01	2,90	140,01	1,23	14386,46	0,01	1,77	140,07	1,21	5717,69	0,01	0,71
150,06	1,57	27313,80	0,01	3,38	150,01	1,40	20732,53	0,01	2,55	150,07	1,37	13866,33	0,01	1,72
155,06	1,65	29105,15	0,01	3,60	155,01	1,48	22366,63	0,01	2,75	155,07	1,46	18548,95	0,01	2,30
160,06	1,73	30784,20	0,01	3,81	160,01	1,57	23748,21	0,02	2,92	160,07	1,54	21382,06	0,02	2,65
170,06	1,90	33953,50	0,01	4,20	170,01	1,73	26210,88	0,02	3,23	170,07	1,71	25038,36	0,02	3,10
180,06	2,07	36688,54	0,01	4,54	180,01	1,90	28471,96	0,02	3,51	180,07	1,87	28106,14	0,02	3,48
190,06	2,24	38329,19	0,01	4,74	190,01	2,07	30351,15	0,02	3,74	190,07	2,04	30837,09	0,02	3,82
200,06	2,40	38492,39	0,01	4,76	200,01	2,23	31855,21	0,02	3,92	200,07	2,21	33001,93	0,02	4,09
210,06	2,57	38644,22	0,01	4,78	210,01	2,40	32613,30	0,02	4,02	210,07	2,37	34545,35	0,02	4,28
220,06	2,74	38370,62	0,01	4,74	220,01	2,57	32276,09	0,03	3,98	220,07	2,54	35309,99	0,03	4,37

Окончание таблицы П.А3

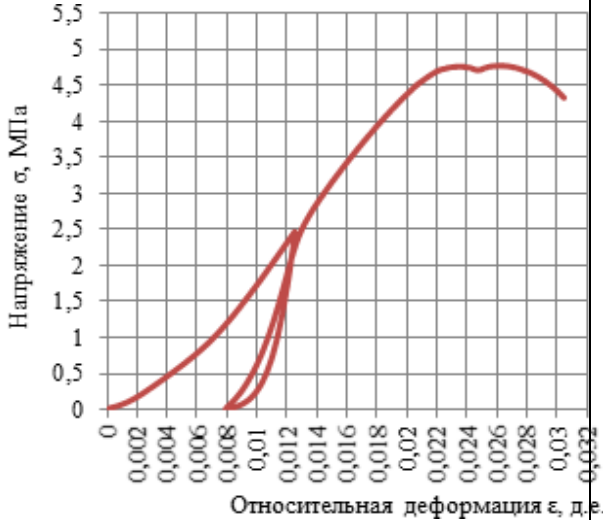
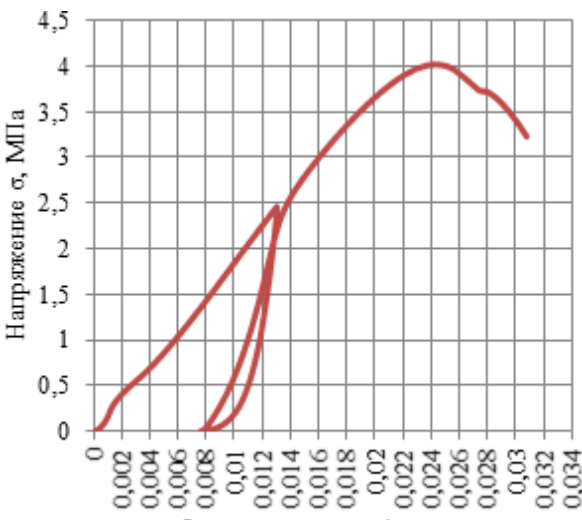
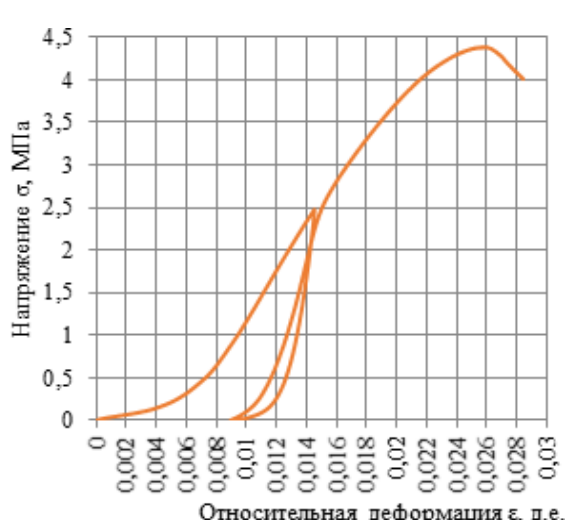
1					2					3				
230,0	2,90	37052,36	0,01	4,58	230,01	2,73	30558,69	0,03	3,76	230,07	2,71	34163,00	0,03	4,23
Модуль упругости, МПа				1233	240,01	2,90	29415,24	0,03	3,62	Модуль упругости, МПа				1429
					245,01	2,98	28225,37	0,03	3,48					
					250,01	3,07	26754,03	0,03	3,30					
					Модуль упругости, МПа				1360					
														
График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения				

Таблица П.А4 – Протокол определения модуля упругости суглинка Г6, укрепленного известью 6 % (образцы 15–17)

Образец 15					Образец 16					Образец 17				
Макс. нагрузка, Н		32611,46			Макс. нагрузка, Н		33239,5			Макс. нагрузка, Н		30202,3		
Перемещение при макс. нагрузке, мм		2,4206			Перемещение при макс. нагрузке, мм		2,37704			Перемещение при макс. нагрузке, мм		2,47216		
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отно- ситель- ная де- форма- ция	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отно- ситель- тель- ная дефор- фор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отно- ситель- тель- ная дефор- фор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,07	0,00	0,00
10,00	0,16	1261,02	0,00	0,16	10,00	0,16	1192,22	0,00	0,15	10,00	0,16	903,77	0,00	0,11
20,00	0,33	2888,77	0,00	0,36	20,00	0,33	3897,77	0,00	0,48	20,00	0,33	2139,39	0,00	0,26
30,00	0,50	5241,36	0,00	0,65	30,00	0,50	6409,51	0,00	0,79	30,00	0,50	3887,42	0,00	0,48
40,00	0,66	8124,50	0,01	1,00	40,00	0,66	9059,24	0,01	1,12	40,00	0,66	6215,48	0,01	0,77
50,00	0,83	11163,84	0,01	1,38	50,00	0,83	11941,41	0,01	1,48	50,00	0,83	8845,19	0,01	1,09
60,00	1,00	14265,69	0,01	1,76	60,00	1,00	14880,25	0,01	1,84	60,00	1,00	11735,81	0,01	1,45
70,00	1,16	17306,63	0,01	2,14	70,00	1,16	17864,75	0,01	2,21	70,00	1,16	14581,10	0,01	1,80
80,01	1,31	18423,22	0,01	2,28	80,09	1,24	14899,05	0,01	1,84	80,00	1,33	17348,72	0,01	2,14
80,11	1,30	18211,34	0,01	2,25	80,19	1,24	14725,00	0,01	1,82	80,10	1,33	17365,90	0,01	2,14
90,01	1,14	5020,01	0,01	0,62	90,09	1,08	3952,36	0,01	0,49	90,00	1,50	20000,74	0,01	2,46
100,01	0,97	781,93	0,01	0,10	100,09	0,91	606,54	0,01	0,07	99,96	1,33	6155,08	0,01	0,76
110,01	0,81	2,77	0,01	0,00	110,06	0,82	605,61	0,01	0,07	110,06	1,17	1347,66	0,01	0,17
120,02	0,96	2969,52	0,01	0,37	120,06	0,99	4694,50	0,01	0,58	120,06	1,00	186,90	0,01	0,02
130,02	1,13	8717,48	0,01	1,08	130,06	1,16	11349,32	0,01	1,40	129,77	0,96	518,25	0,01	0,06
140,02	1,30	17190,58	0,01	2,13	140,06	1,32	19353,68	0,01	2,39	139,77	1,13	3254,95	0,01	0,40
150,02	1,46	22138,47	0,01	2,74	150,06	1,49	23090,66	0,01	2,86	149,77	1,30	8539,90	0,01	1,05
160,02	1,63	24979,85	0,02	3,09	160,06	1,66	25866,41	0,02	3,20	159,77	1,46	16311,65	0,01	2,01
170,02	1,80	27497,16	0,02	3,40	170,06	1,82	28372,73	0,02	3,51	169,77	1,63	21372,53	0,02	2,63
180,02	1,96	29601,60	0,02	3,66	180,06	1,99	30530,84	0,02	3,78	179,77	1,80	24073,60	0,02	2,97
190,02	2,13	31341,32	0,02	3,88	190,06	2,16	32223,62	0,02	3,98	189,77	1,96	26224,45	0,02	3,23
200,02	2,30	32465,86	0,02	4,01	200,06	2,32	33142,01	0,02	4,10	199,77	2,13	28035,65	0,02	3,45
210,02	2,46	32548,37	0,02	4,02	210,06	2,49	33002,83	0,02	4,08	209,77	2,30	29378,79	0,02	3,62

Окончание таблицы П.А4

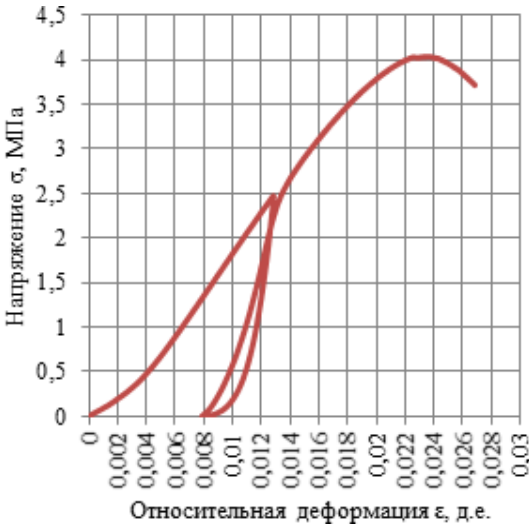
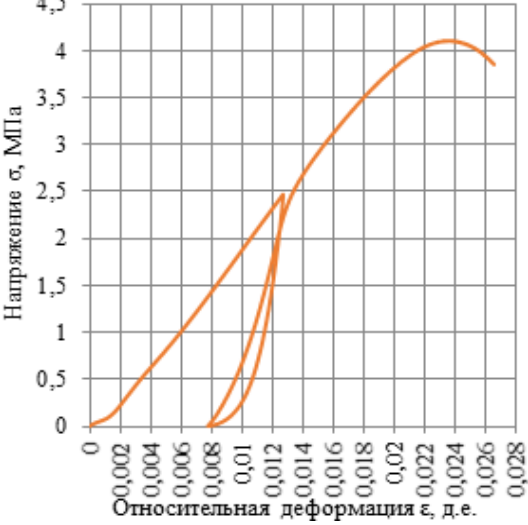
1					2					3				
220,02	2,63	31490,15	0,03	3,89	220,06	2,66	31605,77	0,03	3,91	219,77	2,46	30177,86	0,02	3,72
225,02	2,71	30558,09	0,03	3,78	Модуль упругости, МПа				1617	224,77	2,55	30118,10	0,03	3,71
Модуль упругости, МПа				1529						229,77	2,63	29714,58	0,03	3,66
										234,77	2,71	29173,84	0,03	3,59
										239,77	2,80	28581,94	0,03	3,52
										Модуль упругости, МПа				1289
														
График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения				

Таблица П.А5 – Протокол определения модуля упругости суглинка Г6, укрепленного известью 10 % (образцы 1–2)

Образец 1					Образец 2					
Максимум нагрузка, Н			31 545,22		Максимум нагрузка, Н			27 541,9		
Перемещение при максимум нагрузке, мм			1,73142		Перемещение при максимум нагрузке, мм			1,75955		
Результаты испытания					Результаты испытания					
Время	Перемещение	Нагрузка	Отн. деформация	Напряжение	Время	Перемещение	Нагрузка	Отн. деформация	Напряжение	
(с)	(мм)	(Н)	-	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	-	(Па)	
0,00	0,00	-0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,09	0,00	0,00	
10,00	0,16	590,90	0,00	0,07	10,00	0,16	799,09	0,00	0,10	
20,00	0,33	1791,03	0,00	0,22	20,00	0,33	3187,95	0,00	0,39	
30,09	0,43	2140,48	0,00	0,26	30,00	0,50	8325,02	0,00	1,02	
40,00	0,42	1754,75	0,00	0,21	40,05	0,59	9544,04	0,01	1,17	
50,00	0,58	10349,93	0,01	1,27	50,05	0,42	384,77	0,00	0,05	
60,00	0,75	18785,82	0,01	2,30	60,03	0,43	1121,51	0,00	0,14	
70,00	0,92	24324,00	0,01	2,98	70,03	0,59	10432,22	0,01	1,28	
80,00	1,08	27151,47	0,01	3,32	80,03	0,76	18745,72	0,01	2,30	
90,00	1,25	28919,48	0,01	3,54	90,03	0,93	21371,97	0,01	2,62	
100,00	1,42	30284,99	0,01	3,71	100,03	1,09	23423,35	0,01	2,87	
110,00	1,58	31149,53	0,02	3,81	110,03	1,26	24972,73	0,01	3,06	
120,00	1,75	31538,52	0,02	3,86	120,03	1,43	26249,11	0,01	3,21	
130,00	1,92	31325,82	0,02	3,84	130,03	1,59	27106,97	0,02	3,32	
140,00	2,08	30613,03	0,02	3,75	140,03	1,76	27541,99	0,02	3,37	
150,00	2,25	29331,81	0,02	3,59	150,03	1,93	27122,14	0,02	3,32	
160,00	2,42	27807,57	0,02	3,40	160,03	2,09	25848,89	0,02	3,16	
170,00	2,58	25964,14	0,03	3,18	170,03	2,26	24182,17	0,02	2,96	
180,00	2,75	24076,81	0,03	2,95	Модуль упругости, МПа				1200	
Модуль упругости, МПа			1333							
График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения					

Таблица П.А6 – Протокол определения модуля упругости суглинка Г6, укрепленного известково-зольным вяжущим 10 % (образцы 22, 20, 21)

Образец 22					Образец 20					Образец 21				
Максимум нагрузка, Н			15 935,89		Максимум нагрузка, Н			26 952,1		Максимум нагрузка, Н			13 778,0	
Перемещение при макс. нагрузке, мм			3,71366		Перемещение при макс. нагрузке, мм			3,39463		Перемещение при макс. нагрузке, мм			3,65056	
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- меще- ние	Нагруз- ка	Относи- тельная дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отно- ситель- ная дефор- формация	Напря- жение	Время	Пере- реще- ще- ние	Нагрузка	Отно- ситель- ная де- форма- ция	Напря- жение
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
0,00	0,00	-0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,18	0,00	0,00
10,00	0,16	678,98	0,00	0,08	10,00	0,16	888,02	0,00	0,11	10,00	0,16	669,92	0,00	0,08
20,00	0,33	1424,18	0,00	0,17	20,00	0,33	2094,68	0,00	0,26	20,00	0,33	1193,58	0,00	0,15
30,00	0,50	1885,21	0,00	0,23	30,00	0,50	2960,18	0,00	0,36	30,00	0,50	1568,40	0,00	0,19
40,00	0,66	2291,75	0,01	0,28	40,00	0,66	3770,33	0,01	0,46	40,00	0,66	1925,15	0,01	0,24
50,00	0,83	2735,77	0,01	0,33	50,00	0,83	4668,89	0,01	0,57	50,00	0,83	2322,57	0,01	0,28
60,00	1,00	3294,86	0,01	0,40	59,83	0,79	1422,54	0,01	0,17	60,00	1,00	2818,51	0,01	0,35
70,00	1,16	3933,11	0,01	0,48	70,03	0,62	171,69	0,01	0,02	70,00	1,16	3375,55	0,01	0,41
80,00	1,33	4621,83	0,01	0,56	80,05	0,52	92,79	0,01	0,01	80,00	1,33	4003,98	0,01	0,49
89,88	1,35	2077,38	0,01	0,25	90,05	0,69	1119,17	0,01	0,14	90,00	1,50	4717,49	0,01	0,58
94,88	1,27	778,09	0,01	0,09	95,05	0,77	2073,45	0,01	0,25	95,00	1,58	5094,25	0,02	0,62
99,88	1,18	272,83	0,01	0,03	100,05	0,85	3646,28	0,01	0,45	100,00	1,66	5502,97	0,02	0,68
104,88	1,10	68,39	0,01	0,01	105,05	0,94	5089,66	0,01	0,62	105,00	1,75	5914,61	0,02	0,73
109,61	1,06	107,31	0,01	0,01	110,05	1,02	5823,42	0,01	0,71	110,00	1,83	6327,27	0,02	0,78
119,61	1,22	1219,23	0,01	0,15	120,05	1,19	7164,70	0,01	0,88	120,00	2,00	7203,25	0,02	0,88
129,61	1,39	3737,36	0,01	0,45	130,05	1,35	8635,09	0,01	1,06	130,00	2,16	8126,25	0,02	1,00
139,61	1,56	5552,02	0,02	0,68	140,05	1,52	10284,66	0,01	1,26	140,00	2,33	9082,79	0,02	1,11
150,01	1,73	6554,18	0,02	0,80	150,05	1,69	12070,72	0,02	1,48	150,00	2,50	10039,06	0,02	1,23
160,01	1,90	7483,39	0,02	0,91	160,05	1,85	13988,12	0,02	1,72	160,00	2,66	10982,99	0,03	1,35
170,01	2,06	8459,92	0,02	1,03	170,05	2,02	15981,86	0,02	1,96	170,00	2,83	11877,60	0,03	1,46
180,01	2,23	9450,80	0,02	1,15	180,05	2,19	17978,28	0,02	2,21	180,00	3,00	12690,41	0,03	1,56
190,01	2,40	10470,62	0,02	1,27	190,05	2,35	19995,30	0,02	2,45	190,00	3,16	13400,89	0,03	1,64
200,01	2,56	11478,67	0,03	1,40	200,05	2,52	21907,65	0,02	2,69	200,00	3,33	13935,82	0,03	1,71

Окончание таблицы П.А6

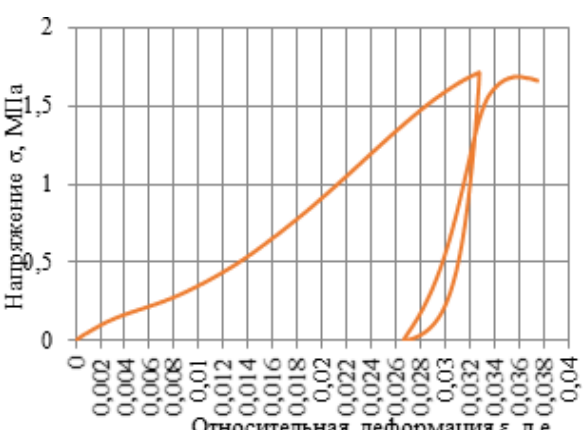
1					2					3				
210,01	2,73	12512,83	0,03	1,52	210,05	2,69	23588,93	0,03	2,89	210,03	3,19	4903,30	0,03	0,60
220,01	2,90	13450,90	0,03	1,64	220,05	2,85	24945,01	0,03	3,06	220,03	3,03	1440,14	0,03	0,18
230,01	3,06	14305,89	0,03	1,74	230,05	3,02	26059,34	0,03	3,20	230,03	2,86	330,38	0,03	0,04
240,21	3,23	14994,02	0,03	1,83	Модуль упругости, МПа				1818	240,02	2,73	202,35	0,03	0,02
250,21	3,40	15509,88	0,03	1,89						250,02	2,90	1934,26	0,03	0,24
260,21	3,57	15857,89	0,04	1,93						260,02	3,06	4586,64	0,03	0,56
270,21	3,73	15908,23	0,04	1,94						270,02	3,23	8616,80	0,03	1,06
280,21	3,90	15655,34	0,04	1,91						280,02	3,40	12466,52	0,03	1,53
Модуль упругости, МПа				600						285,02	3,48	13240,47	0,03	1,62
										290,02	3,56	13618,54	0,03	1,67
										300,02	3,73	13713,39	0,04	1,68
										250,02	2,90	1934,26	0,03	0,24
										Модуль упругости, МПа				1000
														
График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения				

Таблица П.А7 – Протокол определения модуля упругости суглинка Г6, укрепленного известково-зольным вяжущим 10 % (образцы 23–25)

Образец 23					Образец 24					Образец 25				
Макс. нагрузка, Н				15 320,84	Макс. нагрузка, Н				15 452,4	Макс. нагрузка, Н				15 852,7
Перемещение при макс. нагрузке, мм				3,54935	Перемещение при макс. нагрузке, мм				3,84064	Перемещение при макс. нагрузке, мм				3,90834
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере reme меще- ще- ние	Нагруз- ка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
0,00	0,00	-0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,07	0,00	0,00
10,00	0,16	607,03	0,00	0,07	10,00	0,16	313,07	0,00	0,04	10,00	0,16	420,28	0,00	0,05
20,00	0,33	1143,89	0,00	0,14	20,00	0,33	616,82	0,00	0,08	20,00	0,33	788,09	0,00	0,10
30,00	0,50	1568,29	0,00	0,19	30,00	0,50	1055,59	0,00	0,13	30,00	0,50	1165,20	0,00	0,14
40,00	0,66	2007,56	0,01	0,24	40,00	0,66	1568,52	0,01	0,19	40,00	0,66	1585,43	0,01	0,19
50,00	0,83	2419,89	0,01	0,29	50,00	0,83	2075,62	0,01	0,25	50,00	0,83	2010,16	0,01	0,25
60,00	1,00	2920,22	0,01	0,35	60,00	1,00	2601,37	0,01	0,32	60,00	1,00	2470,40	0,01	0,30
70,00	1,16	3623,55	0,01	0,44	70,00	1,16	3138,53	0,01	0,38	70,00	1,16	2977,31	0,01	0,36
80,00	1,33	4347,59	0,01	0,52	80,00	1,33	3723,80	0,01	0,46	80,00	1,33	3559,50	0,01	0,43
89,86	1,46	3985,93	0,01	0,48	90,00	1,50	4368,40	0,01	0,53	90,00	1,50	4208,08	0,01	0,51
99,86	1,29	522,47	0,01	0,06	99,90	1,63	4007,23	0,02	0,49	100,00	1,66	4936,24	0,02	0,60
109,86	1,13	24,36	0,01	0,00	109,90	1,46	591,80	0,01	0,07	109,89	1,53	900,71	0,02	0,11
119,64	1,22	690,11	0,01	0,08	119,90	1,29	57,83	0,01	0,01	119,89	1,36	107,51	0,01	0,01
129,64	1,39	2628,53	0,01	0,32	129,67	1,25	143,76	0,01	0,02	129,66	1,34	343,42	0,01	0,04
139,64	1,56	5191,61	0,02	0,63	139,67	1,41	1051,39	0,01	0,13	139,66	1,51	1583,98	0,01	0,19
150,04	1,73	6228,98	0,02	0,75	150,07	1,59	3223,32	0,02	0,39	150,06	1,68	4408,32	0,02	0,54
160,04	1,90	7149,84	0,02	0,86	160,07	1,75	5318,80	0,02	0,65	160,06	1,85	5780,99	0,02	0,71
170,04	2,06	8148,50	0,02	0,98	170,07	1,92	6299,11	0,02	0,77	170,06	2,01	6729,05	0,02	0,82
180,04	2,23	9141,30	0,02	1,10	180,07	2,09	7222,72	0,02	0,88	180,06	2,18	7718,52	0,02	0,94

Окончание таблицы П.А7

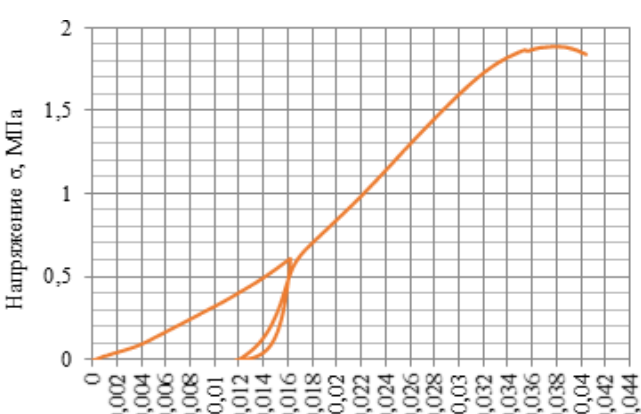
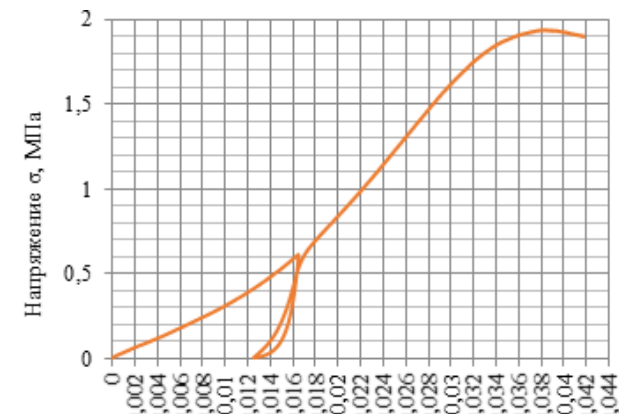
1					2					3				
190,04	2,40	10174,55	0,02	1,23	190,07	2,25	8206,47	0,02	1,00	190,06	2,35	8726,03	0,02	1,07
200,04	2,56	11167,66	0,03	1,35	200,07	2,42	9224,43	0,02	1,13	200,06	2,52	9813,06	0,02	1,20
210,04	2,73	12142,60	0,03	1,46	210,07	2,59	10302,79	0,03	1,26	210,06	2,68	10882,16	0,03	1,33
220,04	2,90	13023,98	0,03	1,57	220,07	2,75	11332,66	0,03	1,38	220,06	2,85	11977,96	0,03	1,46
230,04	3,06	13863,87	0,03	1,67	230,07	2,92	12357,40	0,03	1,51	230,06	3,01	12986,57	0,03	1,59
240,24	3,23	14562,38	0,03	1,76	240,27	3,09	13328,35	0,03	1,63	240,26	3,18	13915,40	0,03	1,70
250,24	3,40	15035,83	0,03	1,81	250,27	3,26	14148,20	0,03	1,73	250,26	3,35	14712,91	0,03	1,80
260,24	3,57	15272,80	0,04	1,84	260,27	3,42	14822,71	0,03	1,81	260,26	3,52	15259,28	0,03	1,86
270,24	3,73	15010,94	0,04	1,81	270,27	3,59	15254,55	0,04	1,86	270,26	3,68	15624,87	0,04	1,91
Модуль упругости, МПа				600	275,27	3,67	15307,09	0,04	1,87	275,26	3,77	15728,52	0,04	1,92
					280,27	3,76	15417,70	0,04	1,88	280,26	3,85	15808,17	0,04	1,93
					290,27	3,92	15412,93	0,04	1,88	290,26	4,02	15802,08	0,04	1,93
					300,27	4,09	15112,64	0,04	1,85	300,26	4,18	15608,67	0,04	1,91
					Модуль упругости, МПа				500	Модуль упругости, МПа				566
														
