

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)»

На правах рукописи



Иванов Евгений Владимирович

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ СМЕСЕЙ
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА
С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОДНО-ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА**

Специальность 05.23.11 – Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов
и транспортных тоннелей

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
В.В. Сиротюк

Омск – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Состояние вопроса	12
1.1 Золошлаковая смесь (ЗШС) – как техногенный грунт для насыпей земляного полотна	12
1.2 Современные представления о формировании водно-теплового режима земляного полотна	15
1.3 Выводы по первой главе, цели и задачи исследования	26
2 Формирование водно-теплового режима земляного полотна из золошлаковой смеси	28
2.1 Особенности формирования теплового режима при промерзании земляного полотна	28
2.2 Особенности влагонакопления и пучинообразования при промерзании земляного полотна из золошлаковой смеси	40
2.3 Сравнение методов расчета водно-теплового режима с учетом особенностей свойств золошлаковых смесей	47
Выводы по второй главе.....	53
3 Экспериментальные исследования свойств золошлаковых смесей как техногенных грунтов для земляного полотна	55
3.1 Общие сведения о получении золошлаковых смесей.....	55
3.2 Химико-минералогический состав золошлаковых смесей.....	57
3.3 Физико-механические свойства золошлаковых смесей.....	60
3.4 Теплофизические свойства золошлаковых смесей	75
3.5 Некоторые водные свойства золошлаковых смесей	79
3.6 Влияние неравномерности зернового состава на свойства золошлаковых смесей.....	91
3.7 Исследование морозного пучения золошлаковых смесей.....	95
Выводы по третьей главе	110
4 Проверка результатов экспериментально-теоретических исследований на опытном участке	112

4.1 Общие данные по опытному участку	112
4.2 Результаты мониторинга промерзания и морозного пучения.....	118
4.3 Проверка несущей способности земляного полотна из золошлаковой смеси.....	125
4.4 Устойчивость откосов земляного полотна из золошлаковой смеси	130
Выводы по четвертой главе	132
5 Экологическая и экономическая оценка рекомендуемых конструктивно-технологических решений.....	137
5.1 Экологическая оценка применения золошлаковых смесей для земляного полотна	137
5.2 Экономическая оценка применения золошлаковых смесей для земляного полотна	142
Выводы по пятой главе.....	148
Заключение.....	149
Список литературы.....	152
Приложение А Химический состав зол-уноса ТЭС от сжигания различных углей	160
Приложение Б Результаты экспериментальных исследований золошлаковых смесей ТЭС Западной Сибири	161
Приложение В Результаты испытаний золошлаковых смесей на морозное пучение	164
Приложение Г Технико-экономическое обоснование использования золошлаковой смеси в верхней части земляного полотна автомобильной дороги НОВ-2 в сторону НОВ-1 на территории золоотвала СП ТЭЦ-5	165

Введение

Без высокого качества земляного полотна невозможно построить современную автомагистраль, длительное время сохраняющую несущую способность дорожной одежды и ровность покрытия, особенно в сложных грунтовых, гидрологических и климатических условиях, характерных для многих регионов России. В то же время всё более осложняются вопросы отвода земли под карьеры с кондиционным грунтом. Наиболее остро этот вопрос стоит при проектировании и строительстве городских и пригородных дорог. Учитывая ценность пригородных земель и экологическую напряжённость на этих территориях, под грунтовые карьеры отводят неудобья и обводнённые территории с некондиционными грунтами. Это зачастую вынуждает строительные организации сооружать земляное полотно из грунтов повышенной влажности, либо везти кондиционный грунт с удаленных от участка строительства карьеров. При этом дальность транспортировки грунтов может измеряться десятками километров, а стоимость земляного полотна и всей дороги значительно возрастает [1].

В теплоэнергетической отрасли сформировалась другая проблема. Она заключается в том, что на пригородных территориях растут отвалы, площадь которых измеряется сотнями гектаров, в которых скапливаются десятки миллионов тонн золошлаковых отходов (ЗШО) ТЭС. Доля угольных ТЭС составляет около 70 % в балансе энергообеспечения нашей страны. И эта доля будет возрастать, особенно на азиатской территории России, где тепловые электростанции, работающие на угле, дают около 90 % энергетических мощностей. ТЭС сжигают более 200 млн т угля в год, выбрасывая в золоотвалы примерно 35 млн т золы и шлака (к 2020 г. эта цифра возрастет до 50 млн т). В стране уже накоплено около 1,5 млрд т золошлаков (рисунок 1).

Электростанции тратят на утилизацию золошлаков и платежи экологическим службам десятки миллионов рублей. Стоимость расширения или строительства золоотвалов измеряется сотнями миллионов рублей. Эти затраты включают в стоимость энергоресурсов, которая неуклонно растёт и перекладывается на потребителей энергии.

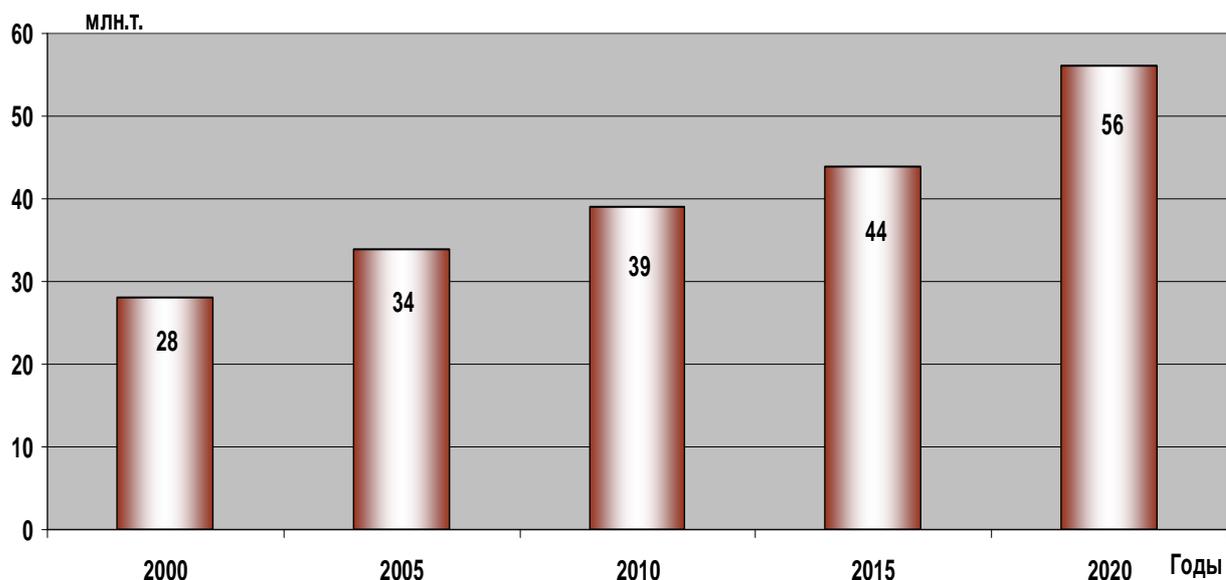


Рисунок 1 – Ежегодный выход золошлаковых отходов на ТЭС России

В настоящее время в мировой и отечественной практике сложились три основных направления утилизации ЗШО [2]:

- прямое использование золошлаковых смесей из золоотвалов при строительстве насыпей автомобильных и железных дорог, в планировочных насыпях и обратных засыпках;
- изготовление строительных материалов, в том числе цемента и конструкций (в основном с использованием золы-уноса);
- глубокая переработка с целью извлечения ценных металлов и сырья для промышленности.

Два первых направления утилизации ЗШО давно и плодотворно прорабатываются учёными СибАДИ и ОмГУ [3-7].

Одним из перспективных направлений крупнотоннажной утилизации золошлаковой смеси (ЗШС) из отвалов является использование её для строительства земляного полотна автомобильных дорог (объём потребления составляет от 20 до 100 тыс. м³ на 1 км). За рубежом дорожники являются одними из основных потребителей ЗШО (рисунок 2). В настоящее время объёмы использования золошлаковых отходов в развитых странах составляют от 50 до 100 % их выхода. Например, широко известен положительный опыт применения этих материалов в США, Германии, Японии, Польше и Индии [8-19].



Рисунок 2 – Отсыпка высокой насыпи (А) и подстилающего слоя дорожной одежды (Б) из золошлаковой смеси (Польша)

Методы и технология использования золошлаковых смесей для сооружения земляного полотна автомобильных дорог исследовались в Союздорнии, Гипродорнии, СибАДИ, в научных центрах Белоруссии, Украины, Казахстана, Узбекистана.

В России (СССР) золошлаковые смеси из отвалов ТЭС применяли для возведения земляного полотна с 70-х годов прошлого века при строительстве подъездных дорог в районе городов Омск [4], Тверь, Воркута [20], при строительстве автомобильных дорог МКАД-Кашира [21], Москва-Серпухов, Алтай-Кузбасс и др. [22].

Нормативные документы, действующие в России, разрешают применять ЗШС для строительства земляного полотна и дорожных оснований, однако разнообразные «мифы» о «большом вреде» ЗШО (радиация, радон, избыточное морозное пучение, сильное пыление, размываемость, неоднородность свойств и т.п.), отсутствие заинтересованности и недостаточный опыт применения этих материалов в нашей стране вызывают настороженность заказчиков, негативное отношение проектировщиков и подрядчиков.

Одной из причин, по которой проектные, экспертные и строительные организации стараются избегать применения ЗШС, является отсутствие современной нормативно-методической базы. Ранее действующий ВСН 185-75 «Технические указания по использованию зол-уноса и золошлаковых смесей от сжигания различных видов твёрдого топлива для сооружения земляного полотна и устройства дорожных оснований и покрытий автомобильных дорог» [23] морально устарел. За последние годы разработано два новых нормативно-методических документа,

один из которых разработали мы: ОДМ 218.2.031-2013 «Методические рекомендации по применению золы-уноса и золошлаковых смесей от сжигания угля на тепловых электростанциях в дорожном строительстве» [24, 25, 26] (утвержден распоряжением № 250–р от 04.03.2013 г. по Росавтодору).

Тем не менее, темпы утилизации ЗШО оставляют желать лучшего. На примере строительства насыпей из ЗШС в таких странах как Польша, Индия, Чехия, Германия и др. можно оценить устойчивость в условиях воздействия динамических нагрузок от транспорта во времени. Однако в условиях сезонного промерзания необходимо провести детальное изучение процессов водно-теплого режима, возникающих в земляном полотне из ЗШС в осенне-зимний период, с учетом специфических физических свойств ЗШС. Это позволит снять спорные вопросы об устойчивости земляного полотна автомобильных дорог из этих техногенных грунтов.

Таким образом, **актуальность диссертационной работы** заключается в обосновании способа решения двух проблем:

- расширение базы грунтовых строительных материалов для сооружения земляного полотна автомобильных дорог;
- утилизации ЗШС из отвалов ТЭС.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с тематическим планом ФГБОУ ВПО «СибАДИ». Исследования выполнялись по прямым договорам с производственными предприятиями. Тема диссертационного исследования включена в программу НИОКР Федерального дорожного агентства (Росавтодор) на 2009-2013 гг.

Степень разработанности. В настоящее время существует большое количество методик по расчету водно-теплого режима земляного полотна и прогнозированию морозного пучения дорожных конструкций. Однако в основном применение этих методик ограничивается свойствами грунтов природного происхождения и климатическими показателями европейской части РФ. Свойства техногенных грунтов, таких как золошлаковые смеси, остаются неизученными в свете их возможного применения в качестве грунта земляного полотна. Определение адекватной методики расчета водно-теплого режима и пучинообразования с учетом специфических свойств ЗШС не проводилось. До настоящего времени не изучены

в полной мере физико-механические и прочностные характеристики слоев из ЗШС и технологические параметры строительства земляного полотна из ЗШС.

Основная идея работы состоит в том, что в современных условиях дефицита карьеров с кондиционными грунтами (особенно на пригородных территориях) крупнотоннажное использование ЗШС из отвалов ТЭС в качестве грунта земляного полотна позволит решить ряд строительных и экологических проблем, при этом необходимо учитывать специфические свойства ЗШС, которые оказывают влияние на процесс влагонакопления, промерзания и пучения земляного полотна.

Объект исследования – земляное полотно автомобильной дороги, построенное из золошлаковой смеси в условиях сезонного промерзания.

Предмет исследования – закономерности изменения водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог из золошлаковой смеси, а также свойства золошлаковых смесей, влияющие на процесс промерзания.

Цель диссертационного исследования – теоретически и экспериментально обосновать возможность применения ЗШС из отвалов ТЭС для сооружения земляного полотна с учетом особенностей водно-теплового режима.

Исходя из цели, сформулированы следующие **задачи** исследования:

1. Установить физико-механические и технологические свойства ЗШС из отвалов ТЭС;
2. Предложить модели для прогнозирования глубины промерзания и морозного пучения земляного полотна из ЗШС в процессе промерзания;
3. Экспериментально установить закономерности изменения водно-теплового режима и морозного пучения ЗШС в лабораторных исследованиях и опытных дорожных конструкциях;
4. Оценить экономическую эффективность и экологическую безопасность использования ЗШС для строительства земляного полотна;
5. Разработать рекомендации по проектированию и строительству земляного полотна автомобильных дорог из ЗШС.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

- определены физико-механические, прочностные и технологические свойства ЗШС, используемых в качестве техногенного грунта для строительства земляного полотна;
- установлены особенности формирования водно-теплового режима насыпей земляного полотна из золошлаковых смесей;
- предложена математическая модель для прогнозирования относительной деформации пучения дорожной конструкции с земляным полотном из ЗШС.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии научных положений и совершенствовании методики расчета глубины промерзания и морозного пучения земляного полотна из ЗШС при его промерзании в зимний период.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в определении расчетных физико-механических показателей свойств ЗШС, необходимых для конструирования и расчета дорожных конструкций на прочность и устойчивость, а также определение технологических свойств ЗШС, которые необходимо учитывать при строительстве земляного полотна.

В ходе проведения диссертационного исследования разработан и передан заказчику нормативно-методический документ: Стандарт организации ОАО «Территориальная генерирующая компания №11» СТО 82982783.001-2010 «Материалы золошлаковые Омских ТЭЦ для дорожного строительства. Технические условия». Материалы исследований были использованы при разработке нормативно-методического документа ОДМ 218.2.031-2013 «Методические рекомендации по применению золы-уноса и золошлаковых смесей от сжигания угля на тепловых электростанциях в дорожном строительстве».

Результаты исследования использованы при подготовке занятий по дисциплине «Специальные вопросы проектирования дорог» для слушателей ФПК, магистрантов и студентов ФГБОУ ВПО «СибАДИ», а также при разработке дипломных проектов на кафедре «Проектирования дорог».

Методология и методы исследования. Методологической основой для решения поставленных задач является системный подход при изучении физико-

механических свойств ЗШС. Методология работы основана на использовании теории тепло- и массопереноса в дисперсных однородных средах и положений методов расчетов водно-теплого режима земляного полотна.

В процессе выполнения диссертационной работы использованы методы исследования, включающие: литературный и патентный поиск, анализ и обобщение, теоретические исследования и физические эксперименты, теорию планирования эксперимента, опытное строительство и обследование, экологическую и технико-экономическую оценку результатов исследования.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается методологической базой исследований, основанной на фундаментальных теоретических положениях; соблюдением основных принципов физического и математического моделирования; достаточным объемом экспериментальных данных, полученных с использованием приборов и оборудования, прошедших поверку. Результаты исследования докладывались и получили положительные отзывы на 12 научных конференциях различного уровня.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель для прогнозирования относительной деформации пучения дорожной конструкции с земляным полотном из ЗШС в зависимости от типа местности по условиям увлажнения;
- результаты экспериментальных исследований физико-механических и технологических свойств золошлаковых смесей из отвалов ТЭС Западной Сибири, рассматриваемых в качестве грунта для сооружения земляного полотна автомобильных дорог.

Личный вклад автора заключается в определении цели и задач исследования, выполнении теоретических и экспериментальных исследований, участии в строительстве и обследовании опытного участка, анализе и обобщении полученных результатов, разработке рекомендаций по проектированию и строительству земляного полотна автомобильных дорог из ЗШС, написанию заключения и выводов, разработке нормативно-методических документов по применению ЗШС в дорожном строительстве.

Апробация работы. Материалы исследования доложены, обсуждены и получили положительные отзывы на следующих конференциях и семинарах: 62, 63 и 66-ая научно-технические конференции в ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (г. Омск, 2008, 2009, 2012 гг.); IV Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Омск, 2009 г.); III Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность» (г. Омск, 2010 г.); III Региональная молодежная научно-техническая конференция «Омский регион – месторождение возможностей!» (г. Омск, 2012 г.); Молодежный форум: Молодежный лагерь «Интеллектуальные чтения» (г. Омск, 2012 г.); Научно-практический семинар студентов и преподавателей кафедры «Проектирование дорог» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» по теме: Применение золошлаков в дорожном строительстве. Новые нормативные документы (г. Омск, 2012 г.); Международная научно-практическая конференция студентов и аспирантов «Казанские научные чтения студентов и аспирантов–2013» имени В.Г. Тимирязова (г. Казань, 2013 г.); Встреча участников Молодежного лагеря «Интеллектуальные чтения» с Первым заместителем Председателя Правительства Омской области (г. Омск, 2014 г.); Международная научно-практическая конференция «Инновационное лидерство строительной и транспортной отрасли глазами молодых ученых» (г. Омск, 2014 г.); Межрегиональная конференция по расширению полезного использования побочных продуктов сжигания угля (г. Кемерово, 2014).

Публикации. Основные результаты исследования отражены в 14 научных статьях (в том числе две из них опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК), в двух нормативно-методических документах и шести отчетах по НИР.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Результаты исследования изложены на 159 страницах основного текста, включающего 76 рисунков, 44 таблицы, библиографию из 141 наименования; объем приложений составляет 6 страниц.

1 Состояние вопроса

1.1 Золошлаковая смесь (ЗШС) – как техногенный грунт для насыпей земляного полотна

Прежде чем рассмотреть вопрос применения того или иного материала, необходимо четко определить, что собой представляет данный материал. Воспользуемся определениями, которые даны нами в официальном нормативном документе ОДМ 218.2.031-2013 [26].

Золошлаковая смесь (ЗШС) – полидисперсная смесь из золы-уноса и шлака топливного, образующаяся при их совместном удалении на тепловых электростанциях (рисунок 3).



Рисунок 3 – Внешний вид золошлаковой смеси различного гранулометрического состава

Зола-унос (ЗУ) – тонкодисперсный материал, размером менее 0,315 мм, образующийся из минеральной части твёрдого топлива, сжигаемого в пылевидном состоянии, и улавливаемый золоулавливающими устройствами из дымовых газов тепловых электростанций (рисунок 4).

Шлак топливный (ШлТ) – грубодисперсный материал размером от 0,315 мм и более, образующийся из минеральной части твёрдого топлива, агрегирующий в топочном пространстве котлоагрегатов, и удаляемый снизу топки [26] (рисунок 5).

Зола-унос представляет собой тонкодисперсный материал, состоящий в основном из частиц размером 5-100 мкм. Ее химико-минералогический состав соответствует составу минеральной части сжигаемого топлива (см. главу 3).

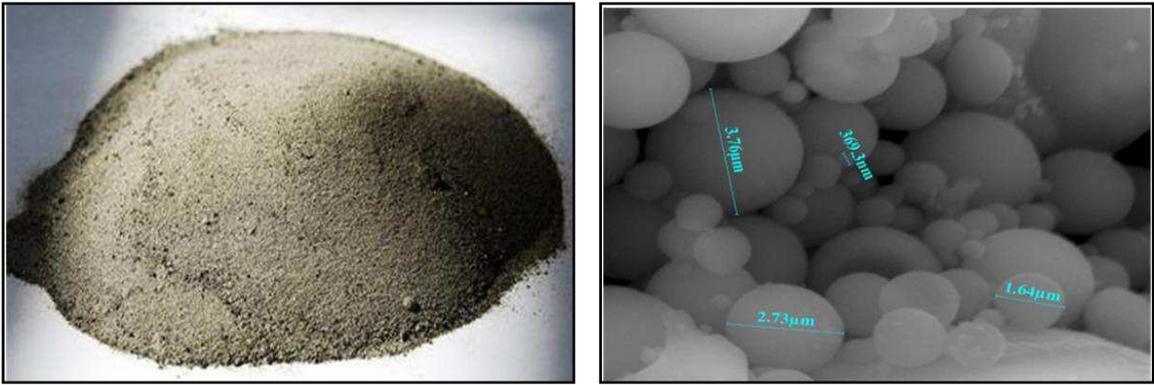


Рисунок 4 – Внешний вид золы-уноса (слева) и вид золы-уноса под микроскопом (справа)



Рисунок 5 – Внешний вид гранулированного шлака (слева) и вид этого шлака под микроскопом (справа)

Шлаки – основной вид отходов при кусковом сжигании топлива. При пылевидном сжигании шлаки составляют не более 10-15 % от массы образуемой золы. Шлаки образуются в результате спекания отдельных минеральных частиц при температуре свыше 1200 °С.

В отличие от зол, шлаки, образуемые при более высоких температурах, практически не содержат несгоревшее топливо и характеризуются большей однородностью. Шлак удаляют гидравлическим или сухим способом. При гидравлическом способе, имеющем большее распространение, золы и шлаки смешиваются [27].

Проведение анализа нормативно-технической документации России позволило выделить несколько основных моментов при использовании ЗШС в земляном полотне [24, 28].

СНиП 2.05.02-85* [29] и СП 34.13330.2012 [30] рекомендуют максимально использовать при строительстве дорог пригодные для применения отвалы тепловых электростанций (золы и золошлаковые смеси ТЭС).

В соответствии с классификацией ГОСТ 25100-2011 [31] золошлаковая смесь относится к четвертому классу – техногенные дисперсные грунты (таблица 1). До 2013 года ЗШС классифицировалась иначе, по ГОСТ 25100-95 [32] (таблица 2).

Таблица 1 – Классификация ЗШС по ГОСТ 25100-2011

Класс	Подкласс	Тип	Подтип	Вид	Подвид	Разновидности
Дисперсные	Несвязные	Техногенные	Антропогенно образованные грунты	Различные виды антропогенных грунтов	Различные подвиды антропогенных грунтов	Выделяют в соответствии с разделом Б.2 приложения Б и разделом В.2 приложения В

Таблица 2 - Классификация ЗШС по ГОСТ 25100-95

Класс	Группа	Подгруппа	Тип	Вид
Техногенные, дисперсные	Несвязные	Антропогенные намывные образования	Отходы производственной и хозяйственной деятельности	Промышленные отходы: шлаки, шламы, золы, золошлаки

Действующие нормативы [29, 30] относят техногенные грунты (отходы промышленности) к особым видам грунтов. Нормативы не допускают использовать в пределах рабочего слоя особые грунты без специальных технико-экономических обоснований, учитывающих результаты их непосредственных испытаний.

Для насыпей во всех условиях разрешается без ограничений применять грунты и отходы промышленности, мало меняющие прочность и устойчивость под воздействием погодно-климатических факторов. Грунты, а также отходы промышленного производства, изменяющие прочность и устойчивость под воздействием этих факторов и нагрузок с течением времени, в том числе особые грунты, допускается применять с ограничениями, обосновывая в проекте их применение результатами испытаний. В необходимых случаях следует предусматривать специальные конструктивные меры по защите неустойчивых грунтов от воздействия погодно-климатических факторов.

По СНиП 2.05.02-85* и СП 34.13330.2012 основным показателем пригодности грунтов для сооружения земляного полотна автомобильных дорог в РФ является степень пучинистости. Для верхней части насыпей рекомендуется использо-

вать грунты со степенью пучинистости не более 4 %. ОДМ 218.2.031-2013 относит к непучинистым или слабопучинистым золошлаковые смеси со степенью пучинистости не более 3,5 % (в соответствии с ГОСТ 25100-2011).

Использование ЗШС за пределами рабочего слоя земляного полотна не содержит существенных ограничений.

1.2 Современные представления о формировании водно-теплового режима земляного полотна

Водно-тепловой режим – сложный процесс изменения температурного и влажностного полей в массиве грунта. Он представляет собой закономерность изменения в течение года влажности и температуры слоев грунта земляного полотна, свойственную данной дорожно-климатической зоне и местным гидрогеологическим условиям. Изучение этого процесса особенно важно в периоды осеннего влагонакопления и зимнего промерзания земляного полотна. На основе моделирования исследуемых процессов можно сделать вывод о пригодности конкретного грунта для строительства в данных климатических условиях, рекомендовать конструктивные решения для повышения устойчивости земляного полотна.

Методику расчета водно-теплового режима можно разделить на несколько стадий или этапов:

- 1) расчет температурного поля, т.е. определение глубины промерзания земляного полотна;
- 2) расчет влажностного поля, т.е. определение влагонакопления в зоне промерзания грунта;
- 3) расчет пучинообразования и осадки земляного полотна.

Теория тепло- и массопереноса дисперсных сред основана на фундаментальных исследованиях в области теплопроводности материалов (Фурье, Клапейрон) и фильтрации жидкости (законы Фика, Ньютона, Навье-Стокса, Дарси). Значительный вклад в развитие и обобщение теории тепло- и массопереноса внесли А.В.

Лыков [33, 34] и его ученики. На этой основе разработана общая теория переноса тепла и влаги в однородных слоях земляного полотна и дорожных одежд [35].

В зависимости от влажности и температуры слоя расчет может производиться по трем схемам.

Первая расчетная схема. Вода содержится только в виде одной фазы – парообразная. Влажность грунта W изменяется в пределах $0 < W < W_{мг}$ ($W_{мг}$ – максимальная гигроскопическая влажность), температура – $t < t_n$ (t_n – температура льдообразования).

Система дифференциальных уравнений для диффузии водяного пара и тепла имеет следующий вид [35]

$$\frac{\partial t}{\partial T} = \frac{1}{C\delta} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \frac{\rho_n e P_n}{Cb} \cdot \frac{\partial W}{\partial T}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial T} = \frac{b}{e \delta P_n} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_n \frac{P_n}{b} \cdot \frac{\partial W}{\partial z} + \lambda_n \frac{b_n}{e} \frac{\partial t}{\partial z} \right), \quad (2)$$

где C – удельная теплоемкость грунта, ккал/кг·град;

δ – объемный вес скелета грунта, кг/м³;

λ – коэффициент теплопроводности грунта в талом состоянии, ккал/м·град·ч;

ρ_n – теплота конденсации пара, ккал/кг;

e – удельная пароемкость, г/кг·мм рт.ст.;

P_n – давление ненасыщенного пара, мм рт.ст.;

b – сорбционный коэффициент;

λ_n – коэффициент паропроницаемости, кг/м·ч·мм рт.ст.;

b_n – термоградиентный коэффициент при диффузии пара, 1/град.

Вторая расчетная схема. В грунте влага содержится в двух фазах – жидкая и парообразная. Миграция влаги осуществляется также в двух фазах. Влажность – $W_{мг} \leq W < W_{нг}$ ($W_{нг}$ – влажность при полной влагоемкости грунта). Температура – $t > t_n$. Миграция тепла и влаги описывается следующей системой уравнений [35]

$$\frac{\partial t}{\partial T} = \frac{1}{C\delta} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \frac{\rho_n e}{C} \cdot \frac{\partial W}{\partial T}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial T} = \frac{1}{1-\varepsilon} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(a_{жс} \frac{\partial W_{жс}}{\partial z} + a_{жс} b_{жс} \frac{\partial t}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где ε – критерий фазового превращения конденсирующегося пара;

$a_{жс}$ – коэффициент влагопроводности, м²/ч;

$b_{жс}$ – термоградиентный коэффициент при миграции жидкой фазы, 1/град;

$W_{жс}$ – влагосодержание жидкой фазы.

Третья расчетная схема. В порах грунта имеются три фазы – парообразная, жидкая и твердая в виде льда. При этом влажность и температура – $W_{мз} \leq W < W_{нз}$, $t < t_n$. Миграция влаги осуществляется в двух фазах – насыщенный пар и незамерзшая (для данной температуры) влага. При наличии в грунте талой и мерзлой зон водно-тепловой режим земляного полотна описывается двумя системами уравнений [35]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t_m}{\partial T} &= \frac{1}{C_m \delta} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m \frac{\partial t_m}{\partial z} \right) + \frac{1}{C_m} (\varepsilon \rho_n + \varepsilon_1 \rho_n) \cdot \frac{\partial W}{\partial T} \\ \frac{\partial W}{\partial T} &= \frac{1}{1 - \varepsilon - \varepsilon_1} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(a_n \frac{\partial W}{\partial z} + a_n b_n \frac{\partial t_m}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} 0 < z \leq h = f(T), \\ \text{мерзлая зона} \end{array}, \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t_m}{\partial T} &= \frac{1}{C \delta} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t_m}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon \rho_n}{C_m} \cdot \frac{\partial W}{\partial T} \\ \frac{\partial W}{\partial T} &= \frac{1}{1 - \varepsilon} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(a_{жс} \frac{\partial W}{\partial z} + a_{жс} b_{жс} \frac{\partial t_m}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} h = f(T) < z \leq \infty, \\ \text{таялая зона} \end{array}, \quad (6)$$

где t_m , t_n – температура мерзлой и талой зон соответственно;

C_m – удельная теплоемкость мерзлого грунта, ккал/кг·град;

λ_m – коэффициент теплопроводности грунта в мерзлом состоянии, ккал/м·град·ч;

ε_1 – критерий фазового перехода в лед;

ρ_n – теплота кристаллизации влаги, ккал/кг;

a_n – коэффициент влагопроводности незамерзшей влаги, м²/ч;

b_n – термоградиентный коэффициент при миграции незамерзшей влаги.

Дифференциальные уравнения аналитической теории полностью описывают водно-тепловой режим, учитывают миграцию влаги в двухфазном состоянии, выделение и поглощение тепла в процессе фазовых превращений влаги, а также взаимное влияние теплового и водного режимов. Однако, решение этих уравнений в инженерной практике достаточно сложно, поэтому большую важность приобретает развитие приближенных методов расчета водно-тепловых процессов, таких как расчет глубины промерзания, влагонакопления и пучения.

Интенсивный и плодотворный этап развития методов расчета глубины промерзания и влагонакопления дорожных конструкций начался с середины и продолжился до 90-х годов XX века. Значительный вклад в развитие вопросов промерзания внесли такие отечественные учёные как П.М. Андрианов, О.П. Афиногенов, А.О. Афиногенов, М.Д. Головкин, В.Н. Ефименко, С.В. Ефименко, И.А. Золотарь, В.Д. Казарновский, М.Б. Корсунский, А.М. Кулижников, А.Ф. Лебедев, Л.С. Лейбензон, В.С. Лукьянов, З.А. Нерсесова, Н.В. Орнатский, Л.А. Преферансова, Н.А. Пузаков, А.А. Роде, В.М. Сиденко, А.Я. Тулаев, Н.А. Цытович, В.И. Штукенберг А.И. Ярмолинский. Из зарубежных ученых также стоит выделить Г. Бескова, Бойюкоса, Бэнкельмана, А. Дюкера, Клапейрона, Ламе, И.И. Леонович, Ф. Неймана, Тэбера.

Методики расчетов различаются подходами и способами определения величины промерзания. Например, метод В.С. Лукьянова [36] и разработанный на его основе метод И.А. Золотаря [35] базируются на решениях систем дифференциальных уравнений. Ниже представлена система дифференциальных уравнений по методу И.А. Золотаря:

$$\lambda_u \frac{\theta}{h} d\tau = Qdh + \frac{1}{2} c_u (d\theta h + dh\theta) ; \quad (7)$$

$$\lambda_l \frac{\theta_n - \theta}{h_1} d\tau = \lambda_u \frac{\theta}{h} d\tau + \frac{1}{2} c_l h_1 (d\theta + d\theta_n), \quad (8)$$

где h_1, h – толщина верхнего и нижнего слоев соответственно, м;

θ – температура грунта на границе слоев, °С;

θ_n – температура на поверхности верхнего слоя, °С;

λ_l, λ_u – коэффициент теплопроводности верхнего и нижнего слоев соответственно, ккал/м·град·ч;

c_l, c_u – объемная теплоемкость верхнего и нижнего слоев, соответственно, ккал/м³·град;

Q – расход тепла на образование (плавление) льда в единице объема материала, ккал/м³.

Для практических расчетов система достаточно сложна, поэтому чаще используется приближенная методика расчета промерзания многослойных конструкций, основывающаяся на эквивалентном (в тепловом отношении) приведении материалов слоев к материалу земляного полотна [35].

Другим методом является расчет глубины промерзания дорожной конструкции, как слоистой системы, рассматривающий дорожную одежду как теплоизоляцию и не учитывающий времени ее промерзания (допустимо при малой влажности слоев) [37]. Принцип метода заключается в замене нестационарных процессов стационарными. Для этого используется критерий А.В. Лыкова [33]:

$$Lu = \frac{a_{жс}}{a}, \quad (9)$$

где: $a_{жс}$ и a – коэффициенты влаго- и теплопроводности.

Критерий Lu характеризует взаимосвязь тепло- и массопереноса, т.е. зависимость изменения поля потенциала влагообмена относительно изменения поля температуры. При понижении влажности грунтов и материалов критерий А.В. Лыкова Lu уменьшается. Экспериментально установлено, что для некоторых разновидностей глинистых грунтов критерий Lu меньше единицы в широком диапазоне изменения влажности. При замерзании грунтов критерий Lu становится еще меньше, так как теплопроводность мерзлого грунта возрастает, а влагопроводность уменьшается по сравнению с талым грунтом. Таким образом, при $Lu < 1,0$ расчет температурного поля можно производить на основе схемы стационарного теплообмена.

Расчетная формула для вычисления глубины промерзания выглядит следующим образом [35]

$$h = \sqrt{\frac{\lambda T}{\rho W \delta} \left[t_n - t_g + (t_g - t_2) \frac{R_n + R_o}{R} \right]}, \quad (10)$$

где λ – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, ккал/м·град·ч;

ρ – скрытая теплота льдообразования, равная 80 ккал/кг;

W – влажность грунта, %;

δ – плотность грунта, кг/м³;

t_n, t_g, t_2 – температура воздуха, грунта и льдообразования, °С;

R_o – тепловое сопротивление дорожной одежды, град·м²·ч/ккал;

R_n – тепловое сопротивление, характеризующее теплообмен покрытия с воздухом, град·м²·ч/ккал;

R – общее тепловое сопротивление, град·м²·ч/ккал.

Методика может быть использована при малой влажности слоев дорожной

одежды и земляного полотна. Также необходимо учитывать условие $Lu < 1,0$ при расчете, что справедливо для большинства глинистых грунтов.

А.Я. Тулаевым и В.А. Борщевским [38] был предложен метод расчета, основанный на векториальном анализе уравнений распространения гармонических колебаний в однородной среде. Суть метода заключается в связывании неизвестного вектора колебаний температуры земляного полотна с известным вектором колебаний температуры поверхности

$$\bar{t} = \bar{t}_0 e^{-z/L} e^{\frac{-z}{L} i}, \quad (11)$$

где \bar{t} – температура в векториальном изображении на глубине z от поверхности;

\bar{t}_0 – температура в векториальном изображении, но на поверхности при $z = 0$;

z – глубина от дневной поверхности при отсутствии дорожной одежды, м;

L – «постоянная длины», зависящая от коэффициента теплопроводности, объемной теплоемкости и круговой частоты вращения вектора колебаний \bar{t}_0 , м;

i – фазовый угол, характеризующий запаздывание колебаний температуры с глубиной z .

Приведенный выше метод и этот метод может быть применен в основном для грунтов с малой влажностью и без учета влияния фазовых превращений влаги. Таким образом, его применение возможно только на участках дорог с I типом местности по условиям увлажнения.

Для расчета толщины теплоизолирующего слоя дорожной одежды из отходов механической обработки древесины А. М. Кулижниковым предложено несколько формул [39, 40]. В случае полного предотвращения промерзания грунтового основания насыпи применима следующая зависимость

$$h_m = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac'}}{2a}, \quad (12)$$

где a – сумма количества теплоты, выделившейся при замерзании воды в единице объема теплоизоляционного материала, и количества теплоты, образующейся при охлаждении единицы объема теплоизолирующего слоя за счет изменения его теплоемкости, кДж/м³;

$$a = \left[\rho(W - W_{нз}) \gamma_{нз} + c_{нз}^M (t_l - t_o) \right], \quad (13)$$

ρ – скрытая теплота льдообразования, кДж/кг;

W – влажность древесного материала, д.е.;

$W_{нз}$ – содержание незамерзшей воды в древесном материале, д.е.;

$\gamma_{нз}$ – плотность скелета древесного материала, кг/м³;

$c_{нз}^M$ – объемная теплоемкость теплоизолирующего слоя, кДж/(м³·К);

t_o, t_l , – температура соответственно на верхней и нижней границе теплоизолирующего слоя, К;

b – количество теплоты, поступившей в зону промерзания теплоизолирующего слоя за весь период промерзания с единицы площади теплоизолирующего слоя, кДж/м²;

$$b = \lambda_{нз}^m \Delta i_{нз} T, \quad (14)$$

$\lambda_{нз}^m$ – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала в талом состоянии, Вт/(м·К);

$\Delta i_{нз}$ – температурный градиент в теплоизолирующем слое за период промерзания, К/м;

T – период промерзания теплоизолирующего слоя, ч;

c' – баланс теплоты, кДж/м;

$$c' = q_1 - q_2 - q_3, \quad (15)$$

q_1 – количество теплоты, поступившей в зону промерзания за весь период промерзания из грунтового основания, кДж/м;

q_2 – количество теплоты, поступившей в зону промерзания за весь период промерзания из талой части теплоизолирующего слоя, кДж/м;

q_3 – количество теплоты, отведенной из зоны промерзания мерзлым теплоизолирующим слоем за период промерзания, кДж/м;

$$q_1 = 0,1 \lambda_{гр}^m \Delta i_{гр} T, \quad (16)$$

$$q_2 = 0,1 \lambda_{нз}^m \Delta i_{нз} T, \quad (17)$$

$$q_3 = \lambda_{нз}^M (t_l - t_o) T, \quad (18)$$

$\lambda_{гр}^m$ – коэффициент теплопроводности грунта в талом состоянии, Вт/(м·К);

$\Delta i_{гр}$ – температурный градиент в грунтовом основании, К/м;

$\lambda_{нз}^M$ – коэффициент теплопроводности мерзлого теплоизоляционного материала, Вт/(м·К).

Расчет по данному методу затруднен, так как на этапе проектирования конструкции земляного полотна невозможно получить данные о температуре на верхней и нижней границе теплоизолирующего слоя. Также в диссертационной работе рассматривается использование ЗШС в качестве грунта земляного полотна, но не теплоизолирующего слоя дорожной одежды.

Метод расчета температурного поля земляного полотна в зимний период, разработанный В.И. Рувинским [41], в настоящее время принят в нормативно-методических документах [42]. Температурное поле рассчитывается с учетом процессов теплопередачи и массопереноса. Основная расчетная формула выглядит следующим образом:

$$h_{np} = 0,86a_{np} C \left[A'_{np} B'_{np} + 2,8 \left(1 - \frac{a_{non}}{a_{зан}} \right) (A''_{np} B''_{np} - A'_{np} B'_{np}) \right] \cdot \lambda_{zp(m)}, \quad (19)$$

где a_{np} , a_{non} , $a_{зан}$ – климатические параметры, определяемые в зависимости от хода температуры окружающего воздуха;

A'_{np} , B'_{np} , A''_{np} , B''_{np} – параметры, устанавливаемые в зависимости от термического сопротивления дорожной одежды $R_{од}$ и количества замерзшей воды $i_{зм}$;

C – параметр, устанавливаемый в зависимости от минимальной температуры грунта под дорожной одеждой.

Далее определяют параметры t_{non} , $t_{зан}$, $t_{уст}$, $t_{нов}$ – периоды времени понижения, запаздывания, постоянства и повышения температуры грунта. Результатом расчета является график температурного поля земляного полотна в зимний период. Расчет проводят несколько раз для различных значений коэффициента теплопроводности мерзлого грунта и количества замерзшей воды до достижения малого различия между полученными температурными полями.

Метод расчета, предложенный В.И. Рувинским, позволяет учесть массоперенос влаги при промерзании, а также влияние уровня грунтовых вод на температурное поле, но достаточно трудоемок. Необходимо несколько раз провести расчет температурного поля для достижения приемлемого результата. Метод был разработан для Европейской части СССР, так как климатические параметры, используемые в расчете, определялись именно для этой территории по результатам наблюдений на стационарных пунктах.

В настоящее время появилось много программных продуктов, позволяющих произвести расчет промерзания и оттаивания массива грунта. Одним из них является программа «Termoground», разработанная коллективом геотехников Санкт-Петербурга совместно с С.А. Кудрявцевым (составная часть программного комплекса «FEM-models» [43]), позволяющая с помощью численного моделирования в пространственной постановке исследовать процессы промерзания, морозного пучения и оттаивания в годичном цикле методом конечных элементов [44, 45].

В основу математической модели теплофизических процессов в программе «Termoground» положена модель промерзающего, оттаивающего и мерзлого

грунта, предложенная Н.А. Цытовичем, Я.А. Кроником, В.Ф. Киселевым [46-48].
Общее уравнение, описывающее процесс промерзания-оттаивания для нестационарного теплового режима в трехмерном пространстве, представлено в следующем виде

$$C_{th(f)}\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{th(f)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad (20)$$

где $C_{th(f)}$ – удельная теплоемкость грунтов (мерзлого и талого), Дж/кг·К;

ρ – плотность грунта кг/м³;

T – температура, °С;

t – время, с;

$\lambda_{th(f)}$ – теплопроводность грунтов (мерзлого и талого), Вт/м·К;

x, y, z – координаты, м;

q_v – мощность внутренних источников тепла, Вт/м³.

Одной из современных программ для расчета глубины промерзания дорожных конструкций является программа «Freeze-1», разработанная А.Л. Исаковым [49-51]. В программе используется методика расчета одномерного нестационарного температурного поля насыпи земляного полотна, позволяющая максимально приблизиться к теоретическому описанию фазовых переходов жидкой фазы грунта в процессе промерзания, с учетом основных внешних факторов (среднесуточная температура воздуха, радиационный баланс, толщина снега, с учетом изменения его характеристик во времени). Одномерная расчетная схема, используемая в методике, позволяет получить распределение температуры по глубине земляного полотна для произвольного момента времени t . Температура i -го элемента на шаге времени $t + \Delta t$ определяется следующим выражением

$$T_i(t + \Delta t) = T_i(t) + a_i \cdot \left\{ \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i} \cdot [T_{i-1}(t) - T_i(t)] - [T_i(t) - T_{i+1}(t)] \right\} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta h^2} + \frac{Q_\phi(\Delta t)}{C_i} \Big|_{T=T_\phi}; \quad (21)$$

где $a_i = \frac{\lambda_i}{\rho_i C_i}$ – коэффициент температуропроводности i -го элемента;

Δh – высота i -го элемента, м;

ρ_i – плотность i -го элемента, кг/м³;

λ_i – коэффициент теплопроводности i -го элемента, Вт/(м·град);

C_i – удельная теплоемкость i -го элемента, Дж/(кг·град);

Q_ϕ – удельная теплота фазового перехода в грунте, Дж/кг.

В настоящее время программа рекомендована для расчета промерзания земляного полотна при проектировании противопучинных мероприятий на железных дорогах.

Также А.Л. Исаковым разработана программа «Freeze-2», которая использует методику двумерного расчета температурного поля поперечного профиля насыпи земляного полотна [52]. Особенностью этой программы является учет толщины снегового покрова на откосах с изменением его характеристик во времени.

Несомненным преимуществом программных продуктов серии «Freeze» по расчету глубины промерзания является большая приближенность решения к аналитическому решению, так как существует возможность задать очень малый интервал расчета (Δh или Δz), т.е. степень точности описания фазовых переходов в грунте. Программные продукты также отличаются набором возможных внешних факторов, задаваемых при расчете.

Наряду с преимуществами программы стоит отметить некоторые недостатки. В работе применена математическая модель процесса промерзания грунтов земляного полотна, которая учитывает температуру окружающего воздуха и теплофизические свойства грунта. Однако в модели программы не отражено влияние других климатических факторов: ветер, солнечная радиация и уровень грунтовых вод, которые влияют на скорость и глубину промерзания грунтов.

Прогнозирование зимнего влагонакопления и возможных пучинных деформаций, в большинстве разработанных ранее методов, основывается на результатах расчета температурного поля и глубины промерзания земляного полотна. Также большую роль в расчетах выполняют водные и фильтрационные свойства грунта. К ним относятся: оптимальная влажность и максимальная плотность, полная влагоемкость и содержание незамерзающей влаги при промерзании, а также коэффициент капиллярной влагопроводности грунта.

В рамках одного метода расчета часто происходит деление на расчетные схемы в зависимости от характера увлажнения земляного полотна. Например, в методе Н.А. Пузакова [53] для трех расчетных схем используются разные формулы и граничные условия к ним. В качестве исходных данных используется характеристика

скорости промерзания α , определенная по методу расчета глубины промерзания И.А. Золотаря. Подробнее метод Н.А. Пузакова рассмотрен в параграфе 2.2.

Следующим из рассматриваемых методов можно отметить метод И.А. Золотаря [35, 54]. Расчетная формула величины пучения грунта выглядит следующим образом

$$l_{пуч} = h \frac{\gamma_m}{\Delta_0} \left[1,09(W_{cp}^{зим} + W_{нз}) - (W_{нв} + W_{нз}) \right]; \quad (22)$$

где h – глубина промерзания грунта земляного полотна за период $\tau_{пр}$, определенная по методу И.А. Золотаря, м;

γ_m – плотность сухого (скелета) грунта в талом состоянии, кг/м³;

Δ_0 – плотность воды, кг/м³;

$W_{cp}^{зим}$ – средняя влажность грунта в промерзшем земляном полотне, д.ед.;

$W_{нз}$ – влажность, соответствующая количеству незамерзшей воды в грунте, д.ед.;

$W_{нв}$ – влажность, соответствующая полной влагоемкости, д.ед.

Основная сложность метода заключается в определении средней влажности грунта в промерзшем земляном полотне $W_{cp}^{зим}$.

Н.А. Цытович [46] относит к приближенным упомянутый ранее метод расчета Н.А. Пузакова. В качестве более точного Н.А. Цытович предлагает использовать метод Г.М. Фельдмана, основанный на аналитической теории тепло- и массопереноса капиллярно-пористых коллоидных сред А.В. Лыкова. Дифференциальное уравнение, полученное Г.М. Фельдманом [55], выглядит следующим образом

$$\frac{\partial W}{\partial t} = a' \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}; \quad (23)$$

где a' – коэффициент потенциалпроводности (влагопроводности);

Решив численно дифференциальное уравнение (23), Г.М. Фельдман получил выражение для определения миграционного потока в открытой системе (неограниченный подток воды)

$$q_{миг} = A + B \frac{\partial \xi}{\partial t}; \quad (24)$$

где $q_{миг}$ – поток миграции воды, кг/м²·ч;

ξ – глубина промерзания, м.

Коэффициенты A и B из уравнения (24) имеют пределы применимости, зависящие от скорости промерзания и коэффициента влагопроводности грунта.

Расчет влагонакопления, пучинообразования и осадки грунта по методике В.И. Рувинского, используемой в методических рекомендациях [42], основан, прежде всего, на расчете температурного поля по методике этого автора. Однако, как и большинство рассмотренных соискателем, этот метод разработан применительно к грунтам природного происхождения (песок, супесь, суглинок, глина). Показатели влажности и коэффициенты влагопроводности ЗШС существенно отличаются от природных грунтов. Основываясь на некоторых замечаниях к расчету температурного поля В.И. Рувинского, а также общей направленности методики на свойства природных грунтов, можно сделать вывод о том, что применение этой методики затруднительно в отношении ЗШС, обладающих специфическими физическими свойствами.

1.3 Выводы по первой главе, цели и задачи исследования

На основании вышеизложенного можно сформулировать ряд выводов:

- 1) Многотоннажное использование ЗШС из отвалов ТЭС является актуальной задачей, выполнение которой необходимо как с точки зрения решения проблем экологии, так и ввиду острой потребности в минеральных грунтах для дорожного строительства на пригородных территориях.
- 2) Золошлаковая смесь угольных электростанций является разновидностью особого грунта, обладающего рядом аномальных свойств (по сравнению с природными грунтами, см. главу 3) – малая плотность, высокая макро- и микропористость, низкая теплопроводность, высокая влагоёмкость, значительное содержание частиц, по размерам относящихся к пылеватым.
- 3) Некоторые аномальные физико-механические и водные свойства ЗШС, разнообразные «мифы» о «большом вреде» ЗШО (радиация, радон, избыточное морозное пучение, сильное пыление, размываемость, неоднород-

ность свойств и т.п.), отсутствие исследований об особенностях водно-теплового режима насыпей из ЗШС, недостаточный опыт применения этих материалов в РФ вызывают настороженность и негативное отношение к этим техногенным грунтам у проектировщиков и подрядчиков.

- 4) Необходима проверка и определение наиболее адекватной методики для прогнозирования процессов промерзания, влагонакопления и морозного пучения ЗШС – как материала для сооружения насыпей земляного полотна автомобильных дорог.

Таким образом, **цель исследования** сформулирована следующим образом: теоретически и экспериментально обосновать возможность применения ЗШС из отвалов ТЭС для сооружения земляного полотна с учетом особенностей водно-теплового режима.

Исходя из цели, сформулированы **задачи** исследования:

- 1) Установить физико-механические и технологические свойства ЗШС из отвалов ТЭС;
- 2) Предложить модели для прогнозирования глубины промерзания и морозного пучения земляного полотна из ЗШС в процессе промерзания;
- 3) Экспериментально установить закономерности изменения водно-теплового режима и морозного пучения ЗШС в лабораторных исследованиях и опытных дорожных конструкциях;
- 4) Оценить экономическую эффективность и экологическую безопасность использования ЗШС для строительства земляного полотна;
- 5) Разработать рекомендации по проектированию и строительству земляного полотна автомобильных дорог из ЗШС.

Объект исследования – земляное полотно автомобильной дороги, построенное из золошлаковой смеси в условиях сезонного промерзания.

Предмет исследования – закономерности изменения водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог из золошлаковой смеси, а также свойства золошлаковых смесей, влияющие на процесс промерзания.

2 Формирование водно-теплового режима земляного полотна из золошлаковой смеси

2.1 Особенности формирования теплового режима при промерзании земляного полотна

Золошлаковая смесь (ЗШС) является разновидностью техногенного грунта [31], обладающего специфическими (аномальными) физико-механическими и водными свойствами (см. главу 3). Считается, что грунт представляет собой трехкомпонентную систему: скелет грунта (минеральная часть), воздух и вода. Кроме этого в ЗШС присутствует и органическая составляющая (углистые остатки), содержание которой может составлять от 3 до 15 % по массе.

В процессе промерзания грунта появляется еще один твердый компонент – лед. Вода в грунте начинает замерзать при условии, что ее температура становится ниже температуры замерзания. При этом для разных состояний и степени засоленности воды температура замерзания отличается.