График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения				

Таблица П.А8 – Протокол определения модуля упругости супеси, укрепленного известью 7 % (образцы 1–3)

Образец 1					Образец 2					Образец 3				
Максимум нагрузка, Н			1654,211		Максимум нагрузка, Н			870,735		Максимум нагрузка, Н			2029,46	
Перемещение при максимум нагрузке, мм			2,27974		Перемещение при максимум нагрузке, мм			3,19905		Перемещение при макс. нагрузке, мм			2,24814	
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Вре- мя	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. де- формация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- мещение	Нагруз- ка	Отн. дефор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0	0,0000	-0,2886	0,0000	0,00	0	0,0000	0,0144	0,0000	0,00	0	0,0000	-0,3866	0,0000	0,00
10	0,1628	90,6151	0,0015	0,01	10	0,1625	57,8318	0,0016	0,01	10	0,1625	144,9524	0,0016	0,02
20	0,3293	162,3429	0,0031	0,02	20	0,3293	113,6559	0,0033	0,01	20	0,3290	268,2521	0,0033	0,03
30	0,4961	275,6997	0,0047	0,03	30	0,4958	167,5763	0,0049	0,02	30	0,4958	403,1983	0,0049	0,05
40	0,6628	408,2258	0,0063	0,05	40	0,6628	224,5982	0,0066	0,03	40	0,6623	560,3556	0,0065	0,07
50	0,8295	577,9704	0,0078	0,07	50	0,8292	284,3360	0,0082	0,03	50	0,8292	759,5841	0,0082	0,09
60	0,9961	762,9613	0,0094	0,09	60	0,9961	341,8255	0,0099	0,04	60	0,9006	349,1326	0,0089	0,04
70	1,1016	446,7955	0,0104	0,05	70	0,8814	26,7688	0,0087	0,00	70	0,7339	7,1391	0,0073	0,00
80	0,9980	120,2762	0,0094	0,01	80	0,9540	176,2101	0,0095	0,02	80	0,8664	405,0515	0,0086	0,05
90	1,1645	880,4151	0,0110	0,11	90	1,1205	377,6154	0,0111	0,05	90	1,0331	977,3250	0,0102	0,12
100	1,3315	1108,358	0,0126	0,14	100	1,2873	448,1130	0,0128	0,05	100	1,1997	1194,852	0,0119	0,14
110	1,4978	1257,997	0,0142	0,15	110	1,4539	518,3946	0,0144	0,06	110	1,3664	1407,835	0,0135	0,17
120	1,6647	1386,303	0,0157	0,17	120	1,6207	587,6710	0,0161	0,07	120	1,5330	1601,582	0,0152	0,19
130	1,8312	1492,119	0,0173	0,18	130	1,7872	661,3441	0,0177	0,08	130	1,6997	1779,638	0,0168	0,22
140	1,9981	1586,444	0,0189	0,19	140	1,9540	731,0360	0,0194	0,09	140	1,8664	1896,970	0,0184	0,23
150	2,1645	1639,312	0,0205	0,20	150	2,1206	744,9774	0,0210	0,09	150	2,0332	1976,945	0,0201	0,24
160	2,3314	1649,681	0,0221	0,20	160	2,2873	802,6232	0,0227	0,10	160	2,1996	2018,888	0,0217	0,24
170	2,4979	1609,474	0,0236	0,20	170	2,4539	826,2067	0,0243	0,10	170	2,3665	2017,299	0,0234	0,24
Модуль упругости, МПа				200	175	2,5371	830,0737	0,0251	0,10	175	2,4497	1984,142	0,0242	0,24
					180	2,6206	838,8297	0,0260	0,10	180	2,5330	1937,691	0,0250	0,23
					Модуль упругости, МПа				100	185	2,6165	1888,442	0,0259	0,23
										190	2,6997	1830,749	0,0267	0,22
										Модуль упругости, МПа				100

Окончание таблицы П.А8

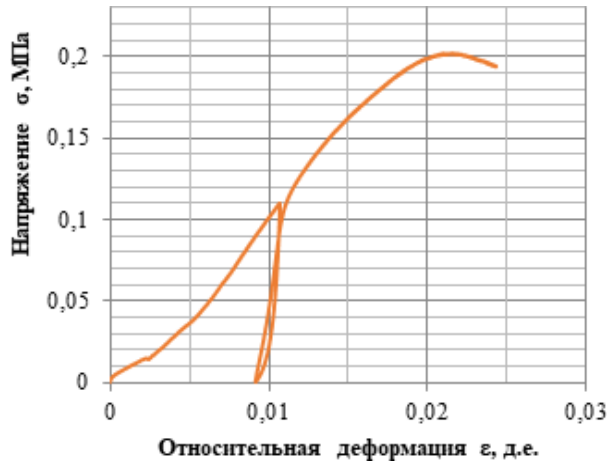
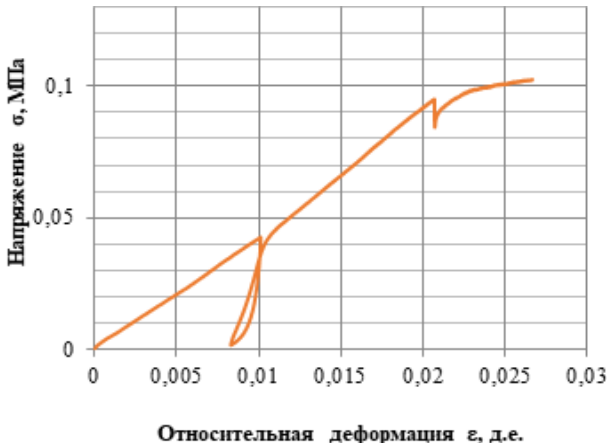
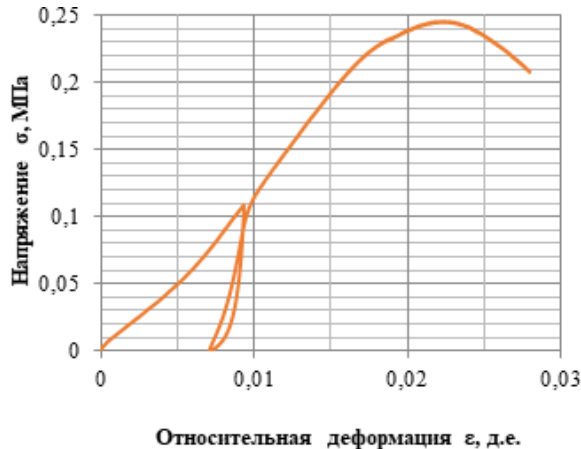
1	2	3
 Напряжение σ, МПа Относительная деформация ε, д.е.	 Напряжение σ, МПа Относительная деформация ε, д.е.	 Напряжение σ, МПа Относительная деформация ε, д.е.
График зависимости относительной деформации от напряжения	График зависимости относительной деформации от напряжения	График зависимости относительной деформации от напряжения

Таблица П.А9 – Протокол определения модуля упругости супеси, укрепленного известью 6 % (образцы 2, 3)

Образец 2					Образец 3				
Максимум нагрузка, Н			870,7358		Максимум нагрузка, Н			1687,394	
Перемещение при максимум нагрузке, мм			3,19905		Перемещение при максимум нагрузке, мм			2,51068	
Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2				
Время	Перемещение	Нагрузка	Отн. деформация	Напряжение	Время	Перемещение	Нагрузка	Отн. деформация	Напряжение
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0	0,0000	0,0144	0,0000	0,00	0	0,0000	0,0229	0,0000	0,00
10	0,1625	57,8318	0,0016	0,01	10	0,1627	142,4428	0,0016	0,02
20	0,3293	113,6559	0,0033	0,01	20	0,3292	246,9863	0,0033	0,03
30	0,4958	167,5763	0,0049	0,02	29,813	0,4675	240,6519	0,0046	0,03
40	0,6628	224,5982	0,0066	0,03	40,072	0,3988	102,3375	0,0040	0,01
50	0,8292	284,3360	0,0082	0,03	50,072	0,5655	407,7824	0,0056	0,05
60	0,9961	341,8255	0,0099	0,04	60,072	0,7322	535,2125	0,0073	0,06
70,045	0,8814	26,7688	0,0087	0,00	70,072	0,8989	660,3786	0,0089	0,08
80,036	0,9540	176,2101	0,0095	0,02	80,072	1,0656	794,1664	0,0106	0,10
90,036	1,1205	377,6154	0,0111	0,05	90,072	1,2321	925,6423	0,0122	0,11
100,036	1,2873	448,1130	0,0128	0,05	100,072	1,3990	1064,4978	0,0139	0,13
110,036	1,4539	518,3946	0,0144	0,06	110,072	1,5654	1195,3353	0,0155	0,14
120,036	1,6207	587,6710	0,0161	0,07	120,072	1,7323	1330,0640	0,0172	0,16
130,036	1,7872	661,3441	0,0177	0,08	130,072	1,8988	1448,7153	0,0189	0,18
140,036	1,9540	731,0360	0,0194	0,09	140,072	2,0657	1558,9962	0,0205	0,19
150,036	2,1206	744,9774	0,0210	0,09	150,072	2,2320	1629,6334	0,0222	0,20
160,036	2,2873	802,6232	0,0227	0,10	160,072	2,3991	1680,2307	0,0238	0,20
170,036	2,4539	826,2067	0,0243	0,10	170,072	2,5654	1679,3988	0,0255	0,20
180,036	2,6206	838,8297	0,0260	0,10	180,072	2,7323	1658,5231	0,0271	0,20
190,036	2,7873	847,9888	0,0276	0,10	190,072	2,8988	1598,1946	0,0288	0,19
195,036	2,8704	853,7820	0,0284	0,10	Модуль упругости, МПа				100
200,036	2,9540	866,1690	0,0293	0,11					
210,036	3,1205	869,3863	0,0309	0,11					
220,036	3,2873	865,4964	0,0326	0,10					
230,036	3,4539	848,2816	0,0342	0,10					

Окончание таблицы П.А9

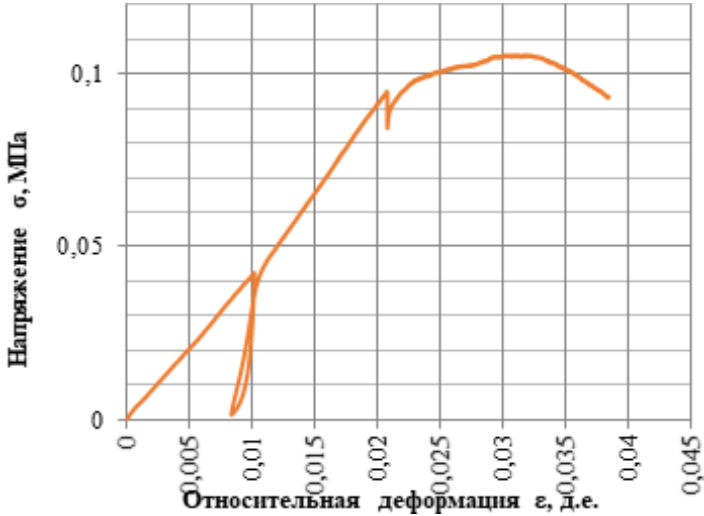
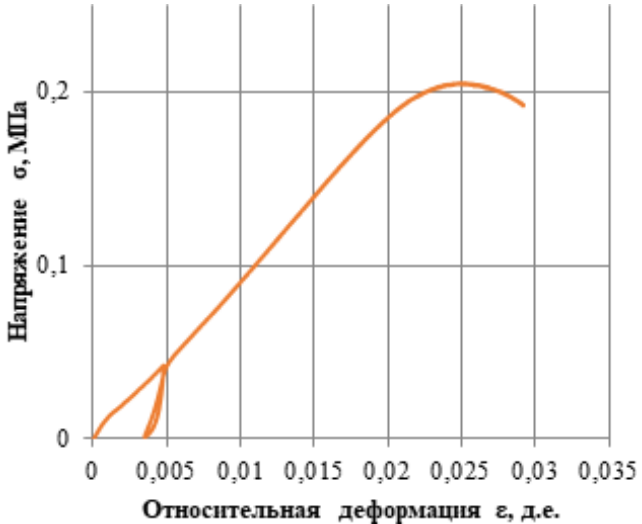
1					2				
240,036	3,6205	818,0674	0,0359	0,10					
250,036	3,7872	786,9320	0,0375	0,10					
Модуль упругости, МПа				100					
Напряжение σ, МПа  Относительная деформация ε, д.е.					Напряжение σ, МПа  Относительная деформация ε, д.е.				
График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения				

Таблица П.А10 – Протокол определения модуля упругости супеси, укрепленной портландцементом 6 % (образцы 1–3)

Образец 1					Образец 2					Образец 3				
Максимум нагрузка, Н				–	Максимум нагрузка, Н				17106,9	Максимум нагрузка, Н				19481,8
Перемещение при макс. нагрузке, мм				–	Перемещение при макс. нагрузке, мм				3,89162	Перемещение при макс. нагрузке, мм				3,78557
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Вре мя	Пере- меще- ние	Нагруз- ка	Отн. дефор- мация	Напря жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. де- форма- ция	Напря жение	Время	Пере- мещение	Нагрузка	Отн. де- форма- ция	Напря жение
(с)	(мм)	(Н)	-	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0	0,0000	0,0603	0,0000	0,00	0	0,0000	0,0507	0,0000	0,00	0	0,0000	-0,1614	0,0000	0,00
10	0,1643	740,2394	0,0016	0,09	10	0,1623	110,6325	0,0015	0,01	10	0,1626	92,0069	0,0016	0,01
20	0,3308	1426,246	0,0033	0,18	20	0,3292	207,0039	0,0031	0,03	20	0,3291	154,7811	0,0032	0,02
30	0,4977	2128,482	0,0049	0,26	30	0,4956	342,9851	0,0047	0,04	30	0,4960	227,2571	0,0049	0,03
40	0,6641	2931,912	0,0066	0,36	40	0,6625	628,6528	0,0063	0,08	40	0,6624	423,2352	0,0065	0,05
50	0,8311	3889,623	0,0082	0,48	50	0,8290	1034,051	0,0079	0,13	50	0,8294	799,9272	0,0082	0,10
60	0,9975	4955,827	0,0098	0,61	60	0,9958	1559,193	0,0095	0,19	60	0,9959	1312,482	0,0098	0,16
70	1,1644	6146,828	0,0115	0,76	70	1,1622	2163,283	0,0111	0,27	70	1,1627	2019,905	0,0115	0,25
80	1,3308	7416,199	0,0131	0,91	80	1,3291	2899,197	0,0127	0,36	80	1,3290	2906,604	0,0131	0,36
90	1,4978	8817,178	0,0148	1,08	90	1,4955	3732,664	0,0143	0,46	90	1,4960	3907,002	0,0147	0,48
100	1,6641	10267,59	0,0164	1,26	100	1,6624	4685,497	0,0159	0,58	100	1,6624	4969,187	0,0164	0,61
110	1,8311	11806,50	0,0181	1,45	110	1,8290	5736,438	0,0175	0,70	110	1,8293	6156,716	0,0180	0,76
120	1,9975	13345,73	0,0197	1,64	120	1,9958	6878,198	0,0190	0,84	120	1,9958	7307,823	0,0197	0,90
130	2,1644	14882,62	0,0214	1,83	130	2,1623	8112,898	0,0206	1,00	130	2,1626	8768,027	0,0213	1,08
140	2,3309	16289,10	0,0230	2,00	140	2,3291	9415,0088	0,0222	1,16	140	2,3291	10217,45	0,0230	1,26
150	2,4978	17510,92	0,0247	2,15	150	2,4957	10766,05	0,0238	1,32	150	2,4960	11757,27	0,0246	1,45
160	2,6643	18376,03	0,0263	2,26	160	2,6625	12134,55	0,0254	1,49	160	2,6625	13293,60	0,0262	1,64
170	2,8311	18796,29	0,0279	2,31	170	2,8290	13458,80	0,0270	1,65	170,00	2,6540	7415,839	0,0262	0,91
180	2,9976	18587,97	0,0296	2,28	180,03	2,8076	7292,986	0,0268	0,90	180,00	2,4872	2113,085	0,0245	0,26
190	3,1644	17697,50	0,0312	2,17	190,03	2,6410	2358,665	0,0252	0,29	190,00	2,3205	503,6018	0,0229	0,06
200	3,3310	16737,61	0,0329	2,06	200,03	2,4741	742,0608	0,0236	0,09	200,00	2,1539	39,3271	0,0212	0,00
Модуль упругости, МПа					210,03	2,3078	200,1495	0,0220	0,02	210,04	2,2387	1060,885	0,0221	0,13

Окончание таблицы П.А10

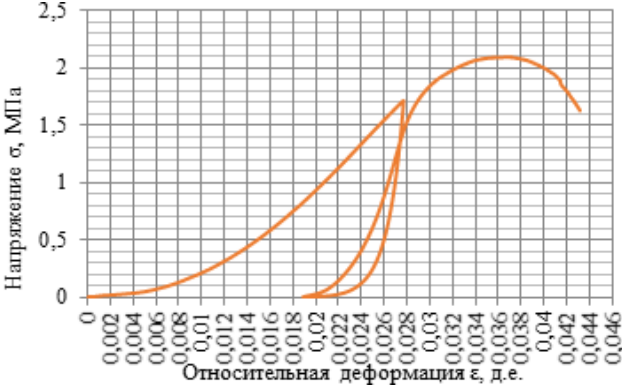
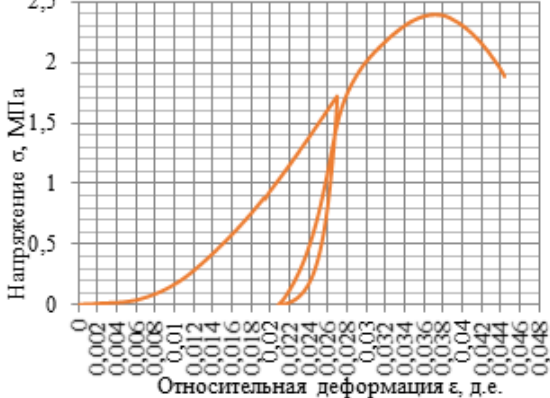
1		2					3				
		220,03	2,1408	35,4173	0,0204	0,00	220,04	2,4053	3274,372	0,0237	0,40
		240,03	2,1397	323,8943	0,0204	0,04	240,04	2,7386	12072,81	0,0270	1,48
		250,03	2,3063	1197,1398	0,0220	0,15	250,04	2,9055	14962,75	0,0286	1,84
		270,03	2,6397	5387,8901	0,0252	0,66	270,04	3,2389	17613,91	0,0319	2,17
		280,03	2,8065	9352,7627	0,0268	1,15	280,04	3,4052	18484,34	0,0336	2,27
		290,03	2,9731	13173,769	0,0284	1,62	290,04	3,5721	19155,09	0,0352	2,36
		300,03	3,1400	15016,257	0,0300	1,84	300,04	3,7387	19449,70	0,0368	2,39
		310,03	3,3063	15957,458	0,0316	1,96	310,04	3,9055	19325,57	0,0385	2,38
		320,03	3,4733	16621,168	0,0332	2,04	320,04	4,0719	18678,41	0,0401	2,30
		330,03	3,6397	16986,238	0,0347	2,09	330,04	4,2388	17741,77	0,0418	2,18
		340,03	3,8066	17084,724	0,0363	2,10	340,04	4,4053	16381,35	0,0434	2,01
		350,03	3,9731	16972,837	0,0379	2,09	Модуль упругости, МПа				742
		Модуль упругости, МПа				1000					
											
		График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения				

Таблица П.А11 – Протокол определения модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной зольно-цементным вяжущим 8 % (образцы 1–3)

Образец 1					Образец 2					Образец 3				
Максимум нагрузка, Н			37 704,03		Максимум нагрузка, Н			31 381,4		Максимум нагрузка, Н			27 675,	
Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,7419		Перемещение при макс. нагрузке, мм			2,09504		Перемещение при макс. нагрузке, мм			2,1339	
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0	0,0000	-0,1286	0,0000	0,00	0	0,0000	-0,3712	0,0000	0,00	0	0,0000	-0,1735	0,0000	0,00
10	0,1628	102,1973	0,0018	0,01	10	0,1628	40,2409	0,0016	0,00	10	0,1625	141,7645	0,0016	0,02
20	0,3293	351,9518	0,0036	0,04	20	0,3292	61,0631	0,0032	0,01	20	0,3292	222,3230	0,0032	0,03
30,087	0,4519	242,9421	0,0049	0,03	30	0,4961	135,0068	0,0049	0,02	30	0,4959	416,4553	0,0048	0,05
40,043	0,4816	841,3652	0,0052	0,10	40	0,6626	369,3937	0,0065	0,05	40	0,6626	698,4086	0,0065	0,09
50,043	0,6484	4206,8550	0,0070	0,52	50	0,8295	1034,3391	0,0082	0,13	50	0,8291	1457,0386	0,0081	0,18
60,043	0,8149	15478,7910	0,0088	1,91	60	0,9958	4535,4614	0,0098	0,56	60	0,9960	2878,6668	0,0097	0,36
70,043	0,9818	23623,5176	0,0106	2,92	70	1,1628	14133,5469	0,0114	1,74	70	1,1623	6429,1157	0,0113	0,79
80,043	1,1483	28825,5117	0,0124	3,56	80	1,3292	20313,3438	0,0131	2,51	80	1,3293	13922,5156	0,0130	1,72
90,043	1,3151	32968,6914	0,0142	4,07	90	1,4961	24452,4824	0,0147	3,02	90	1,4957	19739,6113	0,0146	2,44
100,04	1,4817	35882,1250	0,0160	4,43	100,05	1,3832	8675,2832	0,0136	1,07	100	1,6626	23564,8652	0,0162	2,91
110,04	1,6484	37465,3086	0,0178	4,63	110,05	1,2164	903,5742	0,0120	0,11	110,00	1,6725	14806,7344	0,0163	1,83
120,04	1,8150	37427,0664	0,0196	4,63	120,08	1,0524	4,5866	0,0104	0,00	120,00	1,5059	2664,7932	0,0147	0,33
130,04	1,9818	35561,1992	0,0214	4,39	130,08	1,2182	2391,4612	0,0120	0,30	130,00	1,3391	417,9692	0,0131	0,05
140,04	2,1484	31997,1856	0,0232	3,95	140,08	1,3850	11290,6231	0,0136	1,39	140,00	1,1725	20,7000	0,0114	0,00
Модуль упругости, МПа				400	150,08	1,5515	24169,5293	0,0153	2,98	150,05	1,2905	739,5867	0,0126	0,09
					160,08	1,7185	28320,5352	0,0169	3,49	160,05	1,4573	3578,6699	0,0142	0,44
					170,08	1,8849	30450,1231	0,0185	3,76	170,05	1,6237	12476,5059	0,0158	1,54
					180,08	2,0517	31357,4434	0,0202	3,87	180,05	1,7905	24080,2383	0,0175	2,98
					190,08	2,2182	30865,3027	0,0218	3,81	190,05	1,9570	26937,9707	0,0191	3,33

Окончание таблицы П.А11

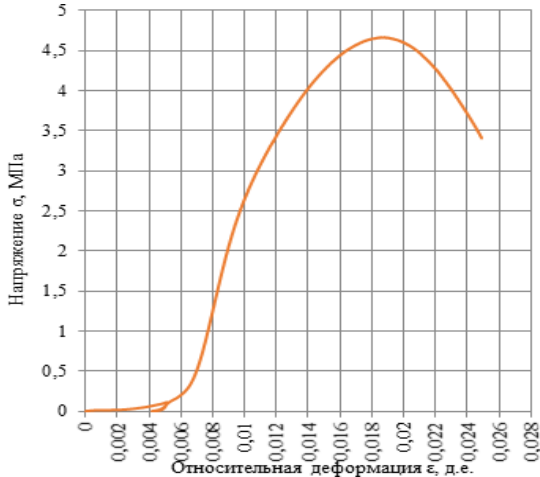
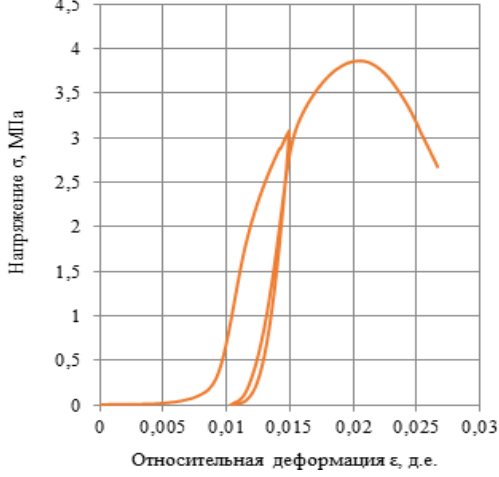
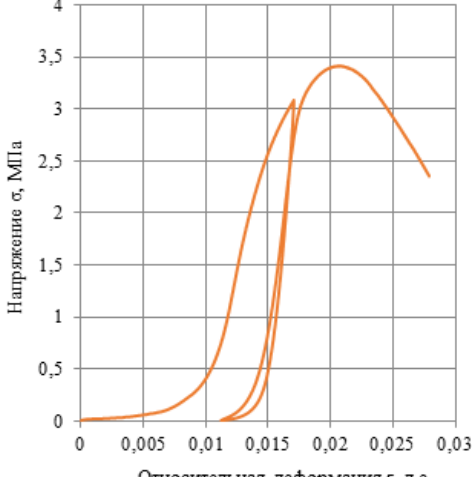
1					2					3				
					200,08	2,3851	28881,9277	0,0235	3,56	200,05	2,1239	27668,8555	0,0207	3,42
					210,08	2,5516	25548,0918	0,0251	3,15	210,05	2,2904	26978,6055	0,0223	3,33
					Модуль упругости, МПа				1250	220,05	2,4573	25144,0879	0,0240	3,11
										230,05	2,6238	22779,6309	0,0256	2,82
										Модуль упругости, МПа				1250
														
График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения				

Таблица П.А12 – Протокол определения модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной зольно-цементным вяжущим 8 % (образцы 1–3)

Образец 1					Образец 2					Образец 3				
Максимум нагрузка, Н			37 029,21		Максимум нагрузка, Н			40 393,6		Максимум нагрузка, Н			36 876,	
Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,2758		Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,45641		Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,6424	
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- reme- ще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- reme- ще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напр яже- ние
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
0,00	0,00	-1,51	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,66	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,17	0,00	0,00
10,00	0,16	6456,61	0,00	0,80	10,00	0,16	4475,67	0,00	0,55	10,00	0,16	726,57	0,00	0,09
20,00	0,33	15881,62	0,00	1,97	20,00	0,33	14773,54	0,00	1,83	20,00	0,33	5569,11	0,00	0,69
30,04	0,38	12586,99	0,00	1,56	30,01	0,42	14696,11	0,00	1,82	30,20	0,50	15147,92	0,00	1,88
40,04	0,21	807,23	0,00	0,10	40,01	0,25	1409,64	0,00	0,17	40,09	0,65	18798,77	0,01	2,33
50,01	0,31	7095,29	0,00	0,88	50,02	0,29	4653,08	0,00	0,58	50,09	0,48	3544,28	0,00	0,44
60,01	0,47	20988,59	0,00	2,60	60,02	0,45	18803,58	0,00	2,33	60,08	0,37	704,50	0,00	0,09
70,01	0,64	26047,02	0,01	3,23	70,02	0,62	25428,43	0,01	3,15	70,08	0,54	8810,65	0,00	1,09
80,01	0,81	30105,21	0,01	3,73	80,02	0,79	29851,53	0,01	3,70	80,08	0,70	21085,22	0,01	2,61
90,01	0,97	33517,01	0,01	4,15	90,02	0,95	33656,98	0,01	4,17	90,08	0,87	25432,62	0,01	3,15
100,01	1,14	36128,46	0,01	4,48	100,02	1,12	36973,92	0,01	4,58	100,08	1,04	29098,17	0,01	3,61
110,01	1,31	36939,22	0,01	4,58	110,02	1,29	39401,53	0,01	4,88	110,08	1,20	32265,19	0,01	4,00
120,01	1,47	34827,92	0,01	4,32	120,02	1,45	40373,79	0,01	5,00	120,08	1,37	34862,88	0,01	4,32
Модуль упругости, МПа				1633	130,02	1,62	39185,28	0,02	4,85	130,08	1,54	36458,61	0,01	4,52
					140,02	1,79	35872,99	0,02	4,44	140,08	1,70	36589,03	0,02	4,53
					Модуль упругости, МПа				1633	145,08	1,79	35496,86	0,02	4,40
										150,08	1,87	33625,35	0,02	4,17
										Модуль упругости, МПа				980

Окончание таблицы П.А12

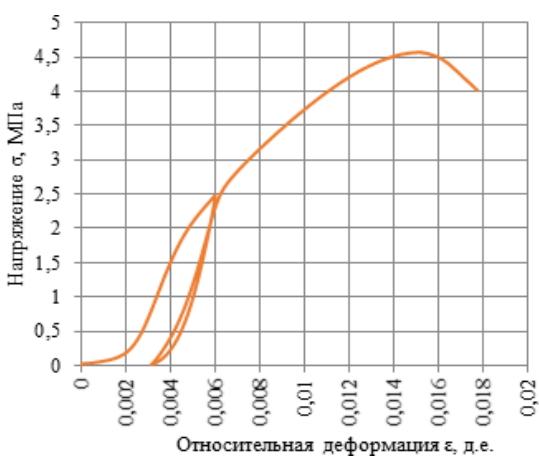
1	2	3
 График зависимости относительной деформации от напряжения	 График зависимости относительной деформации от напряжения	 График зависимости относительной деформации от напряжения

Таблица П.А13 – Протокол определения модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной зольно-цементным вяжущим 8 % (образцы 4–6)

Образец 4					Образец 5					Образец 6				
Максимум нагрузка, Н			30514,51		Максимум нагрузка, Н			22 773,0		Максимум нагрузка, Н			19 519,	
Перемещение при макс. нагрузке, мм			2,07278		Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,5394		Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,9300	
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отно- ситель- ная дефор- форма- ция	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Относи- тельная дефор- мация	Напр- яже- ние	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Относи- тельная дефор- мация	Напр- яже- ние
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0	0	0,02685	0	0,00	0	0,0000	0,1488	0,0000	0,00	0	0,0000	0,0099	0,0000	0,00
10	0,1625	125,5684	0,0016	0,02	10	0,1626	183,2867	0,0016	0,02	10	0,1625	30,5414	0,0016	0,00
20	0,3293	318,0082	0,0032	0,04	20	0,3290	338,0103	0,0033	0,04	20	0,3289	52,3423	0,0032	0,01
30	0,4958	760,7611	0,0049	0,09	30	0,4958	707,4456	0,0049	0,08	30	0,4959	98,4824	0,0049	0,01
40	0,6626	2335,5669	0,0065	0,29	40	0,6623	1421,2404	0,0066	0,17	40	0,6623	197,2147	0,0065	0,02
50	0,8291	6818,5366	0,0082	0,84	50	0,8292	3076,4273	0,0083	0,36	50	0,8292	384,3536	0,0082	0,05
60	0,9960	12359,5645	0,0098	1,53	60	0,9956	6605,2124	0,0099	0,78	60	0,9957	749,3637	0,0098	0,09
70,077	0,9454	4331,0664	0,0093	0,54	70	1,1625	12165,6201	0,0116	1,43	70	1,1626	1598,1304	0,0115	0,19
80,077	0,7788	286,3311	0,0077	0,04	80,02	1,0941	4597,5293	0,0109	0,54	80	1,3290	3514,9277	0,0131	0,42
90,078	0,7010	210,8413	0,0069	0,03	90,02	0,9274	587,3563	0,0092	0,07	90	1,4959	7368,5723	0,0148	0,87
100,07	0,8676	2642,4377	0,0085	0,33	100,02	0,7607	22,7735	0,0076	0,00	100	1,6623	13079,8926	0,0164	1,55
110,07	1,0340	11504,8955	0,0102	1,42	110,04	0,8460	490,3632	0,0084	0,06	110,06	1,5482	3630,0979	0,0153	0,43
120,07	1,2011	17752,1914	0,0118	2,20	120,04	1,0125	3110,7896	0,0101	0,37	120,06	1,3816	432,2166	0,0136	0,05
130,07	1,3674	21555,1992	0,0135	2,67	130,04	1,1793	10778,7754	0,0117	1,27	130,06	1,2148	11,9756	0,0120	0,00
140,07	1,5343	24923,0703	0,0151	3,08	140,04	1,3457	18920,6875	0,0134	2,23	140,09	1,2099	59,7232	0,0119	0,01
150,07	1,7008	27620,2324	0,0168	3,42	150,04	1,5126	22714,7168	0,0151	2,68	150,09	1,3766	1025,3739	0,0136	0,12
160,07	1,8677	29562,7949	0,0184	3,66	160,04	1,6792	20232,7617	0,0167	2,38	160,09	1,5432	4905,5523	0,0152	0,58

Окончание таблицы П.А13

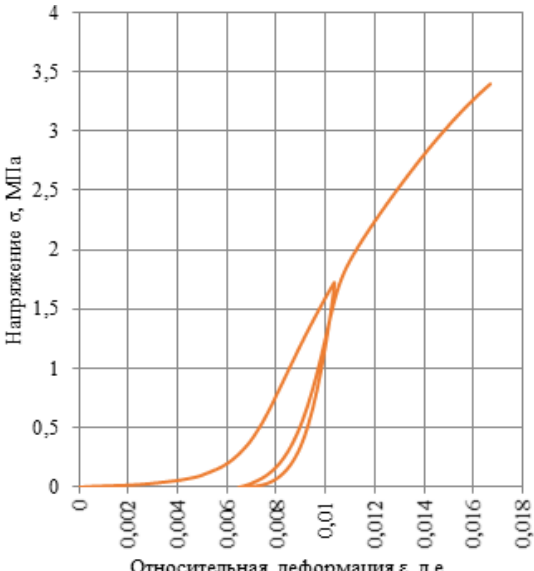
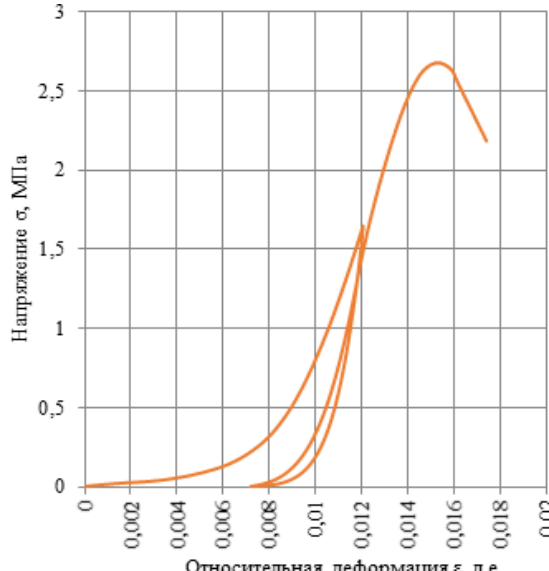
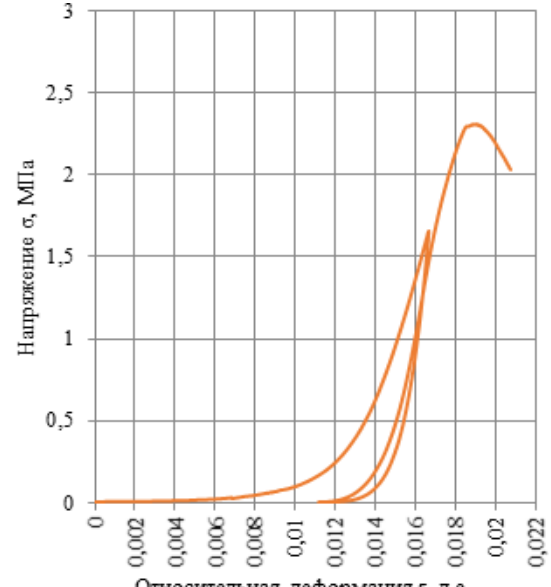
1					2					3					
165,07	1,9510	30147,3828	0,0192	3,73	Модуль упругости, МПа					1200	165,09	1,6264	8912,4746	0,0160	1,05
170,07	2,0341	30433,4082	0,0200	3,76							170,09	1,7099	13616,8672	0,0169	1,61
180,07	2,2011	30201,0000	0,0217	3,73							180,09	1,8766	19390,0469	0,0185	2,29
190,07	2,3675	28857,9668	0,0233	3,57							190,09	2,0433	18205,9102	0,0202	2,15
195,07	2,4508	27911,1094	0,0241	3,45							Модуль упругости, МПа				1166
200,07	2,5344	26776,7402	0,0250	3,31											
Модуль упругости, МПа				1166											
															
График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения					

**Таблица П.А14 – Протокол определения модуля упругости песка средней крупности, укрепленного портландцементом 6 %
(образцы 1–3)**

Образец 1					Образец 2					Образец 3				
Максимум нагрузка, Н				34903,68	Максимум нагрузка, Н				31602,8	Максимум нагрузка, Н				37496,
Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,83806	Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,91778	Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,7706
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Вре мя	Пере reme- меще- ние	Нагрузка	Отн. де- формация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напряже- ние	Вр ем я	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
0	0,00	0,12	0,00	0,00	0	0,00	0,10	0,00	0,00	0	0,00	-0,31	0,00	0,00
10	0,16	1585,44	0,00	0,19	10	0,16	1002,90	0,00	0,12	10	0,16	1445,73	0,00	0,18
20	0,33	6619,54	0,00	0,81	20	0,33	3910,75	0,00	0,48	20	0,33	5959,63	0,00	0,73
30	0,50	12927,19	0,00	1,58	30	0,50	8675,18	0,00	1,06	30	0,50	12748,98	0,00	1,55
40	0,41	2866,51	0,00	0,35	40	0,66	13842,00	0,01	1,68	40	0,66	17614,72	0,01	2,15
50	0,24	7,73	0,00	0,00	50	0,83	18125,21	0,01	2,21	50	0,68	11247,56	0,01	1,37
60	0,41	4661,67	0,00	0,57	60	0,84	10919,63	0,01	1,33	60	0,51	1451,22	0,01	0,18
70	0,58	14904,18	0,01	1,82	70	0,67	1592,62	0,01	0,19	70	0,36	66,87	0,00	0,01
80	0,74	19261,81	0,01	2,35	80	0,51	24,08	0,01	0,00	80	0,53	3980,25	0,01	0,49
90	0,91	22820,88	0,01	2,79	90	0,63	2198,02	0,01	0,27	90	0,70	14151,63	0,01	1,73
100	1,08	26026,22	0,01	3,18	100	0,79	9667,68	0,01	1,18	100	0,86	22687,28	0,01	2,77
110	1,24	28884,92	0,01	3,53	110	0,96	19979,72	0,01	2,43	110	1,03	26773,97	0,01	3,27
120	1,41	31477,06	0,01	3,85	120	1,13	23692,11	0,01	2,88	120	1,20	30245,81		3,69
130	1,58	33463,36	0,02	4,09	130	1,29	26297,43	0,01	3,20	130	1,36	33179,40		4,05
140	1,74	34684,29	0,02	4,24	140	1,46	28480,34	0,01	3,47	140	1,53	35595,86	0,02	4,34
150	1,91	34751,53	0,02	4,25	150	1,63	30221,32	0,02	3,68	150	1,70	37149,52	0,02	4,53
160	2,08	33226,14	0,02	4,06	160	1,79	31322,59	0,02	3,81	160	1,86	37129,65		4,53
170	2,24	30445,57	0,02	3,72	170	1,96	31526,27	0,02	3,84	170	2,03	34845,52		4,25
180	2,41	27245,79	0,02	3,33	180	2,13	30367,92	0,02	3,70	180	2,20	34436,50		4,20

Окончание таблицы П.А14

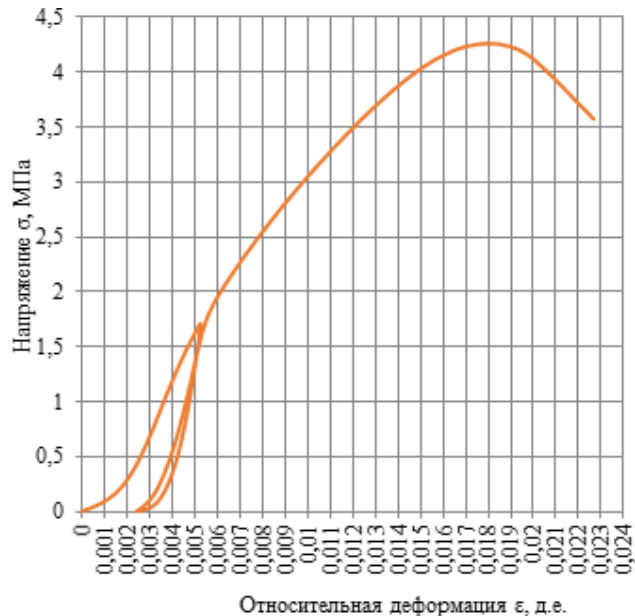
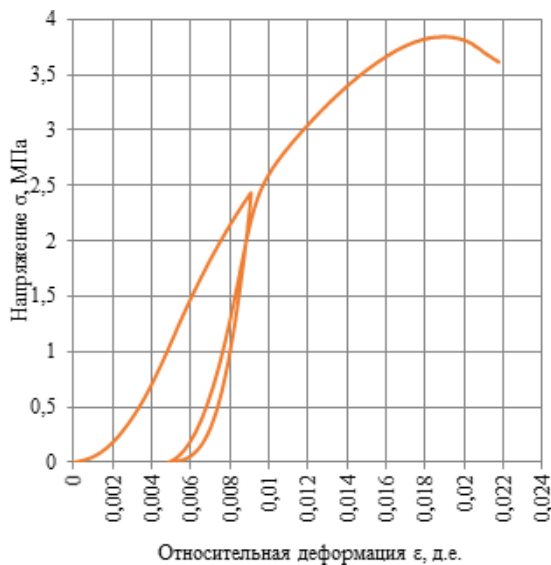
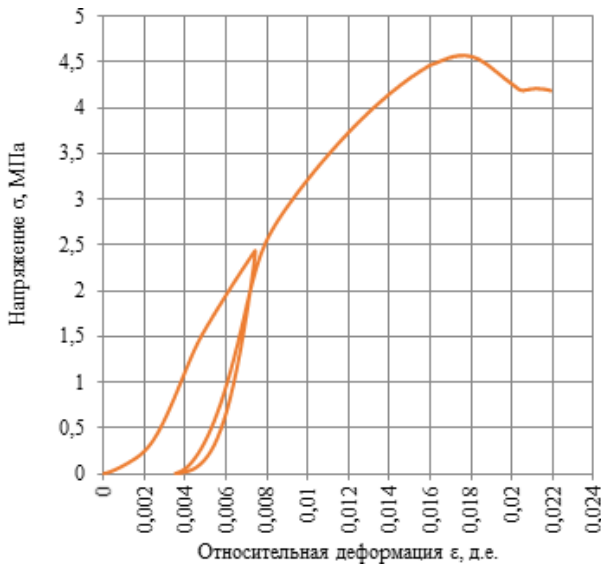
1					2					3				
185	2,49	25439,16	0,02	3,11	185	2,21	29586,78	0,02	3,60	Модуль упругости, МПа				1327
190	2,58	23564,79	0,03	2,88	190	2,29	28771,62	0,02	3,50					
200	2,74	19845,80	0,03	2,43	Модуль упругости, МПа				1200					
205	2,83	17961,16	0,03	2,19										
Модуль упругости, МПа				1200										
														
График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения				

Таблица П.А15 – Протокол определения модуля упругости песка средней крупности, укрепленного портландцементом 6 % (образцы 4–6)

Образец 4					Образец 5					Образец 6				
Максимум нагрузка, Н			34 107,85		Максимум нагрузка, Н			32 016,6		Максимум нагрузка, Н			30 892,	
Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,78527		Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,6702		Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,6465	
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Вре мя	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. де- форма- ция	Напряже- ние	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Вре- мя	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря жение
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0	0,00	-0,16	0,00	0,00	0	0,00	-0,48	0,00	0,00	0	0,00	-2,47	0,00	0,00
10	0,16	2191,08	0,00	0,27	10	0,16	1828,02	0,00	0,22	10	0,16	2267,70	0,00	0,28
20	0,33	7434,85	0,00	0,91	20	0,33	5072,09	0,00	0,62	20	0,33	6811,29	0,00	0,83
30	0,50	13712,13	0,00	1,68	30	0,50	9959,79	0,00	1,22	30	0,50	12169,28	0,00	1,48
40	0,66	17718,79	0,01	2,17	40	0,66	14819,90	0,01	1,81	40	0,66	16414,24	0,01	2,00
50	0,71	12811,83	0,01	1,57	50	0,83	19067,95	0,01	2,33	50	0,83	19856,74	0,01	2,42
60	0,54	1772,16	0,01	0,22	60	0,74	6829,42	0,01	0,84	60	0,68	4832,70	0,01	0,59
70	0,42	296,16	0,00	0,04	70	0,58	590,00	0,01	0,07	70	0,51	2,67	0,01	0,00
80	0,59	5947,59	0,01	0,73	80	0,56	1224,21	0,01	0,15	80	0,67	7095,17	0,01	0,87
90	0,75	17116,24	0,01	2,09	90	0,72	7976,01	0,01	0,98	90	0,84	18280,22	0,01	2,23
100	0,92	22968,91	0,01	2,81	100	0,89	19176,02	0,01	2,34	100	1,01	23087,92	0,01	2,82
110	1,09	26262,15	0,01	3,21	110	1,06	24012,59	0,01	2,94	110	1,17	26007,82	0,01	3,17
120	1,25	29085,76	0,01	3,55	120	1,22	27182,82	0,01	3,32	120	1,34	28495,27	0,01	3,48
130	1,42	31474,19	0,01	3,85	130	1,39	29758,69	0,01	3,64	130	1,51	30269,59	0,01	3,69
140	1,58	33162,34	0,02	4,05	140	1,56	31587,33	0,02	3,86	140	1,67	30816,98	0,02	3,76
150	1,75	34076,97	0,02	4,16	150	1,72	31898,89	0,02	3,90	150	1,84	29806,70	0,02	3,64
160	1,92	33621,83	0,02	4,11	160	1,89	30932,55	0,02	3,78	160	2,01	27685,91	0,02	3,38
170	2,09	31515,98	0,02	3,85	170	2,06	31095,12	0,02	3,80	Модуль упругости, МПа				1473
180	2,25	28978,73	0,02	3,54	180	2,22	29743,08	0,02	3,64					
Модуль упругости, МПа				1429	185	2,31	28793,76	0,02	3,52					
					Модуль упругости, МПа				1473					

Окончание таблицы П.А15

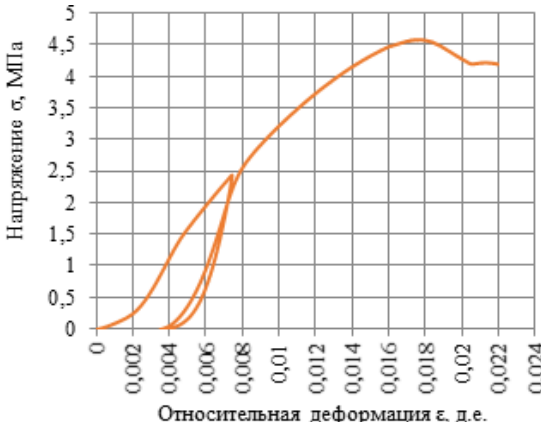
1	2	3
 График зависимости относительной деформации от напряжения	 График зависимости относительной деформации от напряжения	 График зависимости относительной деформации от напряжения

Таблица П.А16 – Протокол определения модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной известью 6 % (образцы 4–6)

Образец 4					Образец 5					Образец 6				
Максимум нагрузка, Н			34 107,85		Максимум нагрузка, Н			32 016,6		Максимум нагрузка, Н			30 892,	
Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,78527		Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,6702		Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,6465	
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
0	0,0000	0,1278	0,0000	0,00	0	0,0000	-0,3904	0,0000	0,00	0	0,0000	-1,3498	0,0000	0,00
10	0,1642	1922,9949	0,0016	0,24	10	0,1635	156,3624	0,0018	0,02	10	0,1625	1426,4970	0,0016	0,18
20,085	0,1372	424,4514	0,0013	0,05	20	0,3300	230,3805	0,0036	0,03	20	0,3289	4522,5610	0,0033	0,56
30,059	0,1731	1828,3610	0,0017	0,23	30	0,4969	285,7510	0,0054	0,03	30	0,4959	9814,7656	0,0050	1,21
40,059	0,3396	12950,4111	0,0033	1,60	40	0,6633	427,8118	0,0072	0,05	40,079	0,6021	10386,0234	0,0060	1,28
50,059	0,5066	19808,4238	0,0050	2,45	50	0,8303	702,4276	0,0090	0,08	50,079	0,4353	1100,2852	0,0044	0,14
60,059	0,6730	24062,3106	0,0066	2,98	60	0,9967	808,7729	0,0108	0,10	60,039	0,3649	640,7429	0,0037	0,08
70,059	0,8399	27790,3027	0,0083	3,44	70	1,1635	1351,4436	0,0126	0,16	70,039	0,5316	5964,6065	0,0053	0,74
80,059	1,0063	30801,7305	0,0099	3,81	80	1,3300	2611,6724	0,0144	0,31	80,039	0,6982	15626,4082	0,0070	1,93
90,059	1,1733	33050,8047	0,0115	4,09	90	1,4969	5858,7564	0,0162	0,69	90,039	0,8650	20071,8516	0,0087	2,48
100,05	1,3397	34070,7969	0,0132	4,21	100	1,6633	11481,5850	0,0180	1,36	100,03	1,0316	23792,1738	0,0103	2,94
110,05	1,5065	33642,4922	0,0148	4,16	110,07	1,6160	4958,9458	0,0175	0,59	110,03	1,1982	26926,5195	0,0120	3,33
120,05	1,6730	31620,6367	0,0164	3,91	120,07	1,4493	544,7954	0,0157	0,06	120,03	1,3650	29306,1816	0,0137	3,62
Модуль упругости, МПа				1000	125,07	1,3661	77,0986	0,0148	0,01	125,03	1,4482	30095,2852	0,0145	3,72
					130,08	1,3781	347,1769	0,0149	0,04	130,03	1,5315	30591,1211	0,0153	3,78
					140,08	1,5446	3370,5064	0,0167	0,40	140,03	1,6983	30766,4297	0,0170	3,80
					150,08	1,7115	12058,5986	0,0185	1,42	150,03	1,8649	29672,5391	0,0187	3,67
					160,08	1,8780	20996,3184	0,0203	2,48	160,03	2,0316	27293,7090	0,0203	3,37