Как известно [56], вода в массиве грунта находится в нескольких состояниях – водяной пар, капиллярная, рыхлосвязанная и прочносвязанная влага. При промерзании грунта в первую очередь конденсируется водяной пар, превращаясь в капиллярную влагу, которая затем начинает замерзать при температуре, равной температуре замерзания воды в обычных условиях на воздухе.

Рыхло- и прочносвязанная влага обволакивает частицы грунта за счет действия физических сил притяжения. Объем связанной влаги зависит от удельной поверхности грунта [46], которая определяется в зависимости от объема пор в грунте. Это обстоятельство очень важно, так как температура замерзания рыхлосвязанной влаги ниже, чем капиллярной. Прочносвязанная влага замерзает при еще более низкой температуре. По данным З.А. Нерсесовой и других исследователей [57, 58] даже при температуре минус 20 °С в некоторых разновидностях грунтов прочносвязанная влага замерзает не полностью и в грунте остается часть

незамерзшей влаги, объем которой зависит от температуры и вида грунта (содержания пылеватых частиц).

При замерзании вода превращается в лед. В ходе этого экзотермического процесса выделяется энергия, которая образуется за счет скрытой теплоты образования (плавления) льда. При этом на поверхность грунта выделяется тепло, и необходимо время для его отведения из зоны промерзания. Количество образуемого тепла зависит от влажности и содержания незамерзшей влаги в грунте при данной температуре.

Грунты естественного природного происхождения, применяемые обычно для строительства земляного полотна (суглинки, супесь, песок и др.), всегда обладают пористостью (даже в плотном состоянии). Эта пористость образуется за счет расстояния между частицами грунта, которые имеют различную форму и, практически всегда, плотную структуру. Чем больше нагрузка при уплотнении грунта и мельче агрегаты грунта, тем меньше расстояние между ними. Однако каким бы интенсивным не было уплотнение, промежутки между частицами грунта возможно лишь уменьшить до определенного объема. Объем пор заполнен вовлеченным воздухом и водой, присутствующей в любом, даже высушенном грунте.

Дисперсность ЗШС не может быть в полной мере охарактеризована только крупностью зольных и шлаковых частиц. Особенностью ЗШС является наличие в большинстве частиц ЗШС большого объема пор, имеющих как открытый, так и закрытый характер. Структура частиц зависит от вида угля, вида минеральной составляющей («пустой» породы) в угле, режимов его сжигания и скорости охлаждения [59] (процесс образования пор в частице ЗШС описан в параграфе 3.1). Общий объем пор может достигать 60-80 % от объема частицы. Эти поры частично заполнены воздухом и водой.

Время промерзания грунта до определенной глубины напрямую связано с его пористостью и влажностью, т.е. теплоемкостью и теплопроводностью всего массива грунта. Теплоемкость грунта как многокомпонентной системы складывается из теплоемкостей отдельных ее составляющих [35]. Обычно при расчетах не учи-

тывают теплоемкость воздуха из-за его малого весового содержания относительно остальных компонентов.

Расчеты теплового режима в основном ведутся для определения максимальной глубины промерзания и построения теплового поля по времени и глубине земляного полотна. При этом также определяют общее время промерзания или время промерзания до определенной глубины.

Рассмотрим детально некоторые методики расчета теплового поля, перечисленные в параграфе 1.2, применительно к земляному полотну из ЗШС:

- 1) метод расчета И.А. Золотаря;
- 2) метод расчета В.С. Лукьянова и М.Д. Головки;
- 3) методика расчета А.Л. Исакова, реализованная в программе «Freeze-1».

Для расчета принята следующая конструкция (реализованная на опытном участке):

- 1) слой покрытия – асфальтобетон плотный из горячей мелкозернистой смеси, тип Б марка П, на вязком битуме БНД марки 90/130, по ГОСТ 9128-2009, толщина 0,07 м [60];
- 2) слой основания из щебеночно-песчаной смеси (ЩПС) марки С5 по ГОСТ 25607-2009, толщина 0,18 м [61];
- 3) материал земляного полотна – золошлаковая смесь (ЗШС) из отвала ТЭЦ.

Такая конструкция принята, чтобы сравнить результаты расчета с результатами обследования опытного участка, речь о котором пойдет в четвертой главе. Расчет будем проводить для условий первого, второго и третьего типов местности по условиям увлажнения. Эти условия задаются начальной предзимней влажностью и соответствующими ей теплофизическими характеристиками ЗШС.

Для расчета теплового поля предложенной конструкции по методу И.А. Золотаря [35] необходимо определить теплофизические свойства материалов слоев в нее входящих:

- коэффициент теплопроводности в талом и мерзлом состояниях;
- объемная теплоемкость в талом и мерзлом состояниях;
- расход тепла на образование (плавление) льда в единице объема материала.

Исходные данные для расчета глубины промерзания приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для расчета

№ слоя	Материал слоя	Плотность материала, $\gamma_{ск}$, кг/м ³	Предзимняя влажность W_0 , % по массе
1	Асфальтобетон	2300	0,25
2	ЩПС	2000	5
3	ЗШС	870	25 / 40 / 60

Примечание – Значения предзимней влажности ЗШС даны соответственно для **первого / второго / третьего** типов местности по условиям увлажнения.

Коэффициенты теплопроводности ЗШС в талом и мерзлом состоянии определены нами экспериментально в соответствии с ГОСТ 26263-84 [62] и ГОСТ 30256-94 [63]. Методика определения описана в третьей главе.

Объемная теплоемкость в талом и мерзлом состояниях определена по формулам

$$c_{im} = \gamma_{ick} \left(c_{ск} + \frac{W_i - W_{инз}}{100} c_l + \frac{W_{инз}}{100} c_v \right); \quad (25)$$

$$c_{im} = \gamma_{ick} \left(c_{ск} + \frac{W_i}{100} c_v \right); \quad (26)$$

где c_{im} , c_{im} – объемная теплоемкость в мерзлом и талом состояниях соответственно, ккал/м³·град;

γ_{ick} – плотность сухого грунта (скелета) или материала, кг/м³;

$c_{ск}$, c_l , c_v – удельные теплоемкости скелетных частиц, льда и воды соответственно, ккал/кг·град ($c_{ск} = 0,17$ ккал/кг·град; $c_l = 0,5$ ккал/кг·град; $c_v = 1,0$ ккал/кг·град);

W_i – общая весовая влажность материала, %;

$W_{инз}$ – среднее содержание незамерзшей воды в процессе промерзания ($W_{инз}=0$ принято, аналогично пылеватому песку по графикам З.А. Нерсесовой [35]), %.

Расход тепла вычисляется по формуле

$$Q_i = \gamma_{ick} \left(\frac{W_i - W_{инз}}{100} \right) L; \quad (27)$$

где L – скрытая теплота образования (плавления) льда ($L \cong 80$, ккал/кг).

Вычисленные и полученные экспериментально теплофизические характеристики сведены в таблицу 4. Граничные условия для расчета – в таблице 5.

Таблица 4 – Теплофизические характеристики

№ слоя	Материал слоя	c_{im} , ккал/м ³ ·град	Q_i , ккал/м ³	λ_{im} , ккал/м·град·ч
1	Асфальтобетон	922,9	460	0,602
2	ЩПС	450	8000	1,806
3	ЗШС	256,3/ 321,9/ 408,9	17400/ 30624/ 54288	0,516/ 0,774/ 1,161

Примечание – Значения теплофизических характеристик ЗШС даны для влажности 25/40/60 % соответственно.

Таблица 5 – Граничные условия

Тип местности по условиям увлажнения	Год проведения исследования	Минимальная среднемесячная температура θ_{min} , °С	Продолжительность периода промерзания τ_{np} , ч
1	2012	-18,2	3672
2	2011	-20,8	3336
3	2012	-18,2	3672

Примечание. Продолжительность периода промерзания получена как длительность между датами перехода температуры воздуха через 0°С осенью и весной.

Далее последовательно приводим все толщины слоев дорожной одежды к эквивалентной толщине грунта земляного полотна, и получаем общую толщину конструкции в однородном полупространстве, материалом которого является грунт земляного полотна. Результатом расчета является максимальная глубина промерзания дорожной конструкции, полученная по формуле

$$h_i = \frac{\tau_i}{Q_i + \frac{1}{2}c_i(a\tau_i^2 + b\tau_i)} \cdot \sqrt{\lambda_i \left(Q_i b + \frac{2aQ_i + b^2c_i}{3} \tau_i + \frac{abc_i}{2} \tau_i^2 + \frac{a^2c_i}{5} \tau_i^3 \right)}, \quad (28)$$

где h_i – глубина промерзания i -го слоя за время τ_i , м;

Q_i – расход тепла на образование (плавление) льда в i -ом слое, ккал/м³;

c_i – объемная теплоемкость в талом и мерзлом состояниях, ккал/м³·град;

λ_i – коэффициент теплопроводности в талом и мерзлом состояниях, ккал/м·град·ч;

a и b – климатические коэффициенты, вычисляемые из зависимостей:

$$a = -\frac{4\theta_{min}}{\tau_{np}^2}, \quad (29)$$

$$b = \frac{4\theta_{min}}{\tau_{np}}, \quad (30)$$

где θ_{min} – минимальная среднемесячная температура воздуха за зимний период, °С;

τ_{np} – продолжительность периода промерзания, ч.

Формула (28) получена интегрированием уравнения (7), представленного в параграфе 1.2. Результаты расчёта скорости промерзания ЗШС при разной влажности даны в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты расчета глубины промерзания по методу И.А. Золотаря

№ слоя	Материал слоя	Толщина слоя h , м	Толщина эквивалентного слоя $h_{экв}$, м	Глубина промерзания грунта земляного полотна h_{np} , м	Характеристика скорости промерзания α , см/ч ^{1/2}	Скорость промерзания ν , см/сут.
1 тип местности по условиям увлажнения						
1	Асфальтобетон	0,07	0,0028	1,70	2,81	1,11
2	ЩПС	0,18	0,058			
3	ЗШС	–	–			
2 тип местности по условиям увлажнения						
1	Асфальтобетон	0,07	0,0027	1,55	2,56	1,01
2	ЩПС	0,18	0,050			
3	ЗШС	–	–			
3 тип местности по условиям увлажнения						
1	Асфальтобетон	0,07	0,0024	1,41	2,33	0,94
2	ЩПС	0,18	0,049			
3	ЗШС	–	–			

Примечание. Скорость промерзания грунта земляного полотна определена по формуле (25).

Характеристика скорости промерзания и скорость промерзания определены по следующим формулам

$$\alpha = \frac{h_{np}}{\sqrt{\tau_{np}}}; \quad (31)$$

$$\nu = \frac{h_{np}}{\tau_{np}}. \quad (32)$$

На основе формулы (28) получены графики зависимости глубины промерзания от времени (рисунок 6).

Анализируя кривые промерзания ЗШС, рассчитанные по методу И.А. Золотаря, можно сказать, что при увеличении расчетной влажности грунта увеличивается весомость количества скрытой теплоты образования льда, что в свою очередь уменьшает глубину промерзания (при втором и третьем типе местности по условиям увлажнения). Таким образом, установлено, что влияние увеличения количества скрытой теплоты образования льда больше, чем увеличение коэффициента

теплопроводности, который на первый взгляд должен определять величину глубины промерзания.

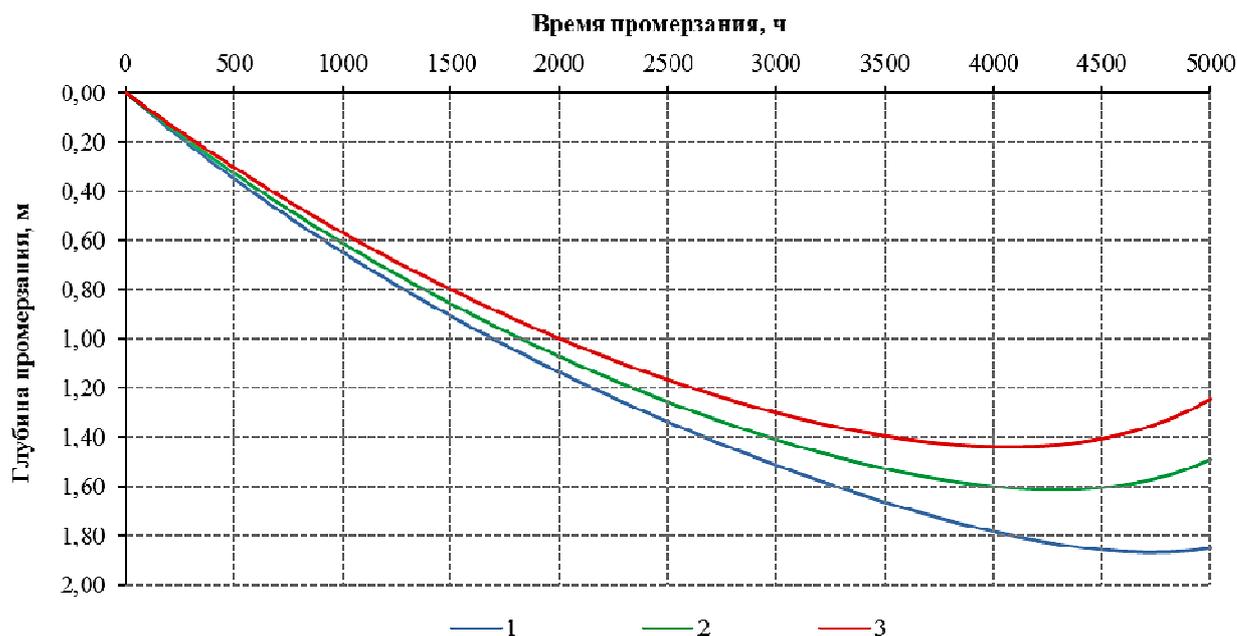


Рисунок 6 – Зависимости глубины промерзания ЗШС от времени по методу И.А. Золотаря: 1, 2, 3 – теоретические кривые промерзания ЗШС при соответственно первом, втором и третьем типе местности по условиям увлажнения

В основу расчета глубины промерзания по методу В.С. Лукьянова и М.Д. Головки положены несколько предпосылок. Главной предпосылкой в методе является введение в расчет величины теплового потока снизу к границе промерзания грунта. Также немаловажным является принятие термического сопротивления, температуры воздуха и соответственно теплового потока снизу постоянными величинами в процессе промерзания. В этом допущении метод похож на рассмотренный ранее метод И.А. Золотаря. Формула для определения максимальной глубины промерзания грунта за зимний период выглядит следующим образом [36]

$$\tau = \left(Q + \frac{C\theta}{2} \right) \cdot \left(\frac{\lambda\theta}{q^2} \ln \frac{\lambda\theta - qS}{\lambda\theta - q(h+S)} - \frac{h}{q} \right), \quad (33)$$

где τ – продолжительность периода промерзания, ч;
 θ – минимальная среднемесячная температура воздуха за зимний период, °С;
 Q – расход тепла на образование (плавление) льда, ккал/м³;
 C – объемная теплоемкость в мерзлом состоянии, ккал/(м³·град);
 λ – коэффициент теплопроводности в мерзлом состоянии, ккал/(м·град·ч);
 q – тепловой поток снизу из незамерзшего грунта к границе промерзания, ккал/(м²·ч);
 S – толщина слоя грунта, термическое сопротивление которого равно термическому сопротивлению слоев дорожной одежды и сопротивлению теплоотдаче с ее поверхности, м;
 h – максимальная толщина промерзшего слоя грунта за время τ , м.

Как видно, для расчета используются те же теплофизические характеристики грунта земляного полотна и дорожной одежды, определенные выше. Толщина эквивалентного слоя грунта определяется по формуле

$$S = \lambda \left(\frac{1}{\alpha} + R_u \right) = \lambda \left(\frac{1}{\alpha} + \sum_1^n \frac{l_n}{\lambda_n} \right), \quad (34)$$

где $\frac{1}{\alpha} = R_a$ – сопротивление теплоотдаче с поверхности дорожной одежды (величину α следует принимать равной 20 ккал/(м²·град·ч) [36]), (м²·град·ч)/ккал;

R_u – термическое сопротивление слоя дорожной одежды, (м²·град·ч)/ккал;

l_n – толщина слоя дорожной одежды, м;

λ_n – коэффициент теплопроводности слоя, ккал/(м·град·ч).

Величина теплового потока снизу к границе промерзания для условий Омской области принята по рекомендациям [36] $q_{рек} = 4,3$ ккал/(м²·ч). Результаты расчета термического сопротивления дорожной одежды и эквивалентного слоя представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты расчета эквивалентного слоя

№ слоя	Материал слоя	Толщина слоя h , м	Предзимняя влажность W_0 , %	Термическое сопротивление R_u слоя, (м ² ·град·ч)/ккал	Толщина эквивалентного слоя S , м
1 тип местности по условиям увлажнения					
1	Асфальтобетон	0,07	0,25	0,12	0,14
2	ЩПС	0,18	5	0,10	
3	ЗШС	–	25	–	
2 тип местности по условиям увлажнения					
1	Асфальтобетон	0,07	0,25	0,12	0,21
2	ЩПС	0,18	5	0,10	
3	ЗШС	–	40	–	
3 тип местности по условиям увлажнения					
1	Асфальтобетон	0,07	0,25	0,12	0,31
2	ЩПС	0,18	5	0,10	
3	ЗШС	–	60	–	

При анализе формулы (33) видно, что получить выражение в явном виде для расчета глубины промерзания не получится, поэтому авторами метода предлагается производить расчет по номограммам. Со своей стороны мы рекомендуем графоаналитический метод на основе формулы (33), который позволяет с достаточной точностью определить максимальное значение глубины промерзания.

Графоаналитический метод заключается в предварительном назначении глубин промерзания, расчете времени промерзания для каждой глубины по формуле (33) и дальнейшей интерполяции этих величин с определением глубины промерзания в соответствии с расчетным значением времени промерзания.

Предлагается следующая последовательность расчета:

- 1) определяем исходные данные для расчета: толщины слоев дорожной конструкции и их теплофизические характеристики, район строительства и его климатические параметры, расчетное время промерзания;
- 2) задаемся произвольными глубинами h_i с шагом Δh (от выбора величины шага зависит точность нахождения глубины промерзания) – рекомендуемое значение $\Delta h = 0,05$ м, при этом точность нахождения глубины промерзания 0,01 м;
- 3) для каждого значения h_i определяем время промерзания τ_i по формуле (33);
- 4) по полученным значениям строим график $\tau = f(h)$ (рисунок 7);
- 5) в соответствии с расчетным временем промерзания $\tau_{расч}$ определяем по графику глубину промерзания дорожной конструкции $h_{расч}$;

Последовательность расчета поясняется на рисунке 7. Необходимо отметить, что алгоритм расчета легко реализуется в современных простейших продуктах программирования, в том числе MS Excel, где автором и выполнена апробация алгоритма.

На основе формулы (33) построены графики кривых промерзания ЗШС от времени (рисунок 8). Результаты определения глубины промерзания представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты определения максимальной глубины промерзания по методу В.С. Лукьянова и М.Д. Головки

Тип местности по условиям увлажнения	Предзимняя влажность ЗШС W_0 , %	Толщина эквивалентного слоя S , м	Глубина промерзания ЗШС $h_{пр}$, м	Скорость промерзания v , см/сут
1	25	0,14	0,92	0,60
2	40	0,21	0,99	0,65
3	60	0,31	1,01	0,66

Примечание – скорость промерзания грунта земляного полотна определена по формуле (32).

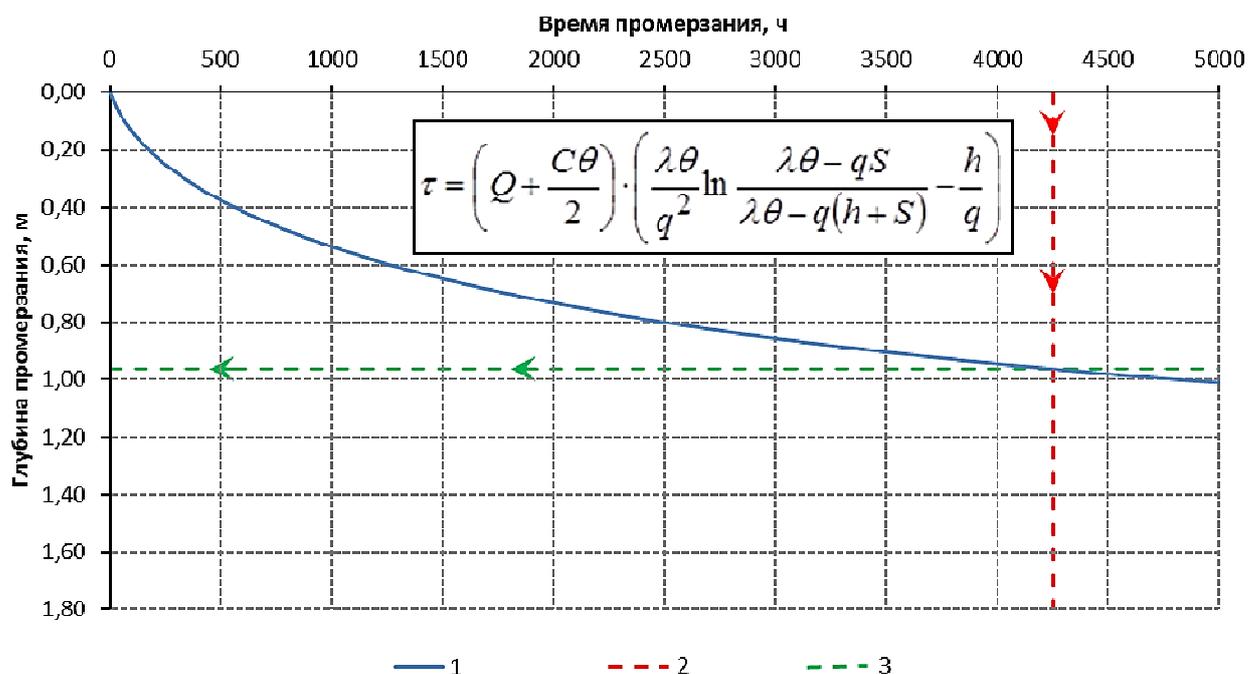


Рисунок 7 – Последовательность определения максимальной глубины промерзания по методу В.С. Лукьянова и М.Д. Головки: 1 – построение кривой промерзания по произвольным глубинам; 2 – определение точки на графике, соответствующей заданному времени промерзания; 3 – определение глубины промерзания, соответствующей заданному времени промерзания

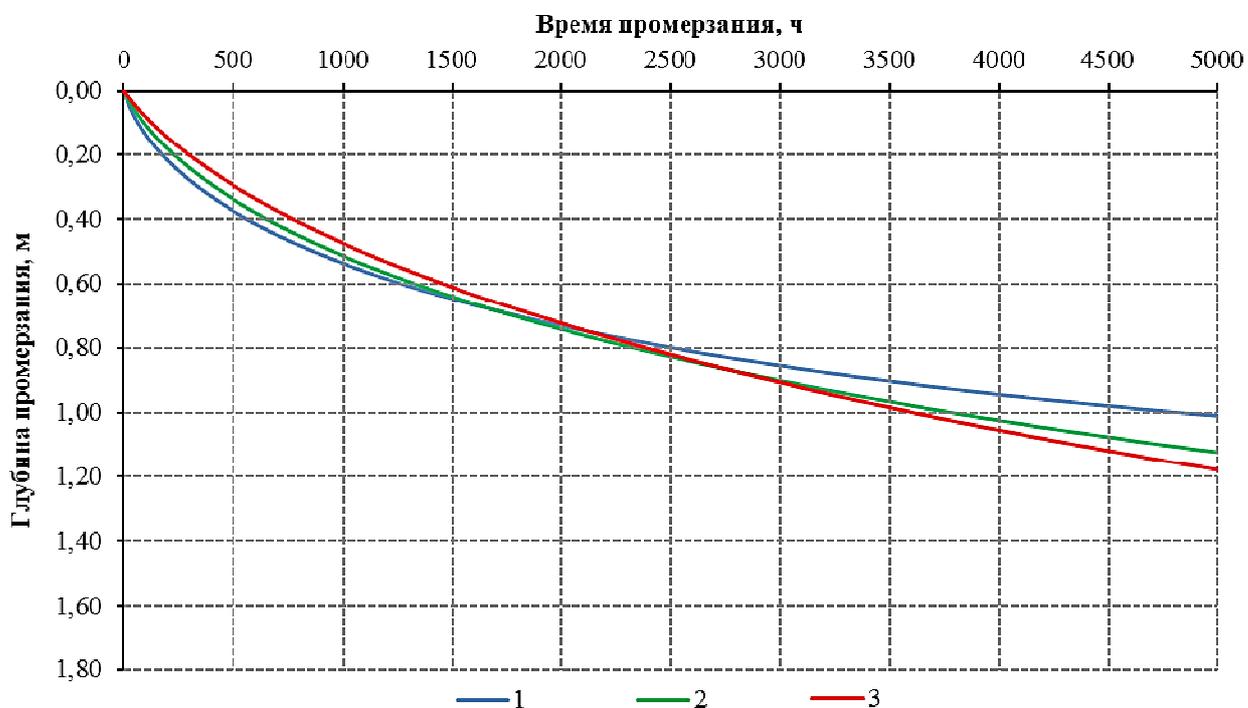


Рисунок 8 – Зависимости глубины промерзания ЗШС от времени по методу В.С. Лукьянова и М.Д. Головки: 1, 2, 3 – теоретические кривые промерзания ЗШС при соответственно первом, втором и третьем типе местности по условиям увлажнения

По результатам расчета насыпь из ЗШС высотой 1,2 м не промерзает на всю глубину даже в условиях третьего типа местности по условиям увлажнения. Стоит также обратить внимание на характер изменения глубины промерзания относительно расчетной влажности. Он отличается от рассмотренного ранее в методе И.А. Золотаря тем, что при изменении расчетной начальной влажности на максимальную глубину промерзания оказывает большее влияние изменение коэффициента теплопроводности ЗШС, нежели изменение количества скрытой теплоты образования льда. Именно поэтому глубина промерзания по данному методу при разных влажностях отличается на величину от 14 до 109 % относительно аналогичных расчетов по методу И.А. Золотаря. При увеличении расчетной влажности разница между расчетными значениями глубины промерзания уменьшается.

Используя методику расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна, реализованную в программе Freeze-1 [49, 50], произведен расчет глубины промерзания земляного полотна из ЗШС на участке с первым и третьим типом по условиям увлажнения рабочего слоя. Одномерная расчетная схема, используемая в методике, позволяет получить распределение температур по глубине земляного полотна для произвольного момента времени t .

Температура i -го элемента на шаге времени $t+\Delta t$ определяется формулой (21)

$$T_i(t + \Delta t) = T_i(t) + a_i \cdot \left\{ \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i} \cdot [T_{i-1}(t) - T_i(t)] - [T_i(t) - T_{i+1}(t)] \right\} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta h^2} + \frac{Q_\phi(\Delta t)}{C_i} \Bigg|_{T=T_\phi}$$

где $a_i = \frac{\lambda_i}{\rho_i C_i}$ – коэффициент теплопроводности i -го элемента;

Δh – высота i -го элемента, м;

ρ_i – плотность i -го элемента, кг/м³;

λ_i – коэффициент теплопроводности i -го элемента, Вт/(м·град);

C_i – удельная теплоемкость i -го элемента, Дж/(кг·град);

Q_ϕ – удельная теплота фазового перехода в грунте, Дж/кг;

T_ϕ – температура фазового перехода (замерзания жидкости в грунте), °С [50].

Характеристики ЗШС, конструктивных слоев дорожной одежды, а также грунта основания насыпи, используемые при расчете процесса распространения температурного поля, представлены в таблице 9 [64].

Задача решается путем вычисления температуры с помощью выражения (21) в двойном цикле – по глубине с шагом Δh и времени с шагом Δt . Результат расчета в программе приведен на рисунке 9.

Таблица 9 – Расчетные характеристики материалов дорожной конструкции

№ п/п	Наименование материала (расположение)	Расчетные характеристики					
		Плотность твердых частиц ρ_s , кг/м ³	Влажность W , д.е.	Удельная теплоемкость твердых частиц C_s , Дж/кг/град	Коэффициент теплопроводности в талом состоянии λ_m , Вт/м/град	Коэффициент теплопроводности в мерзлом состоянии λ_m , Вт/м/град	Температура замерзания (фазовых переходов) T_ϕ , °C
1	Асфальтобетон (покрытие)	2300	-	1420	0,75	0,70	0,0
2	Щебень (основание)	2650	0,05	920	1,16	1,40	0,0
3	Золошлаковая смесь (земляное полотно)	2120	0,25 / 0,60	1410	0,39 / 0,91	0,60 / 1,40	-0,3
4	Суглинок легкий (основание насыпи)	2700	0,17	900	1,33	1,51	-0,7

Примечания:

1. Для асфальтобетонного слоя в графе «Плотность твердых частиц» указана плотность материала слоя.
2. Значения теплофизических характеристик ЗШС даны для влажности **25/60** % по массе соответственно.

Главной целью расчета является определение глубины зоны морозного пучения под дорожной одеждой.

На рисунке 9 она обозначена как $H_{нуч}$, а соответствующая ей зона обозначена цифрой 4. $H_{фаз}$ – максимальная глубина промерзания грунта, а соответствующая ей линия 1 – линия промерзания (фазовых переходов). Значения $H_{нуч}$ и $H_{фаз}$ отсчитываются от низа дорожной одежды. Линия 2 ограничивает зону оттаивания грунта снизу, которое происходит при $T = 0^\circ\text{C}$. Завершение оттаивания соответствует точке встречи двух нулевых изотерм – нижней (линия 2) и верхней (линия 3), которая описывает траекторию оттаивания грунта с поверхности.

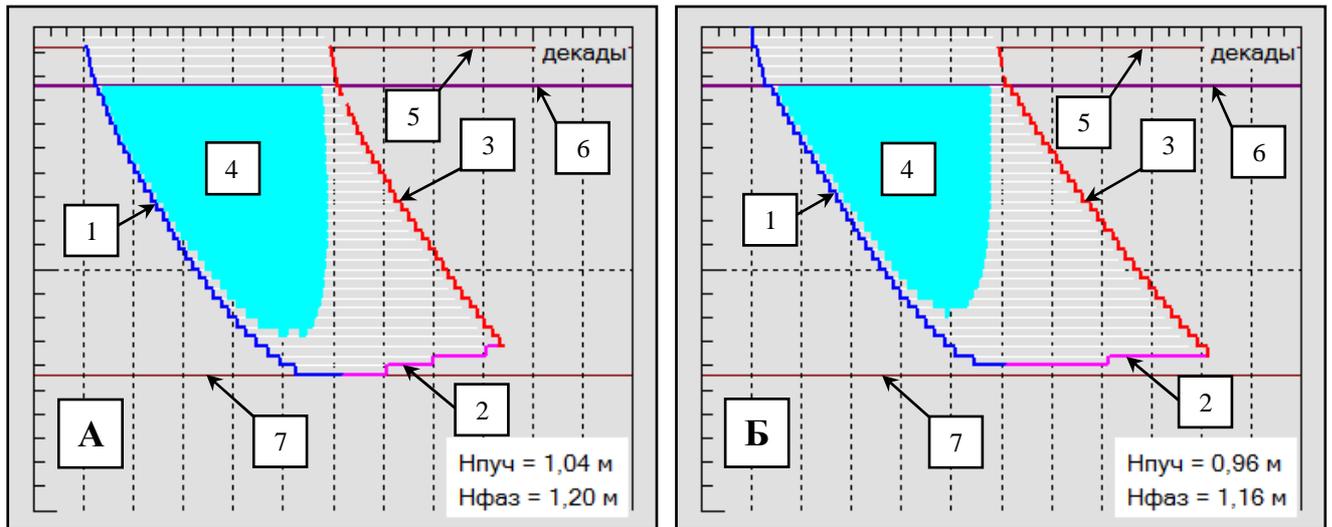


Рисунок 9 – Изменение глубины промерзания земляного полотна из ЗШС во времени (дата начала – 1 октября 2010 г.): А – Влажность ЗШС $W=0,25$; Б – Влажность ЗШС $W=0,60$; 1 – граница промерзания ЗШС ($T_{\phi} = \text{минус } 0,3^{\circ}\text{C}$); 2, 3 – граница оттаивания ЗШС ($T = 0,0^{\circ}\text{C}$); 4 – зона интенсивного морозного пучения, ограниченная изотермой $T = \text{минус } 2,0^{\circ}\text{C}$; 5 – низ слоя покрытия; 6 – низ слоя основания дорожной одежды; 7 – подошва насыпи из ЗШС

Таким образом, по результатам расчета при разной влажности земляное полотно из ЗШС промерзает не полностью, грунт основания насыпи не попадает в зону интенсивного пучения. Глубина распространения изотермы $T = 0^{\circ}\text{C}$ несколько больше (на 30%) по величине относительно максимальной глубины промерзания ЗШС при влажности $W=25\%$, полученной по методу В.С. Лукьянова и М.Д. Головки. При влажности $W=60\%$, разница в значениях глубины промерзания существенно уменьшается и достигает 15%.

Однако судить об адекватности расчетных методов стоит лишь после сравнения их результатов с результатами натурных наблюдений. Сопоставление теоретических расчетов и экспериментальных данных, полученных в процессе мониторинга опытного участка из ЗШС, приведено параграфе 2.3.

2.2 Особенности влагонакопления и пучинообразования при промерзании земляного полотна из золошлаковой смеси

В качестве рассматриваемых методов расчета влагонакопления и пучинообразования приняты следующие:

- 1) Метод Н.А. Пузакова [53];
- 2) Метод И.А. Золотаря [35];
- 3) Методика проверки дорожной конструкции на морозоустойчивость по ОДН 218.046-01 [65];
- 4) Методика оценки характеристик морозоопасных свойств грунтов по ТМД 50-601-2004 [66].

Расчеты по В.И. Рувинскому и Г.М. Фельдману, упомянутые ранее, далее рассматриваться не будут т.к. мы установили, что их подходы применимы только для грунтов природного происхождения и дают значительные ошибки для техногенных грунтов.

В соответствии с тремя расчетными схемами, приведенными в параграфе 1.2, в расчете пучинообразования по Н.А. Пузакову [35, 53] имеется три расчетные зависимости для вычисления возможного пучения грунта. Для первой расчетной схемы увлажнения

$$l_{пуч1} = 1,54k_k \frac{W_0 - W_1}{\sqrt{\alpha_0} - \sqrt{\alpha_1}} \sqrt{T}; \quad (35)$$

где k_k – коэффициент влагопроводности, см²/сут;

W_0 – молекулярная влагоемкость грунта, д.ед.;

$W_1 = 3W_2$ – влажность, соответствующая количеству воды в грунте не способной к передвижению, д.ед.;

W_2 – гигроскопическая влажность, д.ед.;

α_0 – климатический параметр распространения изотермы $\theta = 0^\circ\text{C}$, см²/сут;

α_1 – климатический параметр распространения изотермы $\theta = \text{минус } 3^\circ\text{C}$, см²/сут (по рекомендациям Н.А. Пузакова $\alpha_1 = 0,25\alpha_0$);

T – время промерзания грунта, сут.

$$\alpha_0 = \frac{z^2}{2T}; \quad (36)$$

где z – глубина промерзания земляного полотна, м.

Сопоставляя формулы (31) и (36) можно сказать, что $\alpha_0 = \sqrt{2\alpha}$ [35]. Таким образом, для расчета пучения можно использовать данные из метода И.А. Золотаря по расчету глубины промерзания.

Для второй и третьей расчетных схем увлажнения расчетные зависимости пучения выглядят следующим образом

$$l_{нуч2} = 1,26(W_{oc} - W_0)\sqrt{k_k T}; \quad (37)$$

где W_{oc} – содержание капиллярно-подвешенной влаги в грунте перед промерзанием, д.ед.

$$l_{нуч3} = \frac{2,2k_k}{\alpha_0}(W_k - W_0)\left(2,3H \cdot \lg \frac{H}{H-z} - z\right); \quad (38)$$

где W_k – капиллярная (полная) влагоемкость грунта, д.ед.;

H – расстояние от поверхности грунта до уровня грунтовых (или длительно стоящих поверхностных) вод, м.

Используя результаты расчетов и лабораторных исследований, составлена таблица исходных данных по расчету величины морозного пучения (таблица 10).

Таблица 10 – Характеристики ЗШС для определения величины морозного пучения

Тип местности по условиям увлажнения	Предзимняя влажность ЗШС W , %	Влажность W_1 , %	Молекулярная влагоемкость W_0 , %	Климатические параметры		Коэффициент влагопроводности k_k , см ² /сут.	Время промерзания T , сут.
				α_0 , см/сут ^{1/2}	α_1 , см/сут ^{1/2}		
1	25	5,85	20,0	94,44	23,61	2899	153
2	40			78,51	19,63		
3	60			64,97	16,24		

Коэффициент влагопроводности для ЗШС определялся на приборе ПКВГ-Ф, предложенном Н.А. Золотаревым. Методика оценки коэффициента влагопроводности описана в [67] и соответствует основным принципам методики И.А. Золотаря [35]. Характерные влажности, необходимые для расчета, определены по стандартизированным методикам, описанным в главе 3. В третьей расчетной схеме расстояние до уровня грунтовых вод принято $H = 1,70$ м. Результаты расчета по методу Н.А. Пузакова представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты расчета величины морозного пучения по методу Н.А. Пузакова

Тип местности по условиям увлажнения	Предзимняя влажность ЗШС W , %	Расчетная величина морозного пучения ЗШС $l_{нуч}$, см
1	25	1861,0
2	40	180,5
3	60	72,4

Анализируя результаты расчета по методу Н.А. Пузакова, можно сделать вывод о том, что этот метод не подходит для расчета морозного пучения ЗШС. Величина морозного пучения, получаемая по расчету, несравнимо больше фактической глубины промерзания. Это происходит из-за аномально большого коэффициента влагопроводности ЗШС по сравнению с природными грунтами. Основываясь на экспериментальных данных, можно с уверенностью сказать, что столь большие величины морозного пучения невозможно получить при любых условиях промораживания ЗШС.

Далее рассмотрим расчет по методу И.А. Золотаря. В основе расчета лежит предпосылка о том, что величина морозного пучения обусловлена превышением объема льда над объемом пор грунта с учетом незамерзающей воды. Расчетная зависимость выглядит следующим образом (формула (22))

$$l_{\text{пуч}} = h \frac{\gamma_m}{\Delta_0} \left[1,09(W_{\text{ср}}^{\text{зим}} + W_{\text{нз}}) - (W_{\text{не}} + W_{\text{нз}}) \right]. \quad (15)$$

При расчете по данной формуле за значение средней влажности в промерзшем земляном полотне $W_{\text{ср}}^{\text{зим}}$ принята начальная влажность ЗШС перед промерзанием осенью. Количество воды, остающейся в незамерзшем состоянии, принято таким же, как и в расчете на максимальную глубину промерзания $W_{\text{нз}}=0$, в соответствии с рекомендациями по пылеватому песку. Влажность, соответствующая полной влагоемкости ЗШС $W_{\text{не}}$ определена в соответствии с ГОСТ 25100-2011 для коэффициента водонасыщения $S_r=1$. Результаты расчета для трех типов местности по условию увлажнения приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Результаты расчета величины морозного пучения по методу И.А. Золотаря

Тип местности по условиям увлажнения	Предзимняя влажность ЗШС $W=W_{\text{ср}}^{\text{зим}}$, %	Глубина промерзания $h_{\text{пр}}$ по методу И.А. Золотаря, м	Плотность сухого грунта γ_m в талом состоянии, кг/м ³	Расчетная величина морозного пучения ЗШС $l_{\text{пуч}}$, см
1	25	1,70	870	-59,7
2	40	1,55		-32,4
3	60	1,41		-2,7

На основе полученных расчетных значений можно сделать вывод о том, что этот метод тоже некорректно описывает величину морозного пучения ЗШС. Связано это, по всей видимости, также со специфическими свойствами ЗШС, в том числе влажностью полной влагоемкости. Для ЗШС принята $W_{ne} = 68\%$. Таким образом, при любой расчетной влажности по формуле (22) получается отрицательное значение, что должно означать, что объем пор грунта больше объема льда и незамерзшей воды. То есть все возможное морозное пучение грунта компенсируется объемом пор между частицами и пористостью частиц ЗШС.

Как видно практически все общепринятые теоретические методы оценки величины морозного пучения грунтов дают совершенно разные результаты. Также в некоторых теоретических методах нельзя учесть специфические свойства ЗШС. Чтобы определиться с рекомендуемой методикой расчета были проанализированы инженерные методики оценки, принятые в современных нормативно-методических документах: ОДН 218.046-01 и ТМД 50-601-2004.

Методика проверки дорожной конструкции на морозоустойчивость по ОДН 218.046-01 основана на многолетних исследованиях и применяется при расчете возможного пучения грунта в зависимости от степени пучинистости грунта, его коэффициента уплотнения, уровня грунтовых вод. То есть необходимо провести предварительные исследования по определению степени пучинистости конкретного грунта в предполагаемых условиях эксплуатации дороги. Формула для определения расчетного пучения грунта выглядит следующим образом

$$l_{нуч} = l_{нуч.ср} \cdot K_{УГВ} \cdot K_{пл} \cdot K_{ср} \cdot K_{нагр} \cdot K_{вл}; \quad (39)$$

где $l_{нуч.ср}$ – величина морозного пучения при осредненных условиях в зависимости от толщины дорожной одежды и группы грунта по степени пучинистости, см;

$K_{УГВ}$ – коэффициент, учитывающий влияние расчетной глубины залегания уровня грунтовых или длительно стоящих поверхностных вод;

$K_{пл}$ – коэффициент, зависящий от степени уплотнения грунта рабочего слоя;

$K_{ср}$ – коэффициент, учитывающий влияние гранулометрического состава грунта основания насыпи или выемки;

$K_{нагр}$ – коэффициент, учитывающий влияние нагрузки от собственного веса вышележащей конструкции на грунт в промерзающем слое и зависящий от глубины промерзания;

$K_{вл}$ – коэффициент, зависящий от расчетной влажности грунта.

Расчетные характеристики ЗШС и коэффициенты, определяемые в методике по номограммам и таблицам, приняты как для песка пылеватого. Степень пучинистости ЗШС определена опытным путем (см. главу 3). В качестве расчетной глубины промерзания приняты значения, полученные при мониторинге опытного участка (см. главу 4). Результаты расчета величины пучения приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты расчета величины пучения по методике ОДН 218.046-01

Тип местности по условиям увлажнения	Предельная влажность ЗШС W , %	Опытная глубина промерзания $h_{пр}$, м	Расчетные параметры по ОДН 218.046-01						Расчетная величина морозного пучения ЗШС $l_{пуч}$, см
			$l_{пуч,ср}$, см	$K_{УГВ}$, д.ед.	$K_{пл}$, д.ед.	$K_{зр}$, д.ед.	$K_{назр}$, д.ед.	$K_{вл}$, д.ед.	
1	25	1,27	1,7	0,43	1,2	1,0	1,1	1,0	0,96
2	40	1,17	5,9	0,58	1,2	1,0	1,1	1,3	5,87
3	60	1,20	9,0	0,58	1,2	1,0	1,1	1,8*	12,40

Примечание. * – значение коэффициента получено методом экстраполяции для $W/W_m=1,43$

Отличие методики оценки характеристик морозоопасных свойств грунтов по ТМД 50-601-2004 (разработана В.Д. Карловым) заключается в том, что в расчете используется непосредственно степень пучинистости грунта определяемая по следующей формуле

$$\varepsilon_f = 0,09S_r e (\rho_d / \rho_s) \chi; \quad (40)$$

где S_r – степень влажности грунта перед промерзанием, д.ед.;

e – коэффициент пористости грунта, д.ед.;

ρ_d – плотность скелета грунта, кг/м³;

ρ_s – плотность минеральных частиц грунта, кг/м³;

χ – коэффициент, учитывающий влияние подземных вод на интенсивность морозного пучения песков вследствие миграции влаги к границе промерзания.

Формула (40) разработана для оценки степени пучинистости пылеватых и мелких песков. Степень влажности, коэффициент пористости и плотности грунта и частиц, используемые в расчете, определены по стандартизированным методикам (ГОСТ 25100-2011 [31], ГОСТ 5180-84 [68], ГОСТ 22733-2002 [69]). Коэффи-

коэффициент χ определяется в зависимости от расстояния границы промерзания грунтов до уровня подземных вод по следующей формуле

$$\chi = (z_{\max} + d_{ws}) / (z + d_{ws}); \quad (41)$$

где z – расстояние от границы сезонного промерзания до уровня подземных вод, м;
 z_{\max} – то же, когда влияние подземных вод можно не учитывать (для песков пылеватых $z_{\max} = 1,0$, в соответствии с рекомендациями);
 d_{ws} – глубина зоны всасывания, в пределах которой происходит миграция влаги к границе промерзания, принимаемая по рекомендациям для песков пылеватых 0,40 м.

Величина абсолютной деформации морозного пучения грунта определяется из выражения

$$f_f = \varepsilon_f \cdot d_f; \quad (42)$$

где d_f – глубина промерзания грунта, м.

В соответствии с этой методикой определены величины деформаций морозного пучения для ЗШС (таблица 14).

Таблица 14 – Результаты расчета величины пучения по методике ТМД 50-601-2004

Тип местности по условиям увлажнения	Предельная влажность ЗШС $W, \%$	Опытная глубина промерзания $h_{пр}, \text{ м}$	Расчетные показатели по ТМД 50-601-2004				Расчетная величина морозного пучения ЗШС $l_{пуч}, \text{ см}$
			$S_r, \text{ д.ед.}$	$z, \text{ м}$	$\chi, \text{ д.ед.}$	$\varepsilon_f, \text{ д.ед.}$	
1	25	1,27	0,37	1,2	0,88	0,017	2,18
2	40	1,17	0,60	0,5	1,56	0,049	5,70
3	60	1,20	0,90	0,2	2,33	0,110	13,15

Анализируя результаты расчетов по двум последним методикам, можно сделать вывод о том, что расчетные величины морозного пучения ЗШС близки между собой и вписываются в рамки логического ожидания и экспериментальных исследований. Большую роль в величине деформации пучения в последней методике влияет назначение расстояния до уровня грунтовых (или длительно стоящих поверхностных) вод.

2.3 Сравнение методов расчета водно-теплового режима с учетом особенностей свойств золошлаковых смесей

Чтобы рекомендовать или отвергнуть метод расчета влагонакопления, промерзания, морозного пучения ЗШС результаты вычислений теоретических методов расчета необходимо сравнить между собой и результатами лабораторных испытаний и опытного строительства. Для проверки достоверности расчётов построена дорожная конструкция опытного участка из ЗШС [70], описанная в параграфе 2.1. Мониторинг ее состояния проводился в течение трех лет, в процессе которого оценивалась глубина промерзания и величина деформации морозного пучения земляного полотна при разной влажности ЗШС. Технология мониторинга и проведения испытаний описана в главе 4.

В таблице 15 приведено сопоставление данных теоретических расчетов по разным моделям и результаты мониторинга глубины промерзания земляного полотна из ЗШС на опытном участке. На основе этих данных получены относительные погрешности определения глубины промерзания по каждому методу (таблица 16).

Таблица 15 – Сравнение результатов теоретических расчетов глубины промерзания и результатов мониторинга опытного участка

Тип местности по условиям увлажнения	Расчетная влажность ЗШС W, д.ед.	Глубина промерзания, м			
		по методу И.А. Золотаря	по методу В.С. Лукьянова и М.Д. Головки	по методике расчета А.Л. Исакова	опытный участок
1	0,25	1,70	0,92	1,20	1,27
2	0,40	1,55	0,99	-	1,17
3	0,60	1,41	1,01	1,16	1,20

Примечание – результаты расчётов и измерений получены по разным годам наблюдений.

Как видно, метод И.А. Золотаря и метод В.С. Лукьянова и М.Д. Головки дает относительную погрешность, превышающую 15% во всех расчетных схемах, что ставит под сомнение возможность их использования для расчета глубины промерзания земляного полотна из ЗШС.

Таблица 16 – Относительные погрешности теоретических методов расчета глубины промерзания ЗШС

Тип местности по условиям увлажнения	Расчетная влажность ЗШС W , д.ед.	Относительная погрешность определения глубины промерзания, %		
		по методу И.А. Золотаря	по методу В.С. Лукьянова и М.Д. Головки	по методике расчета А.Л. Исакова
1	0,25	33,9	27,6	5,5
2	0,40	32,5	15,4	-
3	0,60	17,5	15,8	3,3

Методика численного моделирования А.Л. Исакова наибольшим образом подходит в данном случае, так как относительная погрешность при расчете не превышает 10%, как в случае низкой влажности, так и влажности близкой к полной влагоемкости ЗШС. Не смотря на недостатки методики А.Л. Исакова, описанные в параграфе 1.2, ее можно рекомендовать в качестве расчетной для определения глубины промерзания земляного полотна из ЗШС.

Сравнение методов прогнозирования величины морозного пучения производилось также с использованием результатов мониторинга опытного участка [71, 72] (таблица 17). Методика оценки морозного пучения опытного участка описана в главе 4. Для определения наиболее подходящей методики определены относительные погрешности расчета для каждого метода (таблица 18).

Таблица 17 – Сравнение результатов теоретических расчетов величины деформации морозного пучения и результатов мониторинга опытного участка

Тип местности по условиям увлажнения	Расчетная влажность ЗШС W , д.ед.	Величина деформации морозного пучения ЗШС, см				
		по методу Н.А. Пузаткова	по методу И.А. Золотаря	по ОДН 218.046-01	по ТМД 50-601-2004	опытный участок
1	0,25	1861,0	-59,7	0,96	2,18	1,8
2	0,40	180,5	-32,4	5,87	5,70	3,2
3	0,60	72,4	-2,7	12,40	13,15	4,4

Таблица 18 – Относительные погрешности теоретических методов определения величины деформации морозного пучения

Тип местности по условиям увлажнения	Расчетная влажность ЗШС W , д.ед.	Относительная погрешность определения величины деформации морозного пучения ЗШС, %			
		по методу Н.А. Пузакова	по методу И.А. Золотаря	по ОДН 218.046-01	по ТМД 50-601-2004
1	0,25	103288,9	–	46,7	21,1
2	0,40	5540,6	–	83,4	78,1
3	0,60	1545,5	–	181,8	198,9

По результатам сравнения методов расчета величины деформации морозного пучения ЗШС можно сделать следующие выводы.

- 1) Метод Н.А. Пузакова и метод И.А. Золотаря не подходят для расчета величины морозного пучения ЗШС, так как дают неадекватные результаты абсолютной величины, а также очень большую относительную погрешность при любой расчетной схеме.
- 2) Методики оценки величины морозного пучения ЗШС по ОДМ 218.046-01 и по ТМД 50-601-2004 дают схожие и более близкие к реальности результаты, чем методы Н.А. Пузакова и И.А. Золотаря, однако ошибки расчетов по этим методикам также слишком велики (более 50%).

Из рассмотренных выше методик по оценке морозного пучения стоит отметить методику В.Д. Карлова (ТМД 50-601-2004). Она наилучшим образом подходит к расчету пучения ЗШС в земляном полотне, так как использует показатели относительного водонасыщения и пористости, что и отличает в большей мере ЗШС от природных грунтов. Также в формуле (40) учитываются плотность скелета грунта и плотность частиц грунта – эти характеристики тоже существенно определяют специфичность ЗШС.

Однако, не смотря на все плюсы методики, она все же дает весьма завышенные значения величины деформации морозного пучения в случаях второго и третьего типа местности по условиям увлажнения (влажность ЗШС больше оптимальной). Поэтому автором принято решение вместо формулы (40) использовать

для прогнозирования величины морозного пучения ЗШС следующую эмпирическую зависимость

$$\varepsilon_f = 1,05 \cdot K_n \frac{(0,1W_{отн}^2 - 0,008W_{отн})}{100 \cdot \varepsilon_{f0}} [87,3 - 155,6K_{упл} - 7,3t_{отн} + 75K_{упл}^2 + 0,8t_{отн}^2 + 3K_{упл} \cdot t_{отн}], \quad (43)$$

где 1,05 – коэффициент запаса;

K_n – поправочный коэффициент, зависящий от типа местности по условиям увлажнения (назначается по графику 10 или таблице 19), д.ед.;

$W_{отн}$ – относительная влажность ЗШС, д.ед.;

$K_{упл}$ – коэффициент уплотнения рабочего слоя земляного полотна из ЗШС, д.ед.;

$t_{отн}$ – относительная температура промерзания ЗШС, д.ед.;

ε_{f0} – относительная деформация пучения ЗШС, полученная в испытаниях в «открытой» системе при постоянных коэффициенте уплотнения и температуре промораживания (значение $\varepsilon_{f0}=0,043$ при $K_{упл}=1,0$ и $t_{отн}=0,67$), д.ед.

$$W_{отн} = \frac{W}{W_{нс}}, \quad (44)$$

где W – расчетная влажность ЗШС, д.ед.;

$W_{нс}$ – влажность, соответствующая полной влагоемкости ЗШС ($W_{нс}=0,68$), д.ед.

$$t_{отн} = \frac{t}{t_0}, \quad (45)$$

t – расчетная температура промерзания ЗШС, д.ед.;

t_0 – температура промерзания ЗШС, соответствующая основному уровню варьирования при планировании эксперимента ($t_0 = \text{минус } 6^\circ\text{C}$).

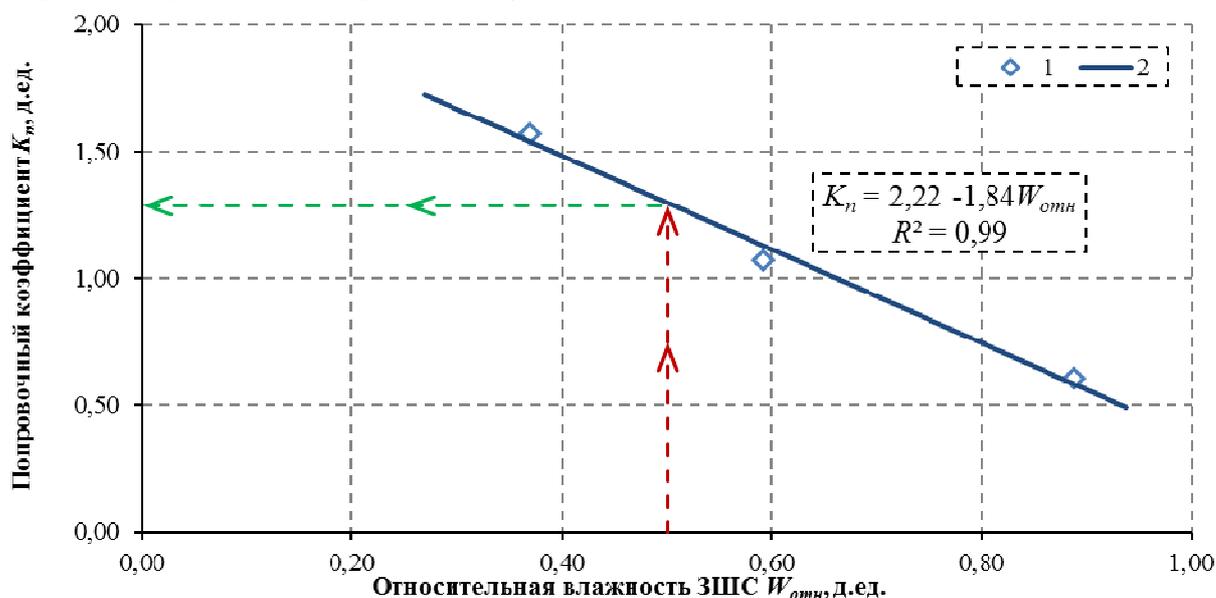


Рисунок 10 – Назначение поправочного коэффициента K_n : 1 – экспериментальные значения коэффициента; 2 – эмпирическая зависимость

Таблица 19 – Назначение поправочного коэффициента K_n

Тип местности по условиям увлажнения	Коэффициент увлажнения ЗШС K_n , д.ед.
1	1,54
2	1,13
3	0,59

Назначение коэффициента K_n производится по графику на рисунке 10 в случае известного расчетного значения относительной влажности ЗШС перед промерзанием $W_{отн}$. В случае, когда влажность ЗШС неизвестна, рекомендуется пользоваться таблицей 19, назначая коэффициент K_n в зависимости от типа местности по условиям увлажнения.

Формулу (43) рекомендуется применять при условии наличия данных о коэффициенте уплотнения и влажности ЗШС в исследуемый период. Расчетную температуру промерзания ЗШС t следует назначать в зависимости от дорожно-климатической зоны, в которой расположена дорога (таблица 20). При назначении расчетных температур промерзания были учтены рекомендации приложения 6 ВСН 46-83 [73] и справочные данные [74]. При назначении дорожно-климатической зон и подзон проектирования дороги необходимо учитывать результаты современных исследований по районированию [75, 76].

Таблица 20 – Назначение расчетной температуры промерзания ЗШС

Номер дорожно-климатической зоны	Расчетная температура промерзания ЗШС t , минус °С
I	10
II	8
III	6
IV	4

Эмпирическая зависимость (43) получена путем математической обработки результатов лабораторных испытаний ЗШС на промерзание при различных значениях влажности, коэффициента уплотнения и температуры промораживания. Методика проведения испытаний и обработка результатов представлены в параграфе 3.6.

При определении величины деформации морозного пучения ЗШС по формуле (43) в соответствии с данными об опытном участке назначены следующие параметры: $K_{\text{ум}}=0,95$, t =минус 6°С. Результаты расчета приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Результаты расчета величины пучения ЗШС по эмпирической зависимости

Тип местности по условиям увлажнения	Расчетная влажность ЗШС W , д.ед.	Величина деформации морозного пучения ЗШС, см		Относительная погрешность определения величины деформации морозного пучения ЗШС, %
		опытный участок	эмпирическая зависимость по формуле (36)	
1	0,25	1,8	1,85	2,0
2	0,40	3,2	3,55	9,8
3	0,60	4,4	4,47	0,5

Сравнивая результаты расчетов по эмпирической зависимости с результатами по ранее рассмотренным методикам, можно сказать, что формула (43) более адекватно описывает зависимость величины морозного пучения ЗШС от расчетной влажности. Погрешности расчета по формуле (43) не больше 10% при всех расчетных влажностях. Происходит это за счет введения поправочного коэффициента K_n , без которого эмпирическая зависимость может давать относительную погрешность больше 15%. Здесь стоит отметить несколько возможных предпосылок этого явления.

Во-первых, при моделировании расчетной влажности на опытном участке реальной дорожной конструкции достаточно сложно добиться равномерного распределения влажности по всему объему ЗШС.

Во-вторых, эмпирическая зависимость (43) получена после обработки результатов испытаний ЗШС по методике ГОСТ 28622-90 [77] и ГОСТ 28622-2012 [78]. Методика испытаний для определения степени пучинистости грунта описывает максимально неблагоприятные условия промерзания грунта в условиях непрерывного подтока влаги к границе промерзания. Достижение таких условий в масштабах опытного участка не представляется возможным. Таким образом, эксперименты по определению степени пучинистости грунта по стандартизирован-

ной методике в большинстве случаев дают завышенные результаты, особенно при влажности близкой к полной влагоемкости грунта.

Несмотря на перечисленные недостатки, эмпирическую зависимость рекомендуется использовать при определении степени пучинистости ЗШС при относительной влажности по формуле (44) $w_{отн} \leq 0,7$. При проектировании земляного полотна с относительной влажностью ЗШС $w_{отн} > 0,7$, следует уменьшать расчетную влажность ЗШС за счет организации мероприятий по регулированию водно-теплового режима земляного полотна.

Выводы по второй главе

Основываясь на проведенном анализе теоретических и инженерных методов расчета глубины промерзания и величины пучения грунтов применительно к золошлаковым смесям, можно сделать следующие выводы:

- Проанализированные теоретические методы расчета глубины промерзания земляного полотна (И.А. Золотарь, В.С. Лукьянов и М.Д. Головкин, В.И. Рувинский и др.) применимы в граничных условиях, которые описывают свойства традиционных природных грунтов;
- Современные методы численного моделирования позволяют учитывать специфические свойства техногенных грунтов, таких как ЗШС, и получать адекватные результаты прогнозирования глубины промерзания;
- В качестве рекомендуемого метода расчета предлагается методика определения глубины промерзания А.Л. Исакова, реализованная в программе «Freeze-1»;
- Аналогично методам расчета глубины промерзания, традиционные методы расчета влагонакопления и пучинообразования (И.А. Золотарь, Н.А. Пузаков, В.И. Рувинский, Г.М. Фельдман) не позволяют получить приемлемых результатов при использовании ЗШС в земляном полотне;
- Инженерные методы расчета, представленные в нормативных документах ОДМ 218.046-01 и ТМД 50-601-2004 дают более адекватные результаты

расчета, однако относительные погрешности расчетов превышают 15%, а при увеличении влажности ЗШС еще больше возрастают;

- В качестве расчетной методики оценки морозного пучения ЗШС предложена математическая модель в виде формулы (43), полученная после обработки результатов лабораторных исследований и корректировки с учетом мониторинга опытного участка;
- Относительная погрешность расчетов по предложенной математической модели не превышает 10% относительно результатов мониторинга опытного участка.

3 Экспериментальные исследования свойств золошлаковых смесей как техногенных грунтов для земляного полотна

3.1 Общие сведения о получении золошлаковых смесей

Большинство тепловых электростанций России (особенно в Сибири) сжигают в котлоагрегатах уголь в тонкомолотом (пылевидном) состоянии. На рисунке 11 представлена типичная схема поставки, переработки, сжигания угля и удаления золошлаков на ТЭС [79].

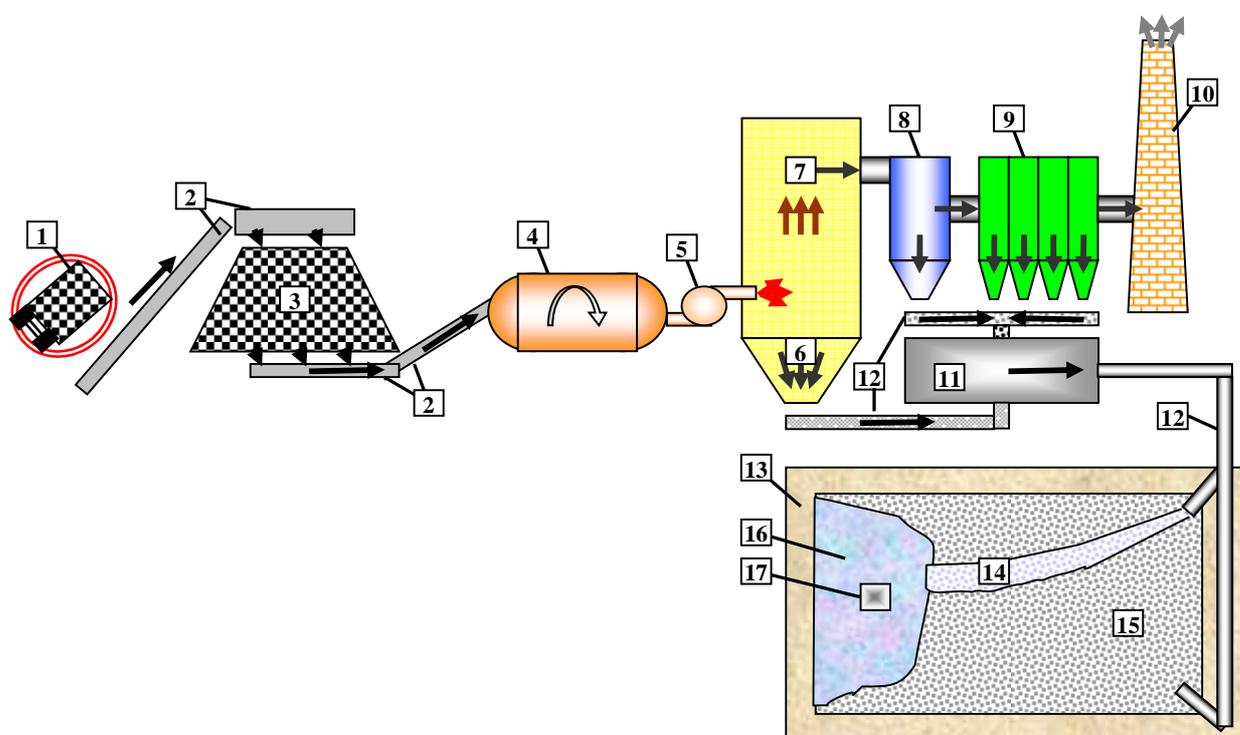


Рисунок 11 – Схема сжигания угля, улавливания и удаления золы-уноса, шлака и золошлаковой смеси на ТЭС: 1 – разгрузка угля вагоноопрокидывателем; 2 – транспортёры; 3 – склад угля; 4 – система пылеприготовления с шаровыми, молотковыми и др. мельницами; 5 – система подготовки, подачи и сжигания пылевидного топлива; 6 – сухое или жидкое (в виде расплава) удаление шлака из котлоагрегата; 7 – дымовые газы с золой-уноса; 8 – батареи циклонов (первая ступень); 9 – электрофильтры (вторая ступень); 10 – дымовая труба; 11 – багерная насосная; 12 – система пульпопроводов; 13 – дамба золоотвала; 14 – русловые потоки пульпы; 15 - золошлаковый материал в зоне надводного намыва; 16 - осветительный пруд и зольная зона подводного намыва; 17 - водосборный колодец

Зола-унос изымается из дымовых газов с помощью одной или двух ступеней улавливания – батарейные циклоны с сухой или мокрой системой улавливания и

электрофильтры. Двухступенчатая система обеспечивает до 98 % улавливания золы-уноса из отходящих дымовых газов, одноступенчатая – от 70 % до 90 %.

Топливный шлак – грубодисперсная часть золы из минеральной части твёрдого топлива, агрегируется в нижней части топочного пространства котлоагрегатов и удаляется снизу топки в спёкшемся или жидком состоянии (в виде расплава). Спёкшийся пористый шлак смывается водой и попадает в багерную насосную. В котлоагрегатах с жидким шлакоудалением шлаковый расплав выливается в ванны с водой, гранулируется за счёт резкого охлаждения и также подаётся в багерную насосную.

Зола-унос после улавливания смывается водой и смешивается со шлаком в багерной насосной с образованием золошлаковой смеси. Обычно золошлаковая смесь содержит от 5 до 20 % шлака, остальное – зола-унос. Золошлаковая смесь (ЗШС) в виде пульпы удаляется с территории ТЭС по металлическим или пластмассовым трубопроводам в золоотвал, где осаждается и хранится.

На некоторых ТЭС России имеются системы отбора сухой золы-уноса. Отбор осуществляется из циклонов с сухим улавливанием и (или) с разных полей электрофильтров. Пневмотранспортом по трубам зола-унос подаётся в закрытые ёмкости (силосы, бункеры и т.п.), из которых сухая зола отпускается потребителям.

Процесс горения углей в топке котлоагрегата описан в [59]. Наличие большого объема пор в зольных частицах объясняется, во-первых, диффузией кислорода в процессе горения, как к поверхности частицы, так и внутрь частицы после образования на ее поверхности зольной оболочки. Во-вторых, из-за наличия в угольном топливе минеральных остатков и органических включений в процессе их дегидратации и диссоциации образуется газообразная фаза. За счет ее роста происходит вспучивание зольной частицы, находящейся в пиропластическом состоянии и образуются закрытые и открытые поры, в зависимости от их контакта с окружающим воздухом.

3.2 Химико-минералогический состав золошлаковых смесей

Химический состав ЗШС в значительной мере определяет свойства этих материалов. В тоже время неоднородность минеральной составляющей твёрдых топлив предопределяет и колебания химического состава и некоторых свойств зол и шлаков ТЭС.

По химическому составу большинство золошлаков ТЭС России относятся к кислым [26, 79-81] и не способны к самостоятельному твердению даже при тепловлажностной обработке. Только зола-унос от сжигания бурого угля некоторых разрезов Канско-Ачинского месторождения содержит значительное количество оксида кальция и может проявлять вяжущие свойства. В тоже время активные золы углей этого месторождения могут содержать существенное количество сульфатов и оксида магния, которые зачастую оказывают негативное влияние на процесс твердения вяжущего, включающего эти золы.

В таблице 22 приведен химический состав ЗШС ТЭС Западной Сибири, исследованных в лаборатории СибАДИ.

Таблица 22 – Содержание оксидов в золошлаковых смесях ТЭС Западной Сибири

Вид сжигаемого угля (ТЭС)	Содержание элементов, % по массе в расчете на оксиды								П.п.п.
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	
Экибастузский (ТЭЦ-4 и ТЭЦ-5 г. Омска)	54,0	24,0	10,0	6,0	13,0	1,8	0,4	1,3	4,8
Кузнецкий (ТЭЦ-2 г. Омска)	61,0	26,0	8,0	1,2	0,6	0,8	0,4	1,1	8,8
Кузнецкий (Барабинская ГРЭС)	51,1	14,6	14,0	3,2	1,8	2,2	0,8	0,04	11,4
Кузнецкий (ГРЭС-2 г. Томска)	60,0	24,0	6,0	3,9	0,6	0,3	0,5	0,5	3,9
Кузнецкий (Кемеровская ГРЭС)	58,9	19,5	9,3	5,3	1,8	0,3	1,8	0,25	4,4
Кузнецкий (Беловская ГРЭС)	58,9	18,8	7,2	5,5	2,4	0,9	2,7	0,25	5,3

Примечания:

1. П.п.п. – потеря массы при прокаливании (содержание горючих веществ).
2. В таблице даны средние значения содержания оксидов и п.п.п.

Химический состав золошлаковых смесей, получаемых на ТЭЦ г. Омска и других городов, соответствует диапазону изменения оксидов углей приведенных в Приложении А [82].

Применимость ЗШС от сжигания того или иного угля необходимо устанавливать по суммарному содержанию оксидов СаО и MgO. В качестве грунта земляного полотна рекомендуется применять ЗШС с низким содержанием этих оксидов и относящихся по классификации ОДМ 218.2.031-2013 [26] к кислым или сверхкислым.

Фазово-минералогический состав ЗШС включает неорганическую и органическую составляющие. Неорганическая фаза, в свою очередь, состоит из составляющих:

- *аморфной*, представленной стеклом и аморфизированным глинистым веществом;
- *кристаллической*, включающей слабоизмененные зёрна минералов исходного топлива (кварц, полевые шпаты и другие, термически устойчивые минералы) и кристаллические новообразования, возникшие при сжигании топлива (муллит, гематит, алюмосиликат кальция и др.).

Большинство минеральной составляющей («пустой породы») топливных углей представлены глинистыми грунтами, имеющими монтмориллонитовый, каолинитовый и гидрослюдистый характер. Минеральная составляющая углей Канско-Ачинского бассейна содержит значительное количество известняка. В процессе сгорания топлива глинистое вещество подвергается кратковременному нагреву (температура в ядре факела достигает 1400-1600 °С), вследствие чего это вещество дегидратирует и остекловывается.

Стекло в золах может быть силикатного, алюмосиликатного и железисто-алюмосиликатного состава. Аморфизированные глинистые вещества - метакаолинит и слабоспекшееся аморфизированное глинистое вещество, а также спекшиеся и частично остеклованные частицы определяют химическую активность золы, форму и характер поверхности зольных частиц.

Частицы большинства зол имеют сферическую форму и гладкую остеклованную фактуру поверхности. Однородность частиц различна. Более однородны частицы, состоящие полностью из стекла. Имеются частицы, внутренняя часть которых не расплавилась и состоит из мельчайших минеральных и коксовых зёрен. Встречаются и полые шарики в результате вспучивания стекла в момент образования частицы. Размер частиц – от 3 до 150 мкм (рисунок 12).

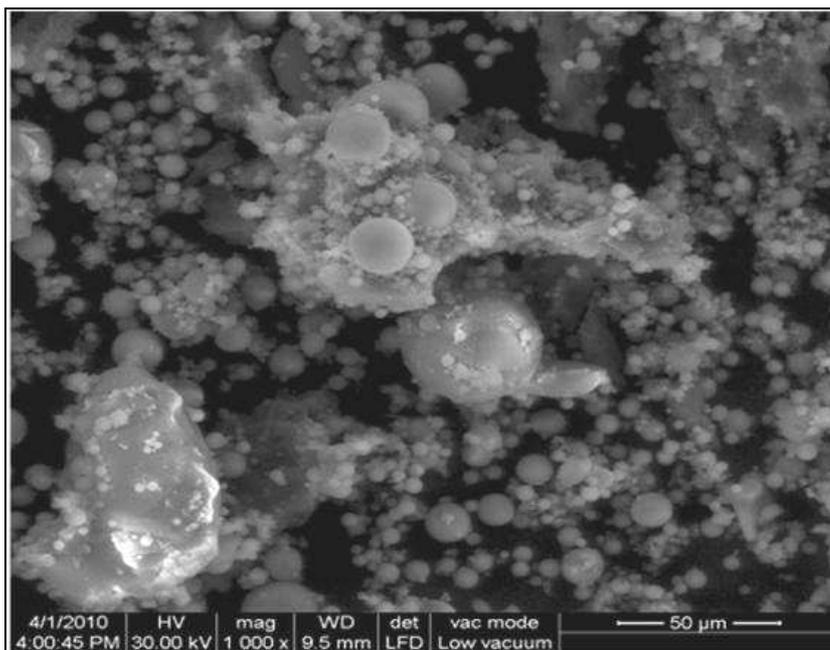


Рисунок 12 – Внешний вид золы-уноса под микроскопом

Могут также образовываться стекловидные частицы неправильной формы. У некоторых частиц поверхность губчатая из-за различного количества пузырьков. Они также могут содержать во внутренней части большое количество кристаллических веществ.

В крупных фракциях золы содержатся агрегаты, образовавшиеся в результате спекания множества мелких зёрен. Они неоднородны и имеют низкую прочность.

При недостаточно высокой температуре сгорания топлива, краткости пребывания при высокой температуре и тугоплавкости его минеральной составляющей образуются золы, состоящие из аморфизированного глинистого вещества, представленного пористыми частицами неправильной формы. Эти частицы имеют высокое водопоглощение.

Наиболее типичным представителем тугоплавких зол являются продукты сгорания Экибастузских углей. Минеральная составляющая этих углей имеет каолиновый и накритовый состав [83] с малым количеством окислов-плавней (Fe_2O_3 , CaO , MgO).

Следствием различий химико-минералогического состава минеральной составляющей углей («пустой» породы») является разный фазовый состав зол (таблица 23).

Таблица 23 – Фазовый состав зол-уноса

Угольные бассейны	Содержание веществ и минералов, % по массе			
	аморфизированное глинистое вещество	стекло различных оттенков	оплавленный кварц, муллит	углистое вещество
Экибастузский	40-60	15-35	5-10	2-10
Кузнецкий	10-30	50-75	5-15	4-12

Примечания: В таблице указаны диапазоны изменения содержания веществ и минералов

Шлаки по сравнению с золами содержат меньше органических остатков и аморфизированного глинистого вещества, но больше стеклофазы (до 95 %). Обусловлено это тем, что шлаки большее время находятся в высокотемпературной зоне топки (особенно это относится к котлам с жидким шлакоудалением). Кристаллическая фаза в них представлена кварцем, муллитом, магнетитом и т.д.

3.3 Физико-механические свойства золошлаковых смесей

Важнейшими физическими свойствами ЗШС как материала для сооружения земляного полотна являются зерновой (гранулометрический) состав, плотность и влажность.

Зерновой состав является основным показателем дисперсности золошлаков. Он зависит от множества факторов: конструкции топок котлоагрегатов и режимов их эксплуатации, системы пылеприготовления и подачи топлива, конструкции и режима работы золоулавливающих систем, системы приготовления и дальности транспортировки пульпы, типа золоотвала и системы гидронамыва, от места от-

бора пробы (по площади и глубине) относительно выпуска пульпы, относительно руслового потока и отстойного пруда.

В большинстве случаев подача золошлаковой смеси на отвалы производится в виде пульпы, подаваемой по распределительному пульпопроводу через многочисленные пульповыпуски, расположенные вблизи ограждающих дамб золоотвала (рисунок 13).

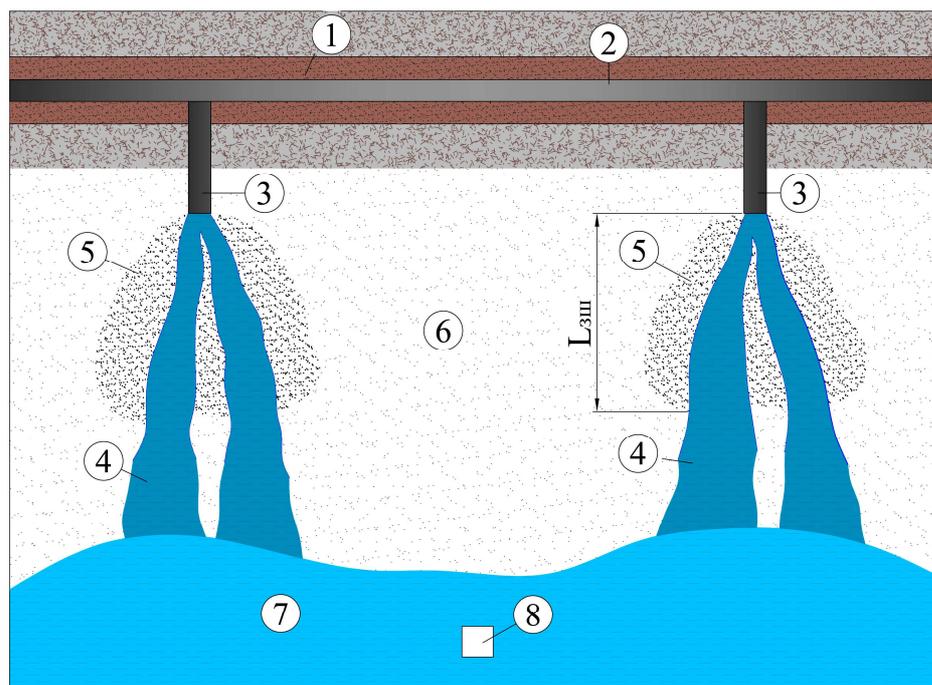


Рисунок 13 – Схема золоотвала: 1 – дамба; 2 – пульпопровод; 3 – выпуски пульпы; 4 – русловые потоки; 5 – золошлаковая зона; 6 – зольная зона надводного намыва; 7 – осветительный пруд и зольная зона подводного намыва; 8 – водосборный колодец

Твёрдая фаза золошлаковой пульпы осаждается на надводном откосе намыва и в отстойном пруду. Осветлённая вода из пруда попадает в водосборные колодцы и возвращается для повторного использования. Такая технология намыва приводит к образованию в зоне растекания на надводном откосе отдельных русловых потоков, что предопределяет неоднородность свойств ЗШС по длине фронта намыва и по глубине массива.

Зерновой состав ЗШС определялся в соответствии с требованиями по ГОСТ 8735 [84] и ГОСТ 12536-79 [85] на пробах, отобранных из различных точек золоотвалов ТЭС Иркутска [86, 87], Омска [88, 89], Кемерово [90], Белово [91], Томска

[79]. Определение содержания частиц крупнее 0,1 мм осуществлялось ситовым методом, менее 0,1 мм – ареометрическим, основанным на различной скорости падения разных по размеру частиц в жидкой среде. Результаты определения зернового состава ЗШС из золоотвалов некоторых ТЭС представлены на рисунках 14-18.

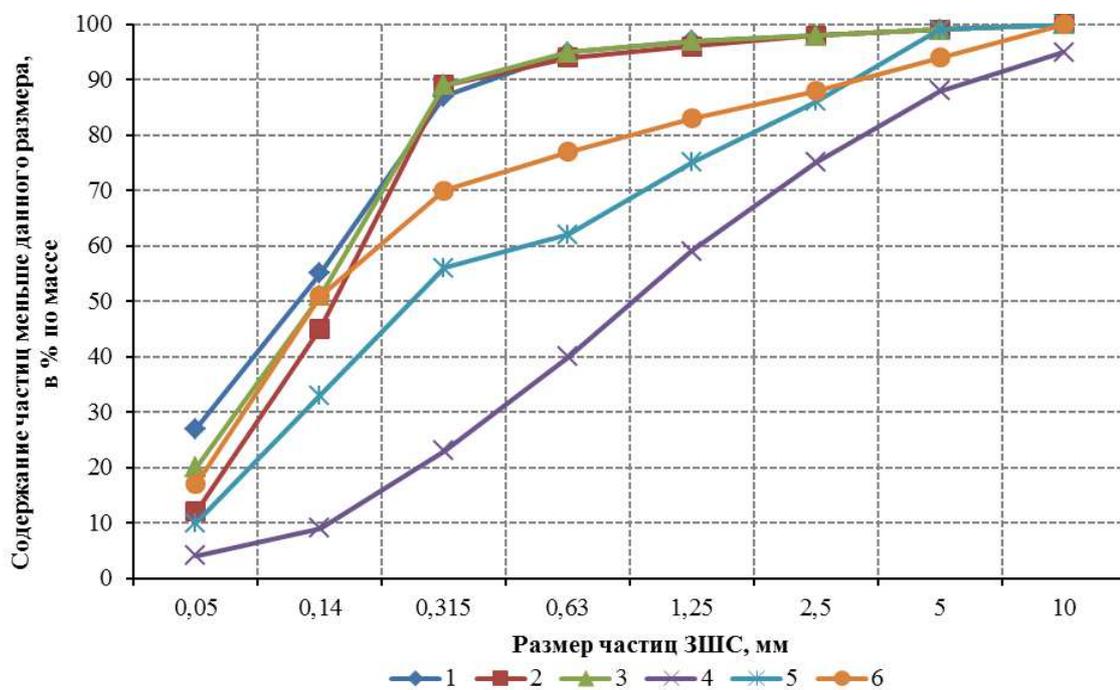


Рисунок 14 – Кривые зернового состава золошлаковой смеси из различных мест отбора в золоотвалах Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-10 г. Иркутска: 1-3 – пробы Ново-Иркутской ТЭЦ; 4-6 - пробы ТЭЦ-10

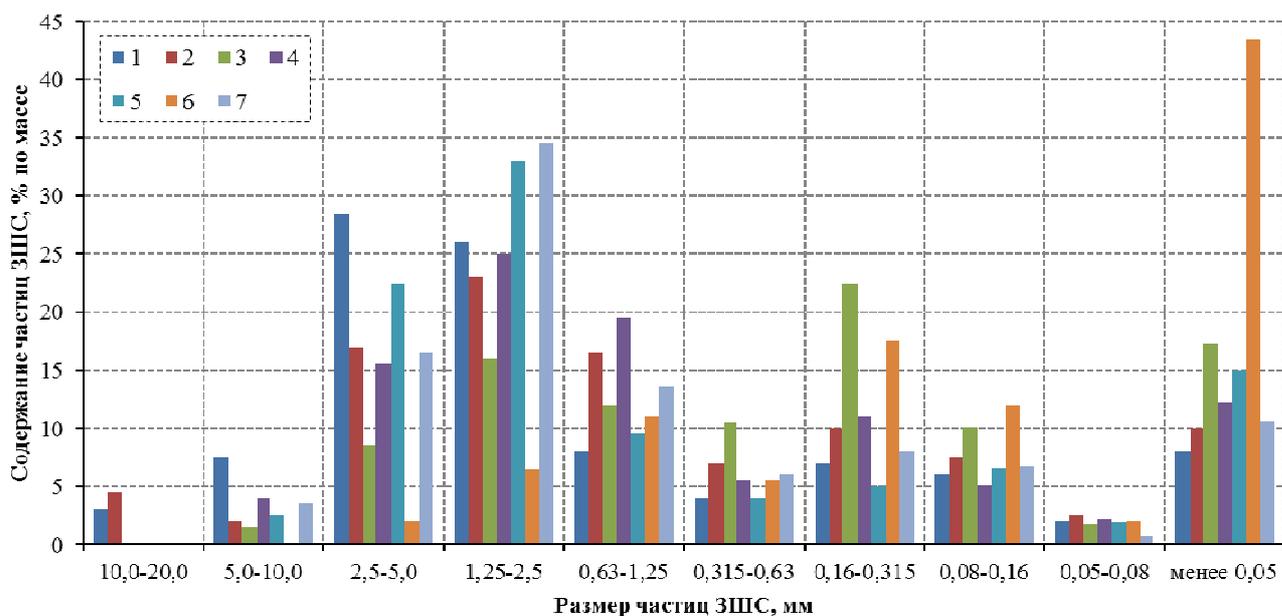


Рисунок 15 – Зерновой состав золошлаковой смеси из различных мест отбора в золоотвале Беловской ГРЭС: 1-7 – номер пробы ЗШС

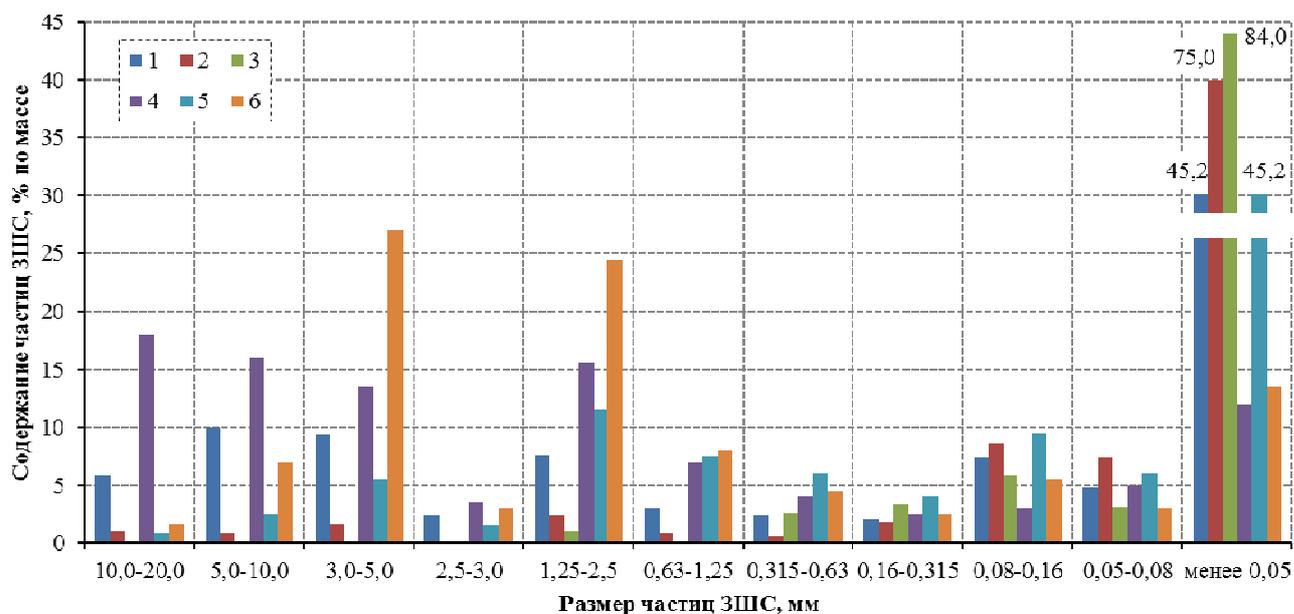


Рисунок 16 – Зерновой состав золошлаковой смеси из различных мест отбора в золоотвале Кемеровской ГРЭС:
1-6 – номер пробы ЗПС

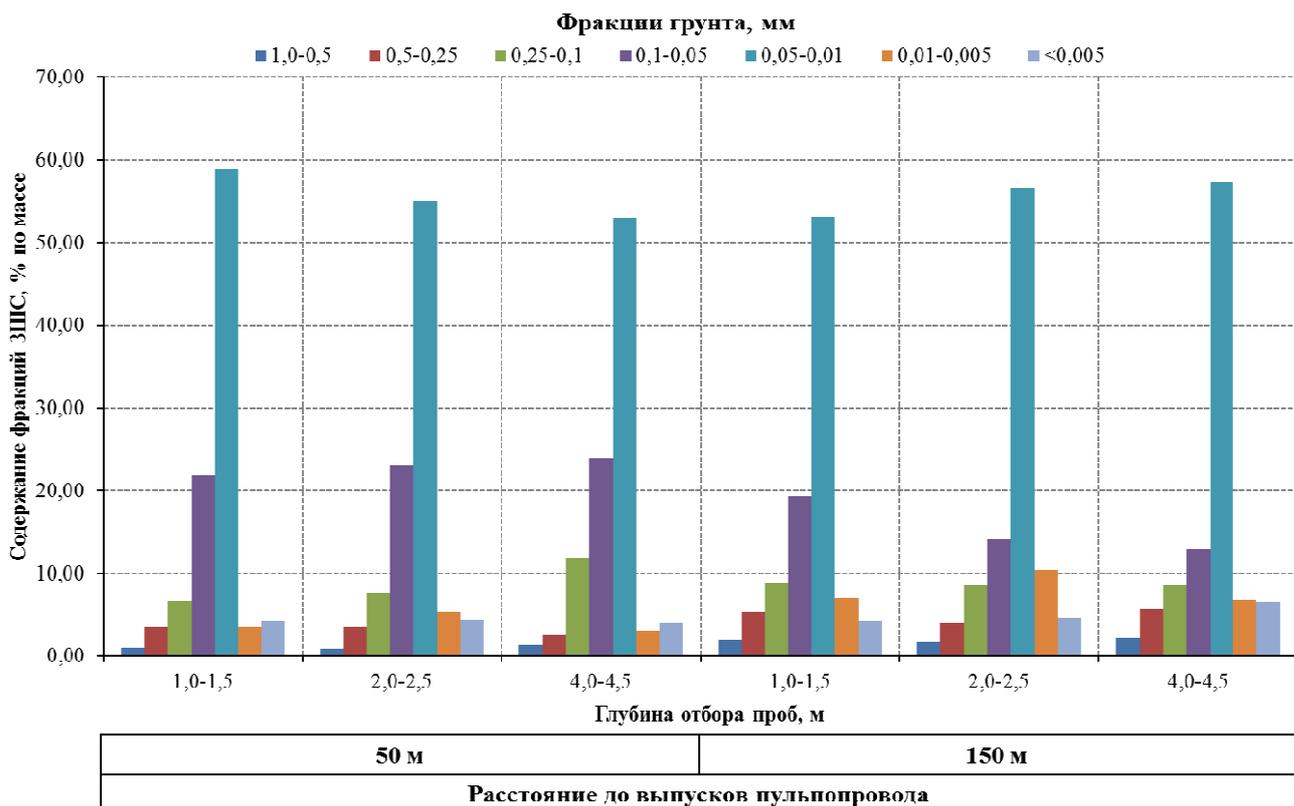


Рисунок 17 – Зависимость содержания частиц ЗПС в зерновом составе золошлаковой смеси от расстояния до выпуска пульпы и глубины отбора проб в золоотвале Березовской ГРЭС

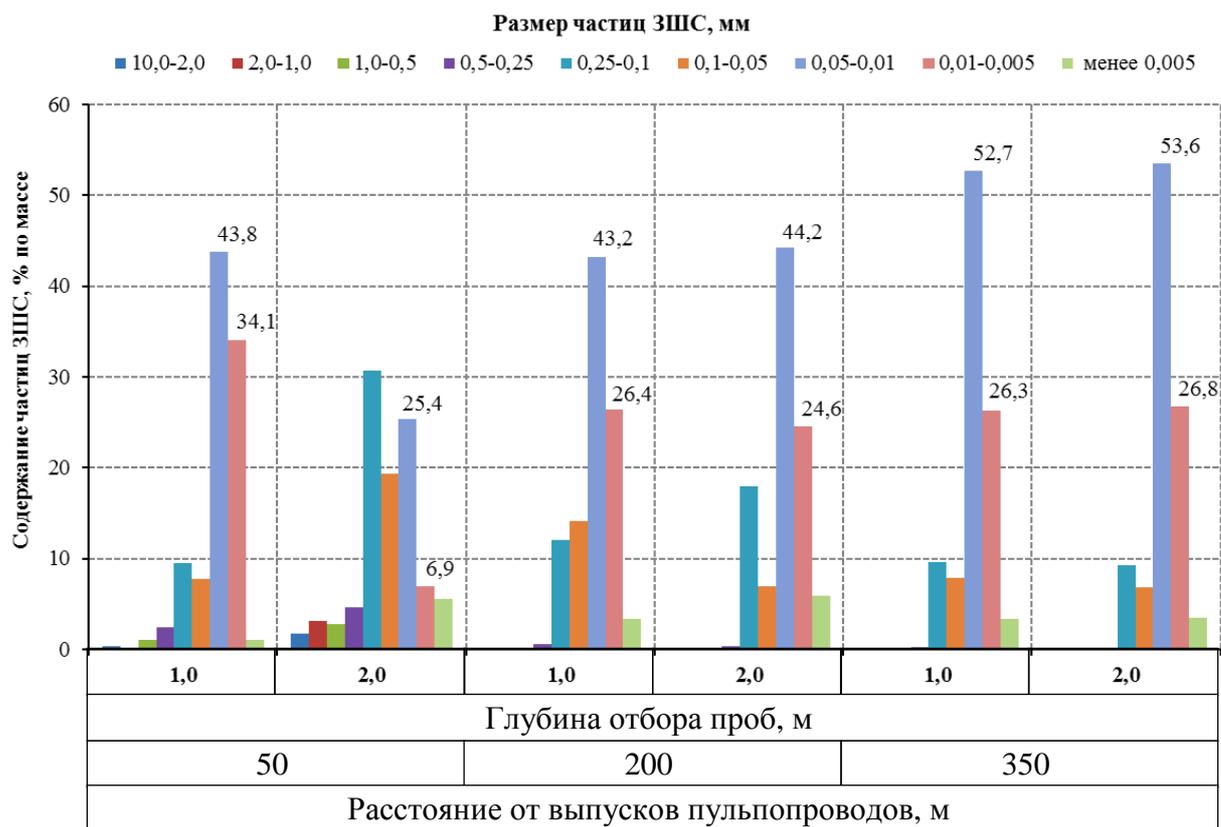


Рисунок 18 – Зависимость содержания частиц ЗШС в зерновом составе золошлаковой смеси от расстояния до выпуска пульпы и глубины отбора проб в золоотвале ТЭЦ-4 г. Омска

Степень неоднородности гранулометрического состава C_u – показатель, косвенно характеризующий степень уплотняемости песчаных грунтов, определяется по формуле

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (46)$$

где d_{60} , d_{10} — диаметры частиц, мм, меньше которых в ЗШС содержится соответственно 60 и 10 % (по массе) частиц.

Пески со степенью неоднородности (по ГОСТ 25100) менее 3, а также мелкие пески с содержанием по массе не менее 90 % частиц размером 0,10-0,25 мм следует относить к однородным.

Результаты определения показателей однородности зернового состава свидетельствуют, что практически все пробы не относятся к однородным материалам, следовательно, ЗШС должна удовлетворительно уплотняться.

Вторым показателем, характеризующим степень дисперсности ЗШС, является *удельная поверхность* – отношение суммарной поверхности частиц дисперсной

фазы к их массе. Обычно удельная поверхность минеральных порошкообразных материалов определяется методом воздухопроницаемости на приборе ПСХ-2(4) по ГОСТ 310.2-76 [92]. Величина удельной поверхности проб золы-уноса на разных ТЭС изменяется от 770 до 5440 см²/г и зависит от места отбора пробы, вида угля и других параметров. Удельная поверхность проб ЗШС из отвалов, определённая на вышеуказанном приборе, изменяется от 700 до 3600 см²/г.

Однако применение метода воздухопроницаемости для измерения удельной поверхности частиц с развитой микропористостью не отражает реальной величины этого показателя (таблица 24).

Величина удельной поверхности золошлаков, измеренная методом низкотемпературной десорбции аргона [93, 94], на порядок больше, чем по воздухопроницаемости. Отмеченное обстоятельство имеет практическую значимость, поскольку с ним связаны такие свойства золошлаков, как гигроскопичность, водопотребность, химическая и физическая активность.

Таблица 24 – Удельная поверхность частиц золы-уноса

Угольный бассейн, место отбора	Величина п.п.п., %	Удельная поверхность, см ² /г	
		по воздухопроницаемости	по десорбции аргона
Экибастузский:			
-электрофильтр четвертое поле	5,6	5706	12100
-электрофильтр второе поле	9,6	3200	63500
-циклон	11,9	2639	43300
-золоотвал	9,1	2180	11400
Кузнецкий, циклон	14,6	3050	39600
Портландцемент М400	3,5	3600	4640

Существует мнение [95], что повышенная действительная удельная поверхность золошлаков и их гигроскопичность объясняется наличием углистых остатков (п.п.п.). Однако сравнение данных (см. таблицу 24) не подтверждают эту закономерность.

В первую очередь столь значительная действительная величина удельной поверхности объясняется наличием в остеклованных зольных частицах микропористости, которая объясняется газовыделениями при нагревании частиц во время

сгорания топлива, когда минеральный материал частиц переходит в пиропластическое состояние.

Следующим важным показателем грунта является *плотность*. Плотность золошлаковой смеси обычно меньше, чем плотность природных минеральных грунтов. При этом следует различать несколько показателей плотности (таблица 25):

- насыпная плотность ЗШС ρ_n – отношение массы рыхло-насыпного материала к его объёму;
- плотность ЗШС ρ – отношение массы образца (при данной плотности и влажности) к его объёму (с учётом пор, занимаемых жидкостью и газами);
- плотность скелета ЗШС ρ_d , - плотность сухого материала, определяемая по формуле

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+W}, \quad (47)$$

где W - влажность материала, д.ед.;

- микроагрегатная плотность ЗШС – отношение массы минеральных частиц и спечённых микроагрегатов (с микропорами) к занимаемому ими объёму;
- истинная плотность золошлаковых частиц – отношение массы минеральных частиц к занимаемому ими объёму без пор (в том числе без микропор).

Введение двух понятий – микроагрегатная плотность и истинная плотность имеет для золошлакового материала определённый физический смысл, поскольку многие зольные частицы имеют микропоры, заполненные газообразной фазой, что зачастую искажает величину истинной плотности этого материала.

Таблица 25 – Значения плотности ЗШС

Граничные значения плотности ЗШС, г/см ³	Насыпная плотность	Плотность (естественного сложения)	Плотность скелета (естественного сложения)	Микроагрегатная плотность	Истинная плотность
	0,7-1,0	1,1-1,4	0,90-1,15	1,9-2,5	2,3-2,7

Исходя из вышеприведённых значений плотности, следует, что относительный объём микропор зольных частиц может изменяться от 0 до 25 %, а пористость ЗШС в золоотвале – от 40 до 60 %.

Максимальная плотность и оптимальная влажность грунтов являются важными технологическими показателями, используемыми при сооружении земляного полотна. Ориентируясь на эти значения, назначают и контролируют минимальную требуемую плотность грунта в теле земляного полотна, оценивают коэффициент увлажнения грунта в карьере на предмет возможности достижения требуемой плотности.

Величина максимальной плотности сухого (скелета) грунта ρ_{max} и оптимальной влажности W_{opt} ЗШС определялась в соответствие с требованиями ГОСТ 22733 [69]. Результаты по некоторым ТЭС представлены на рисунках 19-21.

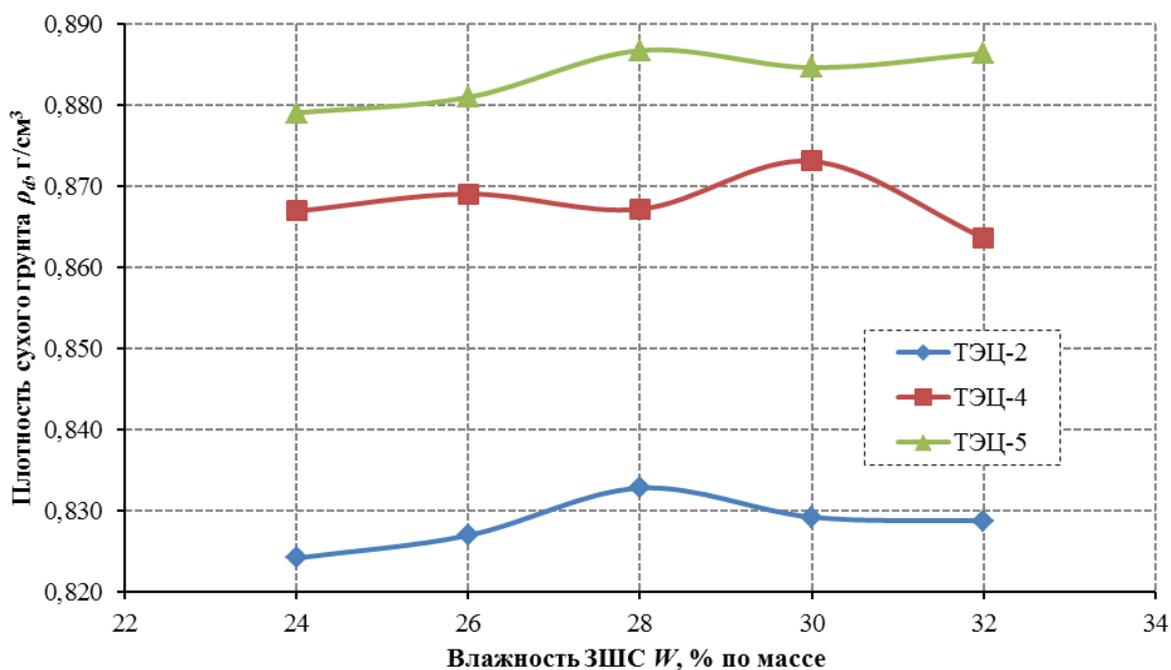


Рисунок 19 – Зависимость плотности скелета ЗШС из различных мест отбора в отвалах ТЭЦ г. Омска от влажности при стандартном уплотнении

Исследования свидетельствуют, что ЗШС (как и пески) не имеют ярко выраженных значений оптимальной влажности и максимальной стандартной плотности. Величина оптимальной влажности зависит как от зернового состава, ЗШС так и от системы шлакоудаления. При жидком удалении шлака (в виде расплава) с его гра-

нуляцией образуются ЗШС с относительно низкими значениями оптимальной влажности и высокими значениями максимальной плотности (таблица 26 [90, 91]).