Окончание таблицы П.А16

		165,08	1,9613	24324,0606	0,0212	2,87	Модуль упругости, МПа				1166
		170,08	2,0448	26110,7148	0,0221	3,09					
		180,08	2,2113	24083,3945	0,0239	2,85					

1		2		3	
		Модуль упругости, МПа		1200	
 График зависимости относительной деформации от напряжения		 График зависимости относительной деформации от напряжения		 График зависимости относительной деформации от напряжения	

Таблица П.А17 – Протокол определения модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной известью 7 % (образцы 4–6)

Образец 4					Образец 5					Образец 6				
Максимум нагрузка, Н		32	395,22		Максимум нагрузка, Н		35 528,2			Максимум нагрузка, Н		34 626,0		
Перемещение при макс. нагрузке, мм		1,48622			Перемещение при макс. нагрузке, мм		1,538			Перемещение при макс. нагрузке, мм		1,5534		
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0	0,0000	0,3907	0,0000	0,00	0	0,0000	-0,4313	0,0000	0,00	0	0,0000	-0,4476	0,0000	0,00
10	0,1641	4050,7241	0,0015	0,50	10	0,1624	2041,5105	0,0016	0,25	10	0,1642	770,4916	0,0016	0,10
20,075	0,0678	72,2000	0,0006	0,01	20	0,3288	8687,4414	0,0032	1,07	20	0,3308	5414,6504	0,0032	0,67
30,075	0,2344	7222,6523	0,0022	0,89	30,032	0,4143	9264,1328	0,0041	1,14	30	0,4974	12915,4414	0,0049	1,60
40,075	0,4012	13791,9443	0,0038	1,71	40,032	0,2476	446,7871	0,0024	0,06	40,061	0,3904	2147,1773	0,0038	0,27
50,075	0,5677	18729,2676	0,0053	2,32	50,052	0,2794	1961,4412	0,0028	0,24	50,027	0,3132	617,0007	0,0031	0,08
60,075	0,7345	22811,3926	0,0069	2,82	60,052	0,4461	12400,1006	0,0044	1,53	60,027	0,4799	9205,4580	0,0047	1,14
70,075	0,9011	26195,3770	0,0085	3,24	70,052	0,6129	19591,0879	0,0061	2,42	70,027	0,6466	18113,0859	0,0063	2,24
80,075	1,0679	28977,0879	0,0100	3,59	80,052	0,7793	24426,5606	0,0077	3,02	80,027	0,8132	22934,8848	0,0080	2,84
90,075	1,2345	31031,0313	0,0116	3,84	90,052	0,9462	28435,1191	0,0094	3,51	90,027	0,9800	26989,9395	0,0096	3,34
100,07	1,4011	32189,4766	0,0131	3,99	100,05	1,1128	31625,9082	0,0110	3,91	100,02	1,1465	30320,5195	0,0112	3,75
110,07	1,5678	32227,2070	0,0147	3,99	110,05	1,2795	34005,6602	0,0126	4,20	110,02	1,3134	33006,1094	0,0129	4,08
120,07	1,7344	30991,4258	0,0163	3,84	120,05	1,4461	35267,4023	0,0143	4,36	120,02	1,4799	34428,0273	0,0145	4,26
130,07	1,9011	28642,4570	0,0178	3,55	130,05	1,6129	35418,0352	0,0159	4,37	130,02	1,6466	34244,9258	0,0162	4,23
Модуль упругости, МПа				1428	135,05	1,6961	35003,1992	0,0168	4,32	135,02	1,7298	33491,6016	0,0170	4,14
					140,05	1,7794	34370,8867	0,0176	4,24	140,02	1,8132	32379,4395	0,0178	4,00
					150,05	1,9463	32292,6973	0,0192	3,99	Модуль упругости, МПа				1428
					Модуль упругости, МПа				1400					

Окончание таблицы П.А17



Таблица П.А18 – Протокол определения модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной известью 7 % (образцы 5–8)

Образец 5					Образец 7					Образец 8				
Максимум нагрузка, Н			45 902,59		Максимум нагрузка, Н			44 983,63		Максимум нагрузка, Н			40 844,	
Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,36104		Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,13745		Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,0051	
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- ме- ще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение	Время	Пере- ме- ще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- ме- ще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0,00	0,00	-5,77	0,00	0,00	0,00	0,00	-6,18	0,00	0,00	0,00	0,00	-21,33	0,00	0,00
10,00	0,16	3650,57	0,00	0,45	10,07	0,16	10931,60	0,00	1,35	10,05	0,16	10230,67	0,00	1,27
20,00	0,33	12630,12	0,00	1,56	20,07	0,33	21639,12	0,00	2,68	20,05	0,33	20228,15	0,00	2,51
30,03	0,42	14925,29	0,00	1,85	30,01	0,29	10795,01	0,00	1,33	30,05	0,35	14653,96	0,00	1,82
40,03	0,26	999,57	0,00	0,12	39,75	0,18	2066,60	0,00	0,26	39,80	0,21	854,50	0,00	0,11
50,01	0,33	6451,48	0,00	0,80	50,05	0,35	19451,64	0,00	2,41	50,10	0,38	19107,72	0,00	2,37
60,01	0,50	21742,39	0,00	2,69	60,05	0,52	31190,95	0,01	3,86	60,10	0,55	30558,73	0,01	3,79
70,01	0,67	29526,87	0,01	3,66	70,05	0,69	37534,13	0,01	4,64	70,10	0,72	36331,00	0,01	4,50
80,01	0,83	35751,27	0,01	4,43	80,05	0,85	41910,20	0,01	5,18	80,10	0,88	39909,18	0,01	4,94
90,01	1,00	40745,61	0,01	5,05	90,05	1,02	44377,59	0,01	5,49	90,10	1,05	40654,68	0,01	5,04
100,01	1,17	44283,22	0,01	5,49	100,05	1,19	44827,62	0,01	5,54	100,10	1,22	39332,77	0,01	4,87
110,01	1,33	45853,26	0,01	5,68	110,05	1,35	43044,31	0,01	5,32	Модуль упругости, МПа				1778
120,01	1,50	44993,86	0,01	5,57	Модуль упругости, МПа				2000					
130,01	1,67	41457,48	0,02	5,14										
Модуль упругости, МПа				1480										

Окончание таблицы П.А18



Таблица П.А19 – Протокол определения модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной известью 7 % (образцы 10–11)

Образец 10					Образец 11				
Максимум нагрузка, Н			43 544,85		Максимум нагрузка, Н			59 399,6	
Перемещение при максимум нагрузке, мм			1,56044		Перемещение при максимум нагрузке, мм			1,63333	
Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2				
Время	Перемеще- ние	Нагрузка	Относитель- ная дефор- мация	Напряжение	Время	Перемещение	Нагрузка	Относитель- ная дефор- мация	Напряжение
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0,00	0,00	-1,14	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,28	0,00	0,00
10,00	0,16	1870,13	0,00	0,23	10,00	0,16	461,73	0,00	0,06
20,00	0,33	4116,79	0,00	0,51	20,00	0,33	1615,85	0,00	0,20
30,00	0,50	8072,99	0,01	1,00	30,00	0,50	6962,01	0,00	0,86
40,00	0,66	15145,65	0,01	1,88	40,00	0,66	19566,97	0,01	2,42
50,00	0,83	22754,45	0,01	2,82	50,05	0,63	11220,86	0,01	1,39
60,06	0,77	10589,11	0,01	1,31	60,05	0,46	200,49	0,00	0,02
70,06	0,60	1845,48	0,01	0,23	69,77	0,58	7688,03	0,01	0,95
80,06	0,44	185,54	0,00	0,02	79,77	0,75	26207,09	0,01	3,25
89,82	0,52	2004,79	0,01	0,25	89,77	0,92	37681,57	0,01	4,67
100,02	0,69	7503,94	0,01	0,93	100,07	1,09	45978,75	0,01	5,70
110,02	0,86	20681,82	0,01	2,56	110,07	1,26	52145,31	0,01	6,46
120,02	1,03	30191,68	0,01	3,74	120,07	1,42	56632,71	0,01	7,02
130,02	1,19	36362,80	0,01	4,51	130,07	1,59	59234,14	0,02	7,34
140,02	1,36	41173,82	0,01	5,10	140,07	1,76	57855,46	0,02	7,17
150,02	1,53	43462,64	0,02	5,38	150,07	1,92	52268,33	0,02	6,48
155,02	1,61	43362,86	0,02	5,37	Модуль упругости, МПа				2333
160,02	1,69	42338,00	0,02	5,25					
170,02	1,86	39034,07	0,02	4,84					
Модуль упругости, МПа				1684					

Окончание таблицы П.А19

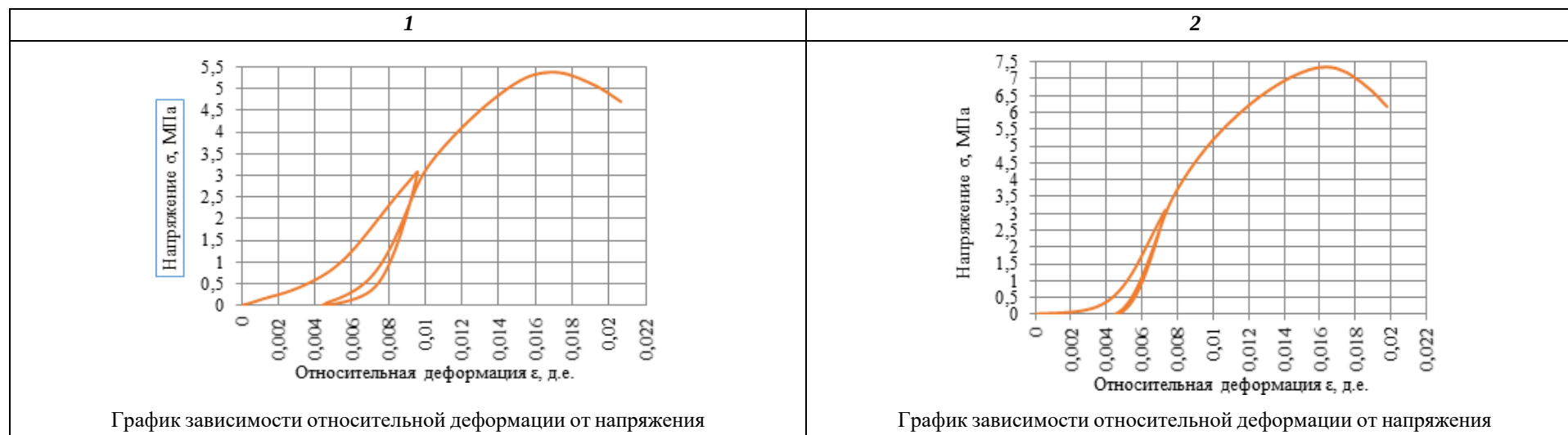


Таблица П.А20 – Протокол определения модуля упругости золошлаковой смеси (Г16), укрепленной портландцементом 6 % (образцы 1–3)

Образец 1					Образец 2					Образец 3				
1					2					3				
Максимум нагрузка, Н				8105,54	Максимум нагрузка, Н				6674,31	Максимум нагрузка, Н				6273,53
Перемещение при макс. нагрузке, мм				2,04628	Перемещение при макс. нагрузке, мм				2,02798	Перемещение при макс. нагрузке, мм				2,27849
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
Время	Пере- меще- ние	Нагруз- ка	Отн. дефор- мация	Напр яже- ние	Время	Пере- меще- ние	Нагруз- ка	Отн. дефор- фор- мация	Напря жение	Время	Пере- меще- ние	Нагруз- ка	Отн. де- форма- ция	Напря жение
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
0	0,000	-0,123	0,000	0,00	0	-0,637	-0,378	-0,006	0,00	0	0,000	-1,526	0,000	0,00
10	0,162	695,341	0,002	0,08	10	-0,474	303,937	-0,005	0,04	10	0,163	640,098	0,002	0,08
20	0,329	1705,227	0,003	0,21	20	-0,308	616,374	-0,003	0,08	20	0,329	1289,668	0,003	0,16
30	0,496	2576,319	0,005	0,31	30	-0,141	1025,282	-0,001	0,13	30	0,496	1917,332	0,005	0,23
40	0,663	3325,829	0,006	0,41	40	0,025	1523,589	0,000	0,19	40	0,663	2502,153	0,006	0,31
50	0,829	4002,262	0,008	0,49	50	0,192	2066,194	0,002	0,25	50	0,829	3031,480	0,008	0,37
60	0,996	4679,441	0,010	0,57	60	0,359	2615,760	0,003	0,32	60	0,996	3540,644	0,010	0,43
60,1	0,997	4680,629	0,010	0,57	60,1	0,361	2625,974	0,003	0,32	60,1	0,998	3547,916	0,010	0,43
70,012	0,997	2261,805	0,010	0,28	70,2	0,529	3196,128	0,005	0,39	70,2	1,166	4041,693	0,011	0,49
80,012	0,831	467,998	0,008	0,06	80	0,692	3749,834	0,007	0,46	80	1,329	4513,914	0,013	0,55
90,012	0,664	26,945	0,007	0,00	90	0,859	4316,455	0,008	0,53	90	1,496	4987,645	0,014	0,61
100,012	0,779	737,670	0,008	0,09	100	1,026	4848,682	0,010	0,59	99,893	1,342	1181,443	0,013	0,14
110,012	0,946	2250,851	0,009	0,28	109,874	0,958	1733,703	0,009	0,21	109,893	1,175	195,806	0,011	0,02
120,012	1,113	4734,072	0,011	0,58	120,074	0,788	326,688	0,008	0,04	120,051	1,165	528,534	0,011	0,06
130,012	1,279	5717,806	0,013	0,70	129,829	0,688	208,219	0,007	0,03	130,051	1,332	1915,516	0,013	0,23
140,012	1,446	6427,476	0,014	0,79	140,029	0,858	1393,698	0,008	0,17	140,051	1,498	4268,573	0,014	0,52
150,012	1,613	7060,458	0,016	0,86	150,029	1,024	3561,233	0,010	0,43	150,051	1,665	5350,676	0,016	0,65
160,012	1,780	7640,183	0,017	0,93	160,029	1,191	5204,090	0,012	0,63	160,051	1,832	5832,607	0,018	0,71
170,012	1,946	8008,225	0,019	0,98	170,029	1,358	5789,284	0,013	0,71	170,051	1,998	6151,540	0,019	0,75
180,012	2,113	8058,485	0,021	0,98	180,029	1,525	6221,714	0,015	0,76	180,051	2,165	6240,826	0,021	0,76

Окончание таблицы П.А20

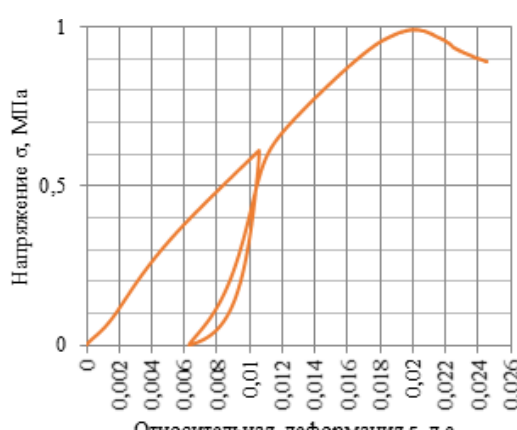
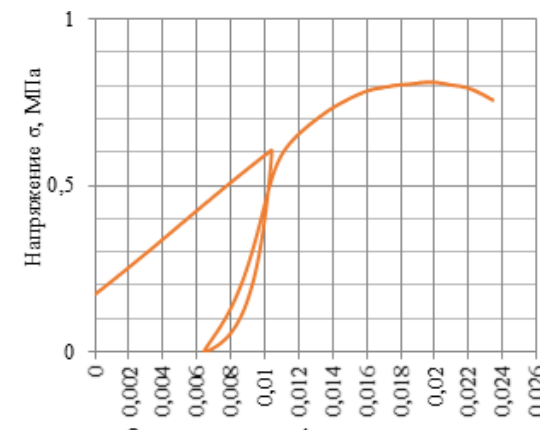
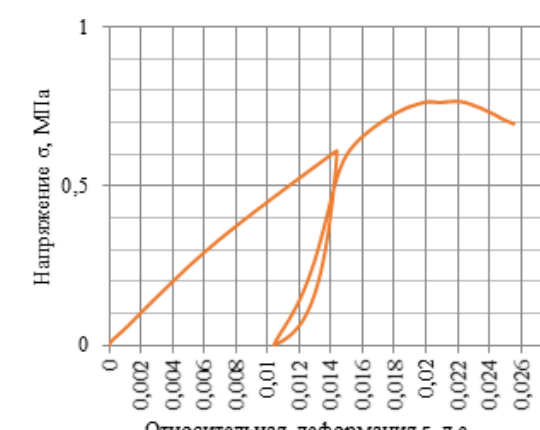
1					2					3				
190,012	2,279	7686,634	0,022	0,94	190,029	1,691	6493,462	0,016	0,79	190,051	2,332	6248,047	0,022	0,76
200,012	2,446	7360,399	0,024	0,90	200,029	1,858	6605,114	0,018	0,81	200,051	2,498	5998,509	0,024	0,73
Модуль упругости, МПа				666	205,029	1,941	6637,389	0,019	0,81	205,051	2,581	5823,743	0,025	0,71
					210,029	2,024	6659,311	0,020	0,81	210,014	2,665	5685,687	0,026	0,70
					215,029	2,108	6643,496	0,020	0,81	Модуль упругости, МПа			500	
					220,029	2,191	6589,009	0,021	0,80					
					Модуль упругости, МПа				500					
 График зависимости относительной деформации от напряжения					 График зависимости относительной деформации от напряжения					 График зависимости относительной деформации от напряжения				

Таблица П.А21 – Протокол определения модуля упругости золошлаковой смеси (Г16), укрепленной портландцементом 6 % (образцы 4–6)

Образец 4					Образец 5					Образец 6				
Максимум нагрузка, Н				5076,917	Максимум нагрузка, Н				7834,43	Максимум нагрузка, Н				51 439,0
Перемещение при макс. нагрузке, мм				2,1754	Перемещение при макс. нагрузке, мм				2,09302	Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,3154
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- reme- меще- ще- ние	Нагруз- ка	Относи- тельная деформация	Напря- жение	Время	Пере- reme- меще- ще- ние	Нагруз- ка	Относи- тельная дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Относи- тельная дефор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
0	0,000	-0,265	0,000	0,00	0	0,000	-0,133	0,000	0,00	0	0,000	-0,209	0,000	0,00
10	0,163	947,279	0,002	0,12	10	0,163	562,319	0,002	0,07	10	0,163	4207,802	0,002	0,52
20	0,330	1524,270	0,003	0,19	20	0,329	1306,665	0,003	0,16	20	0,329	15302,945	0,003	1,89
30	0,496	1970,362	0,005	0,24	30	0,496	2212,795	0,005	0,27	30,09	0,324	9489,723		1,17
40	0,663	2390,300	0,006	0,29	40	0,663	3028,840	0,006	0,37	40,09	0,157	91,908		0,01
50	0,830	2785,283	0,008	0,34	50	0,829	3739,074	0,008	0,46	50,017	0,290	7778,092		0,96
60	0,996	3182,839	0,010	0,39	60,082	0,799	1319,834	0,008	0,16	60,017	0,457	22306,523		2,75
60,1	0,998	3187,337	0,010	0,39	60,182	0,797	1295,006	0,008	0,16	60,117	0,459	22416,309	0,004	2,77
70,2	1,166	3576,800	0,011	0,44	70,282	0,629	171,797	0,006	0,02	70,217	0,627	30435,029	0,006	3,76
80	1,330	3946,893	0,013	0,48	79,866	0,565	186,624	0,006	0,02	80,017	0,790	37361,559	0,008	4,61
90	1,496	4303,766	0,015	0,52	90,066	0,735	1236,786	0,007	0,15	90,017	0,957	43805,922	0,009	5,41
100	1,663	4643,304	0,016	0,57	100,06	0,901	3538,765	0,009	0,43	100,01	1,124	48955,758		6,05
110	1,830	4911,693	0,018	0,60	110,06	1,068	4601,765	0,010	0,56	110,01	1,291	51436,066		6,35
120,09	1,789	2150,326	0,017	0,26	120,06	1,234	5239,689	0,012	0,64	120,01	1,457	50471,168		6,23
130,09	1,623	611,411	0,016	0,07	130,06	1,401	5869,708	0,014	0,72	Модуль упругости, МПа				1392
140,09	1,456	135,272	0,014	0,02	140,06	1,568	6466,322	0,015	0,79					
150,05	1,395	243,775	0,014	0,03	150,06	1,735	7055,376	0,017	0,86					
160,05	1,562	997,294	0,015	0,12	160,06	1,901	7541,622	0,019	0,92					
170,05	1,729	2280,564	0,017	0,28	170,06	2,068	7822,858	0,020	0,95					

Окончание таблицы П.А21

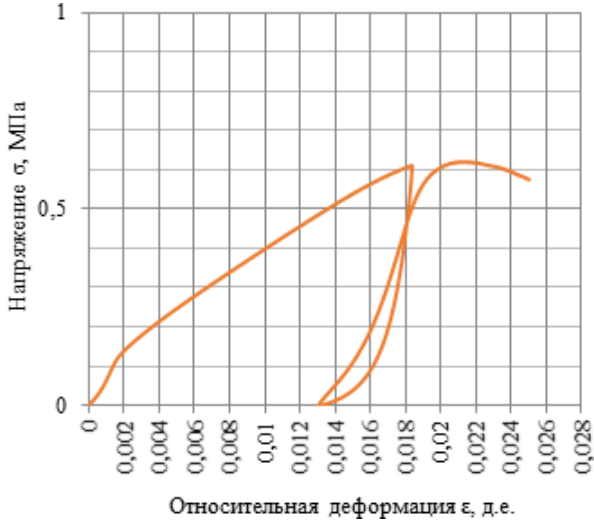
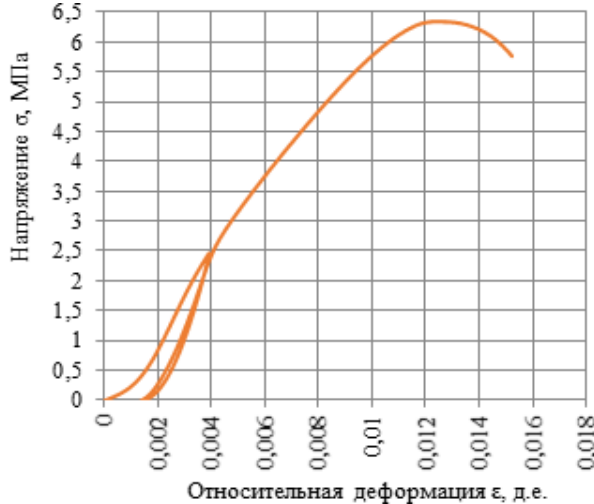
1					2					3				
180,05	1,895	4159,020	0,018	0,51	180,06	2,234	7599,928	0,022	0,93					
190,05	2,062	4963,826	0,020	0,61	190,06	2,401	7277,635	0,023	0,89					
195,05	2,145	5054,922	0,021	0,62	Модуль упругости, МПа				666					
200,05	2,229	5071,449	0,022	0,62										
210,05	2,395	4960,727	0,023	0,60										
Модуль упругости, МПа				500										
 График зависимости относительной деформации от напряжения					 График зависимости относительной деформации от напряжения					 График зависимости относительной деформации от напряжения				

Таблица П.А22 – Протокол определения модуля упругости золошлаковой смеси (Г16), укрепленной портландцементом 6 % (образцы 7–9)