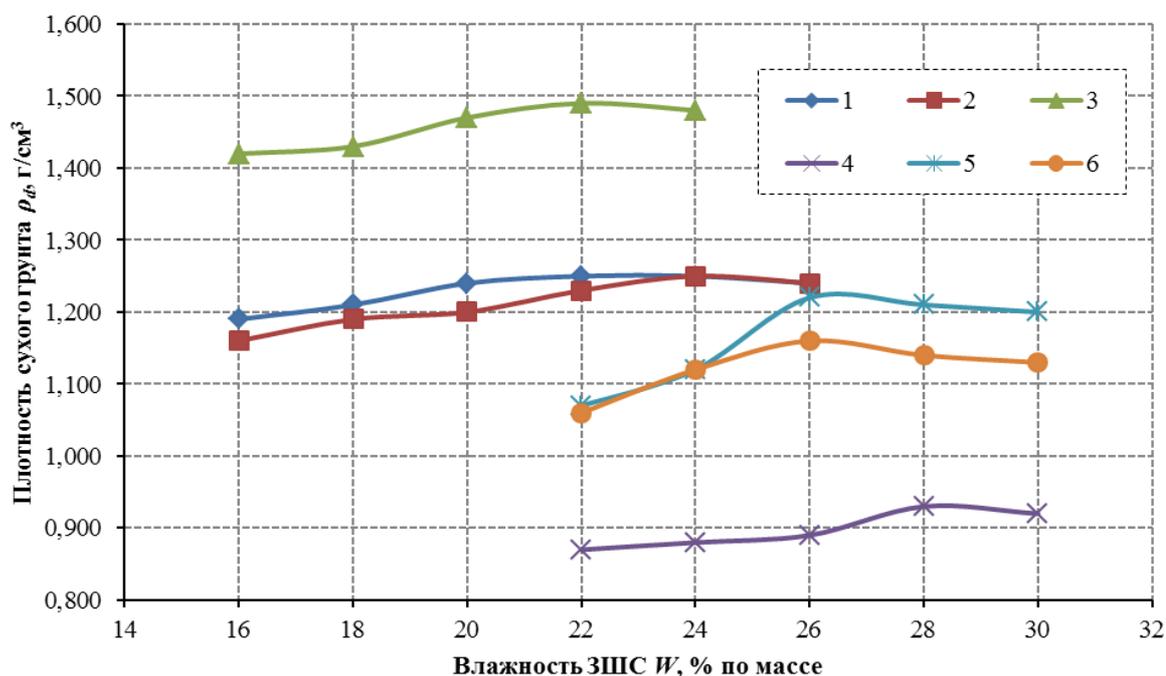


Рисунок 20 – Зависимость плотности скелета ЗШС из различных мест отбора в отвалах ТЭЦ г. Иркутска от влажности при стандартном уплотнении:
1-3 – пробы Ново-Иркутской ТЭЦ; 4-6 - пробы ТЭЦ-10 г. Иркутска

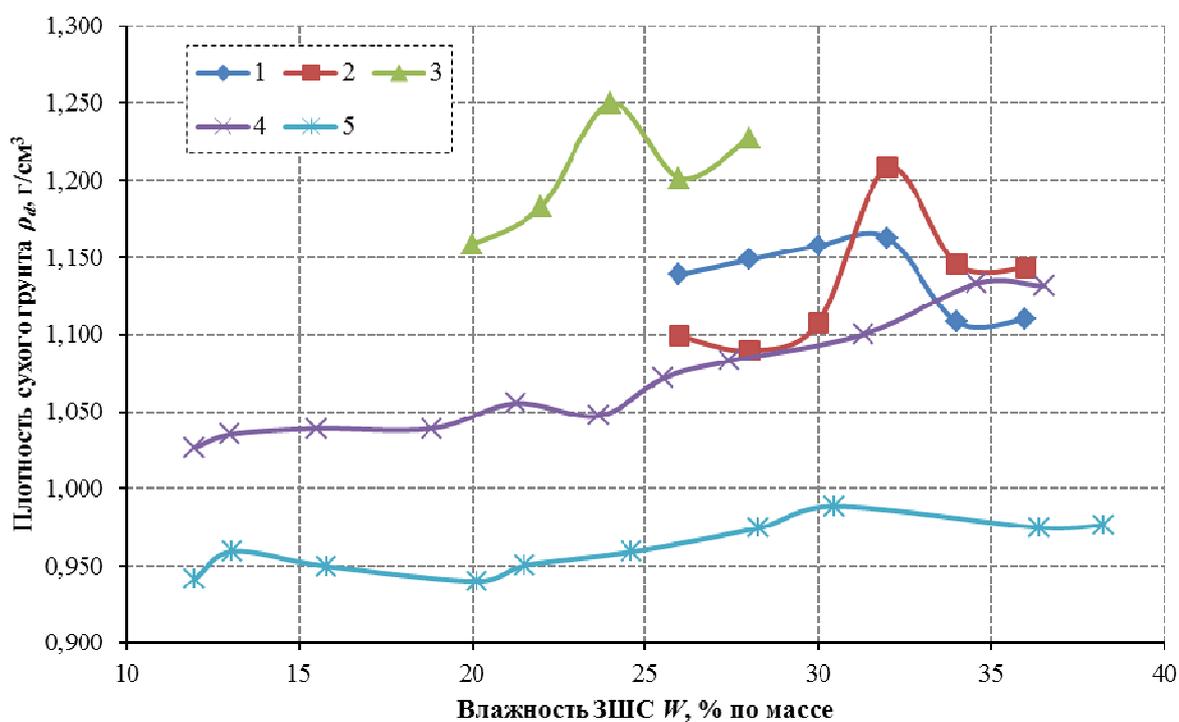


Рисунок 21 – Зависимость плотности скелета ЗШС из различных мест отбора в отвалах Барабинской ГРЭС от влажности при стандартном уплотнении:
1-5 – № проб ЗШС

Таблица 26 – Оптимальная влажность и максимальная плотность ЗШС, получаемых на ТЭС Кемеровской области

№ пробы	Результаты испытаний	
	Оптимальная влажность W_{opt} , % по массе	Максимальная плотность скелета ρ_d , г/см ³
Кузнецкий уголь, Беловская ГРЭС		
1	9,5	1,57
2	10,5	1,60
3	13,0	1,37
4	10,9	1,59
5	11,5	1,60
6	21,5	1,38
7	10,2	1,56
Кузнецкий уголь, Новокемеровская ТЭЦ		
1	16,7	1,60
2	25,0	1,34
3	27,0	1,29
4	8,0	1,97
5	16,9	1,63
6	8,3	1,95

Увеличение зольной составляющей приводит к повышению оптимальной влажности и понижению величины максимальной плотности ЗШС.

Высокую плотность скелета некоторых проб ЗШС с пористым шлаком можно объяснить тем, что эти пробы отобраны вблизи выпуска в русловой части движения пульпы в золоотвале. Значительное содержание магнитной составляющей (до 11 % оксидов железа) в этих пробах предопределяет повышенную микроагрегатную плотность зольных частиц (до 2,5 г/см³), что приводит к выпадению более тяжёлых частиц вблизи выпуска в указанной зоне.

Кроме того, после послонного уплотнения золошлаковой смеси в большом приборе стандартного уплотнения пробы, содержащие существенное количество зёрен пористого шлака, изменяют зерновой состав. Слабые зёрна шлака дробятся, содержание более мелкой фракции увеличивается. В качестве примера на рисунке 22 приведён зерновой состав одной пробы золошлаковой смеси до и после её уплотнения. Эту особенность следует учитывать при уплотнении ЗШС тяжёлыми катками в слоях земляного полотна.

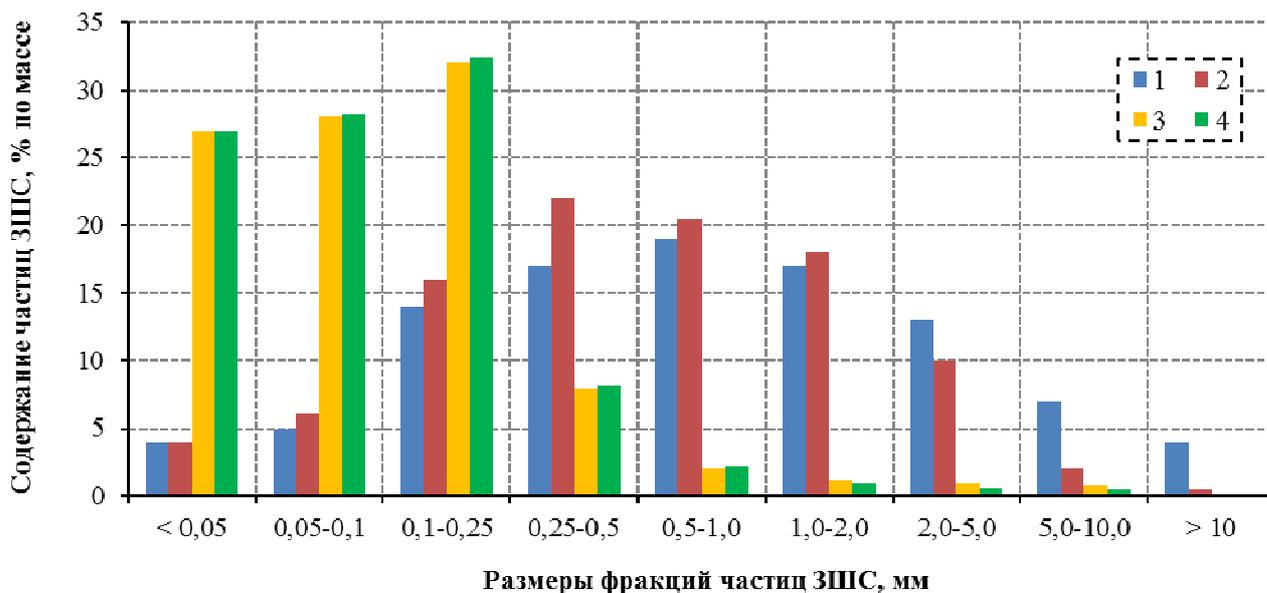


Рисунок 22 – Изменение зернового состава ЗПС после уплотнения: 1, 2 – до и после уплотнения крупнозернистой ЗПС; 3, 4 – до и после уплотнения мелкозернистой ЗПС

Характерно, что, как и природный песок, ЗПС часто имеет два значения влажности, при которой достигается повышенная плотность: первое – при гигроскопической влажности (т.е. при $W_\phi = W_\zeta$); второе – при оптимальной влажности W_{opt} . Однако, во-первых, первое значение плотности меньше, чем ρ_{max} примерно на 0,05-0,07 г/см³. Также уплотнение ЗПС при гигроскопической влажности W_ζ вызывает существенный недостаток – пыление поверхности слоя ЗПС. Уплотнение слоя ЗПС рекомендуется вести с допустимой влажностью, которая позволяет максимально снизить этот технологический недостаток, а применение методов пылеподавления практически исключает явление пыления.

Во-вторых, максимальная плотность при оптимальной влажности достигается при наименьшей работе по уплотнению ЗПС.

Модуль упругости слоя грунта E_y является основной характеристикой для назначения толщин слоев дорожной одежды при проектировании дороги. Этот показатель характеризует упругие свойства слоя грунта при воздействии на него нагрузки.

Модуль упругости ЗПС E_y определяли в лабораторных условиях по методике, изложенной в приложении 8 ВСН 46-83 [73] на рычажном прессе. Образцы ЗПС приготавливали при оптимальной влажности в цилиндрической форме внутренним диаметром 15,0 см и высотой 15,0 см. Диаметр штампа для передачи нагруз-

ки на слой грунта – 3,56 см. Перемещение штампа при испытаниях фиксировали индикаторами часового типа ИЧ-10. Внешний вид формы для испытаний, заполненной ЗШС показан на рисунке 23.



Рисунок 23 – Внешний вид испытательной формы заполненной ЗШС (слева) и отпечаток штампа на образце после испытаний (справа)

Модуль упругости ЗШС E_y рассчитывали по формуле

$$E_y = 0,25\pi p D(1 - \mu^2)/l, \quad (48)$$

где p – расчётное давление от штампа, МПа;

D – диаметр жёсткого штампа, м;

μ – коэффициент Пуассона (для золошлаковой смеси $\mu = 0,35$);

l – упругая деформация, соответствующая расчётному давлению, м.

Фактическое значение модуля упругости ЗШС зависит от влажности и плотности материала, диаметра штампа, методики испытаний и т.п. Ниже представлены результаты определения модуля упругости ЗШС разного зернового состава: среднезернистой (рисунок 24) и мелкозернистой (рисунки 25, 26). Среднезернистая ЗШС представлена пробами из отвала Беловской ГРЭС, мелкозернистая – из отвала ТЭЦ-5 г. Омска.

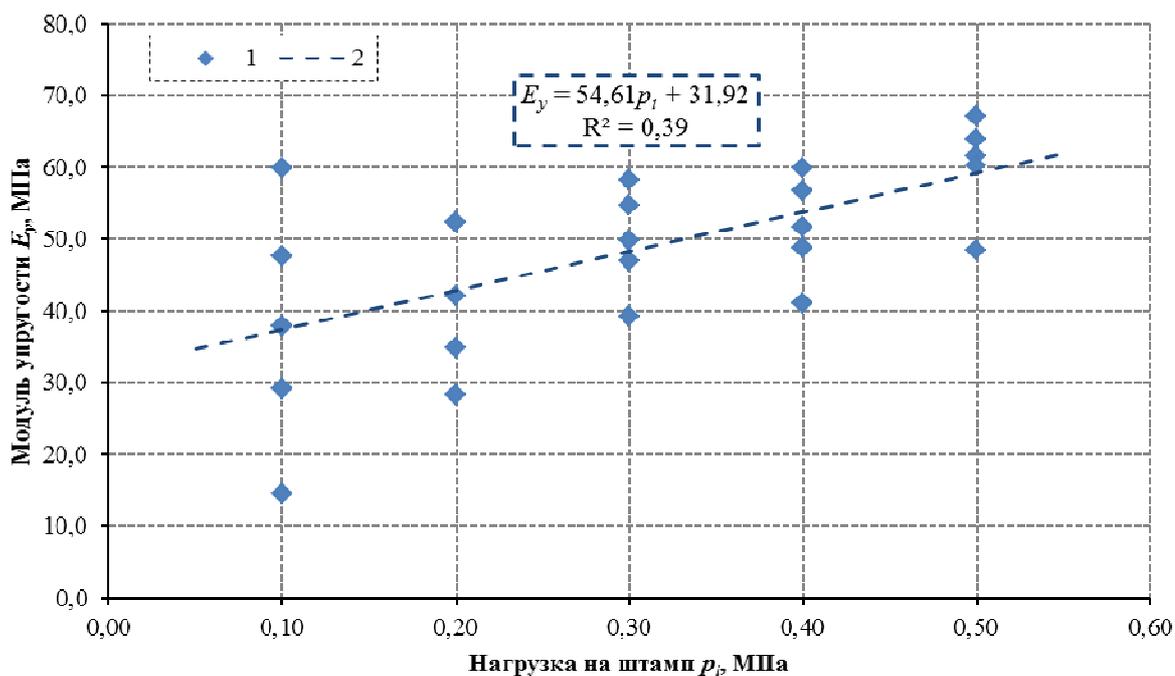


Рисунок 24 – Результаты определения модуля упругости E_y ЗШС из отвала Беловской ГРЭС от нагрузки на штамп p_i : 1 – значение при отдельном испытании; 2 – эмпирическая зависимость

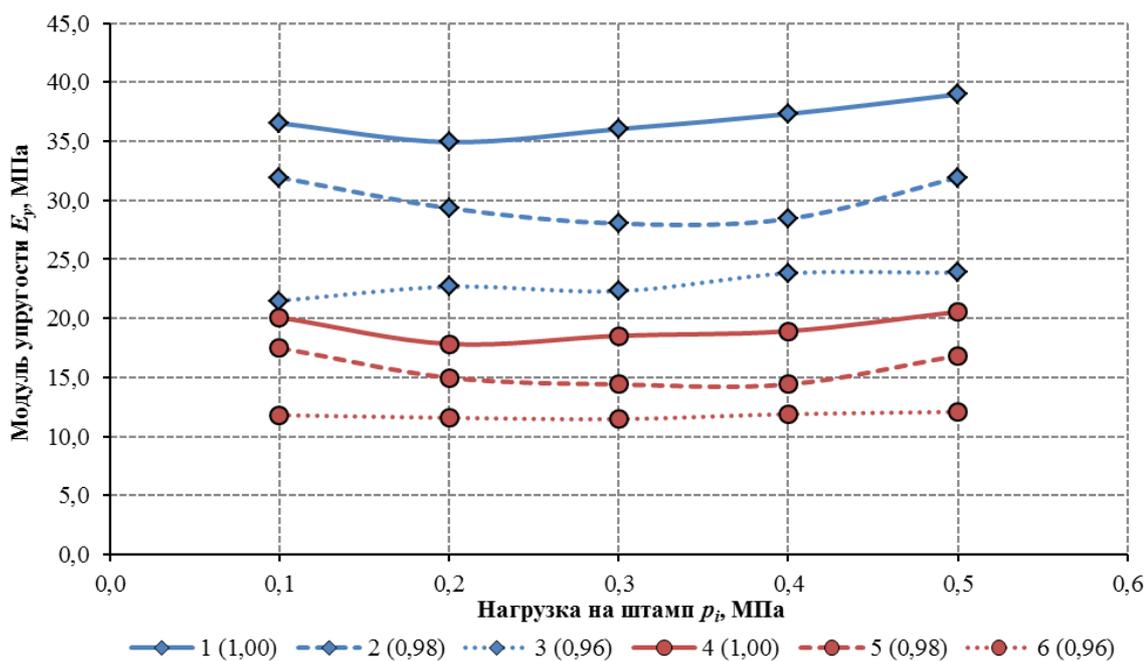


Рисунок 25 – Результаты определения модуля упругости ЗШС из отвала ТЭЦ-5 г. Омска: 1-3 – модуль упругости при влажности $W=0,30$ (в скобках указан коэффициент уплотнения образца); 4-6 – модуль упругости при влажности $W=0,40$ (в скобках указан коэффициент уплотнения образца)

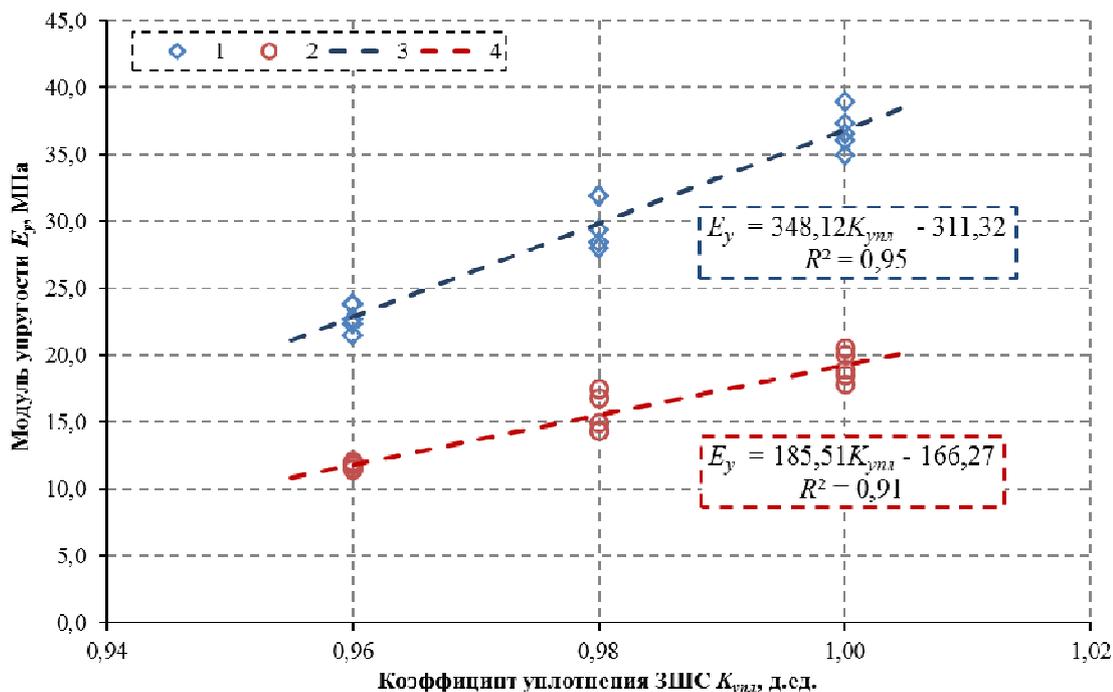


Рисунок 26 – Зависимость модуля упругости E_y от влажности и коэффициента уплотнения ЗШС: 1, 2 – номер испытания; 3 – эмпирическая зависимость модуля упругости от коэффициента уплотнения ЗШС при влажности $W=0,30$; 4 – эмпирическая зависимость модуля упругости от коэффициента уплотнения ЗШС при влажности $W=0,40$

В результате испытаний установлено, что модуль упругости ЗШС E_y существенно зависит от коэффициента уплотнения и фактической влажности. С увеличением коэффициента уплотнения от 0,96 до 1,00 модуль упругости E_y увеличивается более чем на 60%. Уменьшение влажности ЗШС с 40% до 30% по массе увеличивает модуль упругости практически в 2 раза (до 94%).

Влияние зернового состава можно оценить по средним значениям, полученным при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения $K_{упл. д.с.д.}=1,00$ (см. рисунки 22 и 23). Модуль упругости среднезернистой ЗШС превышает аналогичный показатель мелкозернистой ЗШС на величину от 20 до 55%. Причем, чем больше нагрузка на штамп, тем больше различаются модули упругости.

Модуль деформации $E_{деф}$ может косвенно служить величиной для определения примерного значения модуля упругости. Модуль деформации учитывает не только упругие деформации слоя грунта, но и пластические. Также модуль деформации зависит от зернового состава, фактической влажности и коэффициента уплотнения ЗШС.

Определение модуля деформации ЗШС осуществлялась на компрессионном приборе в соответствии с ГОСТ 12248-2010 [96] при оптимальной влажности. Результаты компрессионных испытаний отражены на графиках (рисунок 27) и в приложении Б.

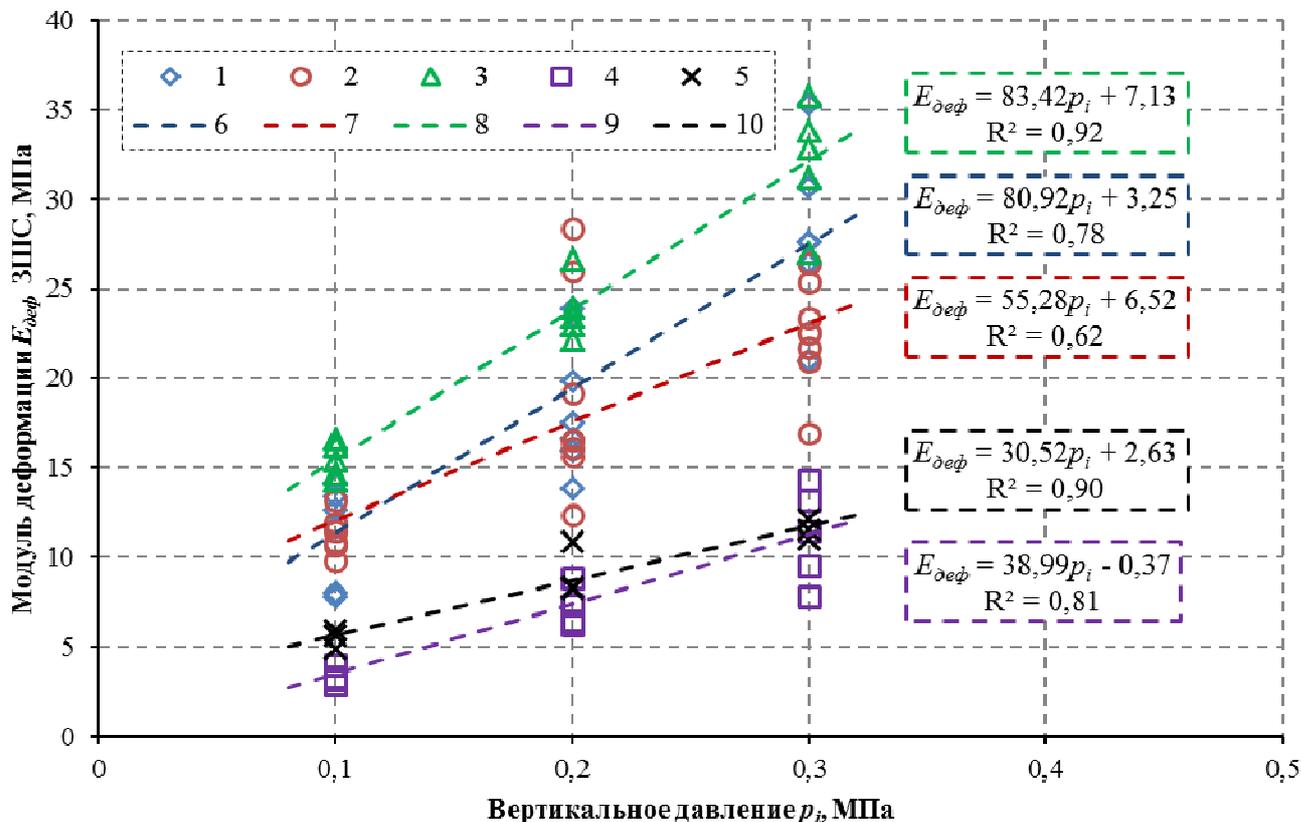


Рисунок 27 – Результаты определения модуля деформации $E_{деф}$ ЗШС: 1-5 – испытания ЗШС и отвала ТЭЦ-5 г. Омска, ТЭЦ-2 г. Омска, ГРЭС-2 г. Томска, Барабинской ГРЭС, Беловской ГРЭС соответственно; 6-10 – эмпирические зависимости модуля деформации $E_{деф}$ от вертикального давления

Анализируя значения и эмпирические зависимости, можно сделать вывод, что более крупнозернистая ЗШС (Беловская ГРЭС и Барабинская ГРЭС) имеет меньший модуль деформации по сравнению с мелкозернистой ЗШС (ГРЭС-2 г. Томска, ТЭЦ-5 и ТЭЦ-2 г. Омска). В сравнении с модулем упругости наблюдается обратное: чем больше дисперсность ЗШС, тем меньше модуль упругости.

При оптимальной влажности ЗШС (Беловская ГРЭС и Барабинская ГРЭС) соответствует сильнодеформируемому и среднедеформируемому грунтам. При оптимальной влажности ЗШС из отвала ТЭЦ-5 г. Омска соответствует среднедеформируемому грунтам.

К механическим свойствам грунтов относят *удельное сцепление C* и *угол внутреннего трения φ* грунтов. Эти характеристики являются важнейшими наряду с модулем упругости и модулем деформации при расчете дорожных одежд на прочность по критерию сдвига. Определение угла внутреннего трения и удельного сцепления осуществлялось на приборе прямого среза ГП-30 в соответствии с ГОСТ 12248-2010 [96] в режиме наблюдения за напряжениями по методике медленного среза уплотнённых образцов. Для испытаний ЗШС из отвалов ТЭЦ г. Иркутска использовался прибор ПГС-2М.

Сопротивление грунта срезу определяли как предельное среднее касательное напряжение, при котором образец срезается по фиксированной плоскости при заданном нормальном напряжении. Результаты определения представлены в приложении Б.

Также как и другие прочностные характеристики, удельное сцепление и угол внутреннего трения существенно зависят от зернового состава, влажности, плотности грунта, а также конструкции прибора, в котором проводились испытания.

3.4 Теплофизические свойства золошлаковых смесей

Малая плотность, высокая пористость смеси и микропористость зольных частиц обуславливают эффективные теплофизические характеристики ЗШС. Теплофизические свойства грунта напрямую влияют на скорость промерзания или протаивания дорожной конструкции. Поэтому необходимо оценить изменение теплофизических свойств от ряда факторов. В качестве важнейшего фактора в водно-тепловом режиме земляного полотна выступает влажность грунта. Также немаловажным фактором является состояние материала: талое или мерзлое, так как от фазового состояния воды в грунте резко изменяются его свойства.

В работе проведена оценка коэффициента теплопроводности ряда золошлаковых смесей ТЭС Западной Сибири как основного теплофизического показателя (таблица 27). Определение коэффициента теплопроводности проводилось при по-

мощи измерителя теплопроводности МИТ-1 [97] зондовым методом в соответствии с ГОСТ 30256-94 [98].

Таблица 27 – Значения коэффициента теплопроводности ЗШС

Вид сжигаемого угля (ТЭС)	Влажность ЗШС W , % по массе	Относительная влажность ЗШС $W_{отн}$, д.ед.	Средний коэффициент теплопроводности ЗШС λ в талом состоянии, Вт/(м·К)
Кузнецкий (ТЭЦ-2 г. Омска)	1,8	0,03	0,390
	26,8	0,36	0,509
Кузнецкий (ГРЭС-2 г. Томска)	1,1	0,02	0,461
	19,6	0,42	0,735
Кузнецкий (Беловская ГРЭС)	0,2	0,003	0,244
	16,7	0,31	0,493

Значения коэффициента теплопроводности ЗШС ТЭЦ-5 г. Омска представлены более подробно в таблице 28. На рисунке 28 приведены результаты обработки данных лабораторных исследований ЗШС из отвала ТЭЦ-5 г. Омска.

Таблица 28 – Значения коэффициента теплопроводности ЗШС ТЭЦ-5 г. Омска

Влажность ЗШС W , д.ед.	Относительная влажность ЗШС $W_{отн}$, д.ед.	Коэффициент теплопроводности ЗШС λ , Вт/(м·К)						
		№ испытания						
		1	2	3	4	5	6	7
при насыпной плотности в талом состоянии								
0,04	0,06	0,108	0,107	0,107	0,102	0,101	0,13	-
0,2	0,29	0,237	0,238	0,268	0,175	0,293	0,275	-
0,3	0,44	0,344	0,346	0,389	0,25	0,425	0,399	0,459
0,6	0,88	0,75	0,674	0,64	0,68	0,674	0,679	0,692
при максимальной плотности ($K_{унл}=1,0$) в талом состоянии								
0,04	0,06	0,19	0,187	0,188	0,179	0,178	0,228	-
0,2	0,29	0,440	0,536	0,486	0,545	0,501	0,495	0,540
0,3	0,44	0,67	0,737	0,742	0,69	0,735	0,7	-
0,6	0,88	1,313	1,18	1,12	1,19	1,18	1,187	1,212
при максимальной плотности ($K_{унл}=1,0$) в мерзлом состоянии								
0,05	0,07	0,362	0,329	0,175	0,212	0,205	0,252	0,334
0,3	0,44	0,874	0,780	0,850	0,744	0,775	0,643	-
0,48	0,71	1,312	1,170	1,125	1,117	1,164	0,966	-
0,6	0,88	1,480	1,419	1,363	1,250	1,410	1,171	-

По результатам исследований коэффициента теплопроводности ЗШС можно сделать некоторые выводы. Эффективные теплофизические характеристики ЗШС, как материала для сооружения земляного полотна, являются позитивным свойством.

Хорошая теплоизолирующая способность этого материала позволяет существенно снижать (или предотвращать) промерзание грунтового основания. А это, в свою очередь, способствует уменьшению осенне-зимнего влагонакопления и морозного пучения, как основания, так и тела земляного полотна. Низкая расчётная влажность в весенний период предопределяет более высокую несущую способность земляного полотна.

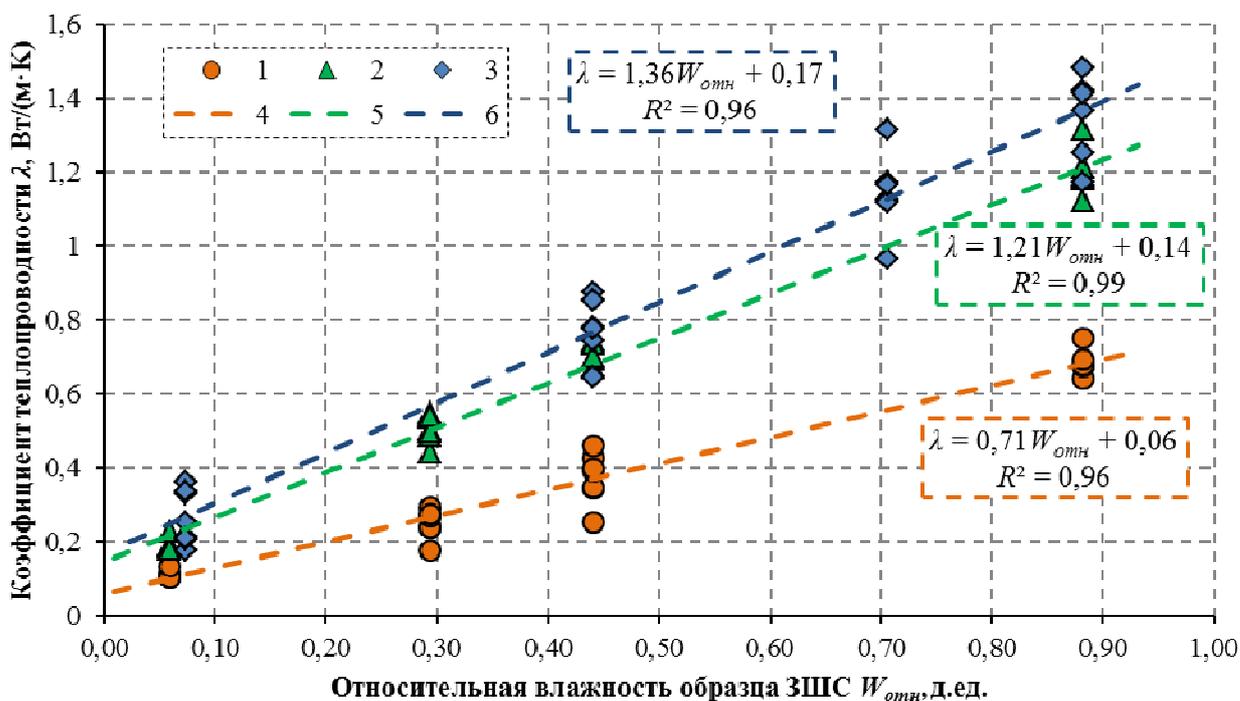


Рисунок 28 – Зависимость коэффициента теплопроводности от относительной влажности ЗШС из отвала ТЭЦ-5 г. Омска: 1 – при насыпной плотности ЗШС в талом состоянии; 2 – при $K_{упл}=1$ ЗШС в талом состоянии; 3 – при $K_{упл}=1$ ЗШС в мерзлом состоянии; 4-6 – эмпирические зависимости при соответствующей плотности и состоянии ЗШС

К теплофизическим показателям грунтов также стоит отнести температуру замерзания, при которой вода в грунте превращается в лед (температура фазовых переходов). Эта температура может отличаться от значения 0°C , так как часть воды в грунте находится в прочно- и рыхлосвязанном состоянии за счет сил молекулярного притяжения частиц грунта. Определение температуры замерзания воды в ЗШС происходило во время проведения испытаний на морозное пучение грунтов (см. параграф 3.6). График изменения температуры в ЗШС показан на рисунке 29.

Анализируя график изменения температуры на нижней и верхней границе образца ЗШС, можно сказать, что они соответствуют классическим представлени-

ям о процессе фазовых переходов воды при промерзании грунтов, полученных П.М. Андриановым [53]. Температура начала фазовых переходов в ЗШС равна T_{ϕ} = минус 0,3°С. При этом, после переохлаждения ЗШС до температуры минус 0,3°С происходит резкий скачок температуры до минус 0,1°С, что соответствует процессу выделения тепла при образовании льда.

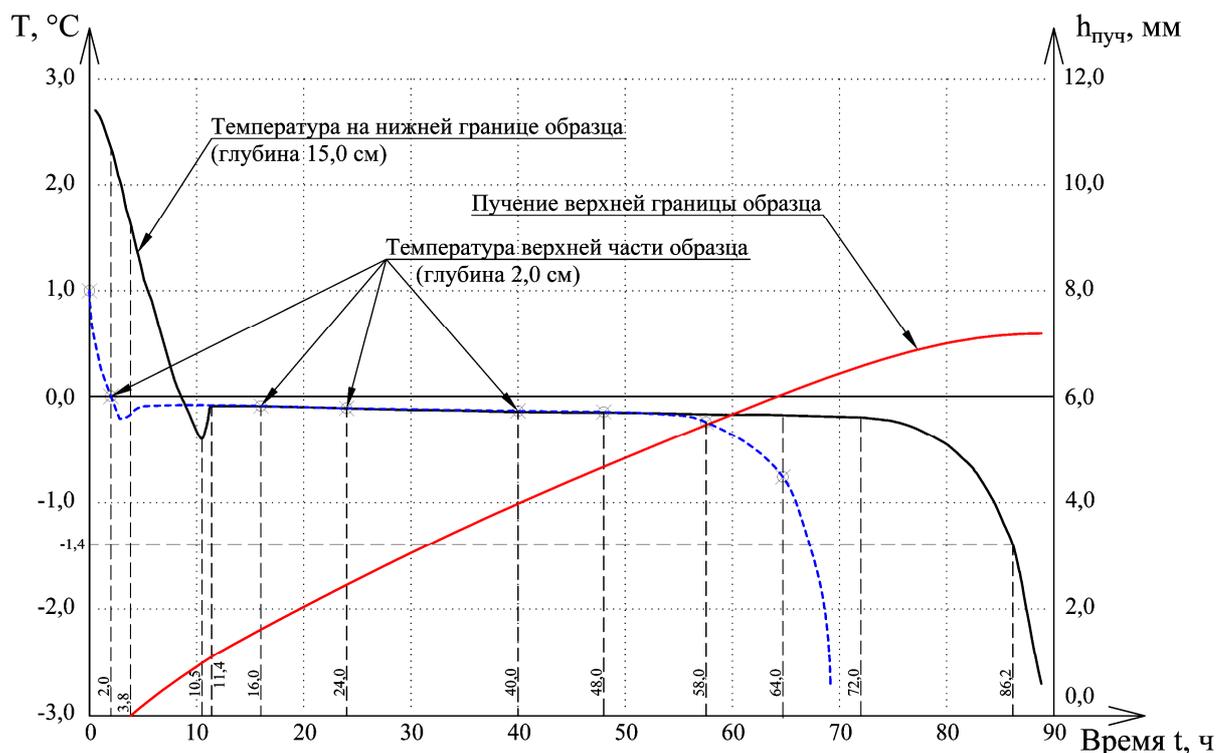


Рисунок 29 – Изменение температуры на границах образца ЗШС в процессе морозного пучения при промораживании

Согласно В.Н. Шестакову [99] температура фазового перехода воды в лед (температура льдообразования) t_l связана с относительной влажностью грунта W/W_m . Ее можно определить по формуле

$$t_l = \frac{-0,045}{(W/W_m)^4}, \quad (49)$$

где W – фактическая влажность грунта, д.ед.;

W_m – влажность грунта на границе текучести, д.ед. (для ЗШС из отвала ТЭЦ-4 г. Омска $W_m=0,42$).

В таблице 29 приведены результаты расчета температуры льдообразования ЗШС при разной расчетной влажности.

Таблица 29 – Температура льдообразования ЗШС

Влажность ЗШС W , д.ед.	Относительная влажность W/W_m , д.ед.	Относительная влажность ЗШС $W_{отн}$, д.ед.	Температура льдообразования (фазовых переходов) t_l , °C
0,25	0,60	0,37	-0,36
0,40	0,95	0,59	-0,05
0,60	1,43	0,88	-0,01

Примечание. Относительная влажность ЗШС $W_{отн}$ определена по формуле (37).

Таким образом, можно сделать вывод, что при увеличении влажности ЗШС температура фазовых переходов всего объема воды в грунте повышается и приближается к 0°C. Однако это не отменяет того факта, что связанная вода имеет более низкую температуру замерзания, что подтверждается рисунком 30 и значением $t_l = \text{минус } 0,36^\circ\text{C}$ при влажности ЗШС $W=0,25$.

3.5 Некоторые водные свойства золошлаковых смесей

Водные свойства – это комплексное понятие, включающее водоустойчивость, влагоёмкость, водоотдачу и водопроницаемость дисперсных материалов.

Влажность. Следует выделить несколько характерных значений влажности ЗШС (таблица 30).

Таблица 30 – Характерные значения влажности ЗШС

% по массе					
Гигроскопическая влажность W_2	Максимальная гигроскопическая влажность $W_{мг}$	Максимальная молекулярная влагоёмкость $W_{ммв}$	Оптимальная влажность W_{opt}	Капиллярная влажность $W_{кап}$	Полная влагоёмкость $W_{пе}$
0,5-1,5	2,0-4,0	9-30	10-45	15-45	25-75

Гигроскопическая влажность W_2 (по ГОСТ 30416-2012 [100]) – влажность грунта в воздушно-сухом состоянии, т.е. в состоянии равновесия с влажностью и температурой окружающего воздуха.

Максимальной гигроскопической влажностью $W_{мг}$ [93] называется равновесная влажность материала, отвечающая насыщенному воздуху с влажностью 95-100%.

Максимальной молекулярной влагоемкостью $W_{ммв}$ [101] называется количество воды, удерживаемое в виде пленок на частицах породы силами молекулярного притяжения.

Капиллярная влажность $W_{кан}$ [93] соответствует количеству влаги, удерживаемому в пористой среде капиллярными силами, возникающими на границе соприкосновения трех фаз – твердой, жидкой и газообразной.

Полная влагоёмкость $W_{не}$ [102] – максимальное количество воды, которое способен удерживать водонасыщенный грунт.

Фактическая и гигроскопическая влажность определялась методом высушивания до постоянной влажности по ГОСТ 5180-84 [68].

Максимальная гигроскопическая влажность определялась по ГОСТ 28268-89 [103]. Сущность метода заключается в насыщении золы, помещенной в эксикатор с раствором сернокислого калия, парообразной влагой с последующим определением влажности методом высушивания.

Максимальную молекулярную влагоемкость определили в соответствии с РСН 51-84 [104], как влажность грунтовой пасты после ее прессования до завершения водоотдачи грунта. Результаты определения влажностей по некоторым ТЭС представлены в приложении Б.

Фактическая влажность ЗШС в золоотвалах зависит от места отбора пробы по глубине (рисунок 30) и от близости к пруду-отстойнику.

Золошлаковая смесь, расположенная на поверхности отвала, при расстоянии до пруда – отстойника более 200 м в сухое время года, как правило, находится в воздушно-сухом состоянии ($W < 2\%$). По мере приближения к пруду и углубления в массив влажность материала возрастает до величины максимальной молекулярной влагоёмкости. Учитывая фильтрующую способность ЗШС, материал, находящийся в отвале ниже высотной отметки поверхности пруда (с учётом кривой депрессии и высоты капиллярного поднятия), имеет влажность, близкую к полной влагоёмкости.

Иной вид кривой по ТЭЦ-10 на рисунке 30 объясняется значительным расстоянием от места отбора проб до пруда – отстойника. Кроме того, глубина отбора проб

была существенно выше отметки поверхности пруда (даже с учётом высоты капиллярного поднятия влаги). Неоднородность гранулометрического состава ЗШС по глубине (увеличенное содержание зольных фракций) объясняет повышенную влажность смеси на глубине 60 см. Основная масса ЗШС, расположенной выше отметки пруда, имеет влажность близкую к максимальной молекулярной влагоёмкости.

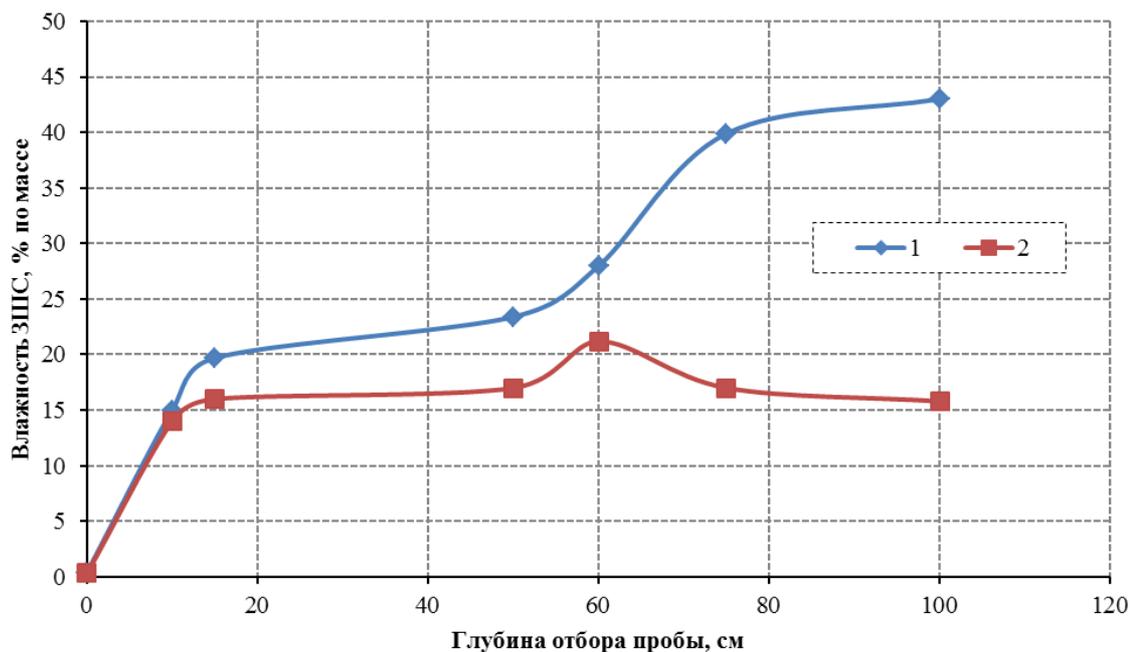


Рисунок 30 – Влажность золошлаковой смеси, отобранной из золоотвала:
1 – Ново-Иркутская ТЭЦ; 2 – ТЭЦ-10 г. Иркутска

На рисунке 31 показаны результаты отбора проб ЗШС из отвала Барабинской ГРЭС в сравнении с максимальной молекулярной влагоёмкостью.

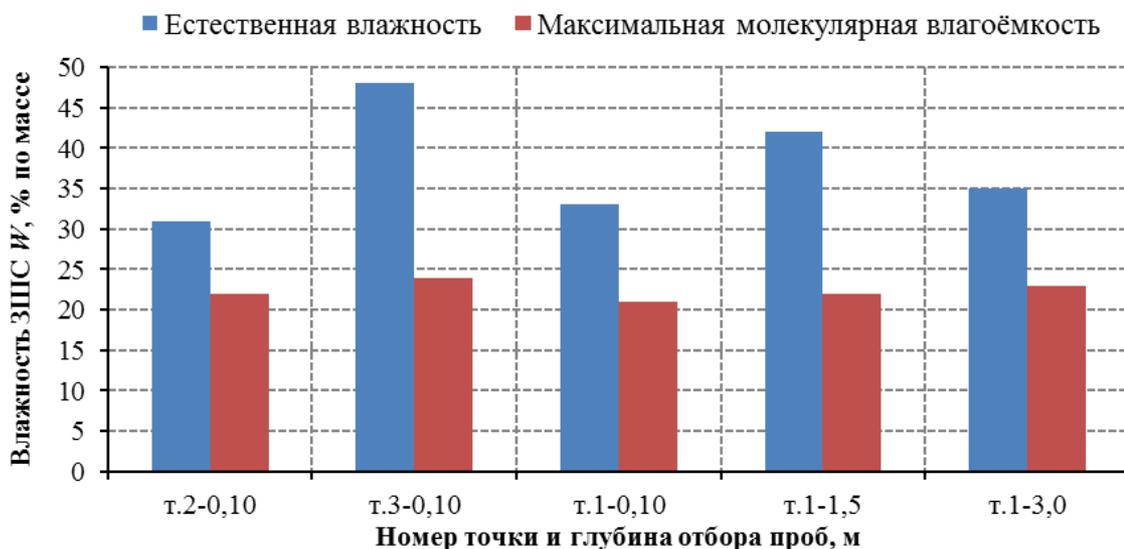


Рисунок 31 – Естественная и максимальная молекулярная влажности ЗШС в золоотвале Барабинской ГРЭС

Водоустойчивость ЗШС как материала для сооружения земляного полотна следует рассматривать, как способность длительно сохранять прочность и устойчивость при взаимодействии с водой.

На основании данных по химическому и фазово-минералогическому составу ЗШС (см. параграф 3.2) можно сделать предварительное заключение о стабильности состава и физико-химических свойств этого материала с течением времени.

Понятие *водоустойчивость* грунтов включает показатели *размокаемость* и *размываемость*.

Размокаемость (дезагрегирование в водной среде) характерна для грунтов, имеющих конденсационные или неводостойкие кристаллизационные связи. Кислый золошлаковый материал не содержит коллоидных частиц и не обладает гидравлической активностью. Поэтому вышеуказанные структурные связи в этом материале практически отсутствуют. Имеющиеся спекшиеся зольные микроагрегаты обладают высокой водостойкостью.

Структура ЗШС формируется под воздействием слабых морфологических связей (или связей механического зацепления частиц) и капиллярных сил. Эти связи усиливаются с возрастанием плотности материала, но они не являются водостойкими. Поэтому негативной особенностью золошлаковой смеси является высокая размываемость, т.е. способность неукрепленного земляного полотна, отсыпанного из ЗШС, разрушаться при воздействии движущейся воды.

Высокая дисперсность, значительная открытая пористость ЗШС, микропористость зольных и пористых шлаковых частиц определяют высокую *влагоёмкость* этого материала, что подтверждается данными из таблицы 12.

Полная *влагоёмкость* ЗШС может быть рассчитана по формуле

$$W_{nb} = \frac{e\rho_w}{\rho_s} S_r, \quad (50)$$

где e – коэффициент пористости грунта, д.ед.;

ρ_w – плотность воды, принимаемая 1 г/см^3 ;

ρ_s – плотность частиц грунта, г/см^3 ;

S_r – коэффициент водонасыщения по ГОСТ 25100-2011, принимаемый 1, д.ед.

Влагоёмкость ЗШС превосходит аналогичный показатель не только для природных песков, но и для многих связных грунтов.

Водоотдача ЗШС W_6 , как и любых дисперсных грунтов может быть определена по формуле

$$W_6 = W_{н6} - W_{мм6} . \quad (51)$$

Величина водоотдачи характеризует количество свободной (гравитационной) воды, находящейся в материале, и изменяется для ЗШС от 8 до 30 % и более.

Положительной особенностью ЗШС как материала для сооружения земляного полотна является способность этого материала быстро отдавать «лишнюю» воду – от величины полной влагоёмкости до максимальной молекулярной влагоёмкости.

Водопроницаемость – это свойство грунта пропускать жидкость под действием перепада давления или напора. Водопроницаемость грунтов характеризуется коэффициентом фильтрации, который численно равен скорости фильтрации воды при градиенте напора, равном единице, и линейном законе фильтрации.

Коэффициент фильтрации может определяться по эмпирическим формулам, лабораторными и полевыми методами.

Эмпирические формулы основаны на данных по зерновому составу. Они включают ряд коэффициентов, требующих экспериментального определения, не учитывают фактический коэффициент уплотнения материала. Эти формулы пригодны для крупных и средних песков.

Полевые методы по ГОСТ 23278 [106] дают более достоверные результаты, но они применяются только для грунтовых массивов естественного сложения.

Коэффициент фильтрации ЗШС определялся лабораторным методом по методике, изложенной в обязательном приложении 5 к ГОСТ 25584 [107] на приборе ПКФ-СД. Этот метод применяется в дорожном и аэродромном строительстве и распространяется на песчаные грунты нарушенного сложения при максимальной плотности и оптимальной влажности, значения которых предварительно устанавливают по ГОСТ 22733 [69]. Результаты испытаний представлены в таблице 31.

Таблица 31 – Коэффициент фильтрации ЗШС различных ТЭС Западной Сибири

№ пробы	Результаты испытаний		
	коэффициент фильтрации K_f , м/сут.	степень водопроницаемости материала по ГОСТ 25100-2011	степень дренирования мате- риала по СП 34.13330.2012
Кузнецкий уголь, Беловская ГРЭС			
1	0,73	водопроницаемый	дренирующий
2	0,16	слабоводопроницаемый	недренирующий
3	0,07		
4	0,10		
5	0,09		
6	0,04		
7	0,19		
Кузнецкий уголь, Новокемеровская ТЭЦ			
1	0,09	слабоводопроницаемый	недренирующий
2	0,08		
3	0,07		
4	0,10		
5	0,08		
6	0,10		
Мугунский уголь Ново-Иркутская ТЭЦ			
1	0,36	водопроницаемый	недренирующий
2	0,35		
3	0,28	слабоводопроницаемый	
Мугунский уголь, Иркутская ТЭЦ-10			
1	125,0	очень сильноводопроницаемый	дренирующий
2	0,57	водопроницаемый	недренирующий
3	0,38		
Кузнецкий уголь, Омская ТЭЦ-2			
1	0,06	слабоводопроницаемый	недренирующий
2	0,07		
3	0,06		
4	0,08		
5	0,05		
6	0,07		
7	0,06		
Экибастузский уголь, Омская ТЭЦ-4			
1	0,07	слабоводопроницаемый	недренирующий
2	0,06		
3	0,06		
4	0,06		
5	0,05		
6	0,07		
7	0,06		
Кузнецкий уголь, Барабинская ГРЭС			
1	0,12	слабоводопроницаемый	недренирующий
2	0,12		
3	0,13		
4	0,12		
5	0,12		

Исследование водопроницаемости ЗШС показало, что две пробы, отобранные в золошлаковой зоне ТЭЦ-10, в соответствии с требованиями СНиП 2.05.02-85* и СП 34.13330.2012 следует отнести к дренирующим грунтам (коэффициент фильтрации $K_f > 0,5$ м/сут.). Особенно выделяется по показателю K_f проба №1, отобранная вблизи выпуска пульпы на золоотвале ТЭЦ-10 (по зерновому составу эта проба соответствует гравелистому песку). Остальные пробы ЗШС по показателю коэффициента фильтрации в уплотнённом состоянии относятся к недренирующим грунтам.

По ГОСТ 25100 большинство проб исследуемого материала относится к слабодопроницаемым грунтам ($0,30 > K_f > 0,005$ м/сут.). Следует отметить для сравнения, что коэффициент фильтрации пылеватого песка обычно изменяется в пределах 0,1-1,0 м/сут.

Помимо коэффициента фильтрации водопроницаемость грунтов оценивается коэффициентом влагопроводности K_w . Коэффициент влагопроводности грунта может служить косвенным показателем при учете степени пучинистости грунта [105].

Коэффициент влагопроводности определялся в соответствии с [67] на приборе ПКВГ-Ф, конструкция которого предложена профессором Н.А. Золотаревым. В ходе испытаний получают значение коэффициента влагопроводности при начальной влажности и плотности грунта за время, необходимое для достижения фронтом увлажнения верхней поверхности образца при его увлажнении снизу. Испытания проводились на образцах ЗШС приготовленных в специальных формах при оптимальной влажности $W_{opt}=0,30$ и коэффициенте уплотнения $K_{yпл}=1,0$. Значение коэффициента влагопроводности определяли по формуле

$$K_w = \frac{4}{3,14d^4\tau} \left[\frac{m_e}{\rho_c(W_{не} - W_H)} \right]^2, \quad (52)$$

где d – диаметр грунтового образца, см;

τ – время увлажнения, ч;

m_e – масса впитавшейся воды, г;

ρ_c – плотность частиц грунта, г/см³;

W_H – влажность испытуемого образца, д.ед.

Результаты оценки коэффициента влагопроводности K_w ЗШС из отвала ТЭЦ-5 г. Омска приведены в таблице 32.

Таблица 32 – Коэффициент влагопроводности ЗШС

№ опыта	Масса впитавшейся воды m_6 , г	Время увлажнения τ , ч	Коэффициента влагопроводности K_w , см ² /ч	Коэффициента влагопроводности K_w , см ² /сут.	Среднее значение коэффициента влагопроводности K_w , см ² /сут.
2	52	0,098	135,0	3240,7	3370
3	49	0,077	153,8	3690,8	
4	54	0,097	148,1	3555,0	
5	50	0,097	127,0	3047,9	
6	44	0,093	101,9	2444,6	

Примечание. Среднее значение коэффициента влагопроводности K_w получено после математической обработки результатов испытаний

Анализируя результаты испытаний необходимо отметить несколько выводов:

- значение коэффициента влагопроводности K_w ЗШС может сильно изменяться в зависимости от зернового состава ЗШС, начальной влажности и коэффициента уплотнения;
- в сравнении с грунтами природного происхождения [108] коэффициент влагопроводности K_w ЗШС больше на порядок, что можно объяснить развитой пористостью как самого материала, так и частиц ЗШС.

Важным показателем, влияющим на устойчивость земляного полотна, является *высота капиллярного поднятия* $h_{\text{кап}}$. Показатель высоты капиллярного поднятия (всасывания) влаги для грунтов имеет существенное значение при назначении конструктивных решений при проектировании дорожных конструкций, толщины слоёв при вертикальной планировке территорий и т.п. Высота капиллярного поднятия определяет, на какую высоту может подняться вода в толще грунта по его капиллярной системе. Чем больше этот показатель, тем больше воды может подняться от уровня грунтовых вод или верховодки до границы промерзания грунта.

На высоту и скорость капиллярного поднятия влияют многие факторы, наиболее важными из которых являются зерновой и химико-минералогический состав грунтов, их характеристики пористости и влагопроводности, а также состав водного раствора.

Высота и скорость капиллярного поднятия воды чрезвычайно сильно зависят от зернового состава грунтов, поскольку в первую очередь он определяет размер и характер пор. С возрастанием дисперсности грунтов размер пор в них уменьшается, и в соответствии с этим увеличивается высота капиллярного поднятия и, наоборот, уменьшается скорость подъема воды. Чем больше начальная скорость капиллярного движения воды, тем быстрее затухает это движение и, наоборот, чем медленнее происходит поднятие капиллярной воды, тем большей высоты оно достигает. Во всех случаях скорость капиллярного поднятия наибольшая в начальный момент поднятия. С повышением дисперсности ЗШС высота капиллярного поднятия воды в слое может увеличиваться от 0,1 до 1,2 м.

Испытания ЗШС проводили по оригинальной методике. Материал засыпали с потряхиванием и штыкованием в полиэтиленовые прозрачные трубки. Нижний конец трубки с ЗШС на 20 мм погружали в воду и наблюдали за процессом поднятия влаги, зрительно фиксируя результат, до завершения увеличения высоты увлажнённого слоя. Капиллярное поднятие в полиэтиленовых трубках воды в слой сухой ЗШС продолжалось в течение шести суток (рисунок 32), после этого перемещение воды прекратилось. В качестве испытуемого материала выступали ЗШС из отвала ТЭЦ-5 г. Омска и из отвала Барабинской ГРЭС.

Извлечение ЗШС из полиэтиленовой трубки производилось легким постукиванием по стенке трубки. По мере извлечения грунта отбирались пробы для проверки влажности по высоте трубки (рисунок 33).

Как видно из графиков на границе уреза воды влажность ЗШС практически достигает значений полной влагоёмкости $W_{не}$. С увеличением расстояния от уреза воды влажность ЗШС уменьшается до значения максимальной молекулярной влагоёмкости $W_{ммв}$ в точке, где визуально заканчивается поднятие границы увлажнения.

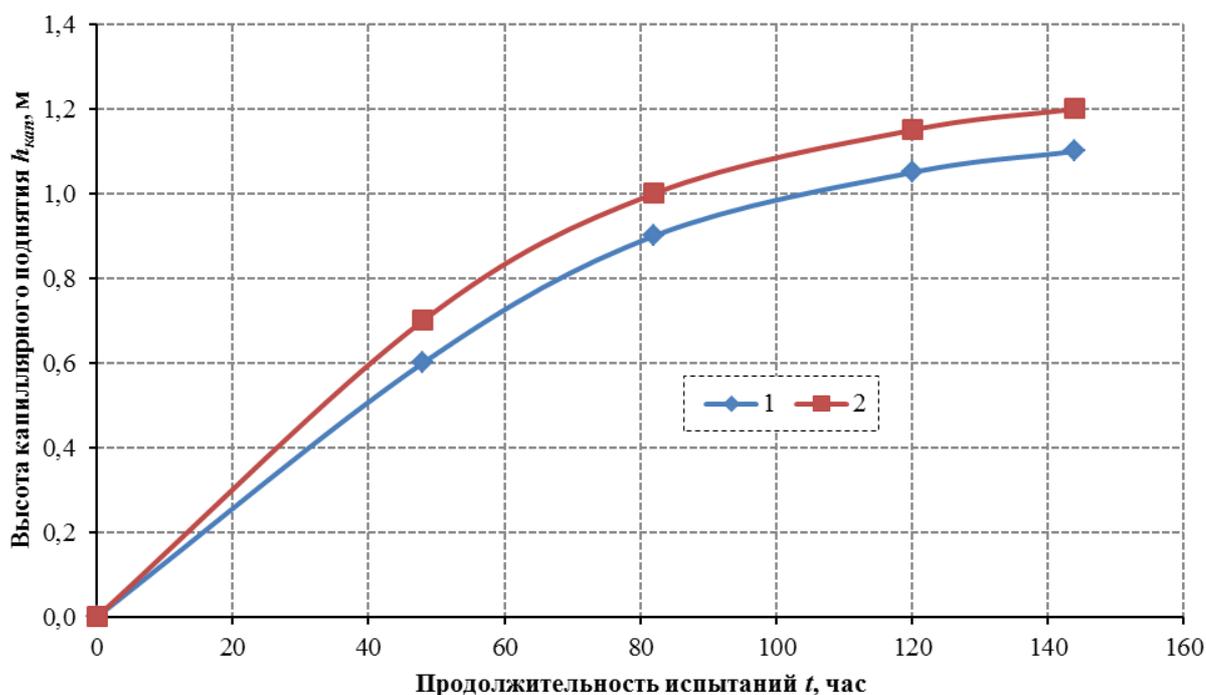


Рисунок 32 – Кинетика процесса капиллярного поднятия воды в ЗШС:
1 – ЗШС из отвала Барабинской ГРЭС; 2 – ЗШС из отвала ТЭЦ-5 г. Омска

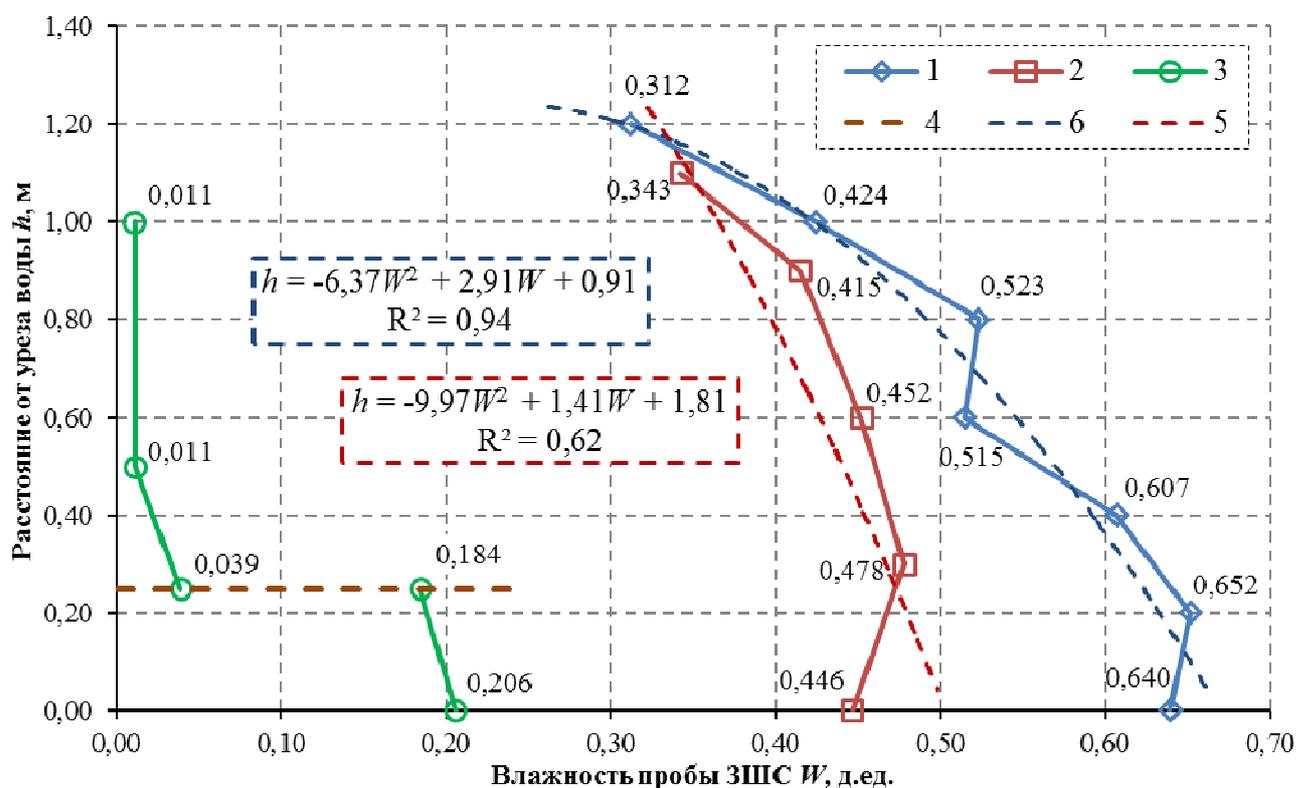


Рисунок 33 – Изменение влажности по высоте в испытаниях на капиллярное поднятие влаги:
1 – влажность проб по высоте образца ЗШС из отвала Барабинской ГРЭС; 2 – влажность проб по высоте образца ЗШС из отвала ТЭЦ-5 г. Омска; 3 – влажность пробы грунта при испытаниях с использованием подстилающего слоя суглинка; 4 – граница слоев суглинка и ЗШС; 5, 6 – эмпирические зависимости влажности ЗШС от высоты образца

Помимо вышеописанного испытания нами проведены дополнительные эксперименты по исследованию капиллярного поднятия воды на границе суглинистого грунта и ЗШС, что важно для прогнозирования процесса увлажнения насыпи из ЗШС, отсыпанной на грунтовое основание.

В полиэтиленовую трубку засыпался грунт (суглинок легкий пылеватый) до толщины слоя 25 см, выше суглинка засыпалась ЗШС толщиной слоя 75 см. Нижний конец трубки с суглинком на 20 мм погружали в воду и наблюдали за процессом поднятия влаги, зрительно фиксируя результат, до завершения увеличения высоты увлажнённого слоя. В качестве испытуемого материала выступала ЗШС из отвала ТЭЦ-5 г. Омска. Наблюдения за процессом велось в течение 14 суток. На протяжении всего эксперимента зрительно не наблюдалось перемещение границы увлажнения в слой ЗШС. После завершения испытаний полиэтиленовая трубка разрезалась по границе слоев грунтов, и производился отбор проб на влажность суглинка и ЗШС (рисунок 34).

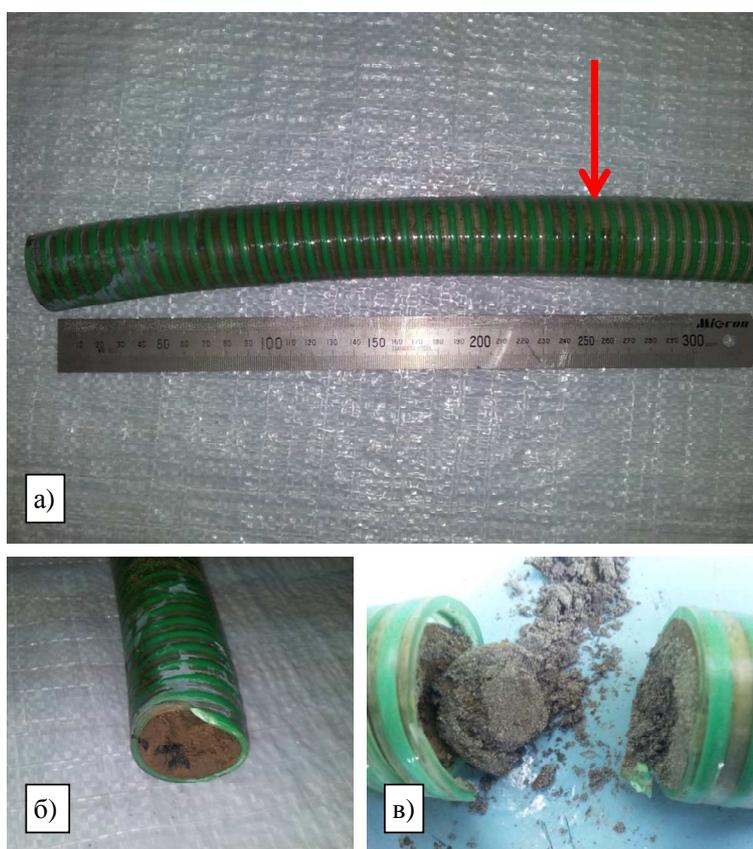


Рисунок 34 – Извлечение образцов суглинка и ЗШС после испытаний: а) граница слоев суглинка и ЗШС; б) вид образца суглинка на уровне уреза воды; в) разрез по границе слоев суглинка и ЗШС (суглинок справа, ЗШС слева)

Извлечение ЗШС из полиэтиленовой трубки производилось легким постукиванием по стенке трубки. По мере извлечения грунта отбирались пробы для проверки влажности по высоте трубки (рисунок 33, линия №3).

Эксперимент показал, что влажность ЗШС на границе со слоем суглинка резко отличается от влажности суглинка. Несмотря на длительное увлажнение лишь малая часть влаги поднялась из слоя суглинка в слой ЗШС.

Проведённые испытания позволили сделать важный вывод: полное капиллярное водонасыщение ЗШС происходит только при прямом длительном контакте с водой. В случае, когда слой ЗШС лежит на основании из глинистого грунта влага не передаётся из капиллярной системы этого грунта в ЗШС, несмотря на то, что глинистый грунт увлажнён до границы текучести.

Важным технологическим показателем грунта земляного полотна является *скорость просыхания* в процессе строительства. Скорость просыхания влияет на периодичность увлажнения слоя ЗШС для предотвращения пыления, а также на продолжительность возможных технологических перерывов.

Испытания на просыхание образцов проводились в полиэтиленовых цилиндрических формах диаметром 100 мм закрытыми снизу. Таким образом, моделировалось просыхание ЗШС только с верхней поверхности слоя (рисунок 35).

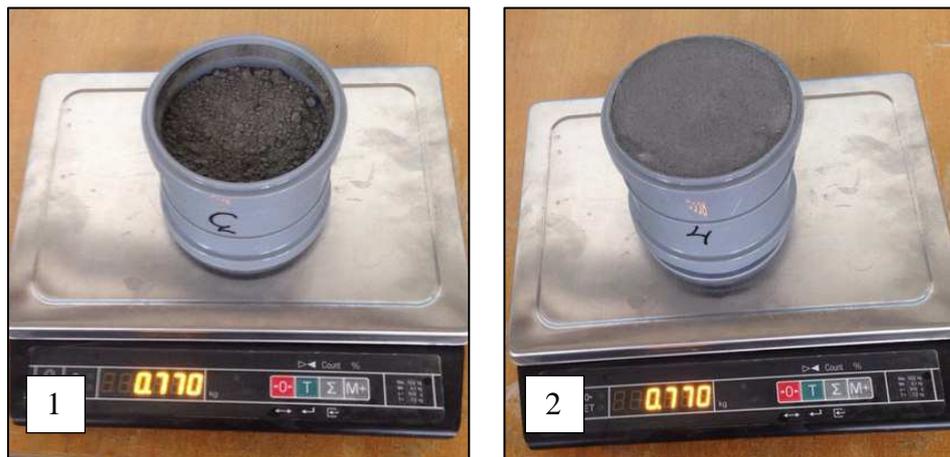


Рисунок 35 – Взвешивание образцов ЗШС в процессе испытаний на просыхание: 1 – образец, приготовленный при насыпной плотности; 2 – образец приготовленный при $K_{\text{упл}}=1,00$

Приготовление образцов осуществлялось из ЗШС, отобранной из отвала Томской ГРЭС-2, при влажности $W=41\%$ по массе по стандартной методике

ГОСТ 22733. Испытания проводили при разной плотности слоя ЗШС: насыпная плотность, $K_{упл}=0,82$ и $K_{упл}=1,00$. Просыхание образцов осуществлялось при температуре воздуха в лаборатории 25 °С без создания дополнительного потока воздуха. Динамика изменения влажности образцов показана на рисунке 36.

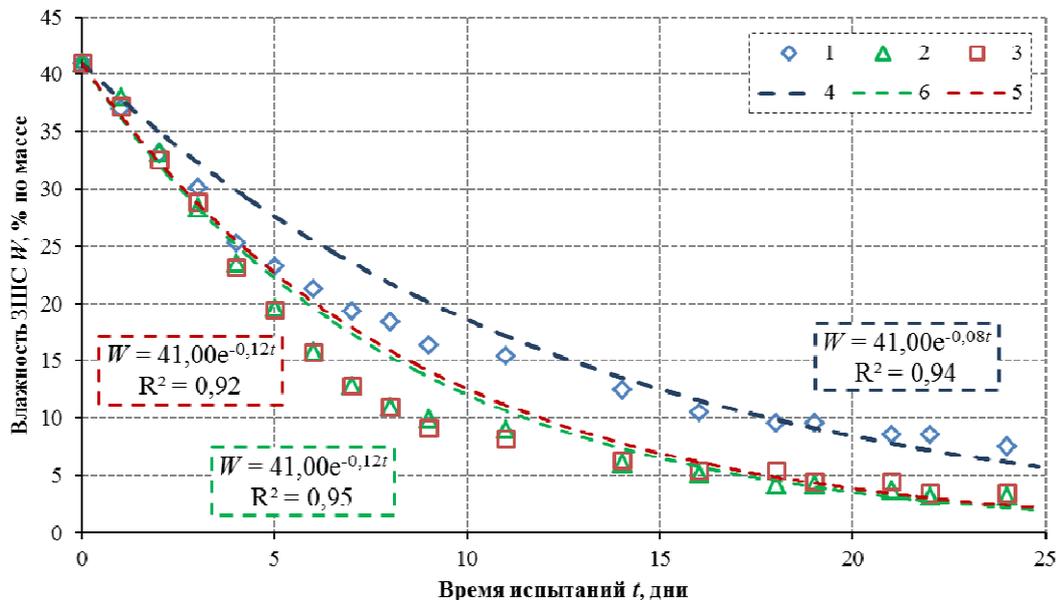


Рисунок 36 – Зависимость изменения влажности ЗШС от времени: 1, 2, 3 – влажность проб при насыпной плотности, $K_{упл}=0,82$ и $K_{упл}=1,00$ соответственно; 4-6 – эмпирические зависимости влажности от времени

Испытания показали, что слой ЗШС находящийся в неуплотненном состоянии просыхает медленнее, чем слой с недостаточным уплотнением. Наибольшая скорость просыхания у слоя ЗШС с $K_{упл}=1,00$. По всей видимости, связано это с сокращением пути диффузии водяного пара к верхней поверхности слоя за счет уплотнения. Влажность слоя ЗШС может находиться в границах допустимой влажности в течении 3-4 дней при насыпной плотности.

3.6 Влияние неравномерности зернового состава на свойства золошлаковых смесей

Данные по зерновому составу подтверждают характерный недостаток отвальной ЗШС как материала для сооружения земляного полотна – неоднородность этого материала по площади и глубине золоотвала.

Влияние неоднородности зернового состава на прочностные свойства ЗШС оценить достаточно сложно. Для сравнения на рисунках 37-40 представлены результаты определения модуля деформации и угла внутреннего трения мелкозернистой ЗШС из отвалов ТЭЦ-5 г. Омска и ГРЭС-2 г. Томск, а также среднезернистой ЗШС из отвала Беловской ГРЭС.

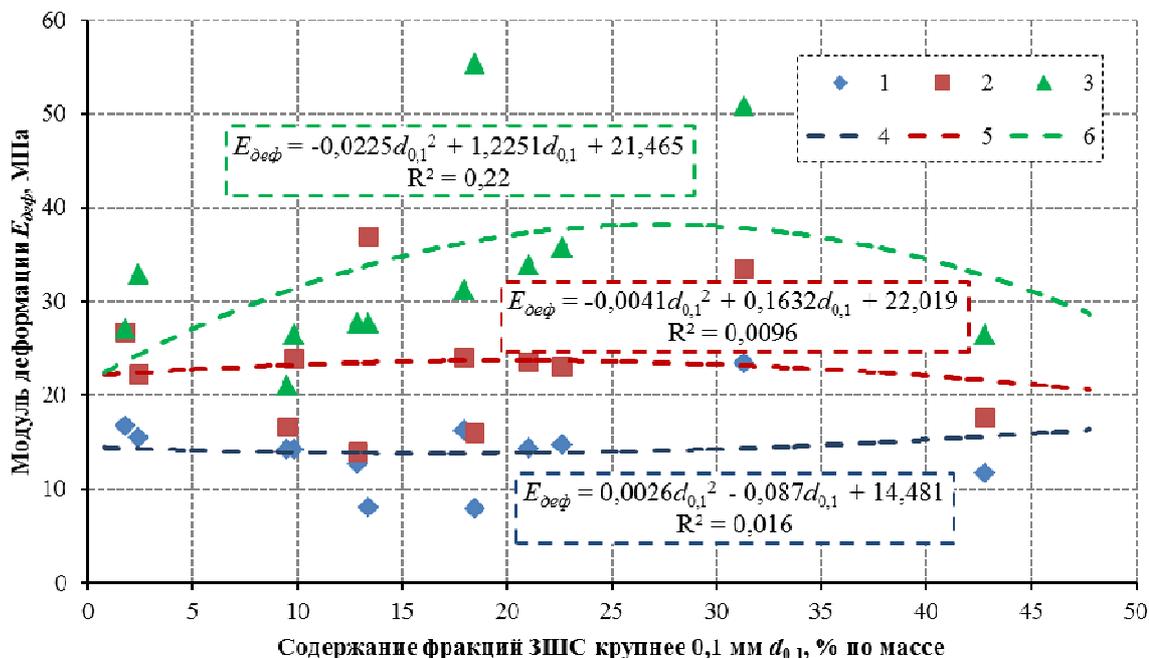


Рисунок 37 – Зависимости модуля деформации от содержания фракций в мелкозернистой ЗШС: 1, 2, 3 – результаты определения модуля деформации при вертикальном давлении 0,1 МПа, 0,2 МПа и 0,3 МПа соответственно; 4, 5, 6 – эмпирические зависимости

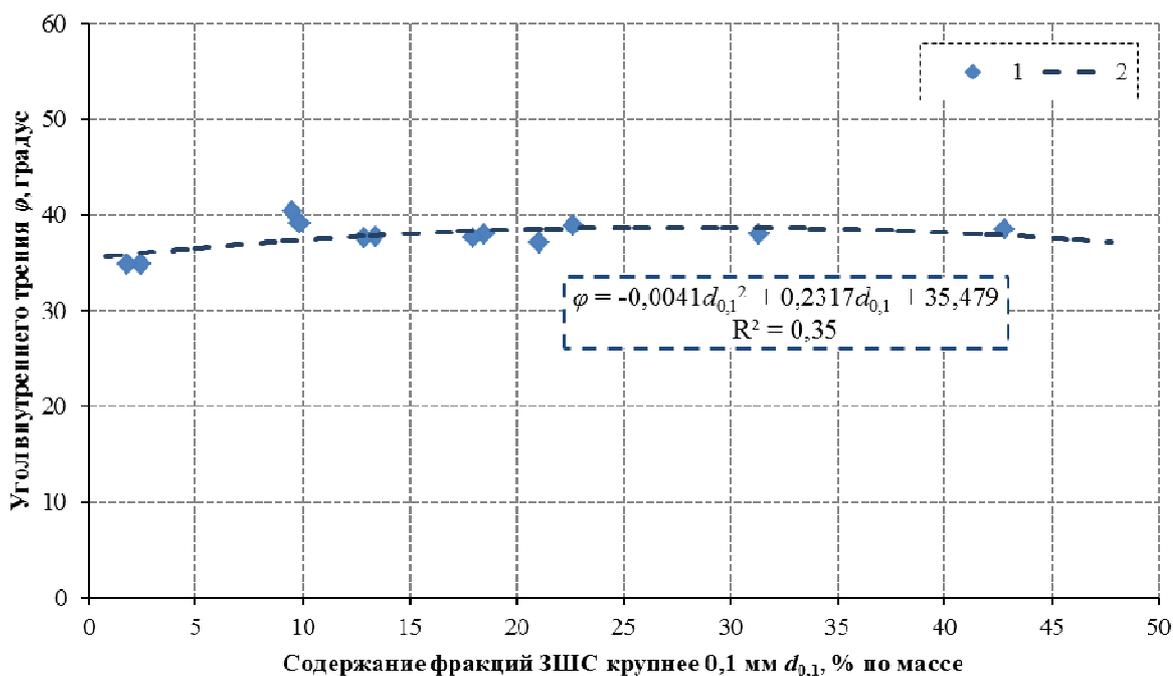


Рисунок 38 – Зависимость угла внутреннего трения от содержания фракций в мелкозернистой ЗШС: 1 – результаты определения угла внутреннего трения; 2 – эмпирическая зависимость

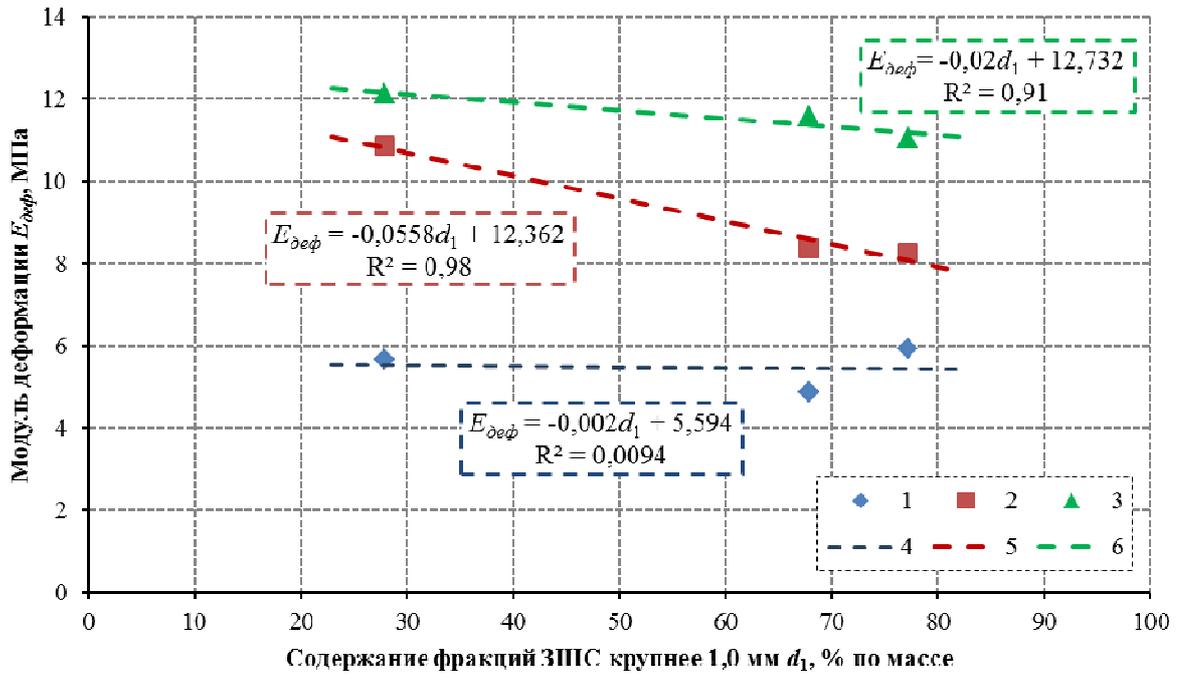


Рисунок 39 – Зависимости модуля деформации от содержания фракций в среднезернистой ЗПС: 1, 2, 3 – результаты определения модуля деформации при вертикальном давлении 0,1 МПа, 0,2 МПа и 0,3 МПа соответственно; 4, 5, 6 – эмпирические зависимости

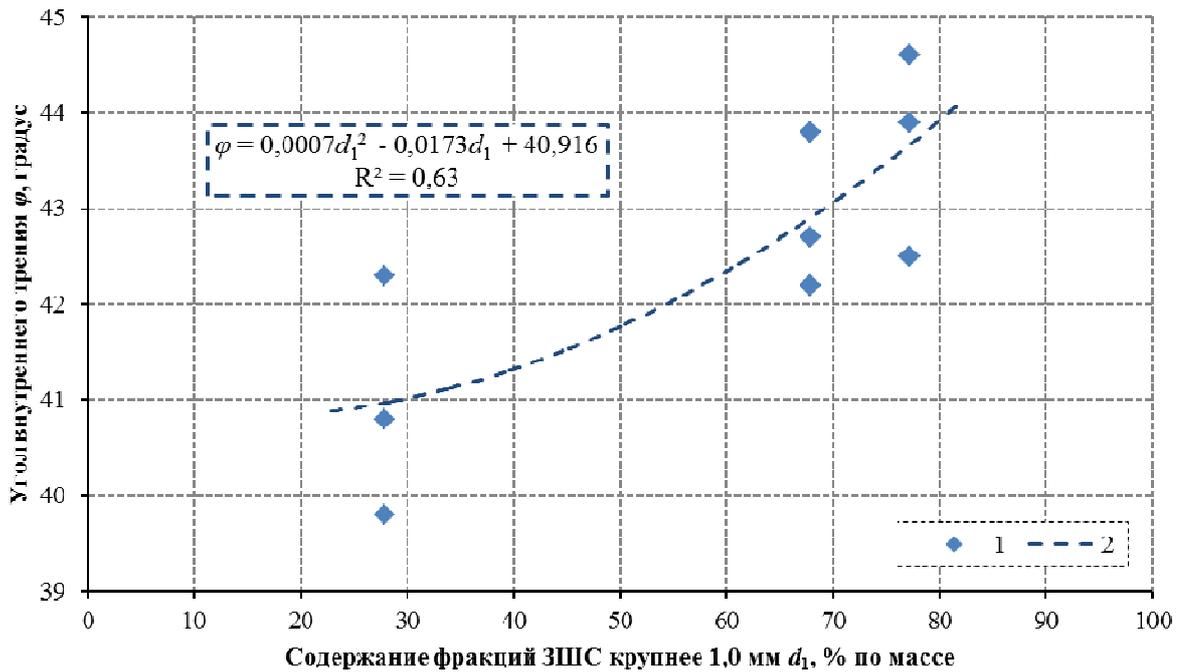


Рисунок 40 – Зависимость угла внутреннего трения от содержания фракций в среднезернистой ЗПС: 1 – результаты определения угла внутреннего трения; 2 – эмпирическая зависимость

Анализируя результаты испытаний и графики зависимостей можно сделать следующие выводы:

- у мелкозернистой ЗШС не наблюдается какой-либо зависимости модуля деформации, удельного сцепления и угла внутреннего трения от изменения зернового состава ЗШС;
- у среднезернистой ЗШС можно выделить слабую зависимость модуля деформации от увеличения содержания фракции более 1,0 мм. При этом увеличение содержания фракции 1,0 мм в более чем в 2 раза модуль деформации уменьшается на значение от 9 до 24 % в зависимости от вертикального давления;
- изменения зернового состава наибольшим образом сказывается на увеличении угла внутреннего трения в среднезернистой ЗШС. При этом увеличение содержания фракции 1,0 мм в более чем в 2 раза угол внутреннего трения увеличивается на 7 %.

Таким образом, можно сказать, что изменение зернового состава ЗШС по глубине и площади золоотвала мало влияет на свойства этого материала как грунта земляного полотна. Для среднезернистой и крупнозернистой ЗШС (по ОДМ 218.2.013-2013) имеется слабое влияние зернового состава на модуль деформации и угол внутреннего трения ЗШС.

Такие ЗШС получаются в результате применения на ТЭЦ системы сухого удаления гранулированного шлака без дробления на более мелкие фракции. Для выбора места разработки золоотвала можно использовать формулу, полученную по результатам многочисленных экспериментальных исследований [87]

$$L_{зу} = \left(0,01 \sum_{d=0,025}^{d_{\max}} \Phi_d \right) L; \quad (53)$$

где $\sum_{d=0,025}^{d_{\max}} \Phi_d$ – сумма фракций диаметром более 0,25 мм в составе исходного золошлакового материала;

L – расстояние от выпуска пульпы до водосбросного колодца.

Эта формула позволяет приближённо определять протяжённость золошлаковой зоны $L_{зу}$ (см. рисунок 13), в которой отлагаются наиболее крупные фракции.

Уменьшить неоднородность ЗШС в отвале можно технологическим приемом – веерным буртованием. Перед разработкой массива ЗШС необходимо произвести его перемещение бульдозером с близлежащей территории по радиусу до 50 м в один бурт. Далее бурт ЗШС разрабатывается экскаватором с погрузкой в автосамосвалы. При этом будет происходить перемешивание ЗШС и усреднение свойств ее как по глубине, так и по площади золоотвала.

Стоит отметить также, что при уплотнении ЗШС с содержанием шлака происходит его дробление на фракции (см. рисунок 21). Тем самым увеличивается содержание более мелких фракций, что ведет к небольшому изменению свойств согласно рисункам 39-40. Такую особенность ЗШС следует учитывать при назначении расчетных прочностных характеристик.

3.7 Исследование морозного пучения золошлаковых смесей

Степень морозного пучения является одним из основных показателей, определяющих пригодность грунтов для сооружения земляного полотна автомобильных дорог.

В соответствие с решением Технического комитета по мёрзлым грунтам Международного общества по механике грунтов и фундаментостроению (ISSMFE) существуют три уровня оценки степени пучинистости грунта [109, 110]:

- I уровень – грубая оценка по гранулометрическому составу (позволяющая выделить лишь заведомо непучинистые грунты);
- II уровень – оценка средней точности по нескольким показателям: гранулометрическому составу, показателям пластичности, высоте капиллярного поднятия воды и т.п. (грунты классифицируются по степени пучинистости).
- III уровень – точная оценка по результатам промораживания образцов в специальных приборах или по данным стационарных наблюдений в полевых условиях.

В настоящее время приборы для определения относительной деформации морозного пучения серийно не выпускаются. В связи, с чем в инженерной прак-

тике степень пучинистости грунта, в основном, оценивается на I или II уровне (в том числе по СП 34.13330.2012 и ОДН 218.046.01), что не всегда обеспечивает необходимое качество проектирования. Это подтверждается испытаниями на льдистость ЗШС [4].

Испытание на морозное пучение регламентируется ГОСТ 28622 [77, 78]. Подобие водно-теплового режима грунта в лабораторных условиях и земляного полотна достигается соблюдением следующих условий:

- промерзание образцов допускается только с верхнего торца;
- температурный режим на нижней и верхней поверхностях образца принимается соответствующий природным условиям;
- в процессе промерзания обеспечивается непрерывный подток воды к границе промерзания.

Степень пучинистости ЗШС определяется по значению относительной деформации морозного пучения ε_{fh} , полученному по результатам испытаний образцов в специальной установке (рисунок 41) [111], обеспечивающей промораживание образца в заданном температурном и влажностном режимах, и измерение перемещений его поверхности.

Сборная обойма выполнена из отдельных полипропиленовых колец с внутренним диаметром 100 мм, высотой 20 мм, соединяющихся между собой. Обойма устанавливается на металлический поддон с подставкой, который соединен термоизолированным шлангом с резервуаром, заполненным водой, расположенным за пределами морозильной камеры (рисунок 42).

Уровень воды в резервуаре и поддоне устанавливался равным. Конструкция прибора позволяет проводить испытания с заданным давлением на образец.

Образцы ($h = 150$ мм, $d = 100$ мм) приготавливали в кольцах методом стандартного уплотнения. Испытания проводили без нагрузки на образцы, при открытой и закрытой схеме увлажнения грунтов. Для исключения смерзания и снижения сил трения грунта со стенками обоймы использовали полиэтиленовую пленку.

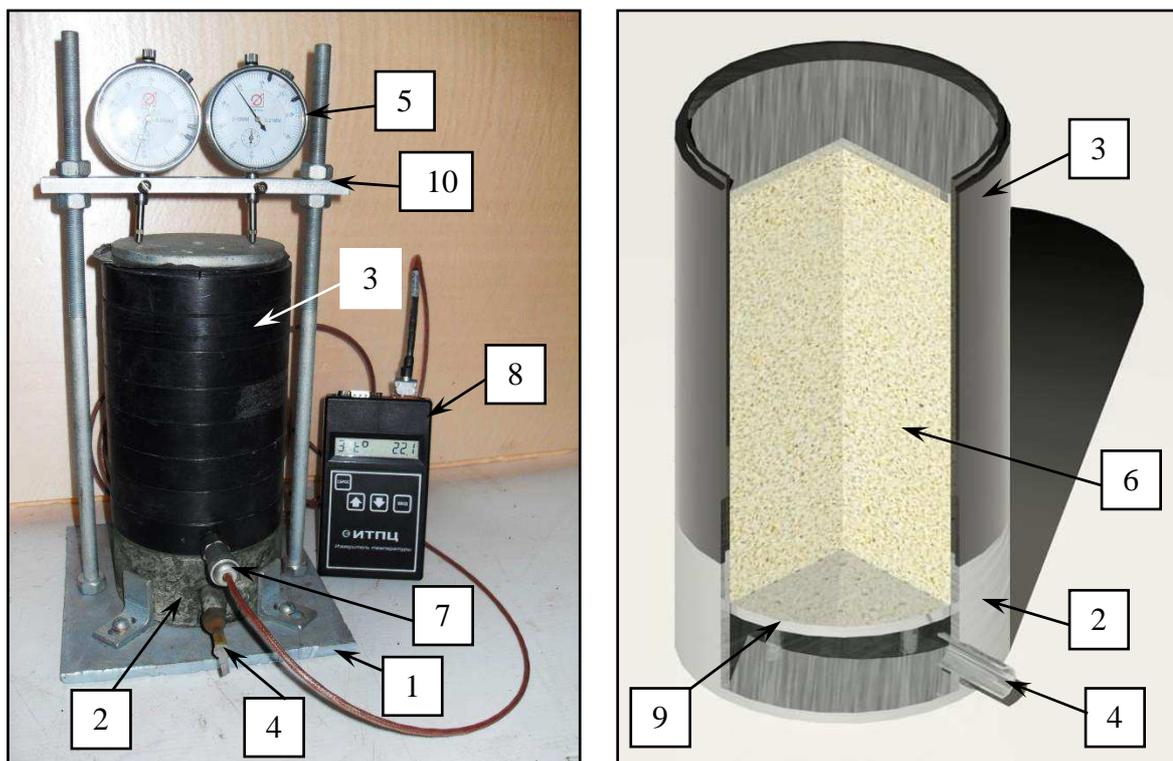


Рисунок 41 – Внешний вид (слева) и 3D-модель в разрезе (справа) установки для определения деформации морозного пучения грунтов: 1 – нижняя плита; 2 – поддон для воды; 3 – сборная обойма из колец; 4 – патрубок для подачи воды; 5 – индикаторы часового типа ИЧ-10; 6 – образец грунта; 7 – термопреобразователь сопротивления ТСП 9307; 8 – цифровой измеритель температуры ИТПЦ-ТС-0-1; 9 – подставка с отверстиями под образец грунта; 10 – опорная рама



Рисунок 42 – Подготовка установок с грунтом для определения морозного пучения в климатической камере

В качестве теплоизоляции применяли кожух из экструдированного пенополистирола с толщиной стенки 80 мм и термическим сопротивлением $2,1 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Дж}$.

Деформации морозного пучения измеряли индикаторами часового типа ИЧ-10 с точностью 0,01 мм. Так как индикаторы рекомендуется использовать при температуре $20 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, для работы индикаторов при отрицательных температурах

была заменена смазка механизмов. Температура образцов измерялась термопреобразователями сопротивления ТСП 9307 [112, 113], подключаемыми к цифровому измерителю температуры модели ИТПЦ-ТС-0-1 [114]. Термодатчики располагали в верхней, средней и нижней частях прибора. Точность измерения температуры 0,1 °С. Необходимый температурный режим создавался в климатической камере марки «Erfurt» типа Т25/1.1. При проведении испытаний в камере поддерживали температуру воздуха минус 4 °С. Кроме этого испытания проводились и при температурах минус 6 °С и минус 8 °С. Перед промораживанием образцы выдерживали в эксикаторе в камере в течение суток при температуре 1 °С.

Степень пучинистости грунта определяли по относительной деформации морозного пучения ε_{fh}

$$\varepsilon_{fh} = \frac{h_f}{d_i}, \quad (54)$$

где h_f – вертикальная деформация образца грунта в конце испытания, мм;
 d_i – фактическая толщина промерзшего слоя образца грунта, мм.

Оценка степени пучинистости ЗШС выполнялась по ГОСТ 25100-2011, ГОСТ 28622-2012 и СП 34.13330.2012 (таблица 33). Испытывали ЗШС из отвалов ТЭЦ-4 г. Омска, Беловской ГРЭС и Новокемеровской ТЭЦ (приложение В).

Таблица 33 – Классификация грунтов по степени пучинистости

По СП 34.13330.2012		Группа грунта	По ГОСТ 25100-2011 и ГОСТ 28622-2012	
Относительное морозное пучение	Степень пучинистости		Разновидность грунта	Относительная деформация пучения
< 0,01	Непучинистый	I	Непучинистый	< 0,01
0,01-0,04	Слабопучинистый	II	Слабопучинистый	0,01-0,035
0,04-0,07	Пучинистый	III	Среднепучинистый	0,035-0,07
0,07-0,1	Сильнопучинистый	IV	Сильнопучинистый	0,07-0,1
> 0,1	Чрезмерно пучинистый	V	Чрезмерно пучинистый	> 0,1

Кроме ЗШС, для сравнения, испытанию на морозное пучение подвергали природные грунты нарушенной структуры, уплотнённые на большом приборе стандартного уплотнения при оптимальной влажности – песок средней крупности,

супесь песчанистая и суглинок лёгкий пылеватый. Испытания проводили без нагрузки на образцы.

Стандартизированной методикой определения степени пучинистости грунтов принято испытывать образцы при постоянном подтоке воды к нижней границе образца. Из-за этого обстоятельства получить достоверные данные о зависимости относительной деформации пучения от влажности не представляется возможным. Поэтому было принято решение разделить эксперимент на две части.

Вначале определяли зависимость относительной деформации пучения от влажности ЗШС при постоянном коэффициенте уплотнения и температуре промораживания. Затем – от коэффициента уплотнения ЗШС и температуры промораживания при неограниченном подтоке воды к нижней границе образца.

Первая часть эксперимента моделирует так называемую *закрытую систему* – во время промораживания нет подтока влаги к нижней границе образца.

Вторая часть эксперимента представляет собой *открытую систему* – неограниченный подток влаги к нижней границе образца при его промораживании.

В конце каждого испытания определяли влажность грунта, путем отбора проб в верхней, средней и нижней части образца. При этом можно проанализировать перемещение воды в процессе промерзания грунта.

Закрытая система. Испытания в закрытой системе (без подтока влаги извне) наилучшим образом моделируют работу земляного полотна в условиях первого типа местности по условиям увлажнения, а также работу изолированных слоёв грунта в насыпи земляного полотна автомобильных дорог.

В первой части экспериментального исследования морозного пучения ЗШС предлагается проанализировать зависимость степени пучинистости ЗШС от начальной влажности образца. Учет влажности производится через показатель относительной влажности, определяемой по формуле (44).

Методика проведения испытаний, по большей части, соответствует ГОСТ 28622, но имеет некоторые отличия. Образец ЗШС приготавливается при оптимальной влажности в цилиндрической форме с заполнением и уплотнением в три

приема. Так как влажность ЗШС оптимальная, коэффициент уплотнения образца соответствовал значению $K_{упл}=1,0$.

Затем к нижней границе образца подводилась вода. В зависимости от необходимости получения расчётной влажности образца увлажнение производилось от нескольких часов до двух суток. После этого подвод воды прекращался, и образец ЗШС с теплоизолирующим кожухом помещался в климатическую камеру, где находился в течение одних суток при температуре 1°C , что необходимо для усреднения влажности по высоте образца. Затем образец ЗШС промораживался при постоянной температуре $t = \text{минус } 4^{\circ}\text{C}$ в климатической камере. Деформации морозного пучения ЗШС фиксировались индикаторами часового типа марки ИЧ-10, установленными на неподвижной раме в верхней части установки. После того, как рост деформаций морозного пучения прекращался, установку разбирали и извлекали образец ЗШС из обоймы. Далее производился отбор проб ЗШС на влажность в трех точках по высоте образца: верх, середина и низ. По этим данным определялась значение средней начальной влажности образца.

На рисунке 43 представлена зависимость вертикальной деформации верхней границы образцов ЗШС (при $W=0,50$) и суглинка легкого пылеватого (при $W=0,20$) от времени промораживания в закрытой системе.

Результаты испытаний на морозное пучение в закрытой системе ЗШС при разной влажности и природных грунтов при оптимальной влажности представлены в таблице 34 и рисунке 44.

На графике можно выделить две характерных области: при увеличении влажности от гигроскопической до максимальной молекулярной влагоёмкости или до оптимальной влажности ЗШС является непучинистым материалом. Дальнейшее увеличение влажности приводит к увеличению морозного пучения ЗШС – вплоть до показателя «среднепучинистый» (по ГОСТ 25100) или «пучинистый» (по СП 34.13330.2012). Только насыщение ЗШС до уровня полной влагоёмкости может перевести этот техногенный грунт в разряд сильнопучинистого.