Образец 7					Образец 8					Образец 9				
Максимум нагрузка, Н				53 624,15	Максимум нагрузка, Н				54 100,92	Максимум нагрузка, Н				56 151,0
Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,30349	Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,34219	Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,3529
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор фор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
0	0,000	-0,112	0,000	0,00	0	0,000	-0,452	0,000	0,00	0	0,000	-0,010	0,000	0,00
10	0,162	1596,860	0,002	0,18	10	0,162	1286,349	0,002	0,16	10	0,164	1703,142	0,002	0,21
20	0,329	7826,169	0,003	0,90	20	0,329	5596,026	0,003	0,69	20	0,331	7151,517	0,003	0,87
30	0,496	19166,719	0,005	2,19	30	0,496	15170,513	0,005	1,86	30	0,498	18847,486	0,005	2,29
40,016	0,359	4032,433	0,003	0,46	40,01	0,479	8728,119	0,005	1,07	40,043	0,368	3774,092	0,004	0,46
50,095	0,210	71,585	0,002	0,01	50,01	0,312	428,849	0,003	0,05	50,08	0,219	58,757	0,002	0,01
60,095	0,376	6389,139	0,004	0,73	60,035	0,304	829,939	0,003	0,10	60,08	0,386	6411,854	0,004	0,78
60,195	0,378	6520,790	0,004	0,75	60,135	0,305	855,165	0,003	0,11	60,18	0,388	6553,968	0,004	0,79
70,295	0,546	22043,389	0,005	2,52	70,235	0,474	9496,558	0,005	1,17	70,28	0,556	22619,563	0,005	2,74
80,095	0,710	31869,158	0,007	3,65	80,035	0,637	24424,959	0,006	3,00	80,08	0,719	32557,150	0,007	3,95
90,095	0,877	40640,641	0,008	4,65	90,035	0,804	34558,953	0,008	4,25	90,08	0,886	41379,906	0,009	5,02
100,09	1,043	48266,992	0,010	5,52	100,03	0,970	43025,863	0,010	5,29	100,08	1,053	48788,879	0,010	5,92
10,095	1,210	52933,121	0,012	6,06	110,03	1,137	49635,324	0,011	6,10	110,08	1,219	54214,691	0,012	6,57
120,09	1,377	52639,520	0,013	6,02	120,03	1,304	53704,293	0,013	6,60	120,08	1,386	56056,625	0,014	6,80
130,09	1,543	49119,527	0,015	5,62	130,03	1,470	50496,523	0,014	6,21	130,08	1,553	45747,715	0,015	5,55
Модуль упругости, МПа				1625	Модуль упругости, МПа				1480	Модуль упругости, МПа				1490

Окончание таблицы П.А22



Таблица П.А23 – Протокол определения модуля упругости гравийного грунта (АД «Егоровщина – Рязановщина»), укрепленного портландцементом 4% (образцы 1–3)

Образец 1					Образец 2					Образец 3				
Максимум нагрузка, Н			10 528,21		Максимум нагрузка, Н			9828,72		Максимум нагрузка, Н			5375,0	
Перемещение при макс. нагрузке, мм			2,15767		Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,89984		Перемещение при макс. нагрузке, мм			0,4669	
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- меще- ние	Нагруз- ка	Отно- ситель- ная дефор- фор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Относи- тель- ная дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Относи- тельная дефор- мация	Напр яже- ние
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,00	0,001	0,192	0,000	0,00	0,00	0,000	-0,487	0,000	0,00	0,00	0,000	-7,086	0,000	0,00
10,00	0,166	78,638	0,001	0,01	10,00	0,163	220,388	0,002	0,03	10,00	0,163	4369,812	0,002	0,54
20,00	0,332	183,294	0,002	0,02	20,00	0,329	463,295	0,003	0,06	19,89	0,162	695,971	0,002	0,09
30,00	0,499	481,566	0,003	0,06	30,00	0,496	974,040	0,005	0,12	30,05	0,279	4931,269	0,003	0,61
40,00	0,665	1224,945	0,003	0,15	40,00	0,663	2045,176	0,007	0,25	40,05	0,445	5355,124	0,005	0,66
50,00	0,832	2408,069	0,004	0,30	50,00	0,829	3628,327	0,008	0,45	50,05	0,612	5273,340	0,006	0,65
60,00	0,999	3683,638	0,005	0,45	59,80	0,974	4393,453	0,010	0,54	Модуль упругости, МПа				909
70,03	0,911	839,147	0,005	0,10	70,00	0,804	505,127	0,008	0,06					
80,03	0,744	91,209	0,004	0,01	80,00	0,637	9,423	0,006	0,00					
90,07	0,666	94,461	0,003	0,01	90,09	0,775	1027,240	0,008	0,13					
100,07	0,833	900,992	0,004	0,11	100,09	0,941	3544,751	0,009	0,44					
110,07	0,999	2872,944	0,005	0,35	110,09	1,108	6058,433	0,011	0,75					
120,07	1,166	5087,745	0,006	0,63	120,09	1,275	7474,507	0,013	0,92					
130,07	1,332	6702,126	0,007	0,82	130,09	1,441	8593,701	0,014	1,06					
140,07	1,499	8169,330	0,008	1,00	140,09	1,608	9392,955	0,016	1,16					
150,07	1,666	9363,536	0,008	1,15	150,09	1,775	9746,043	0,017	1,20					

Окончание таблицы П.А23

1					2					3	
160,07	1,833	10199,096	0,009	1,25	160,09	1,941	9809,216	0,019	1,21		
170,07	1,999	10463,757	0,010	1,29	170,09	2,108	9585,378	0,021	1,18		
180,07	2,166	10519,249	0,011	1,29	180,09	2,275	9160,552	0,022	1,13		
190,07	2,332	10347,519	0,012	1,27	190,09	2,441	8563,627	0,024	1,06		
195,07	2,416	10176,884	0,012	1,25	Модуль упругости, МПа				1000		
200,07	2,499	10006,632	0,013	1,23							
Модуль упругости, МПа				1000							
График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения	

Таблица П.А24 – Протокол определения модуля упругости гравийного грунта (АД «Егоровщина – Рязановщина»), укрепленного портландцементом 4 % (образцы 4–6)

Образец 4					Образец 5					Образец 6				
Максимум нагрузка, Н			16 327,04		Максимум нагрузка, Н			11513,85		Максимум нагрузка, Н			51439,	
Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,78703		Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,37931		Перемещение при макс. нагрузке, мм			1,3154	
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- реме- ще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение	Время	Пере- реме- ще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0,00	0,000	-0,892	0,000	0,00	0,00	0,000	-0,690	0,000	0,00	0,00	0,000	-0,209	0,000	0,00
10,00	0,163	628,397	0,002	0,08	10,00	0,164	1026,004	0,002	0,13	10,00	0,163	4207,802	0,002	0,52
20,00	0,329	2408,398	0,003	0,30	20,00	0,331	3030,808	0,003	0,37	20,00	0,329	15302,945	0,003	1,89
30,04	0,365	1152,923	0,004	0,14	30,10	0,451	3567,129	0,005	0,44	30,09	0,324	9489,723	0,003	1,17
39,75	0,255	189,000	0,003	0,02	40,10	0,284	300,647	0,003	0,04	40,09	0,157	91,908	0,002	0,01
50,05	0,427	3578,527	0,005	0,44	49,83	0,267	621,326	0,003	0,08	50,02	0,290	7778,092	0,003	0,96
60,05	0,594	6640,869	0,006	0,81	60,03	0,437	3607,423	0,004	0,44	60,02	0,457	22306,523	0,004	2,75
70,05	0,760	9254,853	0,008	1,14	70,03	0,604	6573,338	0,006	0,81	70,02	0,624	30327,850	0,006	3,74
80,05	0,927	11682,528	0,010	1,43	80,03	0,771	8360,270	0,008	1,03	80,02	0,790	37361,559	0,008	4,61
90,05	1,094	13746,075	0,012	1,69	90,03	0,938	9825,411	0,009	1,21	90,02	0,957	43805,922	0,009	5,41
100,05	1,260	14605,945	0,013	1,79	100,03	1,104	10840,669	0,011	1,33	100,02	1,124	48955,758	0,011	6,05
110,05	1,427	15368,949	0,015	1,89	110,03	1,271	11397,580	0,013	1,40	110,02	1,291	51436,066	0,012	6,35
120,05	1,594	15938,053	0,017	1,96	120,03	1,438	11459,265	0,014	1,41	120,02	1,457	50471,168	0,014	6,23
130,05	1,760	16312,592	0,019	2,00	130,03	1,604	10944,164	0,016	1,35	Модуль упругости, МПа				1466
140,05	1,927	16013,296	0,020	1,96	140,03	1,771	10255,256	0,018	1,26					
145,05	2,010	15633,529	0,021	1,92	Модуль упругости, МПа				1000					
150,05	2,094	15102,929	0,022	1,85										
Модуль упругости, МПа				1000										

Окончание таблицы П.А24

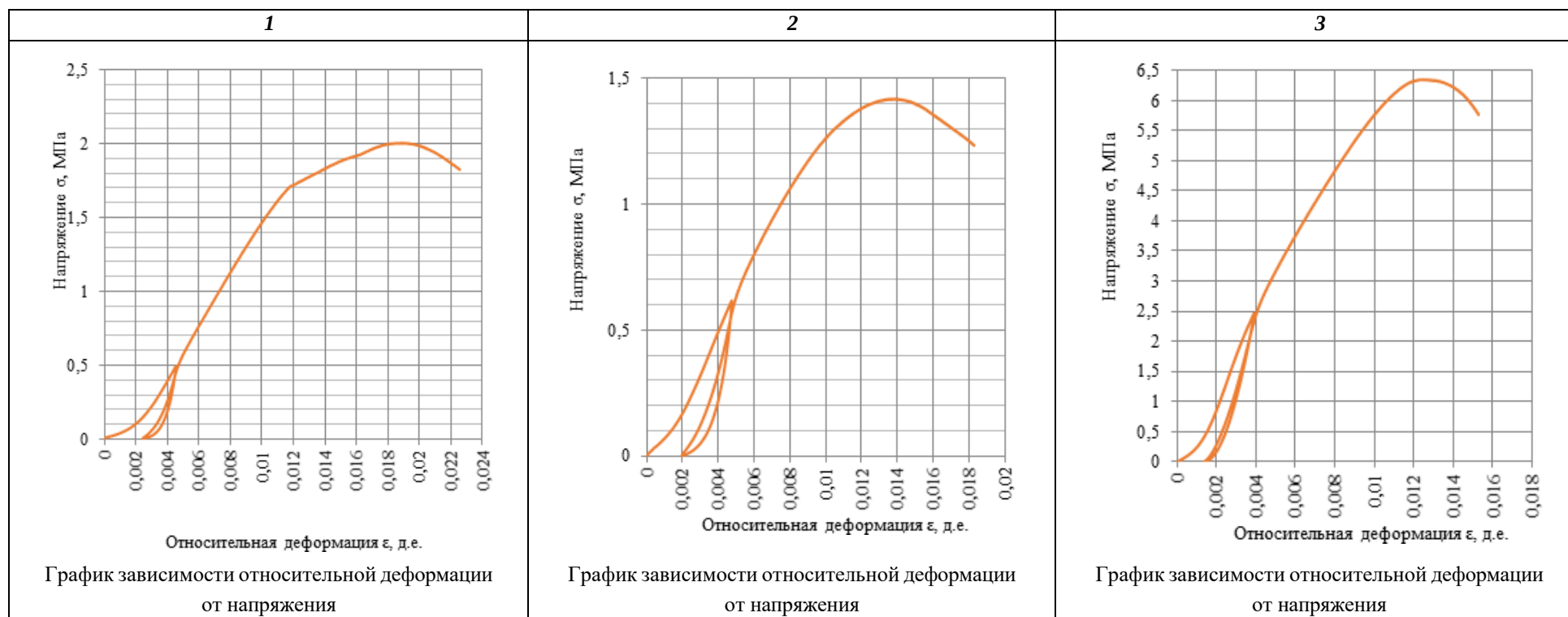


Таблица П.А25 – Протокол определения модуля упругости гравийного грунта (АД «Егоровщина – Рязановщина»), укрепленного портландцементом 4 % (образцы 7–9)

Образец 7					Образец 8					Образец 9				
Максимум нагрузка, Н				53 624,15	Максимум нагрузка, Н				54 100,92	Максимум нагрузка, Н				56 151,0
Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,30349	Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,34219	Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,3529
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- ме- щение	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меше- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меше- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря жение
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
0,00	0,000	-0,112	0,000	0,00	0,00	0,000	-0,452	0,000	0,00	0,00	0,000	-0,010	0,000	0,00
10,00	0,162	1596,860	0,002	0,18	10,00	0,162	1286,349	0,002	0,16	10,00	0,164	1703,142	0,002	0,21
20,00	0,329	7826,169	0,003	0,90	20,00	0,329	5596,026	0,003	0,69	20,00	0,331	7151,517	0,003	0,87
30,00	0,496	19166,719	0,005	2,19	30,00	0,496	15170,513	0,005	1,86	30,00	0,498	18847,486	0,005	2,29
40,02	0,359	4032,433	0,003	0,46	40,01	0,479	8728,119	0,005	1,07	40,04	0,368	3774,092	0,004	0,46
49,80	0,203	13,586	0,002	0,00	50,01	0,312	428,849	0,003	0,05	49,78	0,213	12,134	0,002	0,00
60,10	0,376	6389,139	0,004	0,73	59,74	0,299	754,290	0,003	0,09	60,08	0,386	6411,854	0,004	0,78
70,10	0,543	21822,355	0,005	2,50	70,04	0,470	9207,858	0,005	1,13	70,08	0,553	22388,816	0,005	2,71
80,10	0,710	31869,158	0,007	3,65	80,04	0,637	24424,959	0,006	3,00	80,08	0,719	32557,150	0,007	3,95
90,10	0,877	40640,641	0,008	4,65	90,04	0,804	34558,953	0,008	4,25	90,08	0,886	41379,906	0,009	5,02
100,10	1,043	48266,992	0,010	5,52	100,04	0,970	43025,863	0,010	5,29	100,08	1,053	48788,879	0,010	5,92
110,10	1,210	52933,121	0,012	6,06	110,04	1,137	49635,324	0,011	6,10	110,08	1,219	54214,691	0,012	6,57
120,10	1,377	52639,520	0,013	6,02	120,04	1,304	53704,293	0,013	6,60	120,08	1,386	56056,625	0,014	6,80
130,10	1,543	49119,527	0,015	5,62	130,04	1,470	50496,523	0,014	6,21	130,08	1,553	45747,715	0,015	5,55
Модуль упругости, МПа				1625	Модуль упругости, МПа				1400	Модуль упругости, МПа				1600

Окончание таблицы П.А25



Таблица П.А26 – Протокол определения модуля упругости гравийного грунта (АД «Егоровщина – Рязановщина»), укрепленного известью 8 % (образцы 1–3)

Образец 1					Образец 2					Образец 3				
Максимум нагрузка, Н		12 651,65			Максимум нагрузка, Н		9704,072			Максимум нагрузка, Н		13 737,0		
Перемещение при макс. нагрузке, мм		2,50653			Перемещение при макс. нагрузке, мм		2,93977			Перемещение при макс. нагрузке, мм		2,4956		
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- reme- меще- ние	Нагруз- ка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагруз- ка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение	Время	Пере- мещение	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
0,00	0,00	-0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00
10,00	0,16	467,75	0,00	0,06	10,00	0,16	24,17	0,00	0,00	10,00	0,16	52,44	0,00	0,01
20,00	0,33	981,00	0,00	0,12	20,00	0,33	62,21	0,00	0,01	20,00	0,33	56,59	0,00	0,01
30,00	0,50	1505,85	0,00	0,18	30,00	0,50	426,22	0,00	0,05	30,00	0,50	476,77	0,00	0,06
40,00	0,66	2182,01	0,01	0,27	40,00	0,66	893,02	0,01	0,11	40,00	0,66	1191,97	0,01	0,15
50,00	0,83	3032,31	0,01	0,37	50,00	0,83	1405,60	0,01	0,17	50,00	0,83	2279,25	0,01	0, 28
60,00	1,00	4088,24	0,01	0,50	60,00	1,00	1989,22	0,01	0,24	60,00	1,00	3372,04	0,01	0,41
70,06	1,09	3536,32	0,01	0,43	70,20	1,17	2698,68	0,01	0,33	70,20	1,17	4638,34	0,01	0,57
79,86	0,93	983,24	0,01	0,12	80,00	1,33	3477,25	0,01	0,43	79,81	1,11	1990,87	0,01	0,24
90,06	0,76	253,87	0,01	0,03	90,20	1,50	4346,59	0,01	0,53	90,01	0,94	613,74	0,01	0,07
100,06	0,59	7,03	0,01	0,00	100,07	1,59	3693,32	0,02	0,45	100,01	0,77	139,41	0,01	0,02
110,01	0,73	581,56	0,01	0,07	110,27	1,42	942,15	0,01	0,12	109,95	0,70	157,06	0,01	0,02
120,01	0,90	1570,69	0,01	0,19	120,27	1,26	149,05	0,01	0,02	119,95	0,87	790,79	0,01	0,10
130,01	1,07	3555,33	0,01	0,44	130,04	1,19	225,25	0,01	0,03	129,95	1,04	1948,98	0,01	0,24
140,01	1,23	5661,68	0,01	0,69	140,04	1,36	1306,28	0,01	0,16	139,95	1,20	4260,55	0,01	0,52
150,01	1,40	6927,43	0,01	0,85	150,04	1,52	3042,64	0,01	0,37	149,95	1,37	6068,53	0,01	0,74
160,01	1,57	8130,48	0,02	1,00	160,04	1,69	5113,89	0,02	0,63	159,95	1,54	7318,71	0,02	0,89
170,01	1,73	9238,38	0,02	1,13	170,04	1,86	6159,17	0,02	0,75	169,95	1,70	8801,24	0,02	1,07
180,01	1,90	10264,13	0,02	1,26	180,04	2,02	7060,83	0,02	0,86	179,95	1,87	10331,42	0,02	1,26

Окончание таблицы П.26

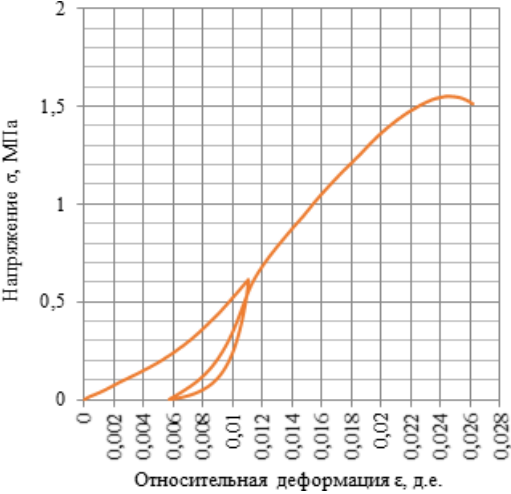
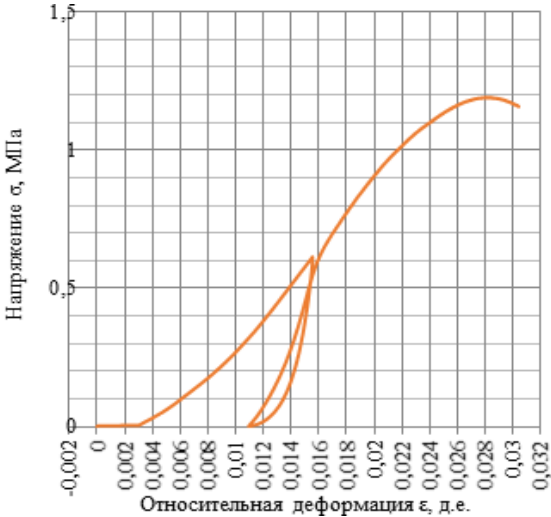
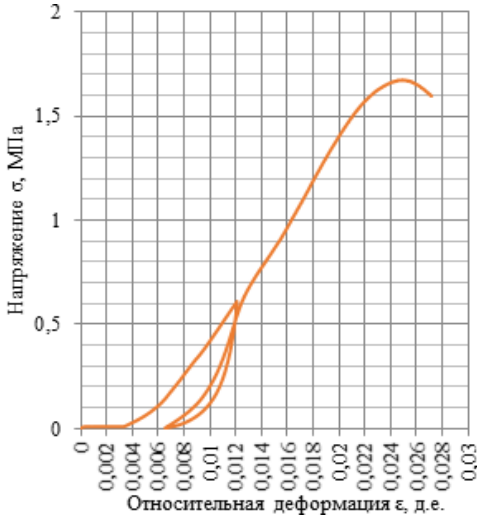
1					2					3				
190,01	2,07	11248,13	0,02	1,38	190,04	2,19	7833,86	0,02	0,96	189,95	2,04	11743,18	0,02	1,43
200,01	2,23	12010,11	0,02	1,47	200,04	2,36	8492,71	0,02	1,04	199,95	2,20	12860,36	0,02	1,57
210,01	2,40	12512,97	0,02	1,53	210,04	2,52	8986,55	0,02	1,10	209,95	2,37	13536,30	0,02	1,65
220,01	2,57	12613,79	0,03	1,54	220,04	2,69	9420,78	0,03	1,15	219,95	2,54	13701,54	0,03	1,67
Модуль упругости, МПа				500	230,04	2,86	9657,82	0,03	1,18	229,95	2,70	13214,87	0,03	1,61
					235,04	2,94	9700,78	0,03	1,19	Модуль упругости, МПа				500
					240,04	3,02	9668,89	0,03	1,18					
					Модуль упругости, МПа				500					
														
График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения				

Таблица П.А27 – Протокол определения модуля упругости гравийного грунта (АД «Егоровщина – Рязановщина»), укрепленного известью 8 % (образцы 4–6)

Образец 4					Образец 5					Образец 6				
Максимум нагрузка, Н			10 069,74		Максимум нагрузка, Н			8308,325		Максимум нагрузка, Н			9824,7	
Перемещение при макс. нагрузке, мм			2,13632		Перемещение при макс. нагрузке, мм			2,80338		Перемещение при макс. нагрузке, мм			2,3008	
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- реме- ще- ние	Нагруз- ка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагруз- ка	Отн. дефор- мация	Напряже- ние	Время	Пере- меще- ние	Нагруз ка	Отн. дефор- мация	Напря жение
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,61	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	0,00
10,00	0,16	2,50	0,00	0,00	10,00	0,16	118,42	0,00	0,01	10,00	0,16	346,42	0,00	0,04
20,00	0,33	3,59	0,00	0,00	20,00	0,33	280,44	0,00	0,03	20,00	0,33	655,68	0,00	0,08
30,00	0,50	273,82	0,00	0,03	30,00	0,50	465,38	0,00	0,06	30,00	0,50	1016,32	0,00	0,12
40,00	0,66	931,24	0,01	0,11	40,00	0,66	684,23	0,01	0,08	40,00	0,66	1446,17	0,01	0,18
50,00	0,83	1859,03	0,01	0,23	50,00	0,83	1044,12	0,01	0,13	50,00	0,83	1965,59	0,01	0,24
60,00	1,00	2910,24	0,01	0,36	60,00	1,00	1567,14	0,01	0,19	60,00	1,00	2509,45	0,01	0,31
70,20	1,17	4036,87	0,01	0,49	70,20	1,17	2202,85	0,01	0,27	70,20	1,17	3236,84	0,01	0,40
79,87	1,27	3596,34	0,01	0,44	80,00	1,33	2926,19	0,01	0,36	80,00	1,33	4132,16	0,01	0,51
90,07	1,10	669,70	0,01	0,08	90,20	1,50	3820,69	0,01	0,47	90,10	1,43	3364,90	0,01	0,41
100,07	0,93	25,04	0,01	0,00	100,20	1,67	4694,65	0,02	0,57	100,10	1,26	641,54	0,01	0,08
110,27	0,76	1,60	0,01	0,00	110,28	1,63	2064,99	0,02	0,25	110,30	1,09	67,54	0,01	0,01
120,27	0,59	1,33	0,01	0,00	120,28	1,46	481,15	0,01	0,06	120,02	1,12	445,63	0,01	0,05
130,02	0,62	4,25	0,01	0,00	130,28	1,29	53,06	0,01	0,01	130,02	1,28	1738,02	0,01	0,21
140,02	0,78	4,85	0,01	0,00	140,04	1,35	581,00	0,01	0,07	140,02	1,45	4169,30	0,01	0,51
150,02	0,95	395,85	0,01	0,05	150,04	1,52	1798,78	0,01	0,22	150,02	1,62	6040,24	0,02	0,74
160,02	1,12	1699,76	0,01	0,21	160,04	1,69	3781,93	0,02	0,46	160,02	1,78	7393,32	0,02	0,91
170,02	1,28	4225,69	0,01	0,52	170,04	1,86	5396,85	0,02	0,66	170,02	1,95	8602,23	0,02	1,05