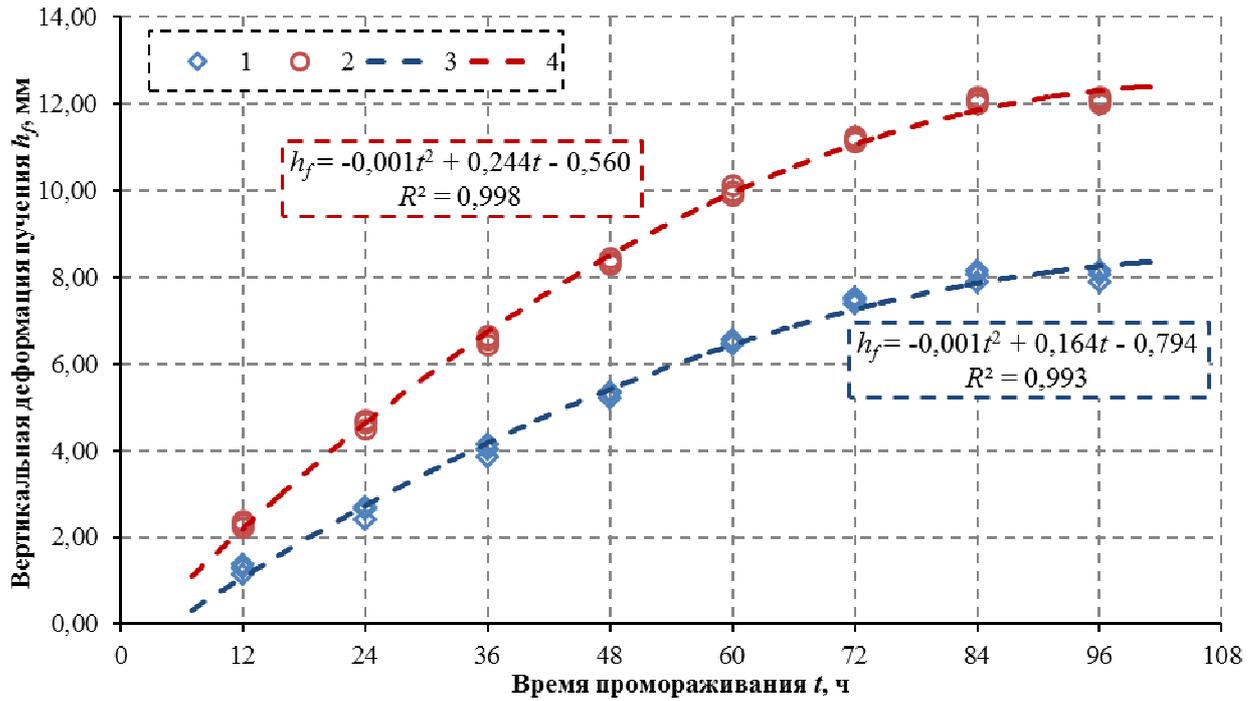


Рисунок 43 – Зависимость вертикальной деформации верхней границы образцов ЗШС и суглинка легкого пылеватого от времени промораживания в закрытой системе: 1 – испытания образцов ЗШС при влажности $W=0,50$; 2 – испытания образцов суглинка легкого пылеватого при влажности $W=0,20$; 3, 4 – эмпирические зависимости деформации пучения от времени для ЗШС и суглинка соответственно

Таблица 34 – Морозное пучение грунтов

Влажность образца, %	Среднее значение вертикальной деформации пучения h_f , мм	Относительная деформация пучения ε_{fh} , д.ед.	Степень пучинистости грунта	
			по СП 34.13330.2012	по ГОСТ 25100-2011
Золошлаковая смесь ТЭЦ-4 г. Омска				
15	0,75	0,005	непучинистый	непучинистый
30	1,30	0,009	непучинистый	непучинистый
36	3,35	0,022	слабопучинистый	слабопучинистый
45	6,97	0,046	пучинистый	среднепучинистый
50	8,08	0,054	пучинистый	среднепучинистый
60	10,05	0,067	пучинистый	среднепучинистый
Суглинок лёгкий пылеватый				
20	11,85	0,079	сильнопучинистый	сильнопучинистый
Супесь песчанистая				
11,9	4,57	0,030	слабопучинистый	слабопучинистый
Песок средней крупности				
5,8	0,60	0,004	непучинистый	непучинистый

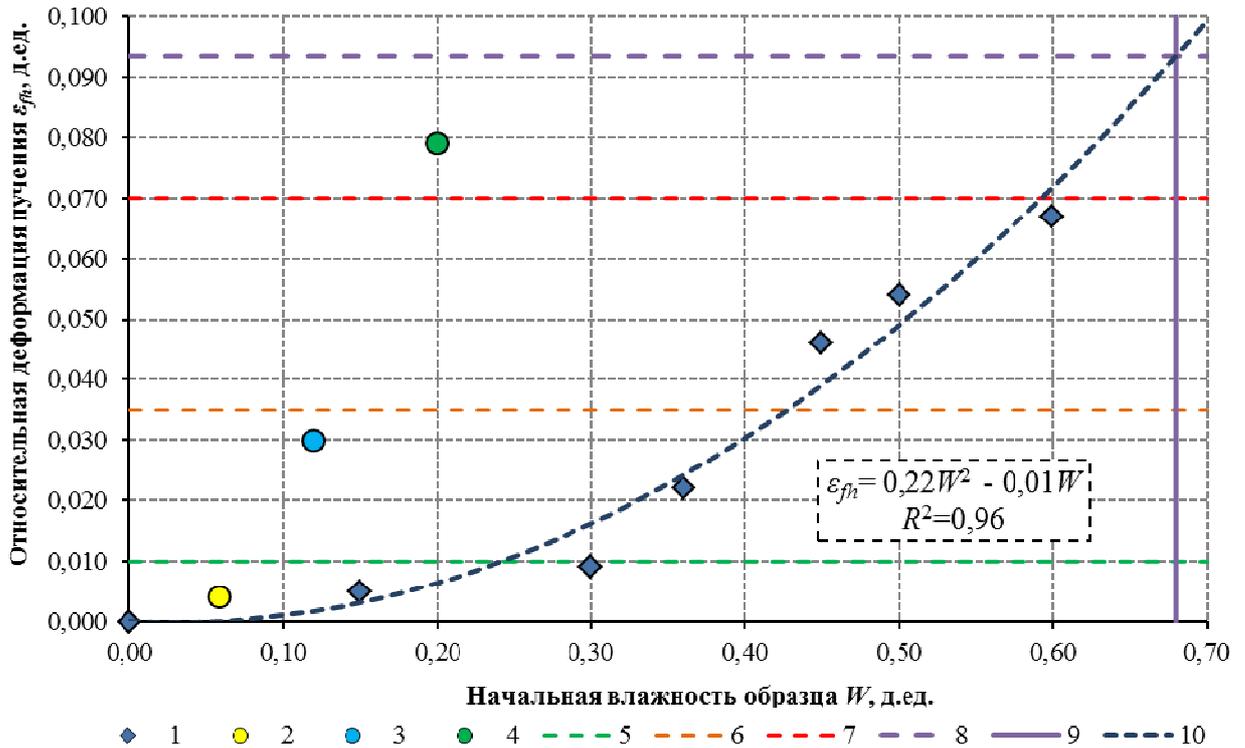


Рисунок 44 – Результаты определения относительной деформации пучения природных грунтов и ЗШС от влажности при промораживании: 1 – золошлаковая смесь ТЭЦ-4 г. Омска; 2 – песок средней крупности; 3 – супесь песчанистая; 4 – суглинок легкий пылеватый; 5, 6, 7 – границы степени пучинистости по ГОСТ 25100-2012 слабопучинистого, среднепучинистого и сильнопучинистого грунта соответственно; 8 – теоретически максимально возможная относительная деформация пучения ЗШС; 9 – значение полной влагоемкости ЗШС W_{ne} ТЭЦ-4 г. Омска; 10 – эмпирическая зависимость относительной деформации пучения от влажности ЗШС

Сравнивая результаты испытания техногенного грунта (ЗШС) с природными грунтами (супесь, суглинок), можно констатировать, что по относительной деформации морозного пучения в условиях закрытой системы ЗШС обладает лучшими показателями.

Полученные результаты эксперимента в закрытой системе после математической обработки были приведены в соответствии с формулой (44) к следующему виду (рисунок 45).

Получена математическая модель, отражающая зависимость относительной деформации пучения от относительной влажности ЗШС

$$\varepsilon_{fh} = 0,1W_{отн}^2 - 0,008W_{отн}, \quad (55)$$

где $W_{отн}$ – относительная влажность ЗШС по формуле (44), д.ед.

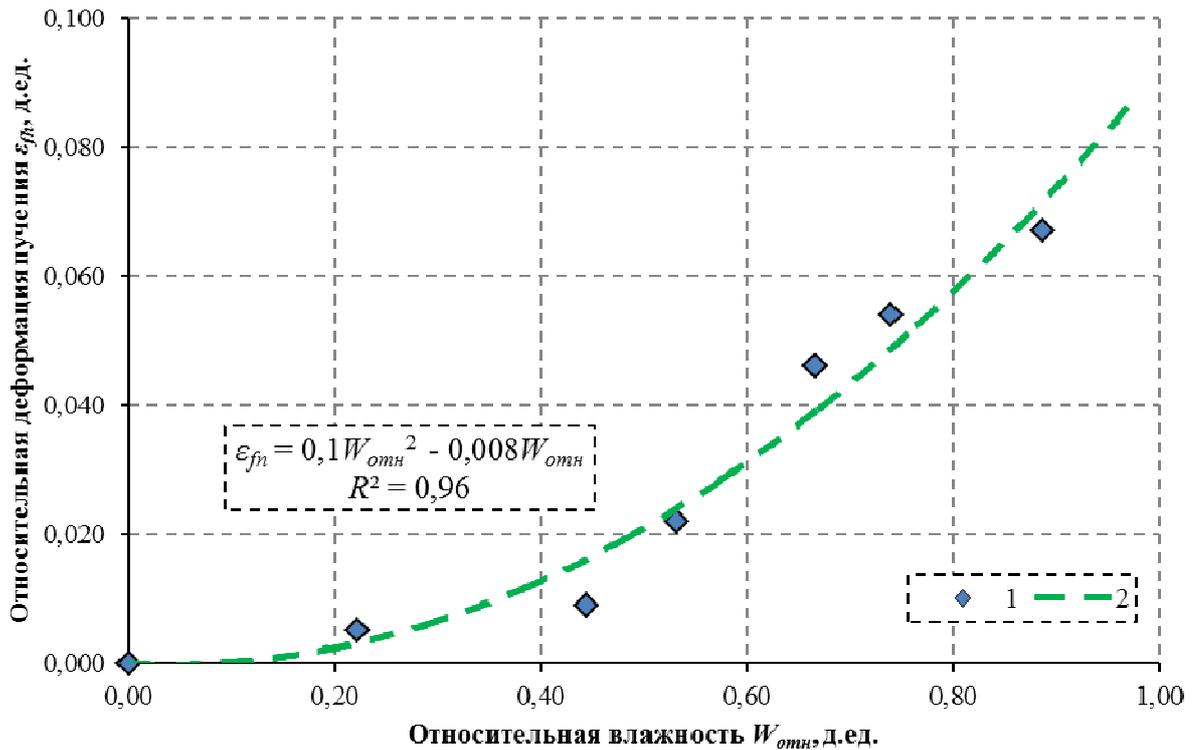


Рисунок 45 – Зависимость относительной деформации пучения от относительной влажности ЗШС: 1 – результаты определения относительной деформации пучения ЗШС ТЭЦ-4 г. Омска; 2 – эмпирическая зависимость

Так как у каждой ЗШС, рассмотренной ранее, показатели влажности (оптимальная, максимальная молекулярная, полная влагоемкость и др.) отличаются друг от друга, то введение показателя относительной влажности по формуле (44) и приведение зависимости к формуле (55) позволяет расширить границы действия математической модели и на другие ЗШС.

Открытая система. Испытания в открытой системе (с неограниченным подтоком влаги к границе промерзания) наилучшим образом моделируют работу земляного полотна в условиях третьего типа местности по условиям увлажнения.

Во второй части экспериментального исследования принята стандартизированная методика испытаний по ГОСТ 28622. Для проведения испытаний в открытой системе было выполнено математическое планирование двухфакторного эксперимента. Учитывая результаты испытаний на льдистость ЗШС при промораживании [4], в качестве переменных факторов приняты коэффициент уплотнения ЗШС $K_{упл}$ и относительная температура промораживания в климатической камере $t_{отн}$. Относительная температура промораживания $t_{отн}$ рассчитывается по формуле (45).

Значения нулевых уровней факторов и интервалов варьирования приведены в таблице 35. В таблице 36 приведена матрица планирования и средние опытные значения функции отклика (количество образцов в каждом опыте было не менее трёх).

Таблица 35 – Интервалы варьирования факторов

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Коэффициент уплотнения $K_{упл}$	X_1	0,90	0,95	1,00	0,05
Относительная температура промораживания $t_{отн}, ^\circ\text{C}$	X_2	0,67	1	1,33	0,33

Кодирование факторов производилось по формулам

$$\begin{cases} X_{ie} = (x_{ie} - x_{i0})/\Delta x_i = +1, \\ X_{in} = (x_{in} - x_{i0})/\Delta x_i = -1, \end{cases} \quad (56)$$

где X_{ie} , X_{in} – верхний и нижний уровень варьирования фактора в кодированном виде;

x_{ie} , x_{in} – верхний и нижний уровень варьирования фактора в натуральном виде;

x_{i0} – средний уровень варьирования фактора в натуральном виде;

Δx_i – интервал варьирования фактора.

Таблица 36 – Матрица двухуровневого плана для числа факторов $k=2$

Точки плана	Матрица планирования		Квадраты переменных		Взаимодействия факторов	Выходной параметр
	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	$X_1 X_2$	Y_i
N_1	1	+1	+1	+1	+1	2,6
	2	+1	-1	+1	+1	4,4
	3	-1	+1	+1	+1	3,1
	4	-1	-1	+1	+1	5,1
N_α	5	+1	0	+1	0	3,0
	6	-1	0	+1	0	4,8
	7	0	+1	0	+1	2,9
	8	0	-1	0	+1	4,7
N_0	9	0	0	0	0	3,5
	10	0	0	0	0	3,3
	11	0	0	0	0	3,7

Примечание.

X_1, X_2 – факторы планирования;

N_1 – опыты при варьировании факторов на нижнем и верхнем уровнях;

N_α – опыты в «звёздных» точках;

N_0 – опыты в нулевых точках;

Y_i – функция отклика (относительная деформация пучения ε_{fh} , %).

В результате обработки полученных данных установлена корреляционная зависимость $\varepsilon_{fh} = f(K_{упл}, t)$ для ЗШС, которая в кодированной форме имеет вид

$$Y = 3,5857 - 0,5001X_1 - 0,93352X_2 + 0,18757X_1^2 + 0,08757X_2^2 + 0,05X_1X_2. \quad (57)$$

Проведена проверка адекватности математической модели. Для принятого уровня доверительной вероятности 95 % модель адекватна.

В раскодированном виде зависимость принимает следующий вид

$$\varepsilon_{fh} = 87,3 - 155,6K_{упл} - 7,3t_{отн} + 75K_{упл}^2 + 0,8t_{отн}^2 + 3K_{упл} \cdot t_{отн}. \quad (58)$$

По формуле (57) можно сделать вывод, что коэффициент уплотнения (X_1) оказывает меньшее влияние на величину относительной деформации морозного пучения, чем температура промораживания (X_2). Зависимость $\varepsilon_{fh} = f(K_{упл}, t)$ отображена на рисунке 46.

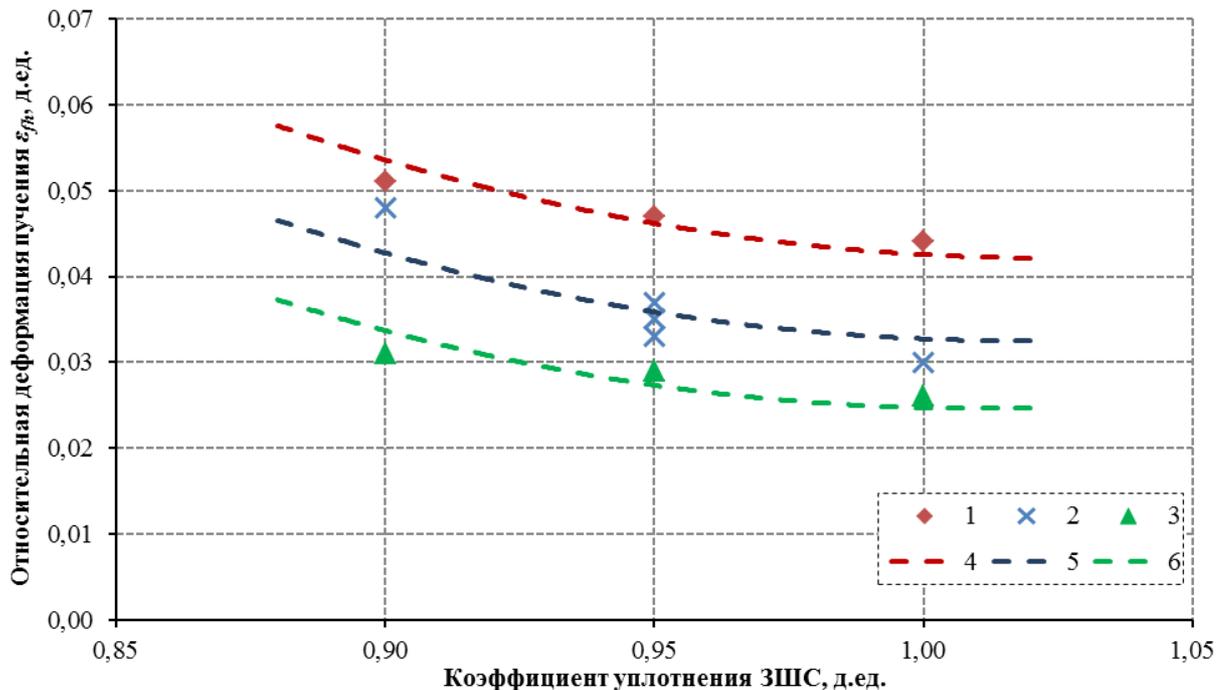


Рисунок 46 – Зависимость степени пучинистости ЗШС от коэффициента уплотнения и температуры промораживания: 1, 2, 3 – значения относительной деформации пучения ε_{fh} (функция отклика Y_i по таблице 28); 4 – зависимость $\varepsilon_{fh} = f(K_{упл}, t)$ при температуре $t =$ минус 4 °С; 5 – зависимость $\varepsilon_{fh} = f(K_{упл}, t)$ при температуре $t =$ минус 6 °С; 6 – зависимость $\varepsilon_{fh} = f(K_{упл}, t)$ при температуре $t =$ минус 8 °С

По результатам испытаний в открытой системе установлено, что ЗШС Омской ТЭЦ-4, являющаяся типичным представителем кислых мелкозернистых золошлаковых отходов, обладает следующим свойствами:

- ни одна проба ЗШС не относится к сильнопучинистым или чрезмерно пучинистым видам грунта при всех режимах промораживания.
- увеличение степени уплотнения ЗШС снижает величину морозного пучения этого техногенного грунта до 25 %;
- в условиях медленного промерзания в открытой системе ЗШС относится к среднепучинистым грунтам при любом реально достижимом коэффициенте уплотнения;
- с увеличением интенсивности промерзания ЗШС степень морозного пучения этого материала уменьшается на 40 %.

В результате анализа получившихся эмпирических зависимостей относительной деформации пучения ЗШС от влажности, коэффициента уплотнения и температуры промораживания предлагается объединить зависимости (55) и (58). Это возможно путем приведения испытаний в закрытой системе к одной из точек плана испытаний в открытой системе. Объединенная математическая модель представлена в следующем выражении

$$\varepsilon_{fh} = \frac{(0,1W_{омн}^2 - 0,008W_{омн})}{100 \cdot \varepsilon_{f0}} (87,3 - 155,6K_{упл} - 7,3t_{омн} + 75K_{упл}^2 + 0,8t_{омн}^2 + 3K_{упл} \cdot t_{омн}); \quad (59)$$

где $W_{омн}$ – относительная влажность ЗШС, д.ед.;

$K_{упл}$ – коэффициент уплотнения рабочего слоя земляного полотна из ЗШС, д.ед.;

$t_{омн}$ – относительная температура промерзания ЗШС, д.ед.;

ε_{f0} – относительная деформация пучения ЗШС, полученная в испытаниях в «открытой» системе при постоянных коэффициенте уплотнения и температуре промораживания (значение $\varepsilon_{f0}=0,043$ при $K_{упл}=1,0$ и $t_{омн}=0,67$), д.ед.;

100 – коэффициент перевода из % в д.ед.

Величина относительной деформации пучения ε_{f0} получена по формуле (58), при условиях моделирования закрытой системы: $K_{упл}=1,0$ и $t =$ минус 4°C ($t_{омн}=0,67$). Эти условия соответствуют точке планирования эксперимента $N_1=2$ (см. таблицу 28) при варьировании фактора X_1 на верхнем уровне и фактора X_2 на нижнем уровне. Следовательно, при $K_{упл}=1,0$ и $t_{омн}=0,67$ справедливо следующее выражение

$$\frac{(87,3 - 155,6K_{\text{унл}} - 7,3t_{\text{омн}} + 75K_{\text{унл}}^2 + 0,8t_{\text{омн}}^2 + 3K_{\text{унл}} \cdot t_{\text{омн}})}{\varepsilon_{f0}} = 1. \quad (60)$$

Т.е. формула (59) превращается в эмпирическую зависимость (55).

В процессе промерзания образцов из ЗШС происходит перераспределение влаги по высоте образца. Для изучения этого процесса после испытаний отбирались пробы на фактическую влажность в верхней, средней и нижней части образца. Результаты проведенных исследований приведены на рисунке 47.

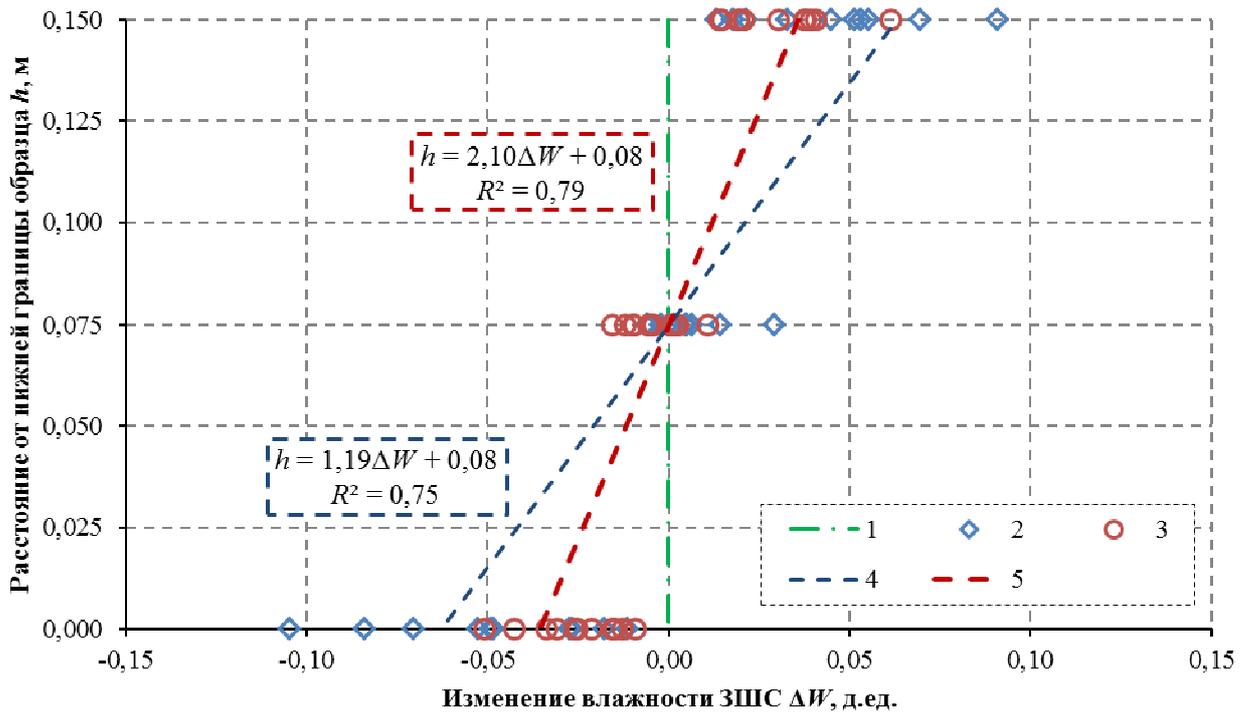


Рисунок 47 – Эпюра перераспределения влажности по высоте образца ЗШС при испытаниях в открытой системе: 1 – ось образца ЗШС; 2 – влажность по высоте образца ЗШС при испытаниях в открытой системе; 3 – влажность по высоте образца ЗШС при испытаниях в закрытой системе; 4, 5 – эмпирические зависимости среднего значения изменения влажности

Как видно из графиков, в открытой системе перераспределение влажности от нижней части образца к верхней в среднем в 2 раза меньше, чем в закрытой системе. Также разница между максимальным и минимальным значением влажности в среднем в 2 раза меньше. Причиной этого служит неограниченный подток влаги в открытой системе, за счет которого восполняется влага в нижней части образца. В закрытой системе восполнение влаги отсутствует.

Анализируя данные на рисунке 47, и сопоставляя начальные влажности образцов, можно сделать вывод о том, что градиент изменения влажности зависит от

начальной влажности. Это видится логичным, так как за счет большего насыщения влаги в капиллярной системе грунта ее перемещение осуществляется по большей площади капилляров, а, следовательно, и расход влаги на перемещение больше.

На рисунке 48 представлена зависимость градиента изменения влажности от начальной относительной влажности ЗШС $W_{отн}$. Среднее значение градиента влажности для каждого испытания определялось по формуле

$$gradW = \Delta W / h, \quad (61)$$

где ΔW – разница влажности между нижней и верхней частью образца ЗШС, д.ед.;
 h – высота образца, м.

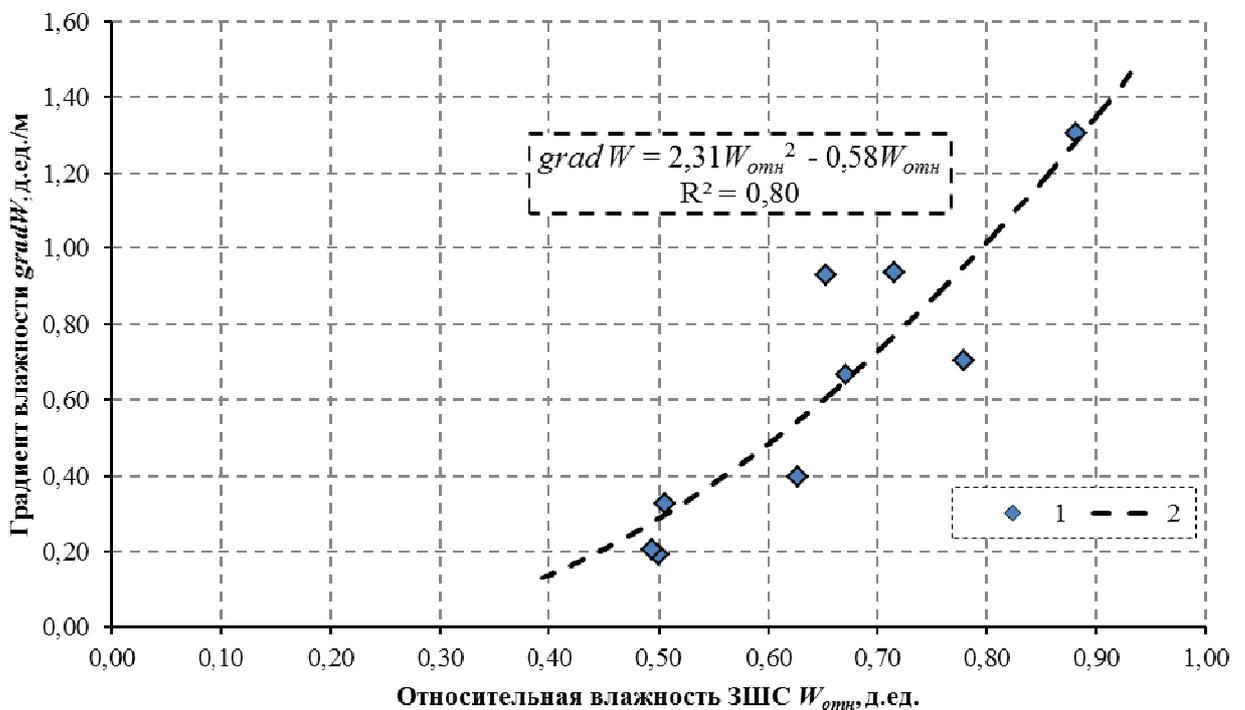


Рисунок 48 – Результаты определения градиента изменения влажности ЗШС в закрытой системе: 1 – значение градиента для отдельного испытания; 2 – эмпирическая зависимость градиента от относительной влажности $W_{отн}$

Дополнительно были проведены испытания ЗШС с подстилающими слоями из песка средней крупности и суглинка легкого пылеватого. Суть испытаний заключается в том, что нижний слой толщиной 5 см из ЗШС в обейме менялся на грунт природного происхождения (рисунок 49).

Таким образом, высота слоя ЗШС составляла 10 см. Испытания проводились в условиях неограниченного подтока влаги к нижней границе образца. Результаты испытаний приведены в таблице 37.



Рисунок 49 – Вид образцов после испытания: 1 – перемещение колец формы в ходе промерзания грунта; 2 – граница слоев песка и ЗШС

Таблица 37 – Морозное пучение конструкции из ЗШС и других грунтов

Вид грунта	Влажность образца, %	Среднее значение вертикальной деформации пучения h_f , мм	Относительная деформация пучения ε_{fh} , д.ед.	Степень пучинистости грунта	
				по СП 34.13330.2012	по ГОСТ 25100-2011
Золошлаковая смесь / песок средней крупности					
Песок	16	2,26	0,045	пучинистый	среднепучинистый
ЗШС	49	5,41	0,054	пучинистый	среднепучинистый
Золошлаковая смесь / суглинок лёгкий пылеватый					
Суглинок	16	3,25	0,065	пучинистый	среднепучинистый
ЗШС	33	1,25	0,013	слабопучинистый	слабопучинистый

Примечание – Значения вертикальных деформаций по слоям получены после испытаний при извлечении образцов.

Проведённые экспериментальные исследования позволили впервые получить очень важные данные:

- При промораживании ЗШС с постоянным подтоком влаги извне в процессе промерзания (в условиях открытой системы) результаты испытания зависят от вида грунта (характера его капиллярной системы), подстилающего ЗШС;
- В случае, когда ЗШС подстилает суглинистый грунт (имеющий капиллярную систему со средним радиусом пор меньше, чем у ЗШС), то капиллярного подтока влаги в ЗШС не происходит, несмотря на то, что влажность глинистого грунта в процессе испытания достигает границы текучести; в

этом случае относительная деформация пучения ЗШС не превышает 2 % и происходит за счет уже имеющейся в ЗШС влаги.

- Если ЗШС подстилает слой песка (имеющего капиллярную систему со средним радиусом больше, чем у ЗШС) толщиной меньше, чем высота капиллярного поднятия влаги в нём, то капиллярная система ЗШС может поглощать и поднимать влагу из этого грунта; величина увлажнения и морозного пучения ЗШС возрастают, причем и песок в этом случае увеличивает собственную величину морозного пучения.

Эти сведения позволяют принимать верные решения при конструировании земляного полотна с использованием ЗШС.

Выводы по третьей главе

По результатам экспериментальных исследований свойств ЗШС можно сделать следующие выводы:

- Золошлаковые смеси являются техногенными грунтами со специфическими строительными и технологическими свойствами, по зерновому составу соответствующие пескам различной крупности;
- По химическому составу ЗШС для сооружения земляного полотна должны относиться к кислым или сверхкислым по ОДМ 218.2.031-2013 с малым содержанием оксида CaO . ЗШС мало меняют химико-минералогические свойства, так как в основном состоят из нерастворимых и малорастворимых соединений и минералов, а также содержат мало углистых остатков;
- Важные технологические показатели оптимальной влажности и максимальной плотности разительно отличаются от природных грунтов и должны определяться для каждой ЗШС;
- Характеристики прочности ЗШС (модуль упругости, модуль деформации, удельное сцепление, угол внутреннего трения) зависят от фактической влажности и плотности ЗШС: чем больше влажность и меньше плотность ЗШС, тем меньше прочностные характеристики. Значение модулей упру-

гости и модулей деформации соответствует суглинистым грунтам (супеси пылеватой и суглинка легкому пылеватому) находящихся при относительной влажности $W/W_m=0,80-0,85$. По числовому значению удельного сцепления и угла внутреннего трения ЗШС в большинстве случаев соответствуют пескам мелким и пескам пылеватым;

- Неравномерность зернового состава ЗШС практически не влияет на прочностные характеристики этого материала. Следует также учесть, что при разработке золоотвала и строительстве земляного полотна из ЗШС происходит усреднение зернового состава;
- Несмотря на специфические характеристики влажности и теплопроводности, относительная деформация пучения ЗШС меньше, чем у суглинка легкого пылеватого при оптимальной влажности;
- Содержание пылеватых частиц, как и повышенная влажность, не может служить показателем возможного морозного пучения;
- При любой достижимой влажности (вплоть до полной влагоемкости) мелкозернистая ЗШС из отвалов Омских ТЭС не переходит в класс сильнопучинистых грунтов по ГОСТ 25100;
- При моделировании в лаборатории первого и второго типа местности по условиям увлажнения ЗШС из отвалов Омских ТЭС соответствует слабопучинистым грунтам по ГОСТ 25100;
- При ограниченном подтоке воды к земляному полотну (первый и второй тип местности по условиям увлажнения) градиент изменения влажности зависит от начальной влажности ЗШС. При третьем типе местности по условиям увлажнения разница в значении влажности на границе промерзания и влажности вне зоны промерзания практически не зависит от начальной влажности из-за постоянного подтока влаги к границе промерзания;
- При проектировании земляного полотна из ЗШС необходимо учитывать, что слои или основание насыпи, сложенные из суглинистых грунтов, выполняют функции капилляропрерывающих слоев, через которые влага слабо переходит в вышележащие слои ЗШС.

4 Проверка результатов экспериментально-теоретических исследований на опытном участке

4.1 Общие данные по опытному участку

Для проверки результатов теоретических методов расчета и экспериментальных исследований нами построен участок насыпи в г. Омске на территории СиБАДИ осенью 2010 г [70, 71]. Опытное строительство позволяет выявить особенности водно-теплового режима земляного полотна из ЗШС и определить расчётные параметры этого техногенного грунта для обоснования эффективности использования ЗШС в качестве грунта земляного полотна. Поперечный профиль дорожной конструкции опытного участка приведен на рисунке 50.

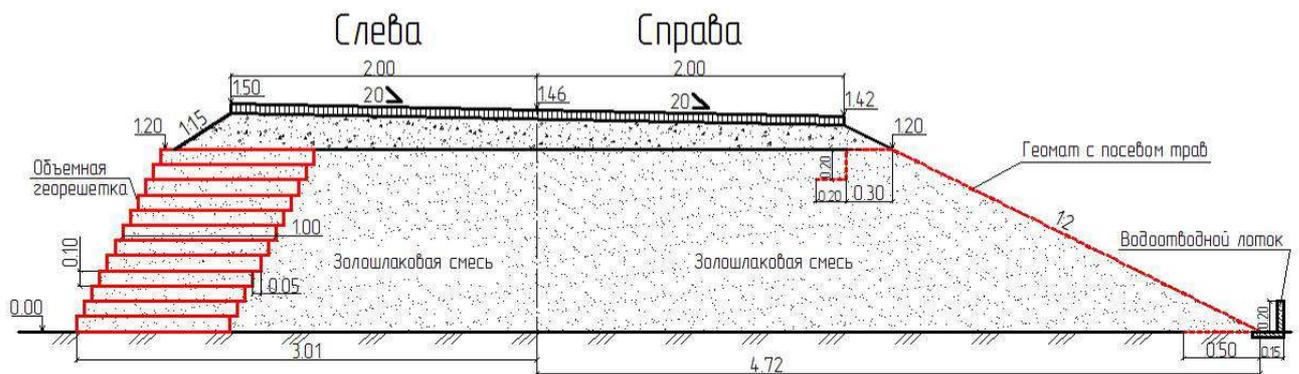


Рисунок 50 – Поперечный профиль дорожной конструкции опытного участка

Конструкция земляного полотна представляет собой насыпь высотой 1,20 м, протяжённостью 12,0 м, ширина проезжей части – 4,0 м. Уклон поверхности проезжей части принят 20‰ односкатный в сторону правого откоса.

Для возведения земляного полотна использовано 120 м^3 золошлаковой смеси из действующего золоотвала ТЭЦ-5 г. Омска и 60 м^3 суглинка лёгкого пылеватого (для сравнения). Возведение насыпи осуществлялось из золошлаковой смеси, имеющей влажность $W = 40 \%$. Производилась отсыпка и разравнивание грунта слоями толщиной по 0,30 м с его уплотнением до $K_{\text{упл}} = 0,95$ при помощи виброплиты и виброкатка (рисунок 51).



Рисунок 51 – Сооружение насыпи из золошлаковой смеси и суглинка:
 1 – общий вид насыпи опытного участка из ЗШС; 2 – уплотнение откосов насыпи из ЗШС;
 3 – общий вид насыпи из суглинка; 4 – уплотнение слоев насыпи из суглинка

На участке выполнены различные виды укрепления откосов земляного полотна геосинтетическими материалами, а также укрепление георешёткой основания дорожной одежды. Слева откос укреплен объёмной георешёткой уложенной в виде подпорной стенки с заложением 1:0,5. Высота ребра объёмной георешётки 0,1 м, ширина ячейки в растянутом состоянии 0,45 м. Ширина каждого слоя в поперечном направлении составляет 1,0 м, ячейки георешётки заполнены золошлаковой смесью, которая использовалась для сооружения земляного полотна (рисунок 52).

Уплотнение золошлаковой смеси в ячейках объёмной георешётки производилось послойно при помощи виброплиты. Слои георешётки в вертикальном направлении соединены между собой стержнями арматуры диаметром 6 мм и длиной 0,5 м, в горизонтальном – при помощи промышленного степлера. Часть ячеек, выступающая на откос, заполнена плодородным грунтом с посевом трав.



Рисунок 52 – Укрепление левого откоса насыпи:

1 – укладка объемной георешетки; 2 – уплотнение ЗШС в ячейках объемной георешетки; 3 – общий вид укрепленного откоса; 4 – заполнение крайних ячеек плодородным грунтом с посевом трав

Правый откос насыпи имеет заложение 1:2 и разделён на 4 равных участка, на которых применены разные конструкции укрепления (рисунок 53):

- 1) геомат с подложкой из нетканого геотекстильного материала, покрытый слоем плодородного грунта с посевом трав (толщина геомата 0,013 м, слоя грунта – 0,1 м);
- 2) геомат без подложки покрытый слоем плодородного грунта с посевом трав (толщина геомата 0,015 м, слоя грунта – 0,1 м);
- 3) слой плодородного грунта с посевом трав толщиной 0,1 м;
- 4) откос из уплотненной ЗШС без укрепления и без посева трав.

По длине насыпь земляного полотна разделена на 2 участка (4,0 и 8,0 м) при помощи установленной вертикально геомембраны из полиэтилена низкого давления марки HDPE толщиной 3,0 мм. Вдоль подошвы насыпи устроен лоток с внутренним покрытием дна из геомембраны (рисунок 54).



Рисунок 53 – Конструкции укрепления правого откоса насыпи: 1 – укладка полотен геоматов; 2 – устройство плодородного слоя грунта с посевом трав поверх геоматов и откоса из ЗШС



Рисунок 54 – Укладка геомембраны и водоотводного лотка: 1 – устройство канавы в поперечном направлении на всю высоту насыпи; 2 – укладка геомембраны с засыпкой и уплотнением ЗШС; 3 – устройство лотка с отведением воды в трубу

Таким образом, осуществлялось моделирование 1-го и 3-го типа местности по условиям увлажнения в предзимний период. Для этого один из участков насыпи подвергается принудительному периодическому дождеванию в течение месяца, а водоотводной лоток служил для удерживания воды у подошвы откоса. В период окончания дождевания проводился отбор проб ЗШС горизонтальным бурением со стороны правого откоса при помощи ручного бура. При этом определялась фактическая влажность ЗШС по ГОСТ 5180-84 [68] на каждом участке моделирования.

На участках установлены многозонные цифровые датчики температуры МЦДТ 0922 (термокосы) [115], которые регистрируют изменение температуры грунта, как по высоте, так и по ширине насыпи (рисунок 55, 56). Показания с датчиков снимались при помощи портативного контроллера цифровых датчиков ПКЦД-1/16 [116]. Таким обра-

зом, осуществлялось наблюдение за температурным режимом земляного полотна из золошлаковой смеси при её промерзании в зимний период в зависимости от типа местности по условиям увлажнения.

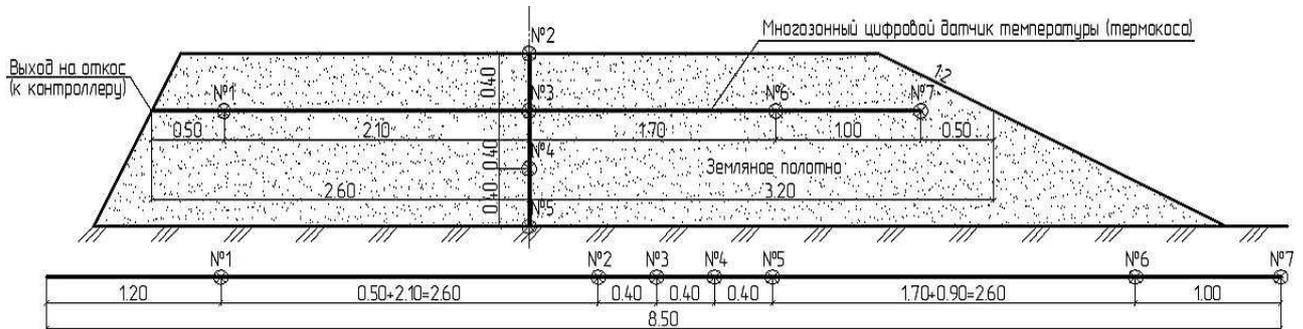


Рисунок 55 – Схема расположения датчиков термокосы в теле земляного полотна и общая длина термокосы: №1-№7 – номера датчиков термокосы



Рисунок 56 – Укладка термокосы в тело земляного полотна из ЗШС

На опытном участке устроена дорожная одежда (рисунок 57):

- 1) слой покрытия – асфальтобетон плотный из горячей мелкозернистой смеси, тип Б марка II, на вязком битуме БНД марки 90/130, по ГОСТ 9128-2009 [60], толщина 0,07 м;
- 2) слой основания из щебёночно-песчаной смеси марки С5 по ГОСТ 25607-2009 [61], толщина 0,18 м. На участке протяжением 4,0 м под основание дорожной одежды уложена георешётка из полипропилена (рисунок 58);
- 3) грунт земляного полотна – мелкозернистая ЗШС из отвала ТЭЦ-5 г. Омска по ОДМ 218.2.031-2013 [26].



Рисунок 57 – Строительство дорожной одежды на опытном участке: 1, 2 – строительство слоя основания из ЦПС; 3, 4 – устройство асфальтобетонного покрытия



Рисунок 58 – Укладка геосетки под щебеночное основание

Это позволило оценить эффективность использования георешёток при армировании слоя основания из дискретного материала, уложенного на слой из ЗШС, а также определить влияние георешётки на взаимное проникновение контактирующих слоёв, а именно глубину проникновения отдельных щебёнок в тело земляного полотна из ЗШС.

4.2 Результаты мониторинга промерзания и морозного пучения

В течение трех лет проводился мониторинг опытного участка. Основная цель мониторинга – наблюдение за изменением следующих параметров:

- глубина и скорость промерзания земляного полотна;
- величина морозного пучения дорожной конструкции;
- состояние укрепленных и неукрепленных участков откосов.

Глубину и скорость промерзания оценивали по показаниям датчиков термокос. Показания с датчиков снимались ежедневно на протяжении всего периода мониторинга. Изменение температуры датчиков термокос за зимние периоды наблюдения показаны на рисунках 59-61. На рисунках представлены средние значения между двумя термокосами.

Моделирование второго типа местности по условиям увлажнения происходило в зимний период 2010-2011 гг., первого и третьего типов – в 2011-2012 гг.

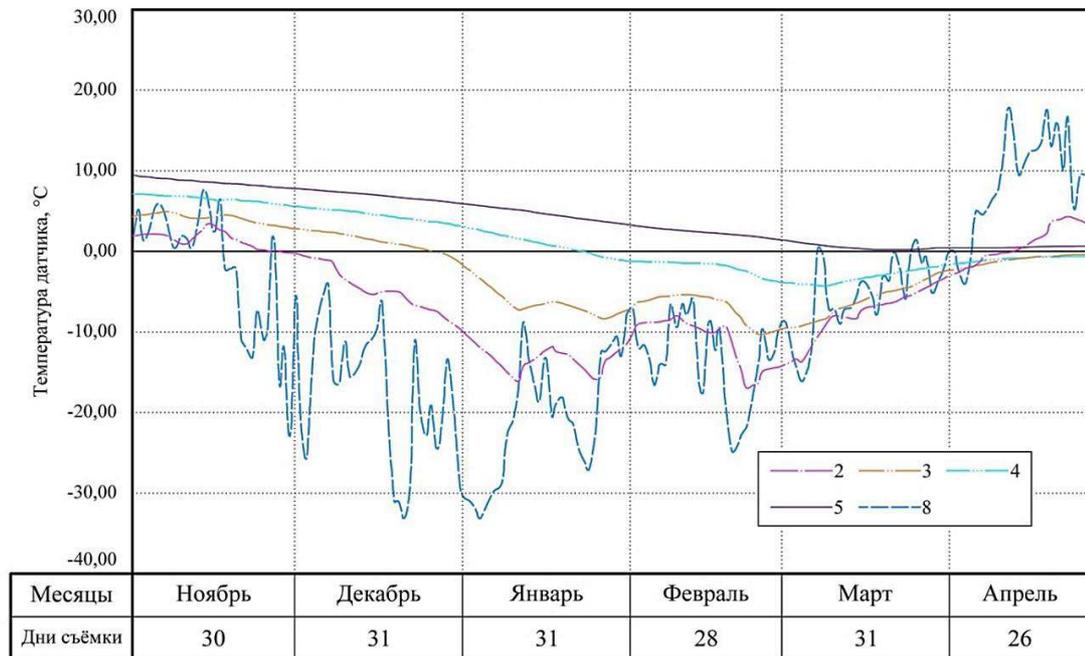


Рисунок 59 – Изменение температуры датчиков термокос в зимний период 2010-2011 гг.: 2, 3, 4, 5 – номера датчиков термокосы (соответствуют рисунку 55); 8 – среднесуточная температура окружающего воздуха

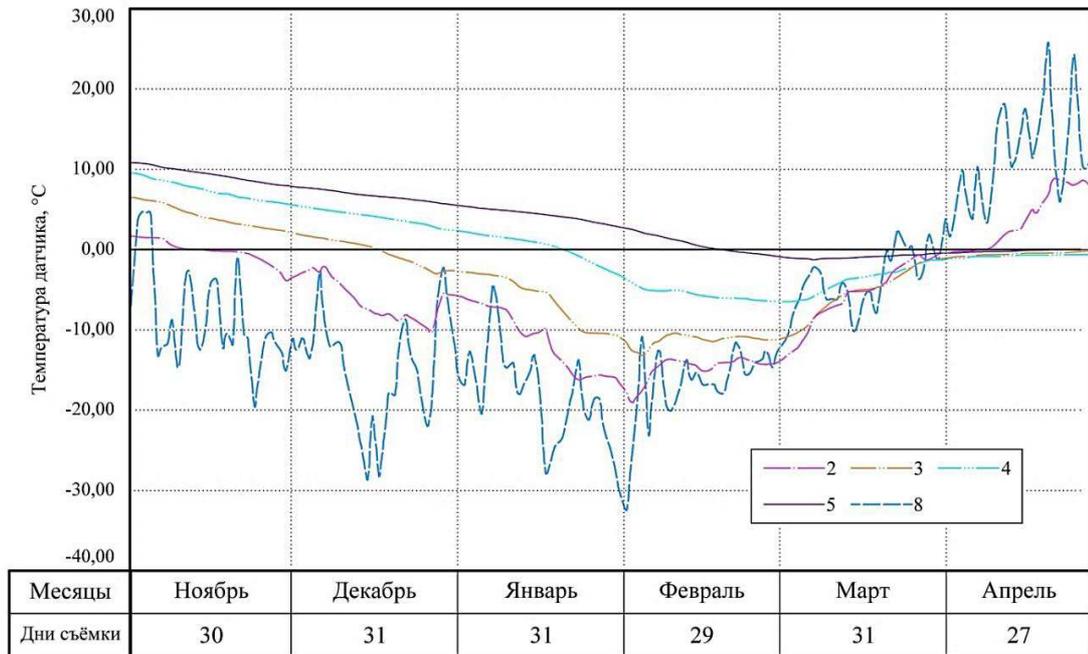


Рисунок 60 – Изменение температуры датчиков термокос в зимний период 2011-2012 гг.:
2, 3, 4, 5, 8 – соответствуют рисунку 59

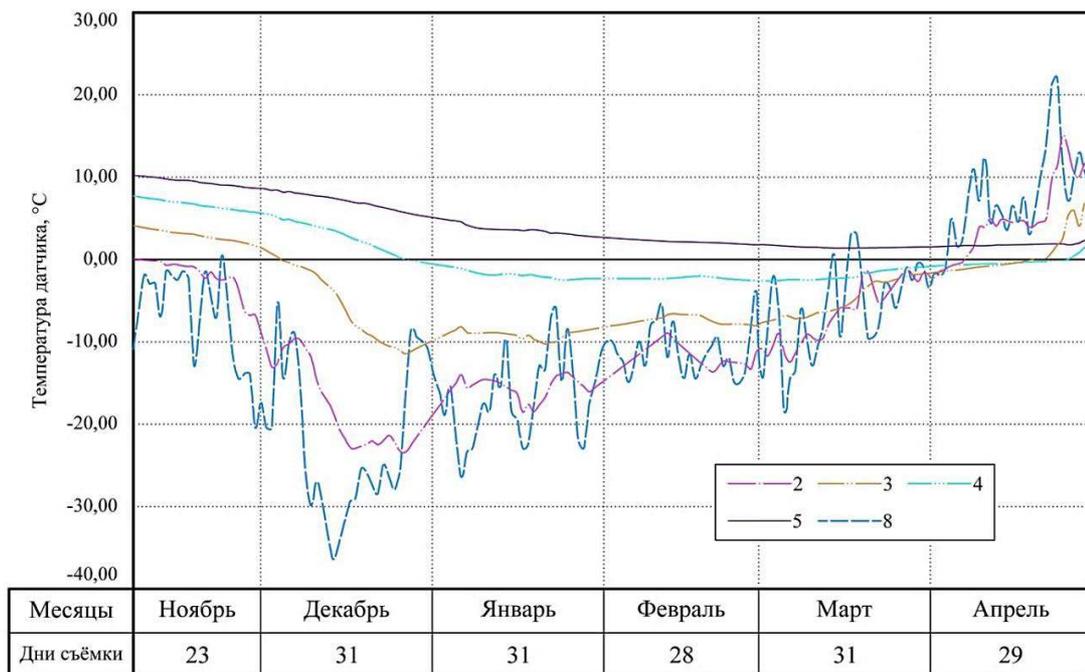


Рисунок 61 – Изменение температуры датчиков термокос в зимний период 2012-2013 гг.:
2, 3, 4, 5, 8 – соответствуют рисунку 59

На основе показаний датчиков определялась глубина распространения изо-терм $T = 0^{\circ}\text{C}$, $T = \text{минус } 0,3^{\circ}\text{C}$ и $T = \text{минус } 2^{\circ}\text{C}$, путем интерполяции температуры между датчиками. Результаты обработки данных представлены на рисунках 62-64.

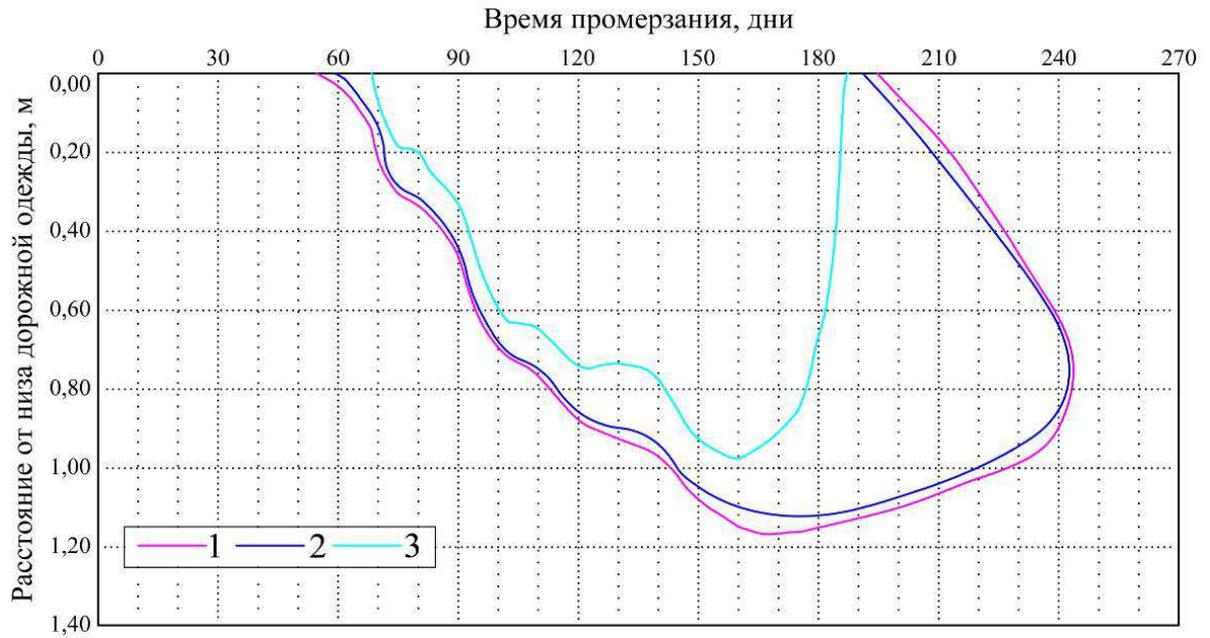


Рисунок 62 – Ход изотерм во времени в процессе промерзания насыпи из ЗШС расчетной влажности $W=0,40$ (дата начала – 1 октября 2010 г.): 1 – экспериментальная изотерма $T = 0^{\circ}\text{C}$; 2 – экспериментальная изотерма $T = \text{минус } 0,3^{\circ}\text{C}$; 3 – экспериментальная изотерма $T = \text{минус } 2^{\circ}\text{C}$

На рисунках 62 и 63 экспериментальные изотермы сопоставлены с теоретическими, полученными по методике А.Л. Исакова в программе «Freeze-1» (номера линии 1, 2, 3, 4 соответствуют рисунку 9).

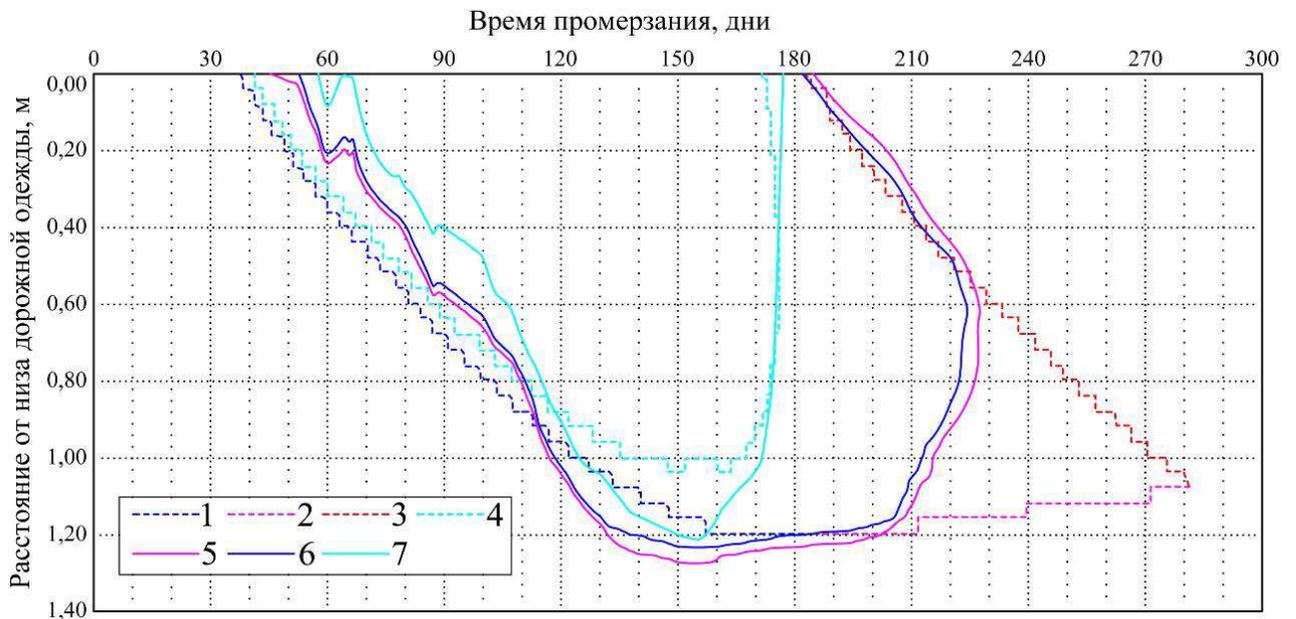


Рисунок 63 – Ход изотерм во времени в процессе промерзания насыпи из ЗШС расчетной влажности $W=0,25$ (дата начала – 1 октября 2011 г.): 1 – граница промерзания ЗШС ($T_{\phi} = \text{минус } 0,3^{\circ}\text{C}$); 2, 3 – граница оттаивания ЗШС ($T = 0^{\circ}\text{C}$); 4 – зона интенсивного морозного пучения, ограниченная изотермой $T = \text{минус } 2^{\circ}\text{C}$; 5 – экспериментальная изотерма $T = 0^{\circ}\text{C}$; 6 – экспериментальная изотерма $T = \text{минус } 0,3^{\circ}\text{C}$; 7 – экспериментальная изотерма $T = \text{минус } 2^{\circ}\text{C}$

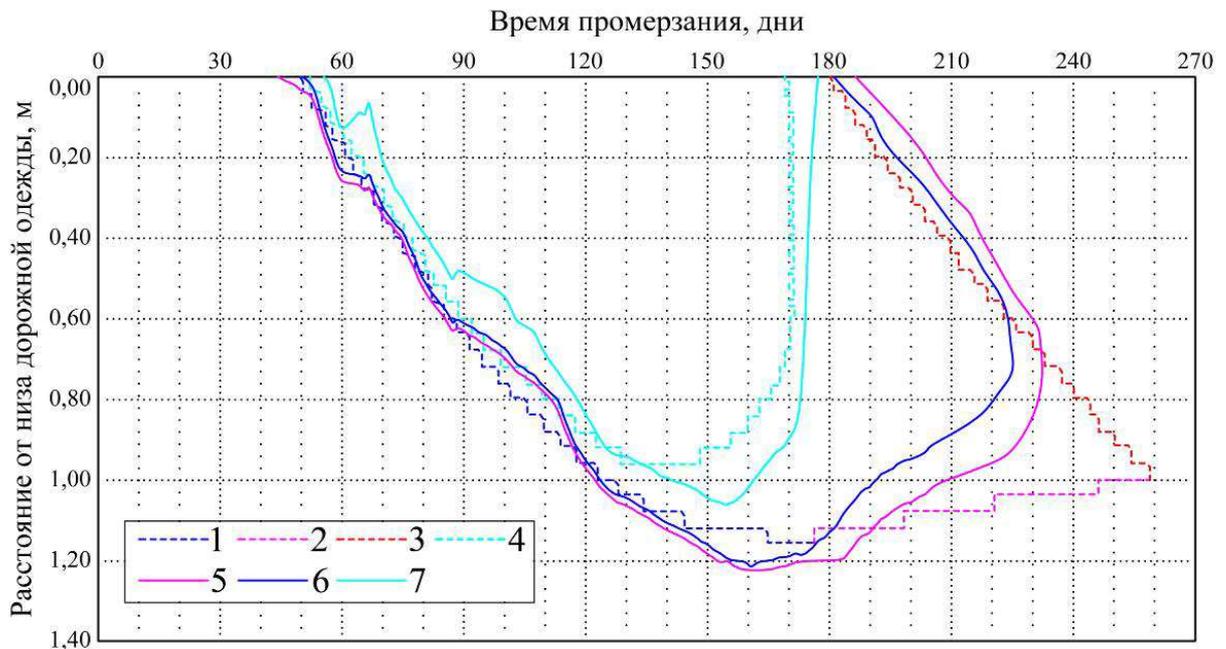


Рисунок 64 – Ход изотерм во времени в процессе промерзания насыпи из ЗШС расчетной влажности $W=0,60$ (дата начала – 1 октября 2011 г.): 1 – граница промерзания ЗШС ($T_{\phi} = \text{минус } 0,3^{\circ}\text{C}$); 2, 3 – границы оттаивания ЗШС ($T = 0^{\circ}\text{C}$); 4 – зона интенсивного морозного пучения, ограниченная изотермой $T = \text{минус } 2^{\circ}\text{C}$; 5 – экспериментальная изотерма $T = 0^{\circ}\text{C}$; 6 – экспериментальная изотерма $T = \text{минус } 0,3^{\circ}\text{C}$; 7 – экспериментальная изотерма $T = \text{минус } 2^{\circ}\text{C}$

Как видно из графиков, экспериментальные изотермы $T = 0^{\circ}\text{C}$ и $T = \text{минус } 0,3^{\circ}\text{C}$ очень близки между собой, разница между глубинами их распространения не превышает 4 %. Так как температура замерзания воды в ЗШС близка к 0°C (см. параграф 3.4), то изотерма $T = 0^{\circ}\text{C}$ принята за величину глубины промерзания.

На основе этих данных построены графики промерзания и оттаивания земляного полотна из ЗШС и суглинка лёгкого пылеватого (рисунок 65) [117, 118].

Результаты измерений свидетельствуют, что низкая теплопроводность ЗШС (даже при влажности 60 % по массе) предопределяет более позднее промерзание и оттаивание земляного полотна. Глубина промерзания земляного полотна из ЗШС почти в два раза меньше, чем из суглинка. Грунт естественного основания насыпи не замерзал даже в суровую зиму 2010 -11 гг.

В процессе мониторинга за глубиной промерзания опытного участка параллельно проводилось наблюдение за величиной морозного пучения поверхности покрытия. Наблюдения проводились еженедельно при помощи нивелира марки CST/BERGER SAL 32ND [119].

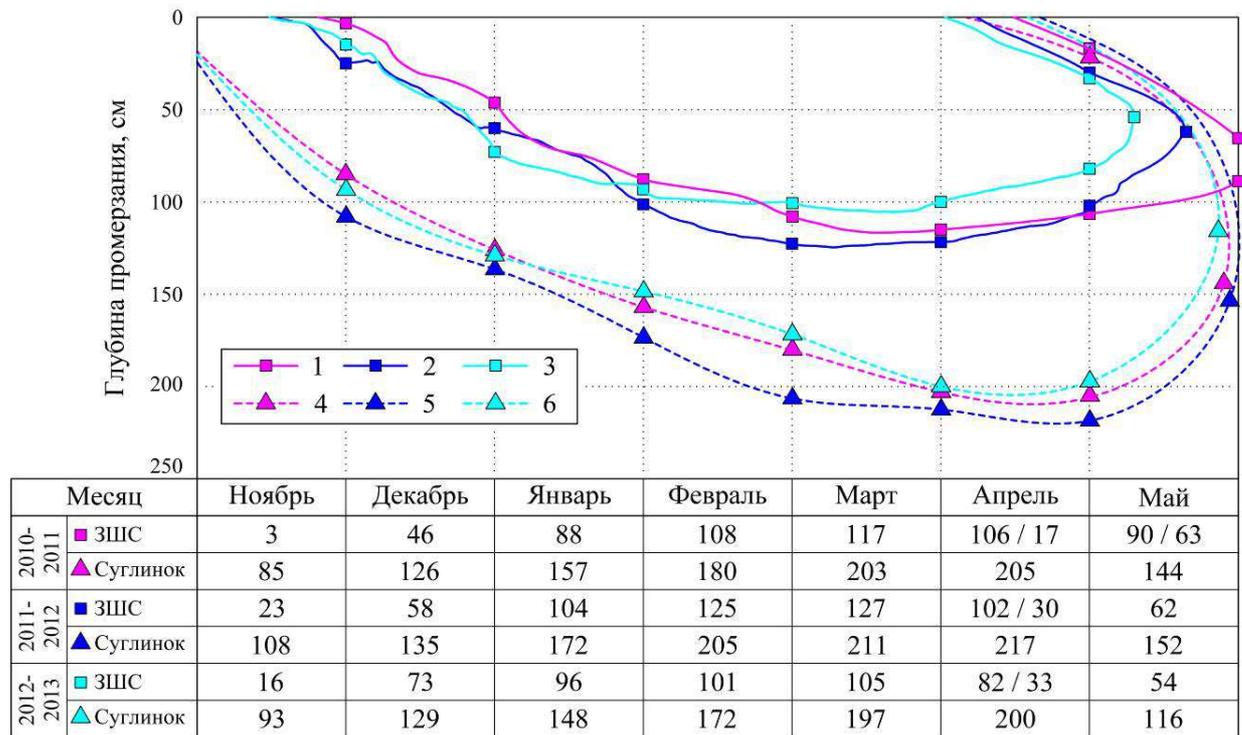


Рисунок 65 – Ход глубины промерзания ЗШС и суглинка за зимние периоды 2010-2013 гг.: 1, 2, 3 – кривые промерзания и оттаивания ЗШС за зимние периоды 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 гг. соответственно; 4, 5, 6 – кривые промерзания и оттаивания суглинка за зимние периоды 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 гг. соответственно

В зимний период 2010-2011 гг. участок земляного полотна из ЗШС промерзал при расчетной влажности ЗШС $W=0,40$ (второй тип местности по условиям увлажнения), которая была достигнута при его строительстве.

В осенний период 2011 г. было организовано периодическое дождевание поверхности покрытия и постоянное подтопление откоса насыпи. Разделения земляного полотна на 2 участка по длине позволило нам установить величину относительного морозного пучения в зимний период при первом ($W=0,25$) и третьем ($W=0,60$) типе местности по условиям увлажнения в зимний период 2011-2012 гг.

На участке земляного полотна из ЗШС были выбраны три поперечных сечения (рисунок 6б), на которых фиксировалась отметка верха дорожной конструкции по оси и по краям проезжей части (точки 1-9). На участке земляного полотна из суглинка лёгкого пылеватого выбрано 2 сечения (точки 10-15). Точки 1-3 соответствуют участку с первым типом местности по условиям увлажнения, точки 4-9 – третьему типу в период испытаний 2011-2012 гг.

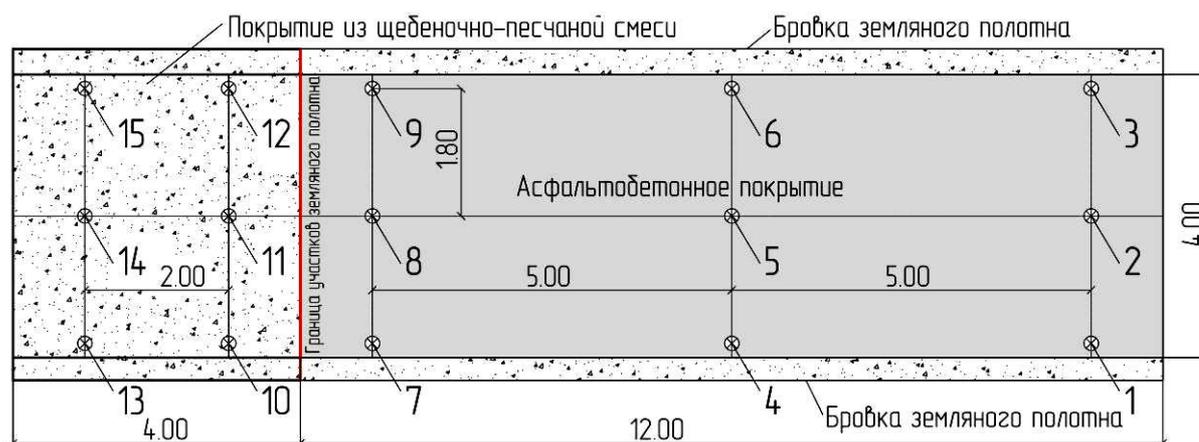


Рисунок 66 – Схема расположения точек нивелирования земляного полотна (план):
1-15 – номера точек нивелирования

Результаты нивелирования высотных отметок верха дорожной конструкции в зимний период 2011-2012 приведены в таблице 38. Данные об изменении высотных отметок за зимние периоды 2010-2013 гг. представлены на рисунке 67.

Относительную деформацию морозного пучения ε_{fh} рассчитывали по формуле (54) на основе данных о глубине промерзания и вертикальной деформации пучения в соответствующий месяц (рисунок 68). Результаты определения степени пучинистости грунтов приведены в таблице 39.

Таблица 38 – Изменение высотных отметок верха дорожной конструкции опытного участка в зимний период 2011-2012 гг.

№ точки	Превышения высотных отметок по месяцам, м				
	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март
1	2	3	4	5	6
1	0,000	0,004	0,009	0,016	0,018
2	0,000	0,002	0,005	0,013	0,014
3	0,000	0,003	0,007	0,014	0,014
4	0,000	0,012	0,024	0,038	0,040
5	0,000	0,011	0,021	0,032	0,036
6	0,000	0,006	0,015	0,027	0,030
7	0,006	0,015	0,030	0,042	0,044
8	0,002	0,012	0,022	0,036	0,037
9	0,000	0,004	0,019	0,029	0,031
10	0,002	0,011	0,021	0,029	0,028
11	0,001	0,011	0,022	0,028	0,028
12	0,000	0,009	0,022	0,029	0,027
13	0,009	0,046	0,080	0,107	0,104
14	0,003	0,039	0,074	0,101	0,099
15	0,006	0,042	0,073	0,103	0,102

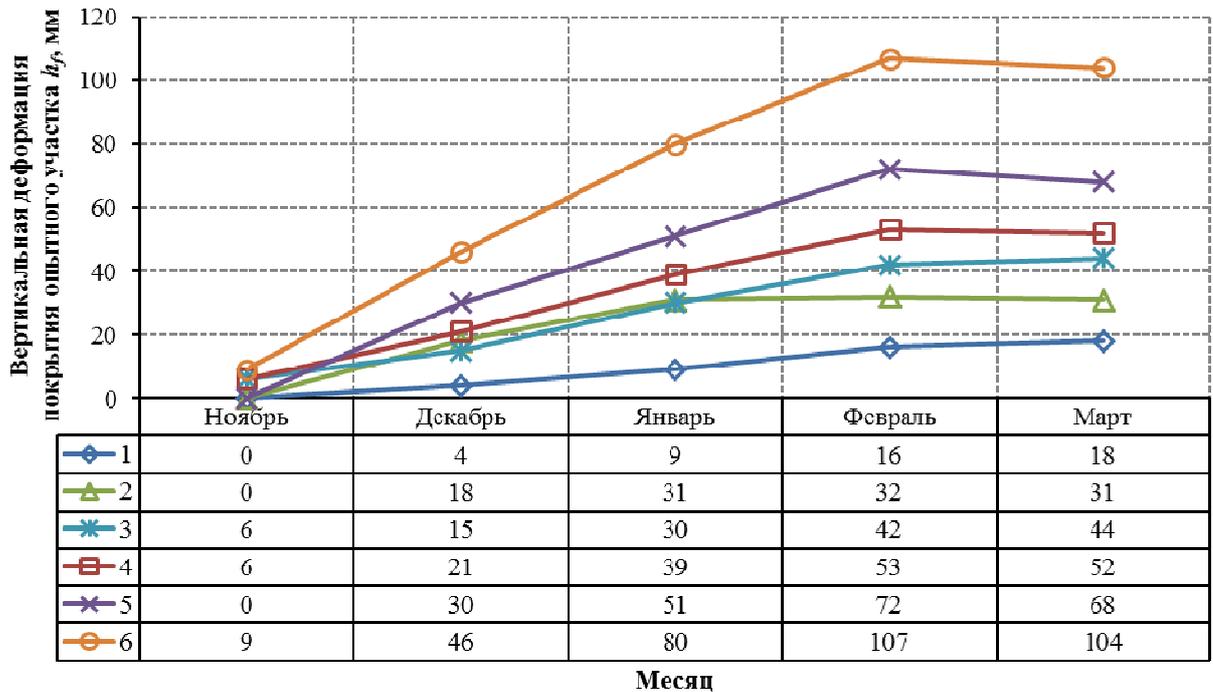


Рисунок 67 – Зависимость вертикальной деформации покрытия опытного участка от времени:
 1, 2, 3 – вертикальная деформация на участке насыпи из ЗШС при первом, втором и третьем типе местности по условиям увлажнения соответственно; 4, 5, 6 – вертикальная деформация на участке насыпи из суглинка легкого пылеватого при первом, втором и третьем типе местности по условиям увлажнения соответственно

Таблица 39 – Степень пучинистости грунтов опытного участка

Наименование грунта	Влажность грунта перед началом промерзания W , % по массе	Максимальная вертикальная деформация покрытия h_f , м	Относительная деформация пучения ε_f , д. ед.	Степень пучинистости по ГОСТ 25100-2011
1 тип местности по условиям увлажнения				
ЗШС	25	0,018	0,015	слабопучинистый
Суглинок	13	0,053	0,066	среднепучинистый
2 тип местности по условиям увлажнения				
ЗШС	40	0,032	0,027	слабопучинистый
Суглинок	17	0,072	0,090	сильнопучинистый
3 тип местности по условиям увлажнения				
ЗШС	60	0,044	0,037	среднепучинистый
Суглинок	19	0,107	0,134	сильнопучинистый

Результаты измерений на опытном участке подтверждают экспериментальные данные, полученные на приборах в лаборатории. Величина относительного морозного пучения ЗШС в 3-4 раза меньше, чем у суглинка лёгкого пылеватого при любом типе местности по условиям увлажнения. Таким образом, при отсутствии свободного постоянного притока воды к телу земляного полотна (первый и второй тип

местности по условиям увлажнения) ЗШС может использоваться для сооружения даже рабочего слоя насыпей земляного полотна автомобильных дорог.

Стоит отметить, что относительная деформация пучения ЗШС на опытном участке в среднем в 1,5 раза меньше, чем в лабораторных испытаниях при моделировании условий третьего типа местности. На основе этого факта в формулу (52) введен поправочный коэффициент K_n , который учитывает разность между результатами в лабораторных условиях и на опытном участке. В результате получена формула (43) (см. параграф 2.3).

4.3 Проверка несущей способности земляного полотна из золошлаковой смеси

Несущая способность дорожной конструкции определяется модулем упругости на поверхности конструктивных слоев. Модуль упругости земляного полотна и слоев дорожной одежды оценивались по методике штамповых испытаний [73, 120]. Штамповые испытания опытного участка из золошлаковой насыпи проводились по слоям, соответственно на поверхности земляного полотна и щебеночного основания (рисунок 68). На поверхности асфальтобетонного покрытия проведены испытания методом статического нагружения спаренным колесом автомобиля.



Рисунок 68 – Проведение штамповых испытаний на поверхности земляного полотна из ЗШС

Моделирование расчётного периода осуществлялось путём интенсивного увлажнения земляного полотна из ЗШС в течение недели. Для штамповых испытаний использовался жесткий штамп диаметром 0,33 м, нагружаемый при помощи гидравлического домкрата грузоподъемностью до 4 тонн, который устанавливался в подрессоренную часть грузового автомобиля. Нагрузку на штамп прикладывали ступенями до максимального расчетного значения: 0,5 МПа на поверхности основания, 0,3 МПа на поверхности земляного полотна.

Модуль упругости грунта или материала в однородной конструкции, а также общий модуль упругости слоистой конструкции, испытанных нагружением с помощью жесткого штампа вычисляется по формуле (48).

Схема расположения точек установки жесткого штампа на поверхности земляного полотна и основания представлена на рисунке 69. Следует отметить, что точка 2 соответствует участку укладки георешетки под слой щебеночно-песчаного основания, а точки 1 и 3 находятся на участках без укладки георешетки.

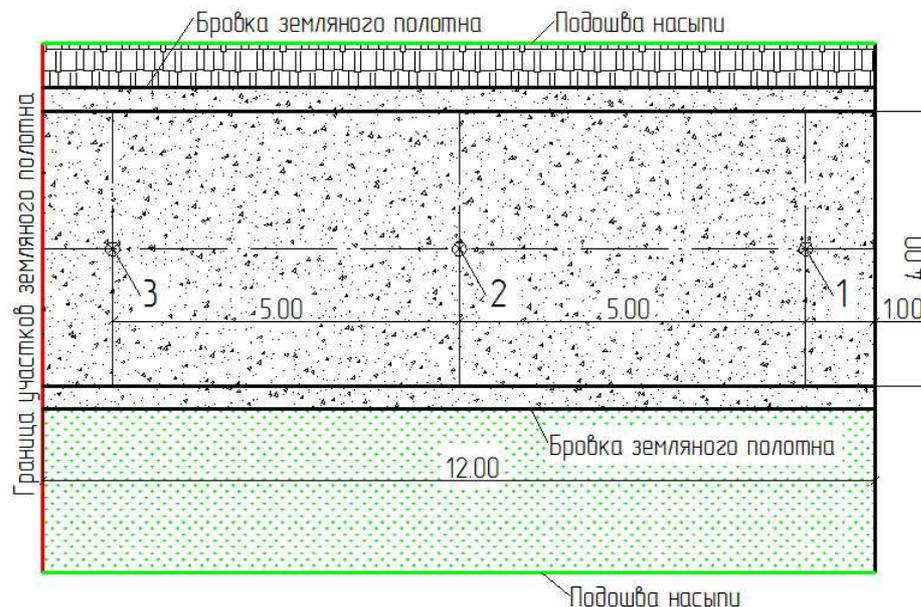


Рисунок 69 – Схема расположения точек установки штампа: 1, 2, 3 – номера точек

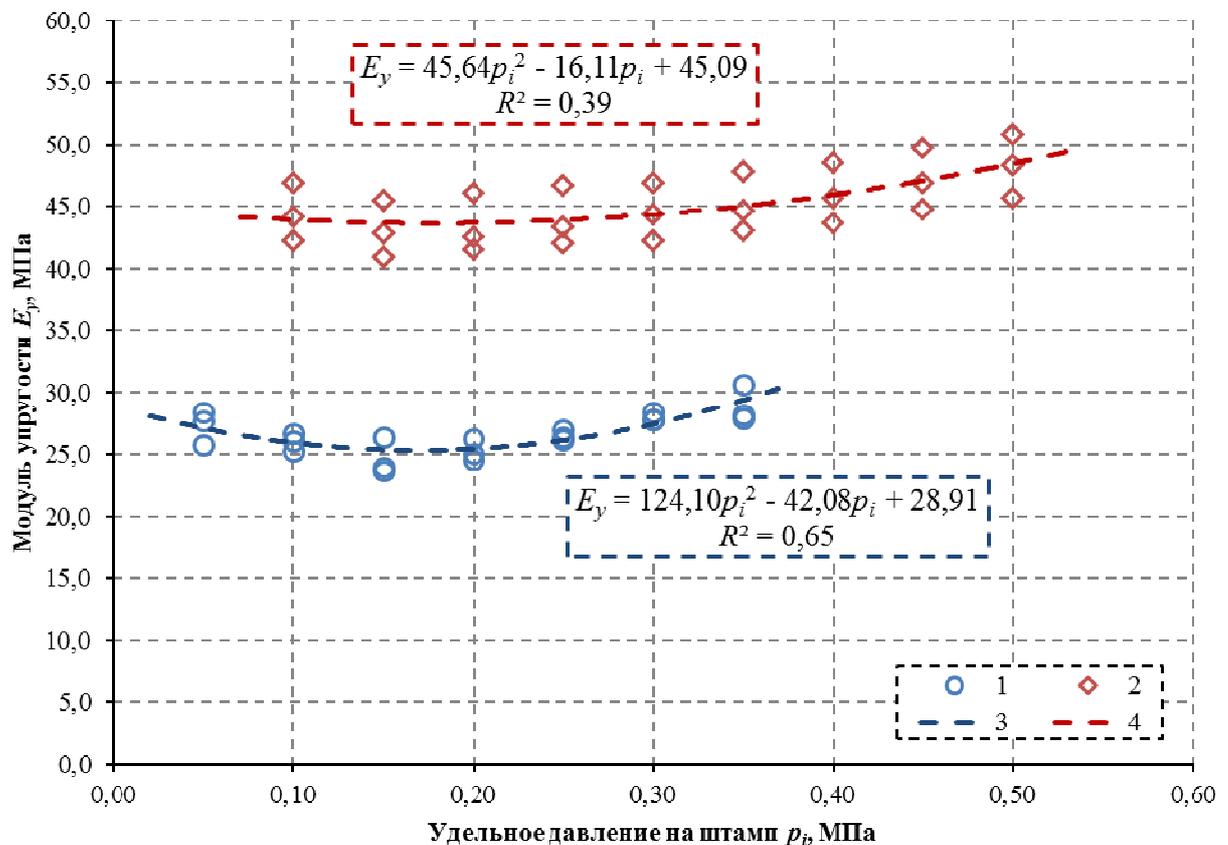
Результаты измерения упругих деформаций на земляном полотне и щебеночно-песчаном основании, а также полученные значения модулей упругости приведены в таблицах 40-41 и на рисунке 70.

Таблица 40 – Модуль упругости на поверхности земляного полотна из ЗШС

Степень нагрузки-разгрузки	Удельное давление на штамп p_i , МПа	Упругая деформация l_i в точке установки штампа, м			Среднее значение упругой деформации l_{cp} , м	Средний модуль упругости E_y , МПа
		1	2	3		
1	0,05	0,00054	0,00041	0,00040	0,00045	25,3
2	0,10	0,00100	0,00095	0,00085	0,00093	24,4
3	0,15	0,00144	0,00142	0,00129	0,00138	24,6
4	0,20	0,00185	0,00181	0,00173	0,00180	25,3
5	0,25	0,00215	0,00217	0,00210	0,00214	26,6
6	0,30	0,00245	0,00240	0,00245	0,00243	28,0
7	0,35	0,00285	0,0026	0,00282	0,00276	28,9

Таблица 41 – Модуль упругости на поверхности щебеночно-песчаного основания

Степень нагрузки-разгрузки	Удельное давление на штамп p_i , МПа	Упругая деформация l_i в точке установки штампа, м			Среднее значение упругой деформации l_{cp} , м	Средний модуль упругости E_y , МПа
		1	2	3		
1	0,10	0,00058	0,00052	0,00055	0,00055	44,4
2	0,20	0,00117	0,00105	0,00114	0,00112	43,3
3	0,30	0,00173	0,00155	0,00164	0,00164	44,4
4	0,40	0,00223	0,00200	0,00213	0,00212	45,9
5	0,50	0,00266	0,00239	0,00252	0,00252	48,2

Рисунок 70 – Результаты испытаний по определению модуля упругости E_y : 1 – испытания на поверхности земляного полотна из ЗШС; 2 – испытания на поверхности щебеночно-песчаного основания; 3, 4 – эмпирические зависимости модуля упругости E_y от удельного давления на штамп

Для испытаний по методу статического нагружения спаренным колесом автомобиля (по ОДН 218.1.052-2002 [121]) применялся грузовой двухосный автомобиль, с нагрузкой на заднее колесо 30,3 кН с давлением воздуха в шинах 0,6 МПа (рисунок 71).



Рисунок 71 – Определение общего модуля упругости дорожной конструкции

Нагрузку на колесо проверяли с помощью переносных весов, обеспечивающих точность взвешивания до 0,5 кН. Измерение упругих деформаций покрытия осуществлялось длиннобазовым рычажным прогибомером, измерительная пятка которого устанавливалась между баллонами спаренного заднего колеса. Определение модуля упругости производилось в тех же поперечных сечениях, представленных на рисунке 69.

Расчет модуля упругости дорожной конструкции произведен по рекомендациям ОДН 218.1.052-2002 [121] (таблица 42). Формула для определения модуля упругости на поверхности покрытия имеет вид

$$E_A = 0,36 \frac{Q_K}{l}, \quad (62)$$

где E_A – модуль упругости дорожной конструкции при воздействии расчетной нагрузки, МПа;
 Q_K – нагрузка на колесо используемого автомобиля, кН;
 l – величина измеренного обратимого прогиба, см.

В результате измерения упругих деформаций показали, что модуль упругости на поверхности земляного полотна из ЗШС изменяется в пределах от 24 до 28 МПа, на поверхности основания – от 43 до 48 МПа, на поверхности покрытия – от 75 до

88 МПа. Стоит отметить, что модуль упругости дорожной конструкции, рассчитанный по рекомендациям ОДН 218.046-01 [65], равен 76,5 МПа. Таким образом, разница между значением опытного модуля упругости на неармированных участках и теоретическим значением составляет всего на 2%.

Таблица 42 – Результаты измерения упругих деформаций на поверхности покрытия

Сечение поперечного профиля (см. рисунок 75)	Нагрузка на колесо испытываемого автомобиля Q_k , кН	Величина измеренного обратимого прогиба l , см	Модуль упругости дорожной конструкции E_A , МПа
1	30,3	0,145	75,2
2	30,3	0,124	88,0
3	30,3	0,140	77,9

В результате обработки полученных значений модулей упругости на поверхности слоев дорожной конструкции можно сделать вывод, что укладка георешетки под слой щебеночно-песчаного основания привела к некоторому увеличению модуля упругости всей дорожной конструкции. Прирост на поверхности основания составил 8,5 %, а на поверхности покрытия – 14,9 %. Увеличение прироста модуля упругости объясняется распространением нагрузки от колеса на большую площадь нижележащих слоев, нежели без использования георешетки.

Летом 2013 г. на опытном участке были проведены дополнительные испытания модуля упругости при помощи установки динамического нагружения (УДН) ДИНА-3М [122] (рисунок 72). Принцип действия установки основан на нагружении дорожной одежды расчетной динамической нагрузкой и измерении возникающего при этом упругого прогиба [123].

Рекомендации по расчету модуля упругости приведены в СТ СЭВ 5497-86 [124]. Модуль упругости при динамическом нагружении определяли по формуле

$$E_{vdi} = \frac{\pi \cdot d \cdot \sigma_i}{4W_{0i}} (1 - \mu^2), \quad (63)$$

где d – диаметр нагружаемого штампа, мм ($d=340$ мм);

μ – коэффициент Пуассона (для грунтов $\mu=0,35$; для дорожных конструкций $\mu=0,3$);

W_{0i} – амплитуда упругой деформации нагруженной поверхности по оси нагрузки, мм;

σ_i – контактное напряжение, МПа, определяемое по формуле

$$\sigma_i = \frac{4F_i}{\pi \cdot d^2}; \quad (64)$$

где F_i – динамическое усилие, развиваемое падающим грузом, Н (для установки ДИНА-3М $F_i=50000$ Н).



Рисунок 72 – Определение модуля упругости на поверхности покрытия при помощи УДН ДИНА-3М

Результаты испытаний и расчета модуля упругости по формуле (63) приведены в таблице 43. Испытания динамического нагружения проводились в точке № 2 соответствующей рисунку 70.

Таблица 43 – Определение модуля упругости при помощи УДН ДИНА-3М

Номер испытания	Амплитуда упругой деформации W_{0i} , мм	Модуль упругости дорожной конструкции E_{vdi} , МПа	Средний модуль упругости E_{vdi} , МПа
1	2,43	55,1	63,3
2	1,93	69,3	
3	2,04	65,6	

Как видно, значения динамического модуля упругости дорожной конструкции с использованием ЗШС в земляном полотне меньше статического модуля упругости в среднем на 21%.

4.4 Устойчивость откосов земляного полотна из золошлаковой смеси

Имеется точка зрения, что земляное полотно из ЗШС чрезвычайно неустойчиво к водной или ветровой эрозии, поэтому требуется его немедленное закрытие слоем глинистого или растительного грунта.

Земляное полотно на опытном участке было отсыпано и спрoфилировано в августе 2010 г. Вслед за этим пошли дожди, в том числе и ливневого характера. Всю зиму, весну и большую часть лета 2011 г. земляное полотно простояло без дорожной одежды и укрепления правого откоса. Основываясь на результатах этого жесткого испытания, мы констатируем, что ни верх, ни откосная часть земляного полотна из ЗШС не претерпели существенных деформаций или разрушений, простояв без укрепления в течение года. Также за весь этот период не наблюдалось существенного пылеуноса с поверхности верха и откосов насыпи из ЗШС, его можно было сравнить с пылеуносом близлежащих дорог с грунтовым покрытием.

Только в августе 2011 г. верх и правый откос были укреплены (см. рисунок 53).

Состояние откосов после укрепления представлено на рисунке 73. Ближняя часть правого откоса из ЗШС (рисунок 73А) не имеет укрепления.



Рисунок 73 – Внешний вид откосов насыпи из ЗШС в октябре 2011 г.: А – правый откос с заложением 1:2; Б – левый откос с заложением 1:0,5 (обозначение откосов соответствует рисунку 50)

На сегодняшний день (июнь 2014 г.) откосы насыпи из ЗШС находятся в хорошем состоянии. На откосах, закрытых тонким слоем растительного грунта, имеется удовлетворительный растительный покров (рисунок 74). На участке откоса из ЗШС, незакрытом растительным грунтом (рисунок 74В), растительный покров слабый. Однако не наблюдается какого-либо пыления этой части откоса. Несмотря на то, что насыпь из ЗШС подвергалась периодическому принудительному дождеванию, существенных размывов укрепленного и неукрепленного откоса не наблюдалось.



Рисунок 74 – Внешний вид откосов насыпи из ЗШС после трёх лет мониторинга, в июне 2014 г.: А – правый откос с заложением 1:2; Б – левый откос с заложением 1:0,5; В – участок откоса из ЗШС, не закрытый растительным грунтом

Результаты проведенных исследований [125, 126] показали, что для получения хорошего растительного покрова откосы из ЗШС необходимо укреплять слоем растительного грунта с посевом трав. Наименование и процентное содержание семян растений следует устанавливать экспериментально для каждой ЗШС. Также необходимо вводить минеральные удобрения и осуществлять периодический полив водой укрепленного откоса. При этом слой ЗШС, находящийся под растительным грунтом, хорошо удерживает влагу необходимую для роста трав.

Выводы по четвертой главе

На основе проведенных исследований в лаборатории, строительства и мониторинга опытного участка из ЗШС можно сделать ряд выводов:

- Технология строительства земляного полотна из ЗШС не отличается от природных песчаных грунтов. Однако следует учитывать, что оптимальная влажность ЗШС, как правило, больше в несколько раз, чем у песчаных грунтов. В то же время границы допустимой влажности ЗШС гораздо шире

по сравнению с глинистыми грунтами, что позволяет в случае необходимости увеличивать технологические перерывы;

- В процессе строительства земляного полотна необходимо периодически доувлажнять верхний слой ЗШС для предотвращения возможного пыления: для этого может использоваться вода, либо различные ПАВ и пленкообразующие вещества;
- Установлено, что неукрепленные части земляного полотна (верх и откосы) из ЗШС не подвержены существенному влиянию осадков или ветра при кратковременном воздействии. Однако необходимо предусматривать укрепление откосов насыпей из ЗШС слоем растительного грунта с посевом трав для исключения возможного пыления и водной эрозии поверхности откоса в течении срока службы дороги;
- Для уплотнения слоев ЗШС рекомендуется использовать катки с гладкими вальцами либо на пневматических шинах с возможностью включения вибратора. Стоит отметить, что при допустимой влажности ЗШС хорошо уплотняется вибрационными способами, т.е. так называемого виброразжижения не происходит. Однако при переувлажнении ЗШС более допустимой влажности, как и случае песчаных грунтов, происходит выделение воды при уплотнении;
- Промерзание насыпи из ЗШС происходит медленнее, чем насыпь из суглинка, из-за специфических теплофизических и водных свойств ЗШС. В конце зимнего периода глубина промерзания насыпи из ЗШС практически в 2 раза меньше, чем из суглинка;
- Расчетная глубина промерзания земляного полотна по методике А.Л. Исакова (изотермы $T=0^{\circ}\text{C}$ и $T=$ минус $0,3^{\circ}\text{C}$) близка (в пределах точности расчета) к экспериментальной, полученной при мониторинге;
- Более раннюю расчётную дату начала промерзания (разница с экспериментом 6-8 дней) можно объяснить влиянием снежного покрова небольшой толщины, периодически образовывавшегося в ноябре на поверхности по-

крытия опытного участка. Также возможно сказалось влияние снегового покрова находящегося на откосах насыпи;

- Расчетная скорость промерзания близка к экспериментальной (наклон кривых промерзания на рисунках 62-64), что позволяет сделать вывод о корректном описании динамики промерзания земляного полотна в рамках принятой расчетной схемы;
- Дискретная модель, положенная в основу расчета по программе «Freeze-1», хорошо описывает общий ход изотерм в процессе промерзания земляного полотна из ЗШС при моделировании первого и третьего типа местности по условиям увлажнения;
- Модуль упругости поверхности земляного полотна из ЗШС соответствует значению модуля упругости слоя ЗШС полученному при штамповых испытаниях при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения $K_{упл}=0,96$ (см. главу 3);
- Модуль упругости поверхности земляного полотна из ЗШС соответствует модулю упругости суглинистых грунтом (супеси пылеватой и суглинка легкому пылеватому), находящихся при относительной влажности $W/W_m=0,80-0,85$ [65];
- Общий модуль упругости дорожной конструкции опытного участка соответствует расчетному значению, полученному по рекомендациям ОДН 218.046-01 [65];
- Относительная деформация пучения ЗШС на опытном участке при всех типах местности по условиям увлажнения в 3-4 раза меньше, чем суглинка легкого пылеватого в тех же условиях;
- В то же время относительные деформации пучения ЗШС, полученные на опытном участке, в среднем в 1,5 раза меньше, чем при испытаниях в лабораторной установке. Таким образом, стандартизированная методика определения степени пучинистости грунта по ГОСТ 28622 [78] в большинстве случаев дает завышенные результаты, особенно при влажности близкой к полной влагоемкости грунта;

- При обработке результатов экспериментальных исследований и мониторинга опытного участка впервые получены эмпирические зависимости относительной деформации пучения ЗШС от влажности, коэффициента уплотнения и температуры промораживания. Таким образом, получена возможность прогнозирования пучения дорожной конструкции с применением ЗШС.

В технологии строительства и эксплуатации дорог принято выделять три основных фактора, влияющие на величину пучения дорожной конструкции:

- 1) высокая влажность грунта (большое осенне-зимнее влагонакопление);
- 2) медленное промерзание – низкая скорость промерзания из-за небольшой отрицательной температуры окружающего воздуха, а также перепадов температуры в период осенне-зимнего влагонакопления;
- 3) наличие в рабочем слое земляного полотна грунтов с высокой степенью пучинистости.

В случае использования ЗШС как грунта земляного полотна стоит выделить существенные отличия от традиционных представлений о морозном пучении этого материала.

Хотя низкий коэффициент теплопроводности ЗШС предопределяет медленное промерзание, однако оно происходит на гораздо меньшую глубину (в 1,5-2 раза меньше) относительно грунтов природного происхождения. Меньшая глубина промерзания дает меньшую деформацию морозного пучения в соответствии с формулой (42).

Высокая влажность ЗШС при необеспеченном отводе воды от земляного полотна с первого взгляда должна существенно увеличивать степень пучинистости ЗШС. Однако этого не происходит, и здесь можно выделить несколько возможных предпосылок такого явления. Во-первых, большая пористость ЗШС и развитая микропористость частиц обуславливает большую удельную поверхность ЗШС (как по воздухопроницаемости, так и по десорбции аргона). Тем самым образуется относительно большое количество прочно- и рыхлосвязанной воды вокруг частиц ЗШС. Прочно- и рыхлосвязанная вода в процессе промерзания грунта очень ограничена в передвижении к границе промерзания в виду наличия молекулярных

сил притяжения. Также такая вода замерзает при более низкой температуре, чем свободная вода.

Во-вторых, наличие пористости ЗШС компенсирует часть деформаций грунта, происходящих за счет увеличения воды в объеме при замерзании. То есть можно сказать, что степень пучинистости ЗШС существенно меньше по отношению к ее влажности в сравнении с природными грунтами, где прирост влажности даже на несколько процентов может перевести грунт в пучинистый или сильно пучинистый.

Третий из рассматриваемых факторов – высокая степень пучинистости грунта. Здесь можно сказать, что вопреки большой влажности и содержанию пылеватых частиц, а также медленному промерзанию, ЗШС обладает относительно низкой степенью пучинистости даже в условиях неограниченного подтока воды к границе промерзания. Косвенный фактор – содержание пылеватых частиц, как и повышенная влажность, тоже не может служить показателем возможного пучения, ввиду специфичности формы частиц ЗШС и наличия микропористости.

Низкая степень пучинистости ЗШС подтверждена как испытаниями в лаборатории, так и в условиях реального земляного полотна. Причем величина пучения на опытном участке даже оказалась ниже, чем в лаборатории, не смотря на достаточно суровые условия испытаний.

5 Экологическая и экономическая оценка рекомендуемых конструктивно-технологических решений

5.1 Экологическая оценка применения золошлаковых смесей для земляного полотна

Все федеральные законы и подзаконные акты, относящиеся к вопросам применения получаемых золошлаковых отходов, выдвигают требования, касающиеся защиты окружающей среды [81, 127]. Тем не менее, не существует нормативно-правовой базы, описывающей порядок использования (переработки, утилизации) отходов, а также регламентирующей порядок перехода золошлаков из категории «отход» в категорию «материал».

ГОСТ 30772-2001 [128] дает ряд определений.

Безопасные отходы – отходы, существование которых и (или) обращение с которыми в определенных условиях и в определенное время признаны безопасными для жизни, здоровья человека и окружающей природной среды.

Побочный продукт – дополнительная продукция, образующаяся при производстве основной продукции и не являющаяся целью данного производства, но пригодная как сырье в другом производстве или для потребления в качестве готовой продукции.

Золошлаковая смесь, получаемая в процессе сжигания твердого топлива, не является конечным продуктом производства тепло- и электроэнергии и при удовлетворении соответствующих экологических требований может быть отнесена к побочным продуктам производства. Согласно ГОСТ 25100-2011 золошлаковые смеси, полученные при сжигании твердого топлива, относятся к дисперсным техногенным антропогенно-образованным грунтам (см. таблицу 1).

Главной задачей механизма юридического перевода ЗШС из категории «отход» в категорию «материал» является доказательство экологической безопасности их применения. Эту задачу можно выполнить путем применения программно-целевого подхода, состоящего из нескольких этапов:

- создание государственного стандарта (ГОСТ) дающего четкое определение золошлаковых отходов в качестве «побочных продуктов», а также регламентирующего области и принципы использования золошлаковых отходов в дорожном строительстве;
- создание нормативно-технического документа в виде стандарта организации (СТО) для каждой ТЭС, в котором будут представлены технические требования к золошлаковым материалам, методы испытаний, рекомендации по применению, порядок получения паспорта на материал, порядок отгрузки, приемки и методы контроля;
- согласование и рецензирование СТО на уровне региональных и федеральных проектных и строительных организаций;
- утверждение СТО на уровне федерального подразделения Росавтодора;
- внесение СТО в нормативную базу для выполнения проектно-строительных работ.

Описанный регламент оценки возможности использования золошлаковых материалов позволит внедрить данный класс материалов в дорожное строительство.

При решении этой задачи необходимо оценить экологические параметры с точки зрения воздействия на близлежащую территорию и людей. Основными экологическими требованиями, предъявляемыми к этим материалам, являются: химический состав и удельная эффективная активность естественных радионуклидов. На основе этих показателей определяется класс опасности материала по степени негативного воздействия на окружающую среду согласно ФЗ-89 "Об отходах производства" [129], в соответствии с Приказом МПР РФ от 15.06.2001 № 511 [130]. Помимо этого следует также учитывать влияние пылеуноса со слоя ЗШС в период строительства.

В таблице 15 (см. параграф 3.2) представлен химический состав золошлаков основных топливных углей, применяемых на ТЭС в Западной Сибири.

Большинство соединений, слагающих ЗШС, представлены нерастворимыми веществами (поэтому не имеют влияния на окружающую среду), и только оксиды кальция, серы и магния имеют слабую растворимость в воде.

В течение сравнительно долгого времени золошлаки считались материалами непригодными к использованию в силу их радиационных свойств. На данный момент были проведены исследования удельной эффективной активности природных радионуклидов и присутствия газа радона в пробах золошлаков с ТЭС Западной Сибири.

В соответствии с СанПин 2.6.1.2523-09 («НРБ 99/2009») и СП 2.6.1.2612-10 [131, 132] удельная эффективная активность природных радионуклидов $A_{эфф}$ в отходах промышленного производства рассчитывается по формуле:

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3A_{Th} + 0,09A_K \quad (65)$$

где A_{Ra} и A_{Th} – удельные активности изотопов ^{236}Ra и ^{232}Th (Бк/кг);
 A_K – удельная активность изотопа $K-40$ (Бк/кг).

Результаты исследований по определению удельной эффективной активности природных радионуклидов проб ЗШС, отобранных из отвалов ряда ТЭС Западной Сибири, представлены на рисунке 75.