Окончание таблицы П.А27

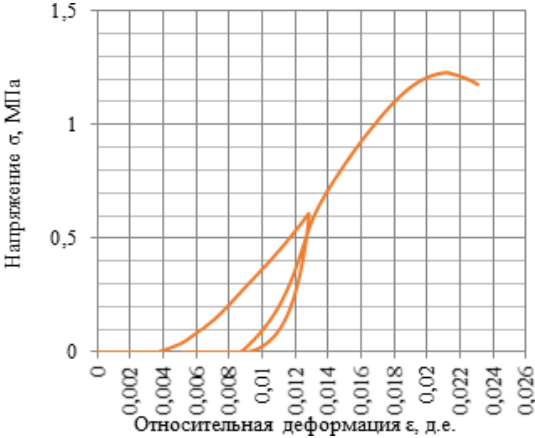
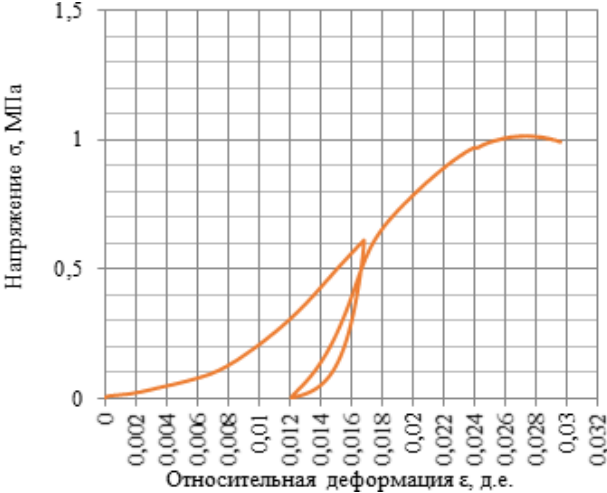
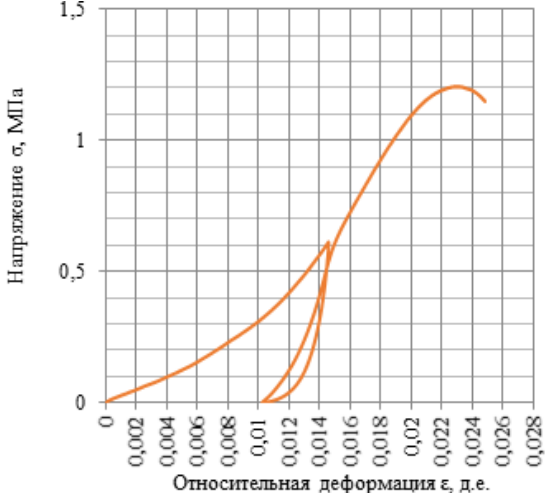
1					2					3				
180,02	1,45	6180,95	0,01	0,76	180,04	2,02	6257,09	0,02	0,77	180,02	2,12	9448,30	0,02	1,16
190,02	1,62	7599,19	0,02	0,93	190,04	2,19	7014,94	0,02	0,86	190,02	2,28	9823,23	0,02	1,20
200,02	1,78	8787,33	0,02	1,08	200,04	2,35	7625,70	0,02	0,93	200,02	2,45	9528,23	0,02	1,17
205,02	1,87	9269,93	0,02	1,14	205,04	2,44	7882,76	0,02	0,97	Модуль упругости, МПа				666
210,02	1,95	9673,81	0,02	1,18	210,04	2,52	8027,56	0,02	0,98					
220,02	2,12	10043,43	0,02	1,23	220,04	2,69	8246,22	0,03	1,01					
230,02	2,28	9788,62	0,02	1,20	230,04	2,86	8301,34	0,03	1,02					
Модуль упругости, МПа				800	235,04	2,94	8241,34	0,03	1,01					
					240,04	3,02	8132,89	0,03	1,00					
					Модуль упругости, МПа				666					
														
График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения				

Таблица П.А28 – Протокол определения модуля упругости гравийного грунта (АД «Егоровщина – Рязановщина»), укрепленного известью 8 % (образцы 7–9)

Образец 7					Образец 8					Образец 9				
Максимум нагрузка, Н				12 230,25	Максимум нагрузка, Н				7101,68	Максимум нагрузка, Н				12736,
Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,69376	Перемещение при макс. нагрузке, мм				3,33603	Перемещение при макс. нагрузке, мм				2,4616
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- ме- ще- ние	Нагруз- ка	Относи- тельная дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагруз- ка	Относи- тельная деформа- ция	Напря- жение	Время	Пере- меще- ние	Нагруз- ка	Относи- тельная деформа- ция	Напря- жение
(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)	(с)	(мм)	(N)	–	(Па)
0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,23	0,00	0,00
10,00	0,16	845,98	0,00	0,10	10,00	0,16	429,64	0,00	0,05	10,00	0,16	471,00	0,00	0,06
20,00	0,33	2698,03	0,00	0,33	20,00	0,33	726,70	0,00	0,09	20,00	0,33	988,12	0,00	0,12
30,00	0,50	4116,92	0,00	0,50	30,00	0,50	1032,68	0,00	0,13	30,00	0,50	1563,37	0,00	0,19
39,87	0,55	2732,74	0,01	0,33	40,00	0,66	1285,51	0,01	0,16	40,00	0,66	2251,46	0,01	0,28
49,87	0,39	374,48	0,00	0,05	50,00	0,83	1658,71	0,01	0,20	50,00	0,83	3100,96	0,01	0,38
59,64	0,28	188,06	0,00	0,02	60,00	1,00	1951,45	0,01	0,24	60,00	1,00	4183,33	0,01	0,51
69,84	0,45	1764,22	0,00	0,22	70,20	1,17	2251,35	0,01	0,28	70,01	1,05	2851,95	0,01	0,35
79,64	0,61	4647,62	0,01	0,57	80,00	1,33	2601,58	0,01	0,32	79,81	0,88	662,95	0,01	0,08
89,84	0,78	6519,75	0,01	0,80	90,20	1,50	2927,65	0,01	0,36	90,01	0,71	100,46	0,01	0,01
99,84	0,95	8028,02	0,01	0,98	100,20	1,67	3287,09	0,02	0,40	99,73	0,68	242,89	0,01	0,03
110,04	1,12	9448,47	0,01	1,15	110,40	1,84	3679,95	0,02	0,45	109,93	0,85	1124,84	0,01	0,14
120,04	1,29	10664,85	0,01	1,30	120,40	2,00	4078,46	0,02	0,50	119,93	1,02	2957,17	0,01	0,36
130,04	1,45	11620,88	0,01	1,42	130,40	2,17	4572,58	0,02	0,56	129,93	1,18	5441,92	0,01	0,67
140,04	1,62	12156,28	0,02	1,49	140,21	2,29	3963,02	0,02	0,49	139,93	1,35	6987,93	0,01	0,86
150,04	1,79	12138,52	0,02	1,48	150,21	2,12	823,08	0,02	0,10	149,93	1,52	8299,09	0,02	1,02
160,04	1,95	11669,96	0,02	1,43	160,21	1,96	78,14	0,02	0,01	159,93	1,68	9493,02	0,02	1,16
Модуль упругости, МПа				800	169,94	2,02	894,41	0,02	0,11	179,93	2,02	11612,12	0,02	1,42
					179,94	2,19	2613,25	0,02	0,32	189,93	2,18	12352,92	0,02	1,51

Окончание таблицы П.А28

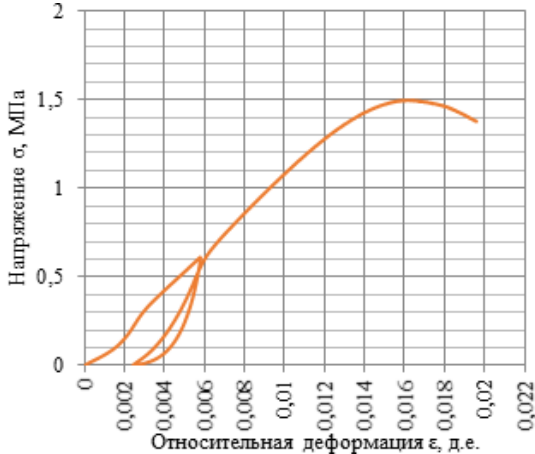
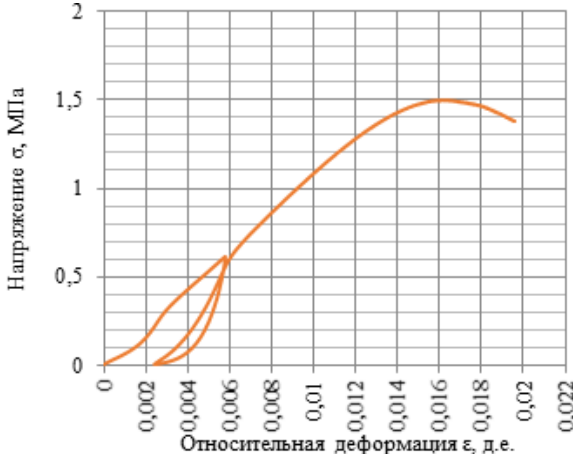
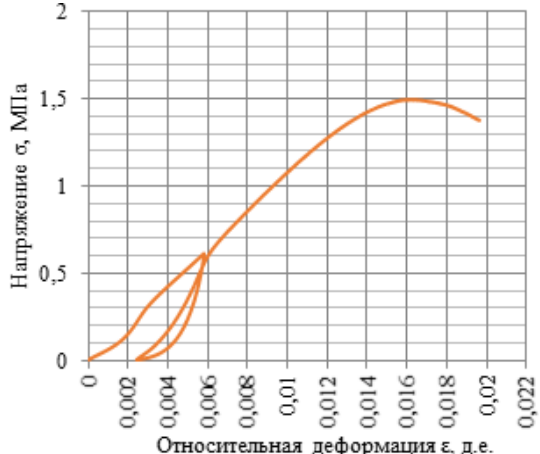
1		2					3				
		189,94	2,35	4537,61	0,02	0,56	199,93	2,35	12686,17	0,02	1,55
		199,94	2,52	5380,57	0,02	0,66	209,93	2,52	12684,44	0,02	1,55
		209,94	2,69	5930,62	0,03	0,73	Модуль упругости, МПа				800
		219,94	2,85	6369,84	0,03	0,78					
		229,94	3,02	6696,31	0,03	0,82					
		Модуль упругости, МПа				800					
											
График зависимости относительной деформации от напряжения		График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения				

Таблица П.А29 – Протокол определения модуля упругости гравийного грунта (АД «Егоровщина – Рязановщина») с добавлением золошлаковой смеси, укрепленного портландцементом 6 % (образцы 1–3)

Образец 1					Образец 2					Образец 3				
Максимум нагрузка, Н				48 288,10	Максимум нагрузка, Н				45 167,93	Максимум нагрузка, Н				61 561
Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,52498	Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,2718	Перемещение при макс. нагрузке, мм				1,3327
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- реше- ще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение	Время	Пере- реше- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напряже- ние	Время	Пере- реше- ние	Нагрузка	Отн. дефор- фор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0,00	0,00	-0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,10	0,00	0,00
10,00	0,16	1235,22	0,00	0,15	10,00	0,16	679,81	0,00	0,08	10,00	0,16	865,42	0,00	0,11
20,00	0,33	3268,45	0,00	0,41	20,00	0,33	3752,07	0,00	0,46	20,00	0,33	4422,87	0,00	0,55
30,00	0,50	7061,91	0,00	0,88	30,00	0,50	12236,30	0,00	1,51	30,00	0,50	14502,56	0,00	1,79
40,00	0,66	13090,44	0,01	1,62	40,04	0,58	14605,00	0,01	1,80	40,05	0,47	8227,69	0,00	1,02
50,06	0,54	3671,69	0,01	0,46	50,04	0,41	1349,75	0,00	0,17	50,05	0,30	143,82	0,00	0,02
60,06	0,38	711,50	0,00	0,09	60,01	0,38	1173,65	0,00	0,14	60,09	0,40	3681,05	0,00	0,45
70,02	0,27	211,23	0,00	0,03	70,21	0,55	12342,22	0,01	1,52	70,29	0,57	19771,97	0,01	2,44
80,02	0,43	2292,60	0,00	0,28	80,01	0,71	25430,32	0,01	3,14	80,09	0,73	31889,92	0,01	3,94
90,02	0,60	7452,81	0,01	0,92	90,01	0,88	33756,30	0,01	4,17	90,09	0,90	42528,05	0,01	5,25
100,02	0,77	17968,52	0,01	2,23	100,01	1,05	40560,31	0,01	5,01	100,09	1,07	52129,34	0,01	6,44
110,02	0,93	27901,37	0,01	3,46	110,01	1,21	44778,34	0,01	5,53	110,09	1,23	59794,19	0,01	7,38
120,02	1,10	37287,13	0,01	4,62	120,01	1,38	44873,18	0,01	5,54	120,08	1,40	61108,12	0,01	7,55
130,02	1,27	44472,39	0,01	5,51	130,01	1,55	41540,32	0,01	5,13	130,08	1,57	59286,11	0,02	7,32
135,02	1,35	45926,45	0,01	5,69	Модуль упругости, МПа				1466	135,08	1,65	58790,68	0,02	7,26
140,02	1,43	47239,96	0,01	5,86						140,08	1,73	55187,30	0,02	6,81
145,02	1,52	48216,05	0,01	5,98						Модуль упругости, МПа				1500
150,02	1,60	47725,04	0,02	5,92										
160,02	1,77	47600,73	0,02	5,90										

Окончание таблицы П.А29

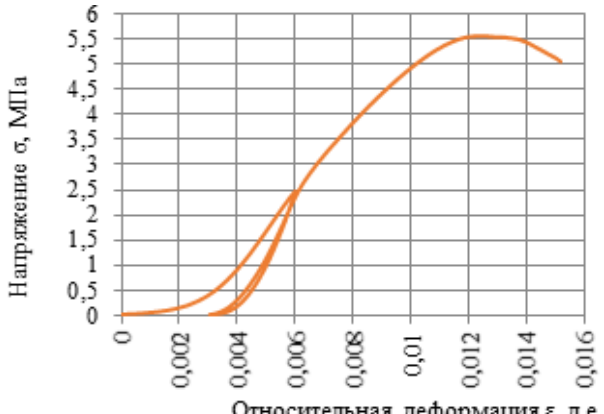
1					2		3	
170,02	1,93	44751,80	0,02	5,55				
Модуль упругости, МПа				2151				
								
График зависимости относительной деформации от напряжения					График зависимости относительной деформации от напряжения		График зависимости относительной деформации от напряжения	

Таблица П.А30 – Протокол определения модуля упругости гравийного грунта (АД «Егоровщина – Рязановщина») с добавлением золошлаковой смеси, укрепленного портландцементом 6 % (образцы 4–6)

Образец 4					Образец 5					Образец 6				
Максимум нагрузка, Н		45 805,32			Максимум нагрузка, Н		61 436,29			Максимум нагрузка, Н		51 439,0		
Перемещение при макс. нагрузке, мм		1,46348			Перемещение при макс. нагрузке, мм		1,5587			Перемещение при макс. нагрузке, мм		1,31549		
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- reme- меше- ще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- меше- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напряже- ние	Время	Пере- меше- ние	Нагрузка	Отн. дефор фор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0,00	0,00	-0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,21	0,00	0,00
10,00	0,16	639,80	0,00	0,08	10,00	0,16	1050,63	0,00	0,13	10,00	0,16	4207,80	0,00	0,52
20,00	0,33	2162,26	0,00	0,27	20,00	0,33	4095,24	0,00	0,50	20,00	0,33	15302,95	0,00	1,89
30,00	0,50	6881,24	0,00	0,85	30,00	0,50	11417,93	0,00	1,41	29,79	0,33	10003,31	0,00	1,24
40,00	0,66	15047,93	0,01	1,85	40,07	0,61	16207,79	0,01	2,00	40,09	0,16	91,91	0,00	0,01
49,79	0,69	11318,85	0,01	1,39	50,07	0,44	1802,76	0,00	0,22	49,82	0,29	7497,48	0,00	0,93
60,09	0,52	1428,39	0,00	0,18	60,08	0,37	577,02	0,00	0,07	60,02	0,46	22306,52	0,00	2,75
65,09	0,43	294,44	0,00	0,04	65,08	0,45	3466,44	0,00	0,43	65,02	0,54	26513,35	0,01	3,27
70,03	0,40	301,29	0,00	0,04	70,28	0,54	9571,50	0,01	1,18	70,22	0,63	30435,03	0,01	3,76
80,03	0,57	4390,10	0,01	0,54	80,08	0,70	24457,57	0,01	3,01	80,02	0,79	37361,56	0,01	4,61
90,03	0,74	17150,24	0,01	2,11	90,08	0,87	35418,84	0,01	4,36	90,02	0,96	43805,92	0,01	5,41
100,03	0,90	27636,56	0,01	3,40	100,08	1,04	45244,17	0,01	5,58	100,02	1,12	48955,76	0,01	6,05
110,03	1,07	35273,66	0,01	4,34	110,08	1,20	53629,64	0,01	6,61	110,02	1,29	51436,07	0,01	6,35
120,03	1,24	41312,05	0,01	5,09	120,08	1,37	59639,21	0,01	7,35	120,02	1,46	50471,17	0,01	6,23
130,03	1,40	45449,04	0,01	5,60	130,08	1,53	61323,43	0,02	7,56	Модуль упругости, МПа				1461
140,03	1,57	45086,57	0,02	5,55	140,08	1,70	59175,84	0,02	7,29					
Модуль упругости, МПа				1555	Модуль упругости, МПа				1416					

Окончание таблицы П.А30

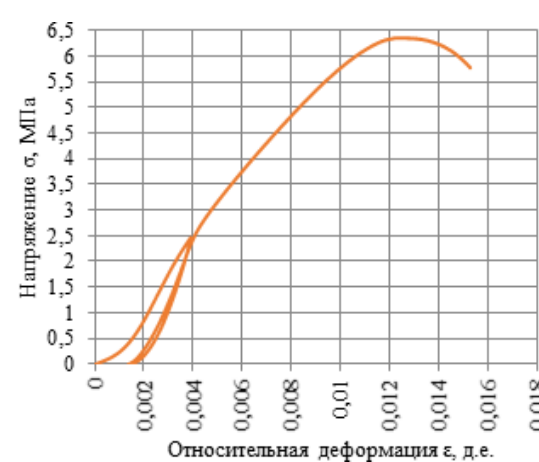
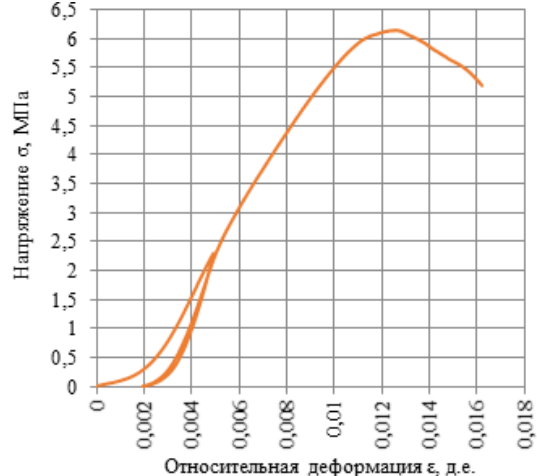
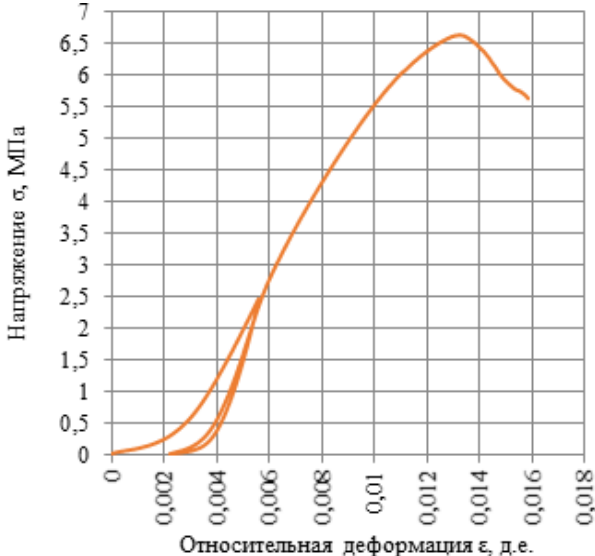
1	2	3
 График зависимости относительной деформации от напряжения	 График зависимости относительной деформации от напряжения	 График зависимости относительной деформации от напряжения

Таблица П.А31 – Протокол определения модуля упругости гравийного грунта (АД «Егоровщина – Рязановщина») с добавлением золошлаковой смеси, укрепленного портландцементом 6 % (образцы 7–9)

Образец 7					Образец 8					Образец 9				
Максимум нагрузка, Н		53 624,15			Максимум нагрузка, Н		54 100,91			Максимум нагрузка, Н		56 151,0		
Перемещение при макс. нагрузке, мм		1,30349			Перемещение при макс. нагрузке, мм		1,34219			Перемещение при макс. нагрузке, мм		1,3529		
Результаты испытания					Результаты испытания					Результаты испытания				
1					2					3				
Время	Пере- reme- ще- ние	Нагруз- ка	Отн. дефор- мация	Напря- жение	Время	Пере- reme- ще- ние	Нагрузка	Отн. де- форма- ция	Напря- жение	Время	Пере- reme- ще- ние	Нагрузка	Отн. дефор- мация	Напря- жение
(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)	(с)	(мм)	(Н)	–	(Па)
0,00	0,00	-0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00
10,00	0,16	1596,86	0,00	0,18	10,00	0,16	1286,35	0,00	0,16	10,00	0,16	1703,14	0,00	0,21
20,00	0,33	7826,17	0,00	0,90	20,00	0,33	5596,03	0,00	0,69	20,00	0,33	7151,52	0,00	0,87
30,00	0,50	19166,72	0,00	2,19	30,00	0,50	15170,51	0,00	1,86	30,00	0,50	18847,49	0,00	2,29
40,02	0,36	4032,43	0,00	0,46	40,01	0,48	8728,12	0,00	1,07	40,04	0,37	3774,09	0,00	0,46
49,80	0,20	13,59	0,00	0,00	50,01	0,31	428,85	0,00	0,05	49,78	0,21	12,13	0,00	0,00
60,10	0,38	6389,14	0,00	0,73	60,04	0,30	829,94	0,00	0,10	60,08	0,39	6411,85	0,00	0,78
70,30	0,55	22043,39	0,01	2,52	70,24	0,47	9496,56	0,00	1,17	70,28	0,56	22619,56	0,01	2,74
80,10	0,71	31869,16	0,01	3,65	80,04	0,64	24424,96	0,01	3,00	80,08	0,72	32557,15	0,01	3,95
90,10	0,88	40640,64	0,01	4,65	90,04	0,80	34558,95	0,01	4,25	90,08	0,89	41379,91	0,01	5,02
100,10	1,04	48266,99	0,01	5,52	100,04	0,97	43025,86	0,01	5,29	100,08	1,05	48788,88	0,01	5,92
110,10	1,21	52933,12	0,01	6,06	110,04	1,14	49635,32	0,01	6,10	110,08	1,22	54214,69	0,01	6,57
120,10	1,38	52639,52	0,01	6,02	120,04	1,30	53704,29	0,01	6,60	120,08	1,39	56056,63	0,01	6,80
130,10	1,54	49119,53	0,01	5,62	130,04	1,47	50496,52	0,01	6,21	130,08	1,55	45747,71	0,02	5,55
Модуль упругости, МПа				1625	Модуль упругости, МПа				1400	Модуль упругости, МПа				1600

Окончание таблицы П.А31

1	1	3
 График зависимости относительной деформации от напряжения	 График зависимости относительной деформации от напряжения	 График зависимости относительной деформации от напряжения

Конструкции нежестких дорожных одежд

Таблица П.Б1 – Конструкции нежестких дорожных одежд переходного типа для дорог V категории

Дорожно-климатическая зона	Із	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	V	Заданная надежность K_n	0,7
Тип дорожной одежды	Переходный	Расчетная нагрузка	АК-10,0; Р 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	50 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$1,14 \cdot 10^4$

№ слоя	Наименование слоя конструкции	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Щебеночно-песчаная смесь С-5 ГОСТ 25607-2009	260	Тонкослойное покрытие Поверхностная обработка	—	Тонкослойное покрытие Поверхностная обработка	—
2		—	—	—	—	—	—
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-7 ГОСТ 25607-2009	240	Золотшлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом 6 %	350
4		—	—	—	—	—	—
5	Дополнительный слой основания	—	—	Щебеночно-песчаная смесь С-7 ГОСТ 25607-2009	240	Щебеночно-песчаная смесь С-7 ГОСТ 25607-2009	240
Грунт земляного полотна – супесь легкая							

Окончание таблицы П.Б1

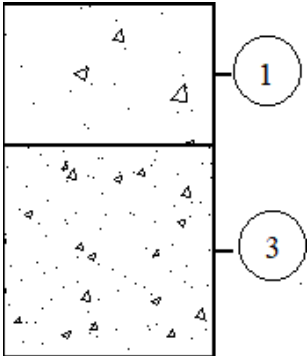
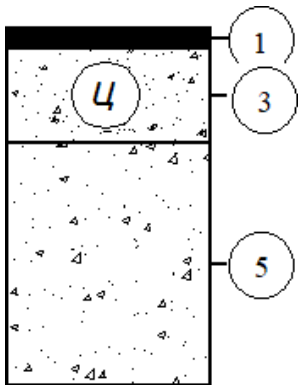
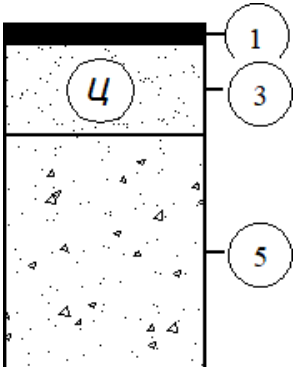
№ слоя	Наименование слоя конструкции	Толщина слоев конструкции для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна, см								
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	15	15		2,5–3	2,5–3		2,5–3	2,5–3	
2		—	—		—	—		—	—	
3	Основание	27	28		10	10		10	10	
4		—	—		—	—		—	—	
5	Дополнительный слой основания	—	—		27	28		30	32	
Общая толщина дорожной одежды		42	43		37	38		40	42	

Таблица П.Б2 – Конструкции нежестких дорожных одежд облегченного типа для дорог V категории

Дорожно-климатическая зона	Iз	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	V	Заданная надежность K_n	0,7
Тип дорожной одежды	Облегченный	Расчетная нагрузка	АК-10,0; Р=0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	100 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$3,7 \cdot 10^5$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900
2		—	—	—	—	—	—
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-6 ГОСТ 25607-2009	250	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом	350
4		—	—	—	—	—	—
5	Дополнительный слой основания	Щебеночно-песчаная смесь С-7 ГОСТ 25607-2009	240	Щебеночно-песчаная смесь С-7 ГОСТ 25607-2009	240	Щебеночно-песчаная смесь С-7 ГОСТ 25607-2009	240
Грунт земляного полотна – супесь легкая							

Окончание таблицы П.Б2

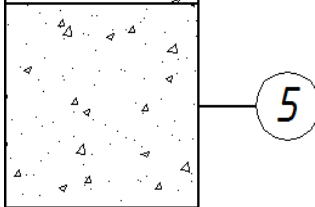
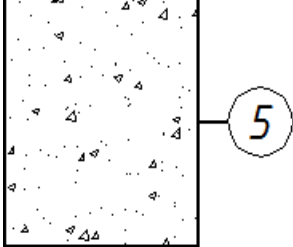
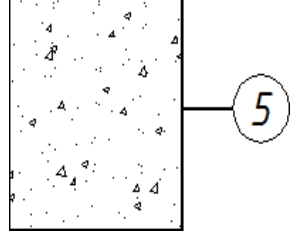
№ слоя	Наименование слоя конструкции	Толщина слоев конструкции для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна, см											
		1, 2	3	Чертеж		1, 2	3	Чертеж		1, 2	3	Чертеж	
1	Покрытие	8	8		8	8		8	8		8	8	
2		—	—		—	—							
3	Основание	15	15		10	10		10	10				
4		—	—		—	—		—	—				
5	Дополнительный слой основания	15	15		17	17		18	19				
Общая толщина дорожной одежды		38	38		35	35		36	37				

Таблица П.Б3 – Конструкции нежестких дорожных одежд переходного типа для дорог IV категории

Дорожно-климатическая зона	Із	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	IV	Заданная надежность K_n	0,7
Тип дорожной одежды	Переходный	Расчетная нагрузка	АК-10,0; Р 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	100 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$3,7 \cdot 10^4$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	Тонкослойное покрытие Поверхностная обработка	—	Тонкослойное покрытие Поверхностная обработка	—
2		—	—	—	—	—	—
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-6 ГОСТ 25607-2009	250	Золошлаковая смесь укрепленная зольно-цементом 8%	600	Супесь укрепленная цементом 6%	350
4		—	—	—	—	—	—
5	Дополнительный слой основания	—	—	—	—	—	—
Грунт земляного полотна – песчаный грунт крупный							

Окончание таблицы П.Б3

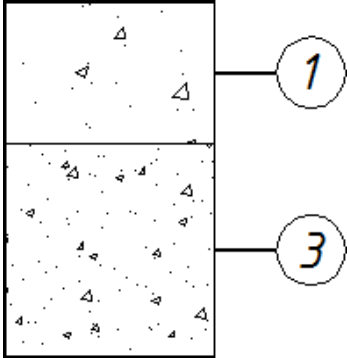
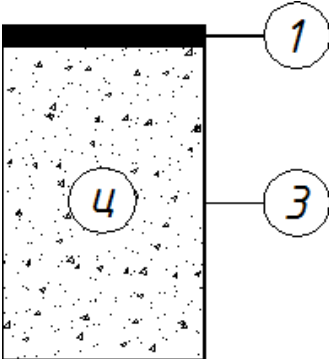
№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Толщина слоев конструкции для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна, см							
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3
1	Покрытие	20	20		2,5–3	2,5–3		2,5–3	2,5–3
2		—	—		—	—		—	—
3	Основание	33	33		29	29		33	33
4		—	—		—	—		—	—
5	Дополнительный слой основания	—	—		—	—		—	—
Общая толщина дорожной одежды		56	56		29	29		33	33

Таблица П.Б4 – Конструкции нежестких дорожных одежд переходного типа для дорог IV категории

Дорожно-климатическая зона	I _з	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	IV	Заданная надежность K_n	0,9
Тип дорожной одежды	Переходный	Расчетная нагрузка	АК-10,0; Р 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	100 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$3,7 \cdot 10^4$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	Тонкослойное покрытие Поверхностная обработка	—	Тонкослойное покрытие Поверхностная обработка	—
2		—	—	—	—	—	—
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-6 ГОСТ 25607-2009	250	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом	350
4		—	—	—	—	—	—
5	Дополнительный слой основания	—	—	—	—	—	—
Грунт земляного полотна – песчаный грунт крупный							

Окончание таблицы П.Б4

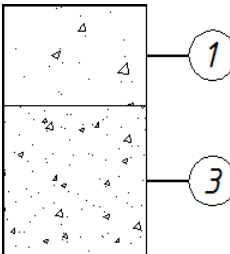
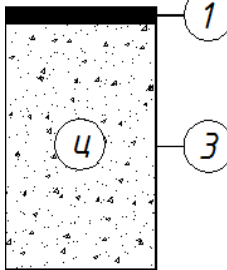
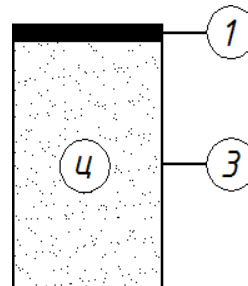
№ слоя	Наименование слоя конструк- ции дорожной одежды	Толщина слоев конструкции для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна, см								
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	20	20		2,5– 3	2,5–3		2,5–3	2,5–3	
2		-	-		-	-		-	-	
3	Основание	37	37		32	32		37	37	
4		-	-		-	-		-	-	
5	Дополнительный слой основания	-	-		-	-		-	-	
Общая толщина дорож- ной одежды		60	60		32	32		37	37	

Таблица П.Б5 – Конструкции нежестких дорожных одежд переходного типа для дорог IV категории

Дорожно-климатическая зона	Із	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	IV	Заданная надежность K_n	0,9
Тип дорожной одежды	Переходный	Расчетная нагрузка	АК-10,0; Р 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	100 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$3,7 \cdot 10^4$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Щебеночно-песчаная смесь С-5 ГОСТ 25607-2009	260	Тонкослойное покрытие Поверхностная обработка	—	Тонкослойное покрытие Поверхностная обработка	—
2		—	—	—	—	—	—
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-7 ГОСТ 25607-2009	250	Золошлаковая смесь укрепленная цементом	600	Супесь укрепленная цементом	350
4		—	—	—	—	—	—
5	Дополнительный слой основания	Щебеночно-песчаная смесь С-7 ГОСТ 25607-2009	250	Щебеночно-песчаная смесь С-7 ГОСТ 25607-2009	250	Щебеночно-песчаная смесь С-7 ГОСТ 25607-2009	250
Грунт земляного полотна – супесь легкая							

Окончание таблицы П.Б5

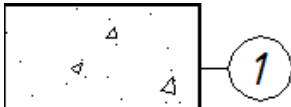
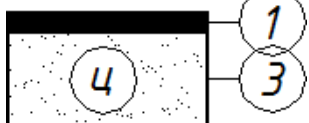
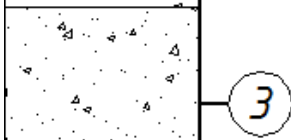
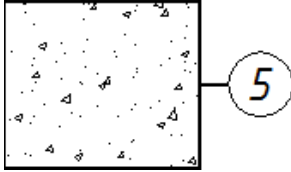
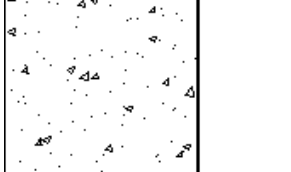
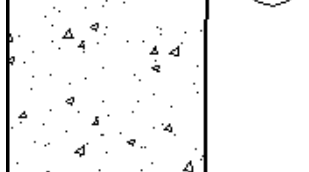
№ слоя	Наименование слоя конструк- ции дорожной одеж- ды	Толщина слоев конструкции для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна, см								
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	15	15		2,5-3	2,5-3		2,5-3	2,5-3	
2		—	—		—	—		—	—	
3	Основание	15	15		10	10		10	10	
4		—	—		—	—		—	—	
5	Дополнительный слой основания	20	20		33	33		36	36	
Общая толщина дорож- ной одежды		50	50		43	43		46	46	

Таблица П.Б6 – Конструкции нежестких дорожных одежд облегченного типа для дорог IV категории

Дорожно-климатическая зона	Із	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	IV	Заданная надежность K_n	0,9
Тип дорожной одежды	Облегченный	Расчетная нагрузка	АК-10,0; Р = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	150 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$1,2 \cdot 10^5$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400
2		—	—	—	—	—	—
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом	350

Окончание таблицы П.Б6

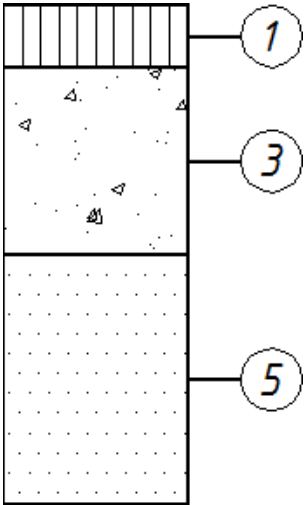
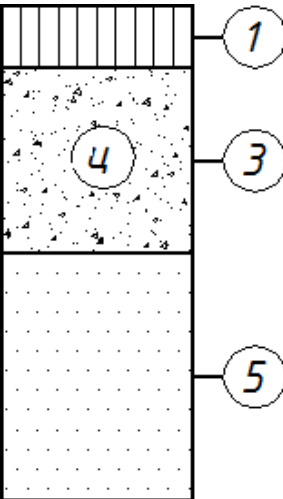
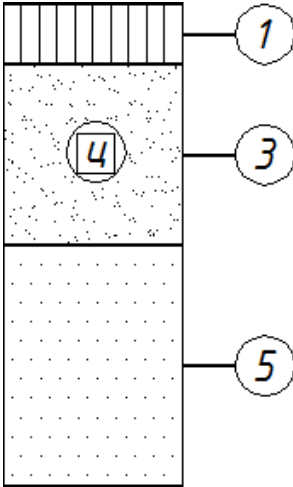
4		—	—	—	—	—	—			
5	Дополнитель- ный слой ос- нования	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130			
Грунт земляного полотна – супесь легкая										
№ слоя	Наимено- вание слоя конструк- ции дорожной одежды	Толщина слоев конструкции для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна, см								
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	5	5		5	5		5	5	
2		-	-		-	-				
3	Основание	40	40		20	20		24	24	
4		-	-		-	-		-	-	
5	Дополни- тельный слой осно- вания	29	29		29	29		29	29	
Общая толщина дорожной одежды		74	74		54	54		58	58	

Таблица П.Б7 – Конструкции нежестких дорожных одежд облегченного типа для дорог IV категории

Дорожно-климатическая зона	Iз	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	IV	Заданная надежность K_n	0,9
Тип дорожной одежды	Облегченный	Расчетная нагрузка	АК-10,0; P = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	150 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$1,2 \cdot 10^5$

№ сл оя	Наименова- ние слоя конструк- ции дорож- ной одежды	Конструкция дорожной одежды	Мо- дуль упру- гости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упруго- сти, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упруго- сти, МПа
1	Покрытие	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900
2		—	—	—	—	—	—
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом %	350
4		Щебеночно-песчаная смесь С-6 ГОСТ 25607-2009	250	—	—	—	—
5	Доп. слой основания	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130
Грунт земляного полотна – супесь легкая							

Окончание таблицы П.Б7

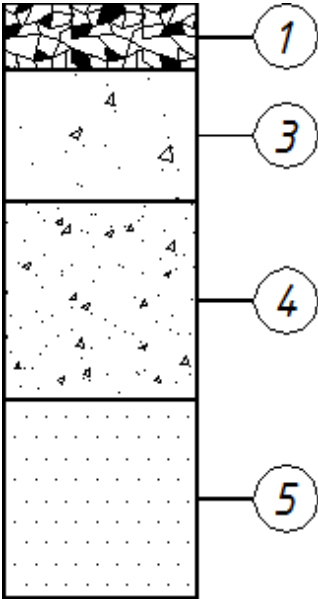
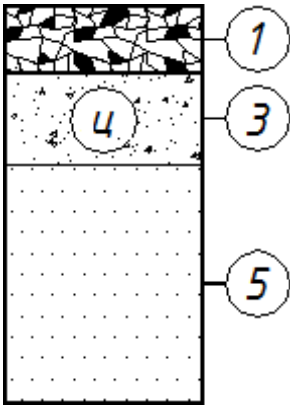
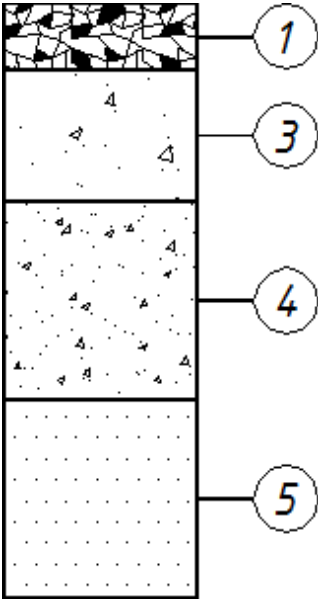
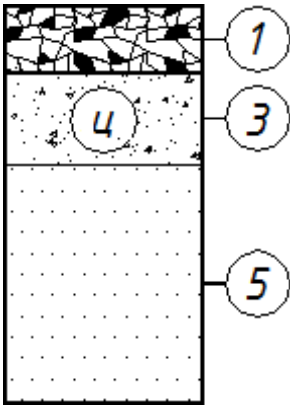
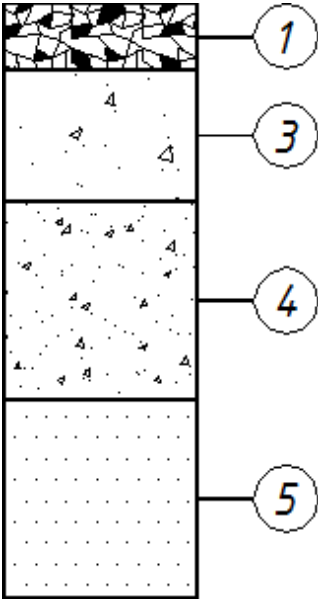
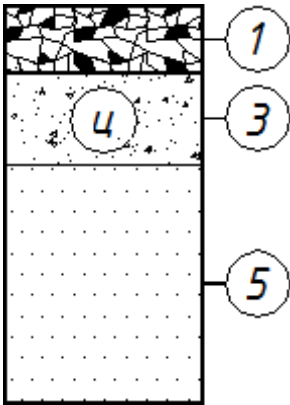
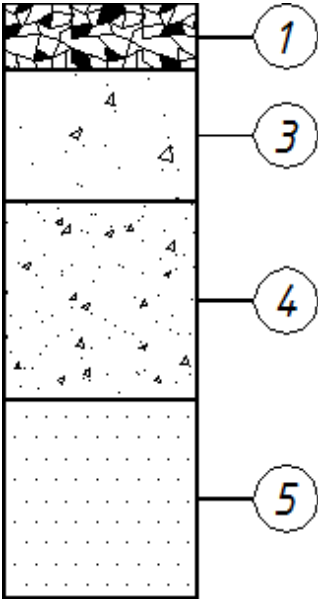
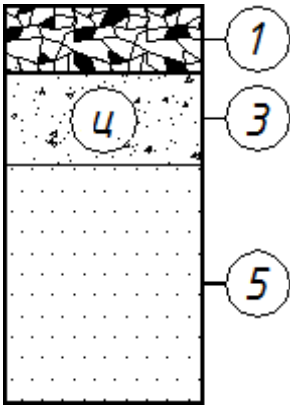
№ сл оя	Наименова- ние слоя конструк- ции дорож- ной одежды	Толщина слоев конструкции для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна, см							
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3
1	Покрытие	8	8		8	8		8	8
2		-	-		-	-		-	-
3	Основание	15	15		18	18		23	23
4		21	21		-	-		-	-
5	Дополни- тельный слой основа- ния	22	22		28	28		26	26
Общая толщина дорожной одеж- ды		66	66		54	54		57	57

Таблица П.Б8 – Конструкции нежестких дорожных одежд облегченного типа для дорог IV категории

Дорожно-климатическая зона	Iз	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	IV	Заданная надежность K_n	0,9
Тип дорожной одежды	Облегченный	Расчетная нагрузка	АК-10,0; P=0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	150 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$1,2 \cdot 10^5$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900
2		—	—	—	—	—	—
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом	350
4		Щебеночно-песчаная смесь С-6 ГОСТ 25607-2009	250	—	—	—	—
5	Доп. слой основания	—	—	—	—	—	—
Грунт земляного полотна – песчаный грунт крупный							

Окончание таблицы П.Б8

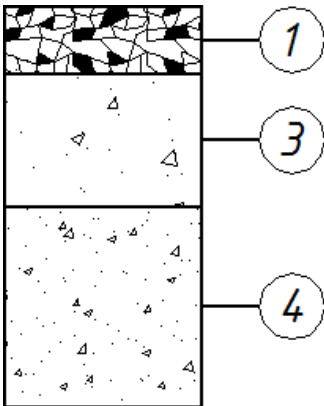
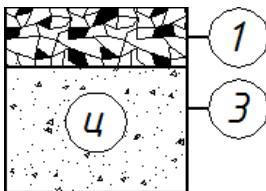
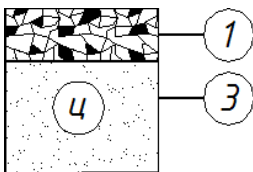
№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна								
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	8	8		8	8		8	8	
2		—	—		—	—		—	—	
3	Основание	22	22		24	24		27	27	
4		25	25		—	—		—	—	
5	Дополнительный слой основания	—	—		—	—		—	—	
Общая толщина дорожной одежды		55	55		32	32		35	35	

Таблица П.Б9 – Конструкции нежестких дорожных одежд облегченного типа для дорог IV категории

Дорожно-климатическая зона	I ₃	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	IV	Заданная надежность K_n	0,9
Тип дорожной одежды	Облегченный	Расчетная нагрузка	АК-10,0; P = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	150 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	1,2*10 ⁵

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900
2		—	—	—	—	—	—
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-6 ГОСТ 25607-2009	250	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом 8 %	600	Супесь, укрепленная цементом 6 %	350
4		—	—	—	—	—	—
5	Доп. слой основания	—	—	—	—	—	—
Грунт земляного полотна – дресвяный							

Окончание таблицы П.Б9

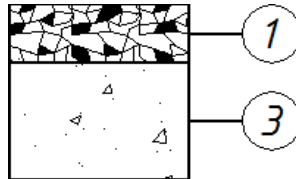
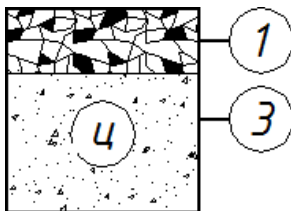
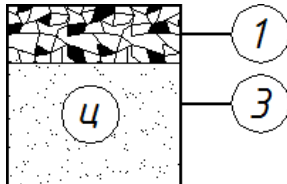
№ слоя	Наименование слоя конструк- ции дорожной одежды	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна								
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	8	8		8	8		8	8	
2		—	—		—	—		—	—	
3	Основание	15	15		10	10		10	10	
4		—	—		—	—		—	—	
5	Дополнитель- ный слой осно- вания	—	—		—	—		—	—	
Общая толщина до- рожной одежды		23	23		18	18		18	18	

Таблица П.Б10 – Конструкции нежестких дорожных одежд облегченного типа для дорог IV категории

Дорожно-климатическая зона	Із	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	IV	Заданная надежность, K_n	0,9
Тип дорожной одежды	Облегченный	Расчетная нагрузка	АК-10,0; Р 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	200 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$3,8 \cdot 10^5$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900
2		—	—	—	—	—	—
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом	350
4		Щебеночно-песчаная смесь С-6 ГОСТ 25607-2009	250	—	—	—	—
5	Доп. слой основания	—	—	—	—	—	—
Грунт земляного полотна – песчаный грунт крупный							

Окончание таблицы П.Б10

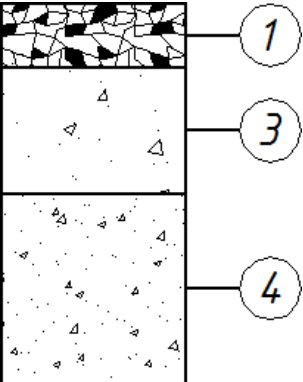
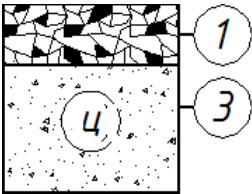
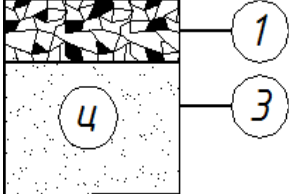
№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна								
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	8	8		8	8		8	8	
2		—	—		—	—		—	—	
3	Основание	18	18		24	24		28	28	
4		30	30		—	—		—	—	
5	Дополнительный слой основания	—	—		—	—		—	—	
Общая толщина дорожной одежды		56	56		32	32		36	36	

Таблица П.Б11 – Конструкции нежестких дорожных одежд облегченного типа для дорог IV категории

Дорожно-климатическая зона	Із	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	IV	Заданная надежность K_n	0,9
Тип дорожной одежды	Облегченный	Расчетная нагрузка	АК-10,0; P = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	200 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$3,8 \cdot 10^5$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	900
2		—	—	—	—	—	—
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом	350
4		—	—	—	—	—	—
5	Доп. слой основания	—	—	—	—	—	—
Грунт земляного полотна – дресвяный							

Окончание таблицы П.Б11

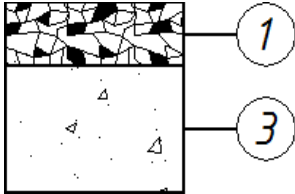
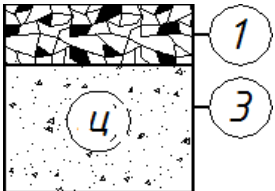
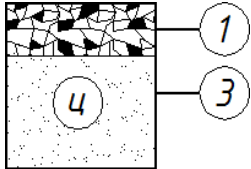
№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна								
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	8	8		8	8		8	8	
2		—	—		—	—		—	—	
3	Основание	17	17		10	10		13	13	
4		—	—		—	—		—	—	
5	Дополнительный слой основания	—	—		—	—		—	—	
Общая толщина дорожной одежды		25	25		18	18		21	21	

Таблица П.Б12 – Конструкции нежестких дорожных одежд капитального типа для дорог IV категории

Дорожно-климатическая зона	I _з	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	IV	Заданная надежность K_n	0,9
Тип дорожной одежды	Капитальный	Расчетная нагрузка	АК-11,5; Р = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	200 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$1,7 \cdot 10^5$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б по на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б по на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б по на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400
2		Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130	1400

Окончание таблицы П.Б12

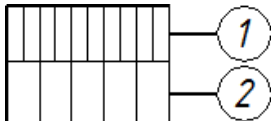
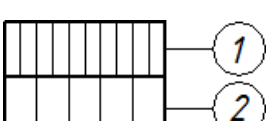
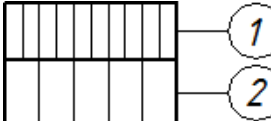
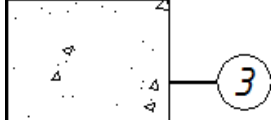
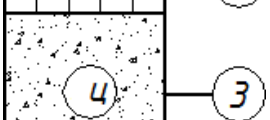
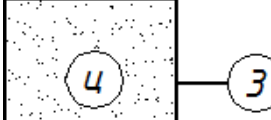
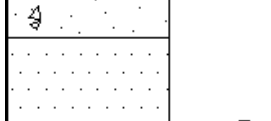
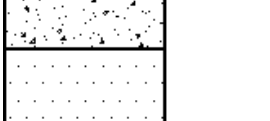
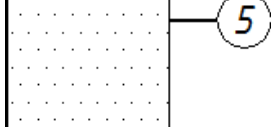
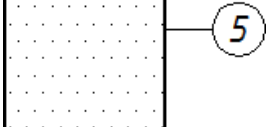
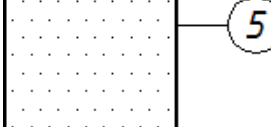
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укреп- ленная цементом	350			
4		—	—	—	—	—	—			
5	Доп. слой ос- нования	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130			
Грунт земляного полотна – супесь легкая										
№ слоя	Наименование слоя кон- струкции до- рожной одеж- ды	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна								
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	5	5		5	5		5	5	
2		5	5		5	5		5	5	
3	Основание	35	35		21	22		27	27	
4		—	—		—	—		—	—	
5	Дополнитель- ный слой осно- вания	33	36		25	25		32	36	
Общая толщина дорож- ной одежды		78	81		56	57		69	73	

Таблица П.Б13 – Конструкции нежестких дорожных одежд капитального типа для дорог IV категории

Дорожно-климатическая зона	Iз	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	IV	Заданная надежность K_n	0,9
Тип дорожной одежды	Капитальный	Расчетная нагрузка	АК-11,5; $P = 0,6$ МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	200 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$1,7 \cdot 10^5$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400
2		Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130	1400

Окончание таблицы П.Б13

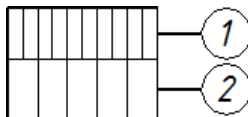
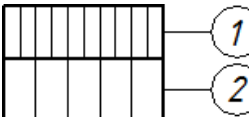
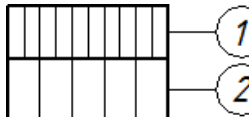
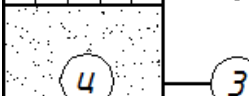
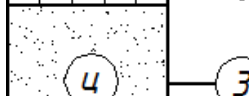
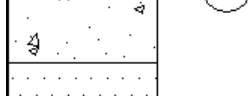
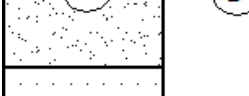
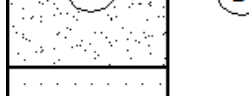
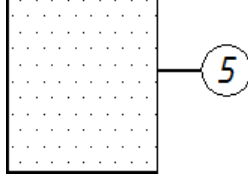
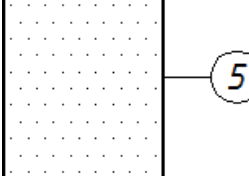
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом 6 %	350				
4		—	—	—	—	—	—				
5	Дополнительный слой основания	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130				
Грунт земляного полотна – супесь легкая											
№ слоя	Наименование слоя конструк- ции дорожной одежды	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна									
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	
1	Покрытие	5	5		5	5		5	5		
2		7	7		7	7		7	7		
3	Основание	30	30		15	15		20	25		
4		—	—		—	—		—	—		
5	Дополнительный слой основания	25	27		33	36		36	25		
Общая толщина дорож- ной одежды		67	69		60	63		68	62		

Таблица П.Б14 – Конструкции нежестких дорожных одежд капитального типа для дорог IV категории

Дорожно-климатическая зона	ІЗ	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	IV	Заданная надежность Кн	0,9
Тип дорожной одежды	Облегченный	Расчетная нагрузка	АК-11,5; Р = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	250 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	5,45*105

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки ІІ, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки ІІ, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки ІІ, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400
2		Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки ІІ на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки ІІ на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки ІІ на БНД90/130	1400

Окончание таблицы П.Б14

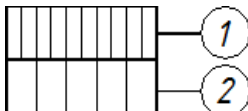
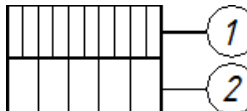
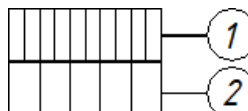
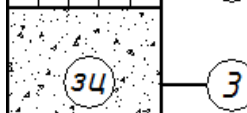
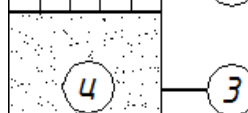
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укреплен- ная цементом	350			
4		Щебеночно-песчаная смесь С-6 ГОСТ 25607-2009	250	—	—	-	—			
5	Доп. слой осно- вания	—	—	—	—	—	—			
Грунт земляного полотна – дресвяный										
№ слоя	Наименование слоя конструк- ции дорожной одежды	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна								
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	5	5		5	5		5	5	
2		5	5		5	5		5	5	
3	Основание	19	19		17	17		26	26	
4		23	23		-	-		-	-	
5	Дополнитель- ный слой осно- вания	—	—		—	—		—	—	
Общая толщина дорож- ной одежды		52	52		27	27		36	36	

Таблица П.Б15 – Конструкции нежестких дорожных одежд капитального типа для дорог III категории

Дорожно-климатическая зона	Із	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	III	Заданная надежность K_n	0,95
Тип дорожной одежды	Капитальный	Расчетная нагрузка	АК-11,5; P = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	275 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$9,75 \cdot 10^5$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Основание	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400
2		Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400

Окончание таблицы П.Б15

3	Основание	Фракционный легкоуплотняемый щебень фракции 31,5-63 мм по ГОСТ 32703 и ГОСТ 32826, устроенный по способу заклинки, расклинованный фракционным мелким щебнем	450	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом	350
4		Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	-	-	-	-
5	Доп. слой основания	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130

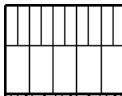
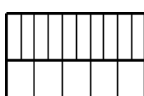
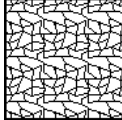
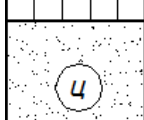
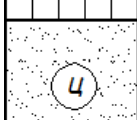
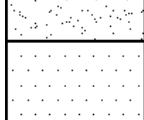
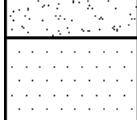
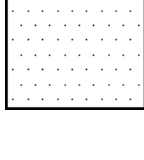
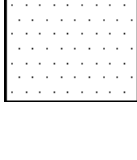
Грунт земляного полотна – супесь легкая											
№ сло я	Наименование слоя конструкции до- рожной одежды	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна									
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	
1	Покрытие	6	6		6	6		7	7		
2		8	8		8	8		8	8		
3	Основание	18	18		27	27		37	37		
4		26	26		–	–		–	–		
5	Дополнительный слой основания	27	29		34	37		34	37		
Общая толщина дорожной одежды		85	87		75	78		86	89		

Таблица П.Б16 – Конструкции нежестких дорожных одежд капитального типа для дорог III категории

Дорожно-климатическая зона	Із	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	III	Заданная надежность K_n	0,95
Тип дорожной одежды	Капитальный	Расчетная нагрузка	АК-11,5; Р = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	250 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$5,5 \cdot 10^5$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400
2		Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II по на БНД90/130	1400

Окончание таблицы П.Б16

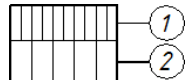
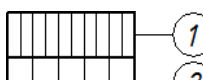
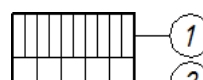
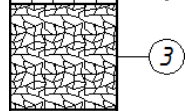
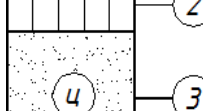
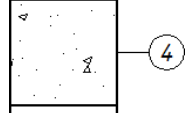
3	Основание	Фракционный легкоуплотняемый щебень фракции 31,5-63 мм по ГОСТ 32703 и ГОСТ 32826, устроенный по способу за- клинки, расклинованный фракционным мелким щебнем	450	Золошлаковая смесь, укреплен- ная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом	350				
4		Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	—	—	Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275				
5	Доп. слой основа- ния	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130				
Грунт земляного полотна – супесь легкая											
№ слоя	Наименование слоя конструк- ции	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна									
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	
1	Покрытие	5	5		5	5		5	5		
2		7	7		7	7		7	7		
3	Основание	16	16		27	27		16	16		
4		26	26		-	-		23	23		
5	Доп. слой основа- ния	27	31		32	35		23	25		
Общая толщина дорож- ной одежды		81	85		71	74		74	76		

Таблица П.Б17 – Конструкции нежестких дорожных одежд капитального типа для дорог III категории

Дорожно-климатическая зона	Из	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	III	Заданная надежность K_n	0,95
Тип дорожной одежды	Капитальный	Расчетная нагрузка	АК-11,5; P = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	200 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$1,7 \cdot 10^5$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400
2		Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130	1400

Окончание таблицы П.Б17

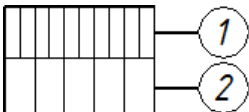
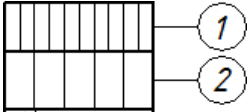
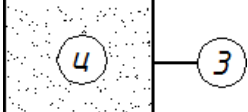
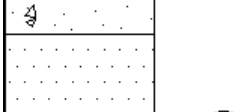
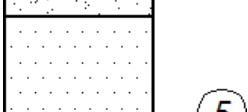
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	Золошлаковая смесь, укрепленная зольно-цементным вяжущим 8 %	600	Супесь, укрепленная цементом 6 %	350
4		—	—	—	—	—	—
5	Доп. слой основания	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130
Грунт земляного полотна – супесь легкая							
№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна					
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	5	5		5/5/5	5/5	
2		7	7		5/5/7	5/7	
3	Основание	33	33		20/25/20	25/20	
4		—	—		—	—	
5	Дополнительный слой основания	25	29		35/21/25	25/25	
Общая толщина дорожной одежды		70	74		65/56/57	60/57	

Таблица П.Б18 – Конструкции нежестких дорожных одежд облегченного типа для дорог III категории

Дорожно-климатическая зона	Iз	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	III	Заданная надежность K_n	0,90
Тип дорожной одежды	Облегченный	Расчетная нагрузка	АК-10,0; Р = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	200 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$3,8 \cdot 10^5$

№ сл оя	Наименование слоя конструкции	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400
2		Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400
3	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом	350

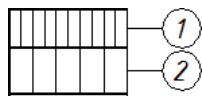
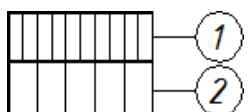
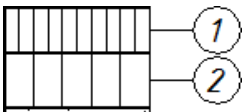
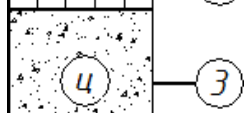
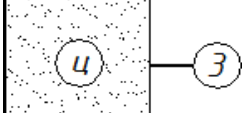
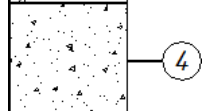
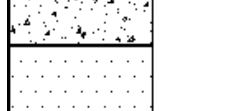
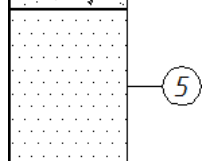
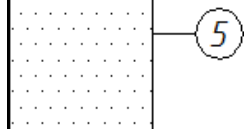
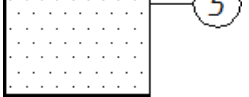
4	Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-6 ГОСТ 25607-2009	250	—	—	—	—			
5	Доп. слой осно- вания	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130			
Грунт земляного полотна – супесь легкая										
№ слоя	Наименование слоя конструк- ции дорожной одежды	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна								
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	5	5		5	5		5	5	
2		6/5	6		5	5		6/5	6	
3	Основание	15/15	15		20	20		22/25	22	
4		15/19	15		—	—		—	—	
5	Дополнитель- ный слой осно- вания	22/22	25		22	25		24/26	26	
Общая толщина до- рожной одежды		63/66	66		52	55		57/61	59	

Таблица П.Б19 – Конструкции нежестких дорожных одежд капитального типа для дорог II категории

Дорожно-климатическая зона	Із	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	II	Заданная надежность K_n	0,98
Тип дорожной одежды	Капитальный	Расчетная нагрузка	АК-11,5; Р = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	220 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$2,7 \cdot 10^5$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400
2		Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400

Окончание таблицы П.Б19

3	Основание	Фракционный легкоуплотняемый щебень фракции 31,5-63 мм по ГОСТ 32703 и ГОСТ 32826, устроенный по способу заклинки, расклинцованный фракционным мелким щебнем	450	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Фракционный легкоуплотняемый щебень фракции 31,5–63 мм по ГОСТ 32703 и ГОСТ 32826, устроенный по способу заклинки, расклинцованный фракционным мелким щебнем	450
4		Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	–	–	Супесь, укрепленная цементом	350
5	Доп. слой основания	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130

Грунт земляного полотна – супесь легкая

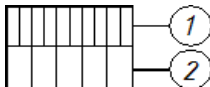
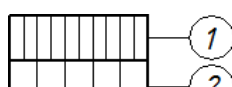
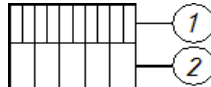
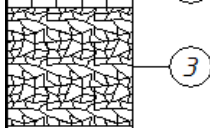
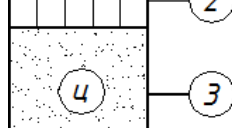
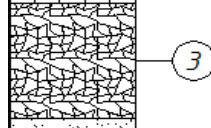
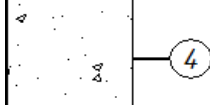
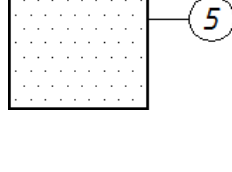
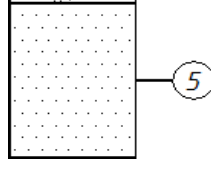
№ слоя	Наименование слоя конструкции	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна											
		1, 2	3	Чертеж		1, 2	3	Чертеж		1, 2	3	Чертеж	
1	Покрытие	5	5			5	5			5	5		
2		7	7			7	7			7	7		
3	Основание	23	23			30	30			21	21		
4		23	23			–	–			22	22		
5	Дополнительный слой основания	23	25			35	36			22	25		
Общая толщина дорожной одежды		81	83			77	78			77	80		

Таблица П.Б20 – Конструкции нежестких дорожных одежд капитального типа для дорог II категории

Дорожно-климатическая зона	Із	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	II	Заданная надежность K_n	0,98
Тип дорожной одежды	Капитальный	Расчетная нагрузка	АК-11,5; P = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	270 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$8,7 \cdot 10^5$

№ слоя	Наименование слоя конструкции	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400
2		Асфальтобетон горячий крупнозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий крупнозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий крупнозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130	2400
3	Основание	Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400

Окончание таблицы П.Б20

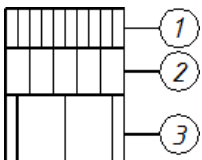
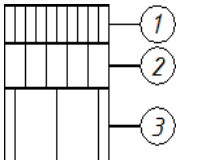
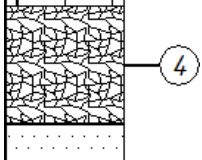
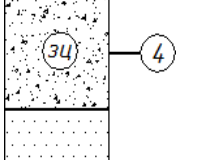
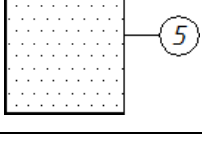
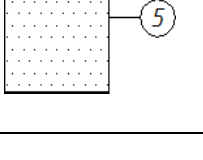
4	Основание	Фракционный легкоуплотняемый щебень фракции 31,5-63 мм по ГОСТ 32703 и ГОСТ 32826, устроенный по способу заклинки, расклинованный фракционным мелким щебнем	450	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом	350
5	Дополнительный слой основания	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130	Песок крупный по ГОСТ 32824	130
Грунт земляного полотна – супесь легкая							
№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна					
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	6	6		6	6	
2		7	7		7	7	
3	Основание	10	10		10	10	
4		25	25		22	22	
5	Дополнительный слой основания	27	28		23	25	
Общая толщина дорожной одежды		75	76		68	70	

Таблица П.Б21 – Конструкции нежестких дорожных одежд капитального типа для дорог II категории

Дорожно-климатическая зона	Из	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	II	Заданная надежность K_n	0,98
Тип дорожной одежды	Капитальный	Расчетная нагрузка	АК-11,5; P = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	270 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$8,7 \cdot 10^5$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400
2		Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400

Окончание таблицы П.Б21

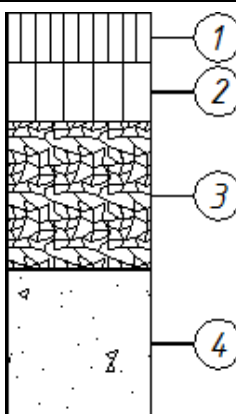
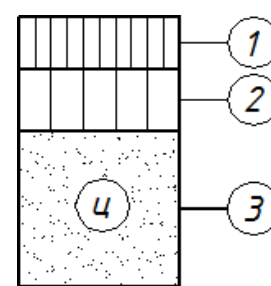
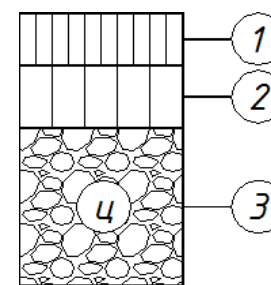
3	Основание	Фракционный легкоуплотняемый щебень фракции 31,5–63 мм по ГОСТ 32703 и ГОСТ 32826, устроенный по способу заклинки, расклинцованный фракционным мелким щебнем	450	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Песчано-гравийная смесь, укрепленная цементом 6 %	500			
4		Щебеночно-песчаная смесь С-4 ГОСТ 25607-2009	275	—	—	—	—			
5	Доп. слой основания	—	—	—	—	—	—			
Грунт земляного полотна – дресвяный										
№ слоя	Наименование слоя конструкции	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна								
		1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж	1, 2	3	Чертеж
1	Покрытие	5	5		5	5		5	5	
2		7	7		7	7		7	7	
3	Основание	22	22		28	28		35	35	
4		25	25		—	—		—	—	
5	Доп. слой основания	—	—		—	—		—	—	
Общая толщина дорожной одежды		59	59		40	40		47	47	

Таблица П.Б22 – Конструкции нежестких дорожных одежд капитального типа для дорог III категории

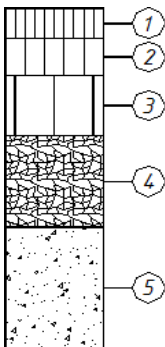
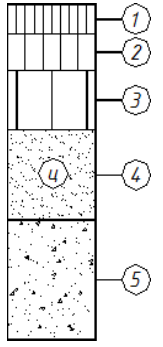
Дорожно-климатическая зона	Із	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	III	Заданная надежность K_n	0,98
Тип дорожной одежды	Капитальный	Расчетная нагрузка	АК-11,5; Р = 0,6 МПа
Минимальный требуемый модуль упругости	300 МПа	Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды	$1,75 \cdot 10^6$

№ слоя	Наименование слоя конструкции дорожной одежды	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа	Конструкция дорожной одежды	Модуль упругости, МПа
1	Покрытие	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый плотный марки II, типа Б на БНД90/130 Щебеночно-мастичный асфальтобетон по ГОСТ 31015-2002 на БНД90/130	2400
2		Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий мелкозернистый пористый марки II на БНД90/130	1400

Окончание таблицы П.Б22

3		Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130	1400	Асфальтобетон горячий крупнозернистый пористый марки II по ГОСТ 9128-2013 на БНД90/130	1400
4	Основание	Фракц. легкоуплотняемый щебень фракции 31,5-63 мм ГОСТ 32703 и 32826, устроенный по способу заклинки, расклинованный фракц. мелким щебнем	450	Золошлаковая смесь, укрепленная цементом	600	Супесь, укрепленная цементом	350
5	Доп. слой основания	Щебеночно-песчаная смесь С-7 ГОСТ 25607-2009	240	Щебеночно-песчаная смесь С-7 ГОСТ 25607-2009	240	Щебеночно-песчаная смесь С-7 ГОСТ 25607-2009	240

Грунт земляного полотна – супесь легкая

№ слоя	Наименование слоя конструкции	Толщина слоев конструкции, см, для схемы увлажнения рабочего слоя и вида грунта земляного полотна									
		1, 2	3	Чертеж		1, 2	3	Чертеж		1, 2	3
1	Покрытие	5	5			5	5			5	5
2		7	7			7	7			7	7
3	Основание	10	10			10	10			10	10
4		26	26			22	22			30	30
5	Доп. слой основания	29	30			26	27			30	31
Общая толщина дорожной одежды		76	78			70	71			82	83

Патенты на изобретения и методические разработки

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2803756

**Состав для укрепления грунтов оснований при
строительстве, реконструкции и капитальном ремонте
автомобильных дорог**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Иркутский национальный исследовательский технический
университет" (ФГБОУ ВО "ИРНИТУ") (RU)*

Авторы: *Слободчикова Надежда Анатольевна (RU), Плюта
Ксения Викторовна (RU)*

Заявка № **2022130968**
Приоритет изобретения **16 декабря 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **19 сентября 2023 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **16 декабря 2042 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

документ подписан электронной подписью
Сертификат 429b6a03e3551364ba169183a73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 18.02.2023 по 02.03.2024



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2779688

Зологрунт для дорожного строительства

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет" (ФГБОУ ВО "ИРНИТУ") (RU)*

Авторы: *Слободчикова Надежда Анатольевна (RU), Плюта Ксения Викторовна (RU)*

Заявка № 2021139523

Приоритет изобретения 29 декабря 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 12 сентября 2022 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 29 декабря 2041 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



СОГЛАСОВАНО:

Министр автомобильного
транспорта и дорожного
хозяйства Иркутской области



М.А. Лобанов

«30» декабря 2022 г.

**УТВЕРЖДАЮ**

Генеральный директор ООО
«Байкальская энергетическая
компания»



О.Н. Причк

«30» декабря 2022 г.



**«Методические указания применения
золошлаковых смесей в земляном полотне
автомобильных дорог Иркутской области»**

РАЗРАБОТАНО:

Ректор ФГБОУ ВО ИРНИТУ



М.В. Корняков

«30» декабря 2022 г.



Иркутск 2022 г.

Акты внедрения результатов диссертационной работы



дата и номер письма

на №

от

Акт

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук, доцента кафедры автомобильных дорог Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск) Слободчиковой Надежды Анатольевны, на тему «Модифицированные композиты общестроительного назначения с использованием золошлаковых отходов», научный консультант диссертационной работы докт. техн. наук, профессор Ключев С.В.

Комиссия в составе:

Председатель комиссии директор ОГКУ «Дирекция автодорог» Демидов П.В.,
член комиссии начальник отдела лабораторного контроля качества Андреев С.Г.,
член комиссии директор филиала «Усть-Ордынский АО «ДСИО» Волчатов Е.В.

Подтверждает, что результаты диссертационного исследования Слободчиковой Надежды Анатольевны использованы при проведении на участках автомобильных дорог ремонтно-строительных работ с использованием золошлаковых отходов ТЭЦ.

Председатель комиссии

Члены комиссии



[Handwritten signatures and initials over the stamp and text:]
 /Андреев С.Г./
 /Волчатов Е.В./



ИРКУТСКЗОЛОПРОДУКТ

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ИРКУТСКЗОЛОПРОДУКТ»

Салашного ул., д. 17, Иркутск, 664025

Тел.: (395-2) 793-663. Факс: (395-2) 793-663

E-mail: office_izp@irkutskenergo.ru

ОКПО 49580575, ОГРН 1193850016260

ИНН/КПП 3808268815/381201001

10.12.2024 № ИЗП-Иск-0238-24

На № _____ от _____

Справка о внедрении результатов диссертационной работы

ООО «Иркутскзолопродукт» подтверждает внедрение результатов диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук, доцента кафедры автомобильных дорог Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск) Слободчиковой Надежды Анатольевны, на тему «Модифицированные композиты общестроительного назначения с использованием золошлаковых отходов». Научный консультант д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

Результаты диссертационного исследования Слободчиковой Надежды Анатольевны использованы в практике деятельности ООО «Иркутскзолопродукт» в виде предложений по эффективному использованию накопленных золошлаковых отходов в золоотвалах ТЭЦ Иркутской области.

Использование результатов диссертационной работы позволяет расширять возможность применения золошлаковых отходов ТЭЦ в конструкциях автомобильных дорог в условиях континентального климата.

Заместитель директора

Юшина Е.С.
Тел. 8(3952) 793-647



А.Н. Покрыщенко

«Утверждаю»
 Генеральный директор ООО
 «Стройсервис» Вагнер Е. Я

28 октября 2025 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук доцента кафедры автомобильных дорог ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» Слободчиковой Надежды Анатольевны, на тему «Модифицированные композиты общестроительного назначения с использованием золошлаковых отходов», научный консультант доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» Клюев С.В.

Комиссия в составе:

Зам. ген. дир. по производству Вагнер А. А. (председатель комиссии),

Зам. ген. дир. по качеству Старков Г. Б. (член комиссии),

Нач. лаборатории Шевякова Н. А. (член комиссии)

Подтверждает, что результаты диссертационного исследования Слободчиковой Надежды Анатольевны использованы в деятельности ООО «Стройсервис» в виде рекомендаций по применению золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог.

Результаты выполненной работы имеют важное значение для увеличения объемов применения золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях земляных сооружений, в том числе в конструкциях автомобильных дорог.

Председатель комиссии _____ Вагнер А. А.

Члены комиссии



_____ Старков Г. Б.

_____ Шевякова Н. А.



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ
«РОССИЙСКИЕ АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ»
(ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ «АВТОДОР»)

Страстной б-р, д. 9, Москва, 127006
тел.: (495) 727-11-95, факс: (495) 249-07-72
e-mail: info@ruhw.ru
www.ruhw.ru

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Результаты диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук «Модифицированные композиты общестроительного назначения с использованием золошлаковых отходов» Слободчиковой Надежды Анатольевны имеют важное научное и практическое значение для применения золошлаковых отходов при строительстве земляного полотна автомобильных дорог.

Результаты работы, полученные в вышеуказанной диссертационной работе использованы Государственной компанией «Автодор» при разработке «Типовых материалов для проектирования автомобильных дорог и искусственных сооружений» (утверждены приказом Государственной компании «Автодор» от 17.04.2025 № 139) в части обязательного технико-экономического сопоставления применения техногенных грунтов, включая золошлаковых отходов при вариантном проектировании дорожных одежд.

Заместитель начальника Управления
технической политики и
инновационных технологий
Государственной компании «Автодор», к.т.н.


 С.В. Ильин



ПРОТОКОЛ О НАМЕРЕНИИ

1. Комиссия ООО «СК «ИнвестПромЭлит» в составе председателя Вивтюк Александра Валерьевича, членов: Поварова Александра Сергеевича, Ковалевой Марии Михайловны, рассмотрела научно-исследовательскую работу в рамках подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Слободчиковой Надежды Анатольевны.

Основные положения диссертационной работы большой научный и практический интерес в части разработки составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, на основе применения золошлаковых отходов для строительства земляных сооружений. Комиссия приняла решение о намерении **внедрения результатов** научно-исследовательской работы Слободчиковой Надежды Анатольевны.

2. Для внедрения результатов диссертации Слободчиковой Надежды Анатольевны комиссия считает необходимым осуществить следующие действия:

2.1. Разработать нормативные документы для апробации разработок диссертанта (ответственный за выполнение Слободчиков Н.А.).

2.2. Разработать практические рекомендации на изготовление золошлаковых смесей, укрепленных неорганическими вяжущими (ответственные за выполнение Ключев С.В., Слободчикова Н.А.).

Председатель

Директор ООО «СК «ИнвестПромЭлит»

А.В.Вивтюк

Члены

Главный инженер ООО «СК «ИнвестПромЭлит»

А.С.Поваров

Начальник ПТО ООО «СК «ИнвестПромЭлит»

М.М.Ковалева