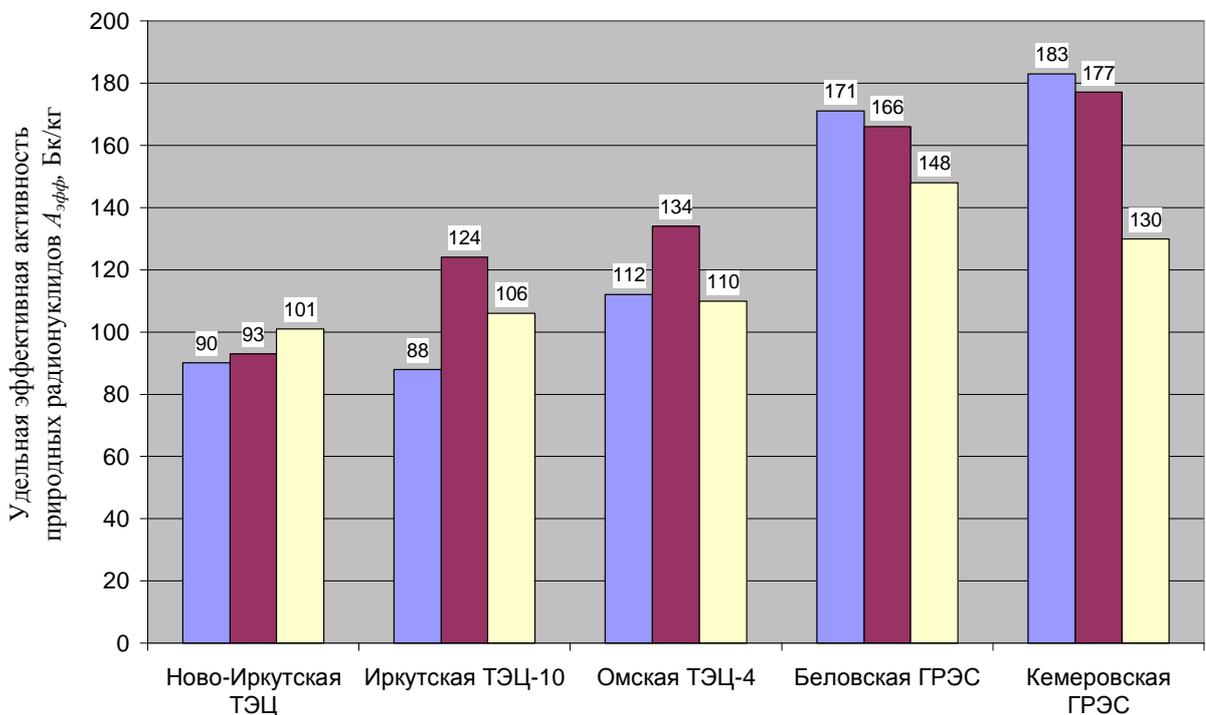


Рисунок 75 – Удельная эффективная активность природных радионуклидов проб ЗШС из отвалов ТЭС Западной Сибири

Согласно санитарно-эпидемиологическим заключениям, полученным по результатам экспертиз, проведенных специализированными лабораториями, значения

удельной эффективной активности природных радионуклидов не превышают 50% от допустимого уровня излучения для отходов производства 1-го класса опасности (не имеющие ограничений в применении, менее 370 Бк/кг) [79, 133, 134].

Наиболее весомым из всех естественных источников радиации является невидимый и не имеющий вкуса и запаха тяжелый газ (в 7,5 раз тяжелее воздуха) – радон. Согласно текущей оценке НК ДАР ООН (научного комитета ООН по действию атомной радиации), радон вместе со своими дочерними продуктами радиоактивного распада ответственен примерно за 75% годовой индивидуальной эффективной дозы излучения, получаемой населением от всех земных источников радиации. Большую часть этой дозы человек получает от радионуклидов, попадающих в его организм вместе с вдыхаемым воздухом, особенно в непроветриваемых помещениях.

Исследования радиационного фона золотавалов и загрязнения радоном в производственных помещениях ТЭЦ-4 и экспериментальных домах из материалов на основе ЗШС проводились в 1992-93 гг. [7] Омским городским экологическим центром, специалистами НИИ радиационной гигиены (г. Санкт-Петербург), специалистами энергетического института им. Г.М. Кржижановского (г. Москва). Исследования проводились с помощью приборов различного класса, в том числе образцового 1-го разряда: ДРГ01Т1, ИЗ13-3М, радиометр радона РРА-01, ИЗВ-3М, γ -радиометр РГА-20П, гамма-спектрометрический комплекс РОУС-1-6.

Согласно проведенным дозиметрическим исследованиям, мощность экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭДГИ) и объемная активность дочерних продуктов радона не превышают установленные в России допустимые пределы для жилых и общественных зданий (не более 200 Бк/м³ среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность радона в воздухе в действующих помещениях, а в проектируемых – не более 100 Бк/м³).

На этапе строительства проявляется единственный серьезный недостаток ЗШС – под действием движения воздушных масс с поверхности материала уносятся пылеватые частицы. Пылеунос не является полностью экологической характеристикой, скорее его следует отнести к области гигиенического воздействия.

Тем не менее, если не принимать во внимание это свойство ЗШС, то в результате пыления могут возникнуть следующие проблемы:

- риск причинения вреда здоровью (при попадании пыли в глаза и/или дыхательные пути);
- повышенный износ техники (налипание пыли на смазку и попадание в механизмы);
- эрозия откосов до момента их укрепления или проведения мероприятий по пылеподавлению.

Пыление ЗШС возможно устранить простыми методами. Достаточно регулярно увлажнять поверхность материала водой или водным раствором глицерина (1-5%) и др., что дает более длительную защиту от пыления. Таким образом, пылеунос не является серьезным препятствием для применения ЗШС в дорожном строительстве. Эффективность проведения строительных работ обеспечивается тщательным соблюдением интервалов увлажнения и объема розлива пылеподавляющих веществ.

По Федеральному закону от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [129] по степени негативного воздействия на окружающую среду золошлаки должны относиться к пятому классу - «практически неопасные отходы». В противном случае их применение должно сопровождаться внедрением специальных мероприятий, предусмотренных ФЗ и [135].

Почти все золошлаки, образованные от углей, сжигаемых на ТЭС в Западной Сибири, имеют пятый класс опасности (на что имеются санитарно-эпидемиологические заключения), а значит, не имеют ограничений к применению в дорожной отрасли. Таким образом, при соответствующем техническом обосновании, ЗШС могут быть применены практически без ограничений и дополнительных мероприятий для сооружения земляного полотна.

5.2 Экономическая оценка применения золошлаковых смесей для земляного полотна

Рассмотрение экономической целесообразности использования ЗШС в строительстве стоит вести в ключе сравнения вариантов по каждому конкретному объекту. Необходимо сравнивать технологии и стоимость строительства земляного полотна из ЗШС вместо природных грунтов. Причина этого в том, что золошлаковые отвалы расположены вблизи городов, а, следовательно, и экономически выгодный радиус доставки ЗШС к месту строительства ограничен.

Также стоит учитывать, что существует несколько технологий доставки и строительства с использованием ЗШС [136-138]:

- автосамосвалами с отсыпкой в земляное полотно;
- гидронамыв непосредственно в земляное полотно;
- гидронамыв в притрассовые бурты с последующей их разработкой.

Необходимо отметить, что стоимость ЗШС на сегодняшний день колеблется по регионам Западной Сибири в пределах от 1 до 5 рублей за тонну. Однако эта стоимость сформирована в условиях отсутствия спроса на данный материал.

На сегодняшний день существует следующая ситуация с реализацией ЗШС. Золоотвалы находятся в предельном режиме эксплуатации: свободная емкость их очень сильно ограничена либо они полностью заполнены. Следовательно ТЭС и управляющие компании заинтересованы в разработке отвалов в большом объеме и готовы рассматривать варианты проектирования и строительства объектов с частичной компенсацией затрат за свой счет. Это обстоятельство очень сильно сказывается на окончательной цене тонны ЗШС, доставленной к месту строительства.

В качестве примеров предлагается рассмотреть несколько реальных объектов строительства дорог на территории Омской области, которые находятся в разных стадиях реализации.

Первый объект – проект строительства технологической дороги, находящийся в территории расположения ТЭЦ-5 г. Омска. Название проекта: «Реконструк-

ция участка автомобильной дороги от НОВ-2 в сторону НОВ-1 на золоотвале СП ТЭЦ-5 с использованием ЗШС».

В проекте сравниваются между собой стоимость сооружения земляного полотна из ЗШС и природного грунта (суглинка) по одинаковой технологии – доставка грунта автосамосвалами с отсыпкой в насыпь. Отличие вариантов заключается в стоимости исходного грунта в отвале и стоимости доставки в зависимости от дальности. Заказчиком объекта строительства является Омский филиал ОАО «ТГК-11», поэтому в технико-экономическом обосновании использования ЗШС из отвала ТЭЦ-5 при расчете стоимости строительства насыпи из ЗШС учитываются следующие факторы (Приложение Г):

- экономия за счет платы за размещение ЗШС на территории ТЭЦ;
- экономия за счет отсутствия необходимости строительства дополнительной секции золоотвала;
- экономия за счет отсутствия необходимости подготовки землеустроительной документации и отвода (выкупа) земель для размещения карьера привозного грунта.

Технико-экономическое сравнение произведено специалистами проектного бюро ООО НПО «Мостовик». При сравнении вариантов строительства технология сооружения земляного полотна из ЗШС с использованием вяжущего экономичнее сооружения насыпи из привозного суглинка практически на 60 %. При этом прочность и устойчивость земляного полотна из укрепленной ЗШС несравнимо выше, чем из суглинка. Вариант строительства насыпи из неукрепленной ЗШС выгоднее, чем сооружение насыпи с использованием вяжущего практически в 2,6 раза.

Получение экономического эффекта при использовании ЗШС в качестве грунта земляного полотна осуществляется косвенным путем за счет экономии средств на строительство новой секции золоотвала или наращивания дамб существующей секции.

Второй объект – проект строительства участка объездной дороги вокруг г. Омска протяженностью 55 км. Название проекта: «Проект строительства Северного обхода г. Омска на участке от с. Новоалександровка до п. Октябрьский». Эта

автомобильная дорога Iб технической категории по проекту имеет высоту насыпи от двух до одиннадцати метров. Для отсыпки земляного полотна Северного обхода требуется около 7,5 млн. м³ грунта. При этом золоотвалы ТЭЦ-4 и ТЭЦ-5 г. Омска находятся в непосредственной близости от начала и конца проектируемого участка дороги (рисунок 76).

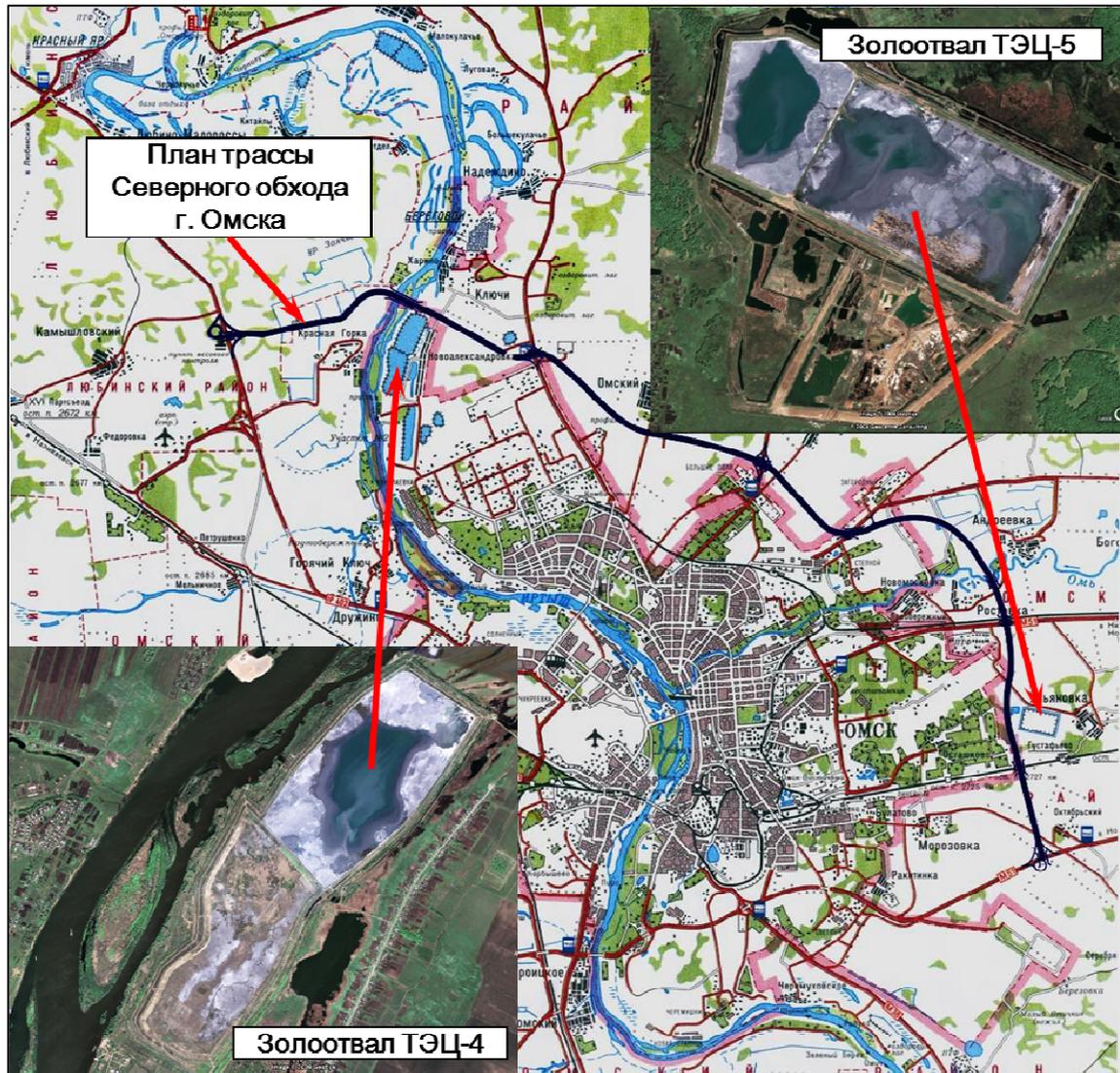


Рисунок 76 – План трассы Северного обхода г. Омска

В качестве альтернативных вариантов рассматриваются перечисленные ранее технологии гидронамыва. Однако стоимость одних и тех же вариантов может быть разной в зависимости от договоренности об участии ТЭЦ в погашении части расходов.

По заданию Омского филиала ОАО «ТГК-11» мы рассмотрели целый ряд вариантов для технико-экономического обоснования предлагаемого решения:

- 1) Первый вариант предполагает, что будут изысканы карьеры для того, чтобы взять 7,5 млн. м³ привозного грунта (суглинка), а после окончания строительства будут проведены работы по рекультивации земли. Доставка грунта осуществляется автотранспортом.
- 2) Второй вариант – типичная технология по разработке золоотвала экскаваторами и перемещении ЗШС в земляное полотно автотранспортом.
- 3) Третий вариант – гидронамыв ЗШС в насыпь на длину транспортировки пульпы земснарядом и в штабели, грунт из которых потом разрабатывается экскаваторами и транспортируется к месту укладки автотранспортом. Для производства работ предложен земснаряд ЗГМ-1-350А производительностью 1600 м³/ч.
- 4) Четвертый вариант – гидронамыв ЗШС в насыпь на всю длину дороги, используя несколько станций перекачки.
- 5) Пятый вариант – гидронамыв ЗШС в штабели с последующей разработкой его экскаваторами.

Для намыва штабеля предложен послойно-грунтоопорный способ, а для намыва земляного полотна – безэстакадный по пионерно-торцевой схеме.

Технико-экономическое сравнение проведено на основе локальных сметных расчетов, выполненных в соответствии МДС 81-35.2004 [139]. Накладные расходы определялись в процентах от сметных затрат на оплату труда рабочих и механизаторов в соответствии с приложением 4 МДС 81-25.2001 [140] по виду строительно-монтажных работ. Норматив накладных расходов принят 95% от фонда оплаты труда (ФОТ) по земляным работам, выполняемым механизированным способом (экскаваторами и автосамосвалами), и 85% от ФОТ по земляным работам, выполняемым при помощи средств гидромеханизации.

Сметная прибыль определялась по нормативам сметной прибыли по видам строительно-монтажных работ в соответствии с приложением 3 МДС 81-33.2004 [141]. Норматив сметной прибыли принят 50% от ФОТ на земляные работы, выполняемые механизированным способом и при помощи средств гидромеханизации.

При сравнении технологий строительства в качестве критерия принят минимум удельной сметной стоимости при сооружении 1000 м³ земляного полотна. Стоимость строительно-монтажных работ определялась в текущем уровне цен по состоянию на 01.05.2012. Результаты выполненных локальных сметных расчетов приведены в таблице 44.

Таблица 44 – Техничко-экономическое сравнение вариантов технологии строительства участка Северного обхода г. Омска

Показатель	№ варианта – технология строительства				
	1 - Перемещение суглинка из карьера автосамосвалами	2 - Перемещение ЗШС из отвала автосамосвалами	3 - Гидронамыв ЗШС в насыпь и штабели	4 - Гидронамыв ЗШС в насыпь на всю длину	5 - Гидронамыв ЗШС в штабели
Сметная стоимость в соответствии с локальным сметным расчетом, млн. руб.	315,341	227,518	300,457	278,390	339,700
Затраты, которые может компенсировать заказчик (ОАО "ТГК-11")	–	–	182,055	208,583	159,737
Затраты подрядной дорожно-строительной организации	315,341	227,518	118,402	69,807	179,963

Примечания:

1.  – Самый выгодный вариант для подрядной организации при условии выполнения строительно-монтажных работ за счет собственных средств;
2.  – Самый выгодный вариант технологии гидронамыва;
3.  – Самый выгодный вариант для подрядной организации при условии компенсации части затрат по гидромеханизации работ со стороны заказчика.

При сравнении сметных стоимостей вариантов строительства можно сделать вывод, что, несмотря на высокую производительность гидронамыва, если эти затраты полностью понесут дорожно-строительные организации, то все-таки эффективнее оказалась транспортировка самосвалами, хотя средняя дальность возки составляет 9 км.

Но организация-заказчик Омского филиала ОАО «ТГК-11» заинтересована в этом объекте, а также стеснена отсутствием емкости золоотвалов, что выражается в готовности за собственные средства проложить пульпопроводы и организовать намыв ЗШС.

Наряду с положительными моментами есть и дополнительные трудности в гидронамыве, которые объясняются тем, что пульпопровод необходимо прокладывать по прямой линии. Вместе с этим, современный и мощный земснаряд может прокачать пульпу всего на 4,55 км, чего недостаточно для данного проекта дороги. В данном случае необходимо строить промежуточные перекачивающие станции.

Кроме того, концентрация твердого вещества в пульпе не превышает 15 %, остальное – вода. Вода после осаждения ЗШС должна поступать обратно в золоотвал, т.к. при выполнении технологии гидронамыва запрещено отводить воду на близлежащие территории для предотвращения их заболачивания.

Все вышеперечисленные моменты вызывают дополнительные затраты. Даже с учетом этих дополнительных затрат, которые готова взять на себя организация-заказчик, получается, что наибольшую эффективность дает не гидронамыв в штабель, а технология намыва в земляное полотно дороги на всю длину.

Таким образом, предлагаемое конструктивно-технологическое решение – гидронамыв ЗШС в земляное полотно по всей длине участка Северного обхода по сравнению с технологией строительства из привозного грунта из карьера позволит сэкономить организации-заказчику около 37 млн. руб., либо сэкономить подрядным дорожно-строительным организациям 245 млн. руб. Также за счет появления свободной емкости золоотвала такой вариант позволит сохранить около 300 га ценных земель.

Выводы по пятой главе

По результатам экологической и экономической оценки применения ЗШС в качестве грунта земляного полотна можно сделать следующие выводы:

- Золошлаковые смеси, получаемые на ТЭС Западной Сибири, состоят из нерастворимых и малорастворимых соединений и большинство из них соответствуют пятому классу опасности по 89-ФЗ – «практически неопасные отходы»;
- По эффективной активности естественных радионуклидов ЗШС на отвалах ТЭС Западной Сибири соответствуют первому классу опасности – «не имеющие ограничений в применении»;
- Применение ЗШС и других золошлаков сдерживается отсутствием четкого определения золошлаков в качестве побочного продукта и перевода этих материалов в класс «материалов». Предложенный порядок создания ряда нормативных документов позволит сформировать условия для широкого использования золошлаков в дорожном строительстве;
- Экономическую оценку применения ЗШС вместо привозного грунта из карьера необходимо проводить для каждого проекта в отдельности. При этом следует учитывать заинтересованность ТЭС в увеличении свободной емкости золоотвалов за счет изымаемого объема ЗШС;
- Строительство земляного полотна из ЗШС может вестись по нескольким технологиям, включая различные варианты гидронамыва. При сравнении вариантов необходимо провести оценку вариантов с привлечением заинтересованных организаций (ТЭС) в погашении части затрат на строительство пульпопроводов и осуществление намыва ЗШС;
- Вариант сооружения насыпи при помощи технологии гидронамыва эффективен при сравнительно большой дальности транспортировки ЗШС и большом объеме потребного грунта.

Заключение

Подводя итоги экспериментальных и теоретических исследований можно сделать общий вывод: кислые и сверхкислые золошлаковые смеси из отвалов ТЭС могут применяться для сооружения устойчивых насыпей земляного полотна автомобильных дорог.

1. В ходе анализа и обобщения литературных данных, проведения экспериментальных исследований и опытного строительства установлен химико-минералогический и фазовый состав ЗШС, физико-механические и технологические показатели ЗШС и конструктивных слоев из этих материалов. По зерновому составу большая часть ЗШС относится к мелким и пылеватым пескам по ГОСТ 25100. Физико-механические показатели ЗШС зависят от коэффициента уплотнения и фактической влажности и должны определяться на основе лабораторных испытаний для каждого проекта в отдельности.

2. Анализ результатов расчёта по общепринятым методикам определения промерзания, влагонакопления и пучинообразования показал, что они не дают адекватных результатов при моделировании для земляного полотна из ЗШС разных типов местности по условиям увлажнения. Наиболее достоверные результаты дают расчеты глубины промерзания земляного полотна из ЗШС по методике А.Л. Исакова. В качестве расчетной модели также можно использовать предложенную автором эмпирическую зависимость, полученную в результате обработки результатов экспериментальных исследований и мониторинга опытного участка земляного полотна из ЗШС. Эти модели позволяют прогнозировать процессы промерзания и морозного пучения земляного полотна из ЗШС с погрешностью расчетов не более 10% относительно результатов мониторинга опытного участка, при всех типах местности по условиям увлажнения.

3. Благодаря низкому коэффициенту теплопроводности и потенциально большей влагоемкости ЗШС по сравнению с грунтами природного происхождения скорость промерзания массива грунта из ЗШС не превышает 1,3 см/сут. Экспериментально установлено, что глубина промерзания земляного полотна из ЗШС

в 1,5-2 раза меньше, чем из глинистых грунтов (в зависимости от типа местности по условиям увлажнения). При ограниченном подтоке воды к земляному полотну (первый и второй тип местности по условиям увлажнения) градиент изменения влажности зависит от начальной влажности ЗШС. При третьем типе местности по условиям увлажнения разница в значении влажности на границе промерзания и влажности вне зоны промерзания практически не зависит от начальной влажности из-за постоянного подтока влаги к границе промерзания. Относительная деформация пучения ЗШС зависит от влажности, коэффициента уплотнения и температуры промерзания грунта. При любой достижимой влажности (вплоть до полной влагоемкости) ЗШС не переходят в класс сильнопучинистых грунтов по ГОСТ 25100. Относительная деформация пучения ЗШС на опытном участке при всех типах местности по условиям увлажнения в 3-4 раза меньше, чем у суглинка легкого пылеватого в тех же условиях. Относительные деформации пучения ЗШС, полученные на опытном участке, в среднем в 1,5 раза меньше, чем при испытаниях по ГОСТ 28622 в лабораторной установке.

4. Земляное полотно из ЗШС можно сооружать по нескольким технологиям, включая различные варианты гидронамыва. При сравнении необходимо проводить оценку вариантов с привлечением заинтересованных организаций (ТЭС) в погашении части затрат на строительство пульпопроводов и осуществление гидронамыва ЗШС. Кислые и сверхкислые ЗШС, получаемые на ТЭС Сибири, состоят из нерастворимых и малорастворимых соединений, большинство из них соответствуют пятому классу опасности по 89-ФЗ – «практически неопасные отходы». По эффективной активности естественных радионуклидов ЗШС на отвалах ТЭС соответствуют первому классу опасности – «не имеющие ограничений в применении».

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, мониторинга опытного участка использованы при разработке рекомендаций по проектированию и строительству земляного полотна из золошлаковых смесей. Рекомендации опубликованы в нормативно-методических документах регионального (СТО 82982783.001-2010) и Всероссийского уровня (ОДМ 218.2.031-2013).

Таким образом, основываясь на цели диссертационного исследования, можно сделать вывод, что ЗШС целесообразно применять при строительстве крупных объектов транспортной инфраструктуры различного уровня. При этом следует руководствоваться рекомендациями по проектированию и строительству земляного полотна с учетом специфических свойств ЗШС.

Так как в рамках диссертационного исследования невозможно охватить всех вопросов, которые касаются возможности применения ЗШС в дорожном строительстве, то не рассмотренным вопросам, по нашему мнению, стоит посвятить отдельные исследования. Дальнейшее направление исследования в вопросе использования золошлаковых смесей в качестве грунта земляного полотна должно быть связано с изучением свойств слоев из ЗШС подверженных воздействию различных факторов на протяжении длительного периода времени. В качестве факторов стоит рассмотреть: воздействие циклических нагрузок от проходящего транспорта и его влияние на прочностные и сдвиговые характеристики слоев ЗШС; влияние ветровой и водной эрозии в течение срока службы дороги на устойчивость откосов насыпи из ЗШС; изменение водно-теплового режима земляного полотна из ЗШС в течение срока службы дороги и его регулирование.

Список литературы

1. Иванов Е.В. Применение золошлаковой смеси тепловых электростанций для строительства земляного полотна автомобильных дорог, или Как из двух минусов получить плюс / Е.В. Иванов, В.В. Сиротюк // Автомобильные дороги / Издательство «Дороги» – 2012. – № 05(966). – с. 62-65.
2. 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. Научный журнал. – Москва. – 2008. – №2(23), – с.221-229.
3. Сиротюк В.В. Стандартизация и перспективы использования золошлаков энергетики для дорожного строительства в России / В.В. Сиротюк // Материалы III Международного научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспортировка, переработка, складирование. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – с.58-59.
4. Обобщение опыта промышленного использования золы и шлака ТЭС в дорожном строительстве и разработка на его основе предложений по расширению использования зол уноса и золошлаковых отходов и уточнению технических требований к золам и шлака (в соответствии с постановлением Госстроя СССР и Государственного комитета СМ СССР по науке и технике №227/577 от 29.XII-1972г.) с использованием изобретений по авторским свидетельствам №318660, №384974 Е 02 3/12. Отчет по НИР; рук.: В.П. Никитин, отв. исп.: Никитина Г.Ю. – Омск, 1975. – 146 с.
5. Активация зол уноса ТЭЦ-4 для применения их в качестве минерального порошка в асфальтовых бетонах. Отчет по НИР № Б582694; рук.: В.П. Никитин. – Омск, 1976. – 233 с.
6. Исследовать и разработать использование зол уноса тепловых электростанций в качестве вяжущего в дорожном строительстве. Отчет по НИР № Б335190; отв. исп.: Сиротюк В.В. – Омск, 1974. – 88 с.
7. Рациональное применение золы ТЭЦ: Результаты научно-практических исследований / Сост. Э.П. Гужулев, Ю.Т. Усманский. – Омск: Омский гос. ун-т, 1998. – 238 с.
8. Atsuko Sato, Satoshi Nishimoto. Effective Reuse of Coal Ash as Civil Engineering Material. Civil Engineering Research Institute of Hokkaido – Режим доступа: <http://www.flyash.info/index.html> (24.03.2010).
9. Bruce A. Dockter, Kurt E. Eylands, Lucinda L. Hamre. Use of Bottom Ash and Fly Ash in Rammed-Earth Construction. Energy & Environmental Research Center. University of North Dakota – Режим доступа: <http://www.flyash.info/index.html> (24.03.2010).
10. Akira Ohnaka, Takashi Hongo, Mikio Ohta and Yoshitsugu Izumo. Research and Development of Coal Ash Granulated Material for Civil Engineering Applications. Ube Industries, Ltd., Japan; Clean Japan Center, Japan – Режим доступа: <http://www.flyash.info/index.html> (24.03.2010).
11. Debra F. Pflughoeft-Hassett. David J. Hassett, and Michael H. Schroeder. Materials from Conversion of Coal for Power Production: Practical Working Definitions. 'Energy & Environmental Research Center, University of North Dakota – Режим доступа: <http://www.flyash.info/index.html> (24.03.2010).
12. Pedro J Amaya, Andrew J Amaya. The Use of Bottom Ash in the Design of Dams. American Electric Power, Columbus; Thomas Worthington High School, Worthington – Режим доступа: <http://www.worldofcoalash.org> (24.03.2010).
13. Jeff ryes Chapman, Wei Tu, Behrad Zand, Tarunjit Butalia, William Wolfe. Full Depth Reclamation of Asphalt Pavements Using Class F Fly Ash. The Ohio State University – Режим доступа: <http://www.worldofcoalash.org> (24.03.2010).
14. Thomas F. Edens. Recovery and Utilization of Pond Ash. South Carolina Public Service Authority – Режим доступа: <http://www.worldofcoalash.org> (24.03.2010).
15. N. Mike Jackson, Robb Mack, Scott Schultz, Mag Malek. Pavement Subgrade Stabilization and Construction Using Bed and Fly Ash. University of North Florida, Jacksonville; Jack-

- sonville Electric Authority (JEA), Jacksonville – Режим доступа: <http://www.flyash.info/index.html> (24.03.2010).
16. Izquierdo Maria, Vazquez Enric, Querol Xavier, Barra Marilda, Lopez Angel, Plana Felicia. Use of bottom ash from municipal solid waste incineration as a road material. Institute of Earth Sciences 'Jaume Almera', Spain; Department of Construction Engineering, Politechnical University of Catalonia, Spain – Режим доступа: <http://www.worldofcoalah.org> (24.03.2010).
 17. Wilfried Gläseker Günter Dehoust. Wissenschaftliche Studie zu Verwertung smöglichkeiten von HMV-Schlacke des Hanseatischen Schlackenkontors im Straßen- und Erdbau unter Berücksichtigung bau- und umwelttechnischer Aspekte. Institut für Bodenkunde Universität Hamburg. Öko-Institut e.V, Büro Darmstadt. – Bochum, im Oktober 2009 – Режим доступа: <http://www.kmgmbh> (16.08.2012).
 18. Shuangzhen Wang. Biomass And Coal Fly Ash In Concrete: Strength Durability. Microstructure. Quantitative Kinetics Of Pozzolan Reaction And Alkali Silica Reaction Investigations. A dissertation submitted to the faculty of Brigham Young University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Brigham Young University – Brigham, 2007. – 264 с.
 19. M. A. Khan, A. Usrnani, S.S. Shah, H. Abbas. A study of multilayer soil-fly ash layered system under cyclic loading. Aligarh Muslim University, Aligarh, India – Режим доступа: http://ijce.iust.ac.ir/index.php?slc_lang=en&slc_sid=1 (14.05.2011).
 20. Кочеткова Р. Г. Техногенные грунты и их применение в дорожном строительстве. Р. Г. Кочеткова // Научно-информационный сборник. – М.: Информавтодор. – 2002. Выпуск №6.
 21. Рекомендации по возведению земляного полотна автомобильной дороги МКАД-Кашира из золы гидроудаления ТЭЦ-17 на участках 2-го и 3-го типов местности по условиям увлажнения / Союздорнии. – М.: Союздорнии. – 1989.
 22. Тарасенко Л. П. Использование отходов промышленности в строительстве сельских дорог / Л. П. Тарасенко – М: Транспорт, 1972. – 64 с.
 23. ВСН 185-75. Технические указания по использованию зол-уноса и золошлаковых смесей от сжигания различных видов твёрдого топлива для сооружения земляного полотна и устройства дорожных оснований и покрытий автомобильных дорог [Электрон. ресурс]. – Введен 1975-08-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 24. Анализ норм и правил проектирования и строительства дорожных конструкций с использованием золы-уноса и золошлаковых смесей. Отчет по НИР (1 этап) № гос.рег.01201169113. по г.к. №УД-47/46 от 22.04.2011 / ФГБОУ ВПО «СибАДИ»; рук. В.В. Сиротюк. – Омск, 2012.– 107 с.
 25. Иванов Е.В. Нормативное обеспечение применения золошлаков в дорожном строительстве / Е.В. Иванов, В.В. Сиротюк // Дорожная держава. – 2012. – №44. – с. 76-79.
 26. ОДМ 218.2.031-2013. Методические рекомендации по применению золы-уноса и золошлаковых смесей от сжигания угля на тепловых электростанциях в дорожном строительстве [Электрон. ресурс]. – Введен 2013-03-04 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 27. Общая характеристика отходов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) – Режим доступа: <http://www.don-tech.ru/news/read.php?n=34&subpage=1> (14.03.2013).
 28. Иванов Е.В. Обзор нормативно-методических документов, касающихся использования золошлаковых отходов ТЭС в дорожном строительстве / Е.В. Иванов // Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 20-21 мая 2009 г. / СибАДИ. – Омск, 2009. Книга 1. – с. 176-180.
 29. СНиП 2.05.02-85*. Автомобильные дороги [Электрон. ресурс]. – Введен 1987-01-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 30. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85 [Электрон. ресурс]. – Введен 2013-07-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 31. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация [Электрон. ресурс]. – Введен 2013-01-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.

32. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация [Электрон. ресурс]. – Введен 1996-07-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
33. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов – М.: Госэнергоиздат, 1963 – 538 с.
34. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков – М.: Издательство «Высшая школа», 1967 – 600 с.
35. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / Н.А. Пузаков и др.; ред.: И.А. Золотарь, Н.А. Пузаков, В.М. Сиденко. – М.: Транспорт, 1971. – 416 с.
36. Лукьянов В.С. Расчет глубины промерзания грунтов / В.С. Лукьянов, М.Д. Головкин. – М.: ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ, 1957. – 165 с.
37. Томирдиаро С.В. Тепловые расчеты оснований в районах вечной мерзлоты / С.В. Томирдиаро. – Магадан: СВКНИИ, 1963. – 104 с.
38. Тулаев А.Я. и др. Примеры проектирования противопучинных мероприятий на автомобильных дорогах / А.Я. Тулаев – М.: Дориздат, 1941. – 128 с.
39. Кулижников А. М. Теплотехнический расчет дорожных конструкций с древесными слоями/ А. М. Кулижников // Применение местных материалов и отходов промышленных производств в дорожном строительстве: межвузовский тематический сборник трудов. – Л., 1986, с. 84-89.
40. Строительство автомобильных дорог на севере европейской части СССР с использованием в конструкциях земляного полотна теплоизолирующих слоев из отходов механической обработки древесины (на примере Архангельской области) : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.23.14 / А. М. Кулижников ; науч. рук. д.т.н., проф. М.Н. Першин, к.т.н., доцент Т.А. Гурьев ; ЛИСИ. – Ленинград, 1982. – 23 с.
41. Рувинский В.И. Оптимальные конструкции земляного полотна / В.И. Рувинский – М.: Транспорт, 1982. – 168 с.
42. Методические рекомендации по расчету водно-теплого режима для разработки оптимальной конструкции земляного полотна автомобильных дорог [Электрон. ресурс]. – Введен 1982-01-21 // Кодекс. Право / ЗАО «Информационная компания «Кодекс». - СПб., 2013.
43. Улицкий В.М. Программная система для создания моделей и решения задач строительства и реконструкции с помощью МКЭ «FEM models» / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин, В.Н. Парамонов // Интернет журнал ГК «Геореконструкция». – 2000 – №2 – Режим доступа: (<http://geogec.spb.ru>).
44. Кудрявцев С.А. Численное моделирование процесса миграции влаги в зависимости от скорости промерзания грунтов [Электрон. ресурс] / С.А. Кудрявцев, А.В. Кажарский // Инженерно-строительный журнал СПбГПУ. – 2012 – № 4.– Режим доступа: (<http://www.engstroy.spb.ru>).
45. Кудрявцев С.А. Расчеты процесса промерзания и оттаивания по программе «Termoground» [Электрон. ресурс] / С.А. Кудрявцев // Интернет журнал ГК «Геореконструкция». – 2004 – №8 – Режим доступа: (<http://geogec.spb.ru>).
46. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.
47. Кроник Я.А. Расчеты температурных полей и напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений методом конечных элементов / Я.А. Кроник, И.И. Демин – М.: МИСИ, 1982. – 102 с.
48. Киселев М. Ф. Теория сжимаемости оттаивающих грунтов под давлением / М.Ф. Киселев – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1978. – 176 с.
49. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 17143. Программа расчета промерзания земляного полотна Freeze-1 / А.Л. Исаков; ГОУ ВПО СГУПС.; заявл. 31.05.2011; опублик. 02.06.2011.
50. Исаков А.Л. Теплофизическая дискретная модель промерзания грунта земляного полотна / А.Л. Исаков, Ким Хюн Чол – Транспорт Урала, вып. 2, Екатеринбург, 2012. – с. 121-124.
51. Исаков А.Л., Ким Хюн Чол. Моделирование процесса промерзания земляного полотна на полигоне СГУПС / А.Л. Исаков, Ким Хюн Чол // «Современные проблемы проектирования,

- строительства и эксплуатации земляного полотна и искусственных сооружений»: Труды VIII научно-технической конференции. – М., 2011, С. 137-142.
52. Исаков А.Л. Численный анализ глубины промерзания земляного полотна с использованием программ «Freeze-1» и «Freeze-2» / А.Л. Исаков, Ким Хюн Чол // Труды IX научно-технической конференции. – М., МИИТ, 2012.
 53. Пузаков Н.А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог / Н.А. Пузаков. – М.: Автотрансиздат, 1960. – 168 с.
 54. Золотарь И. А. Теоретические основы применения тонкодисперсных грунтов для возведения земляного полотна автомобильных дорог в северных районах области многолетнемерзлых грунтов / И. А. Золотарь. – Л.: Военная Академия тыла и транспорта, 1961. – 422 с.
 55. Фельдман Г.М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах / Г.М. Фельдман. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 1988. – 258 с.
 56. Гогентоглер Ч.А. Строительные свойства грунтов / Ч.А. Гогентоглер совместно с Г. Аарон, Р. Сорин, Э. Уиллис, А. Винтермейер; перевод с английского; ред.: Н.В. Орнатский – Москва: Издание ГУШОСДОРА. – 1940. – 340 с.
 57. Григорьев Б.В. Экспериментальное исследование промерзания-оттаивания грунтов в неравновесных условиях / Б.В. Григорьев, А.Б. Шабаров // Вестник Тюменского государственного университета. – Тюмень, 2012. – № 4. – С. 53-60.
 58. Злочевская Р.И. Связанная вода в глинистых грунтах / Р.И. Злочевская. – М.: Изд-во МГУ. 1969. – 178 с.
 59. Сиротюк В.В. Исследование укрепления грунтов цементом и золой-уноса Экибастузских углей для строительства дорожных оснований : дисс... канд. техн. наук : 05.23.14 : защищена 1978 / В.В. Сиротюк; науч. рук. проф. Могилевич, доцент В.П. Никитин; СибАДИ. – Омск, 1978. – 200 с.
 60. ГОСТ 9128-2009. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия [Электрон. ресурс]. – Введен 2011-01-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 61. ГОСТ 25607-2009. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия [Электрон. ресурс]. – Введен 2011-01-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 62. ГОСТ 26263-84. Метод лабораторного определения теплопроводности мерзлых грунтов [Электрон. ресурс]. – Введен 1985-07-01 // Кодекс. Право / ЗАО «Информационная компания «Кодекс». – СПб., 2013.
 63. ГОСТ 30256-94. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом [Электрон. ресурс]. – Введен 1996-01-01 // Кодекс. Право / ЗАО «Информационная компания «Кодекс». – СПб., 2013.
 64. Иванов Е.В. Экспериментальное исследование и математическое моделирование промерзания земляного полотна из золошлаковой смеси / Е.В. Иванов, А.Л. Исаков, В.В. Сиротюк // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – Омск: СибАДИ, 2013. – Выпуск 3 (31). – с. 71-76.
 65. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд [Электрон. ресурс]. – Введен 2001-01-01 // Кодекс. Право / ЗАО «Информационная компания «Кодекс». – СПб., 2013.
 66. ТМД 50-601-2004. Методика оценки характеристик морозоопасных свойств грунтов в строительстве Санкт-Петербурга [Электрон. ресурс]. – Введен 2011-10-12 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 67. Определение коэффициента влагопроводности грунтов: методические указания к выполнению лабораторных работ по механике грунтов для студентов строительных специальностей / сост. А.К. Туякова. – Омск: СибАДИ, 2010. – 12 с.
 68. ГОСТ 5180-84. Методы лабораторного определения физических характеристик [Электрон. ресурс]. – Введен 1985-07-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 69. ГОСТ 22733-2002. Метод лабораторного определения максимальной плотности [Электрон. ресурс]. – Введен 2003-07-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.

70. Иванов Е.В. Результаты мониторинга опытного участка земляного полотна автодороги из золошлаковой смеси / Е.В. Иванов, В.В. Сиротюк, В.Р. Шевцов // Материалы IV Международного научно-практического семинара. Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование. 19-20 апреля 2012 г. / Издательский дом МЭИ. – Москва, 2012. – с. 85-88.
71. Иванов Е.В. Определение степени морозного пучения опытного участка земляного полотна из золошлаковой смеси / Е.В. Иванов, А.А. Папулов, В.В. Чусов // Межвузовский сборник научных трудов молодых ученых, аспирантов и студентов / СибАДИ. – Омск, 2012. Выпуск 9. – с. 86-91.
72. Лунев А.А. Результаты определения глубины промерзания и степени морозного пучения опытного участка земляного полотна из золошлаковой смеси в 2010-2013 гг / А.А. Лунев // Доклад на Международной научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ»: Инновационное лидерство строительной и транспортной отрасли глазами молодых ученых (03-07 февраля 2014) / СибАДИ. – Омск, 2014.
73. ВСН 46-83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа [Электрон. ресурс]. – Введен 1984-01-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
74. СНиП 23-01-99. Строительная климатология [Электрон. ресурс]. – Введен 2000-01-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
75. Ефименко С.В. К уточнению схемы дорожно-климатического районирования территорий на примере районов Западной Сибири / С.В. Ефименко, В.Н. Ефименко, А.О. Афиногенов // Вестник ТГАСУ / Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ). – 2014. Выпуск №1. – с. 125-133.
76. Ефименко В.Н. Уточнение дислокации границ дорожно-климатических зон на территории Западной Сибири с применением методов математического моделирования / В.Н. Ефименко, М.В. Бадина, С.В. Ефименко // Вестник ТГАСУ / Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ). – 2007. Выпуск №1. – с. 220-228.
77. ГОСТ 28622-90. Метод лабораторного определения степени пучинистости [Электрон. ресурс]. – Введен 1990-09-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
78. ГОСТ 28622-2012. Метод лабораторного определения степени пучинистости [Электрон. ресурс]. – Введен 2013-11-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
79. Выборочные лабораторные исследования свойств золошлаковых материалов. Отчет по НИР (2 этап) № гос.рег.01201169113. по г.к. №УД-47/46 от 22.04.2011 / ФГБОУ ВПО «СибАДИ»; рук. В.В. Сиротюк. – Омск, 2012. – 71 с.
80. Состав и свойства золы и шлаков ТЭС: справочное пособие / В. Г. Пантелеев, Э. А. Ларина, В. А. Мелентьев и др.; ред.: В. А. Мелентьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с.
81. Иванов Е.В. Экологические аспекты применения золошлаков в дорожном строительстве / Е.В. Иванов, А.А. Лунев // VIII международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России» (14-16 мая 2014 г.). – ФГБОУ ВПО «ВолгГАСУ», 2014.
82. Энергетическое топливо СССР: (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий газ). Справочник / Матвеева И.И., Новицкий Н.В., Вдовченко В.С. и др. – М.: Энергия, 1979 – 128 с.
83. Сиротюк В.В. Особенности свойств зол уноса экибастузских углей в связи с их применением в дорожном строительстве / Строительство и эксплуатация автомобильных дорог. Межвузовский сборник. – Новосибирск: Из-во НИСИ, 1977. – с.73-82.
84. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний (с Изменениями N 1, 2) [Электрон. ресурс]. – Введен 1989-07-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
85. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава [Электрон. ресурс]. – Введен 1980-07-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
86. Методические рекомендации по применению отвальных золошлаковых смесей (ЗШС) тепловых электростанций (ТЭС) ОАО «ИРКУТСКЭНЕРГО» для сооружения земляного полотна автомобильных дорог / СибАДИ. – Омск, 2005.

87. Рекомендации по применению золошлаковых материалов ТЭЦ-10 «ИРКУТСКЭНЕРГО» при проектировании и строительстве земляного полотна автомобильных и железных дорог / СибАДИ. – Омск, 2006.
88. Иванов Е.В. Физико-механические характеристики золошлаковой смеси Омских ТЭЦ / Е.В. Иванов // Материалы 63-ой научно-технической конференции ГОУ «СибАДИ» / СибАДИ. – Омск, 2009. Книга 1. – с. 103-107.
89. Иванов Е.В. Исследование свойств золошлаковых отходов омских ТЭЦ для применения их в дорожном строительстве / Е.В. Иванов // Вестник МАНЭБ / Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ). – СПб., 2011. Том 17 №2. – с. 66-74.
90. Афиногенов О.П. Строительные свойства золошлаковых отходов Новокемеровской ТЭЦ и предложения по использованию их в дорожном хозяйстве Кемеровской области / О.П. Афиногенов, А.А. Николаев // Техника и технологии дорожного строительства № 1 (21) / ООО «Кузбасский центр дорожных исследований» – Кемерово, 2011. – с 21-31.
91. Афиногенов О.П. Использование золошлаковых отходов Беловской ГРЭС в дорожном хозяйстве Кемеровской области / О.П. Афиногенов, А.А. Николаев // Техника и технологии дорожного строительства № 1 (19) / ООО «Кузбасский центр дорожных исследований» – Кемерово, 2010.
92. ГОСТ 310.2-76. Цементы. Методы определения тонкости помола (с Изменением N 1) [Электрон. ресурс]. – Введен 1978-01-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
93. Большая Энциклопедия Нефти Газа. – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru> (10.02.2014).
94. ГОСТ 23401-90 (СТ СЭВ 6746-89). Порошки металлические. Катализаторы и носители. Определение удельной поверхности [Электрон. ресурс]. – Введен 1992-01-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
95. Иванов Н.А. Легкие бетоны на основе зол электростанций / Н.А. Иванов – М.: Стройиздат, 1972. – 126 с.
96. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости [Электрон. ресурс]. – Введен 2012-01-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
97. Сертификат № 34269 об утверждении типа средства измерений. Действителен до 01 января 2014 г. Выдан: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – 30.12.2008 – Режим доступа: <http://www.interpribor.ru/mit10.php> (25.05.2014).
98. ГОСТ 30256-94. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом [Электрон. ресурс]. – Введен 1996-01-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
99. Шестаков В. Н. Теплофизические основы технологии строительства автомобильных дорог в зимнее время: учеб. пособие (Спецкурс) / В. Н. Шестаков / СибАДИ. – Омск: ОмПИ, 1988. – 88 с.
100. ГОСТ 30416-2012. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения [Электрон. ресурс]. – Введен 2013-07-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
101. Овчинников А.М. Общая гидрогеология / А.М. Овчинников – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1955. — 385 с.
102. Горная энциклопедия. Влагоемкость – Режим доступа: <http://www.mining-enc.ru/v/vlagoemkost/> (25.06.2013).
103. ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений [Электрон. ресурс]. – Введен 1990-06-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
104. РСН 51-84. Инженерные изыскания для строительства. Производство лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов [Электрон. ресурс]. – Введен 1985-01-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013
105. Ефименко В.Н. К дискуссии о методах оценки морозоустойчивости дорожных одежд / В.Н. Ефименко, В.Н. Шестаков // Наука и техника в дорожной отрасли / Издательство «Дороги» – 2003. – № 3 – с. 39-40.

106. ГОСТ 23278. Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости [Электрон. ресурс]. – Введен 1979-07-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
107. ГОСТ 25584-90. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации (с Изменением N 1) [Электрон. ресурс]. – Введен 1990-09-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
108. Леонович И. И. Глубина промерзания грунтов – важнейший фактор водно-теплового режима земляного полотна / И. И. Леонович, Н. П. Вырко // Строительная наука и техника – Минск, 2011. Выпуск №5 (38).
109. Невзоров А.Л. Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах / А.Л. Невзоров. -М.: Изд-во АСВ, 2000. – 151 с.
110. Хархута Н.Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Н.Я.Хархута, Ю.М.Васильев. - М.: Транспорт, 1975. – 285 с.
111. Иванов Е.В. О методике оценки морозного пучения грунтов / Е.В. Иванов, А.Б. Самойленко // Вестник ТГАСУ / Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ). – 2010. Выпуск №3. – с. 234-238.
112. Термопреобразователи сопротивления платиновые ТСП 9307 – Режим доступа: http://www.omsketalon.ru/PDF_production/iii/ts_9307.pdf (25.06.2013).
113. ГОСТ Р 8.585-2001. ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования [Электрон. ресурс]. – Введен 1990-09-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
114. Измеритель температуры портативный цифровой ИТПЦ по ТУ 4211-024-02566540-2006 – Режим доступа: http://www.omsketalon.ru/PDF_production/iv/itpc.pdf (25.06.2013).
115. Цифровой датчик температуры многозонный МЦДТ 0922 по МКСН.405226.001 ТУ – Режим доступа: http://www.omsketalon.ru/?action=mcddt_0922& (25.06.2013).
116. Контроллер цифровых датчиков портативный ПКЦД-1/16 по МКСН.405544.006 ТУ – Режим доступа: http://www.omsketalon.ru/?action=pkcd_1_16& (25.06.2013).
117. Шкадова А.К. Температурный режим почв на территории СССР / А.К. Шкадова. – Л.: Финансы, 1979. – 240 с.
118. Шульгин А.М. Климат почвы и его регулирование / А.М. Шульгин. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1967. – 302 с.
119. Свидетельство о поверке № 01108. Оптический нивелир CST/Berger SAL32ND, заводской номер M286887 // УОМЗ. – Екатеринбург, 2010.
120. Костерин Э.В. Методические указания к лабораторной работе «Определения штамповыми испытаниями модуля деформации песчаного основания и распределения в нем напряжений» / Э.В. Костерин // СибАДИ. – Омск, 1993. – 12 с.
121. ОДН 218.1.052-2002. Оценка прочности нежестких дорожных одежд [Электрон. ресурс]. – Введен 2002-11-19 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
122. ТУ 4822-084-00858763-06. Установка динамического нагружения ДИНА-3М. Технические условия [Электрон. ресурс]. – Государственный реестр средств измерений. – Режим доступа: <http://reestr.si.ru/reestr/18297-Ustanovki-dinamicheskogo-nagruzheniya-DINA-3M.html> (25.06.2013).
123. Филимендигов В. П. Оценки прочности нежестких дорожных одежд установкой динамического нагружения / В. П. Филимендигов // Актуальные вопросы строительства и эксплуатации автомобильных дорог в условиях Сибири / СибАДИ. – Омск, 1983. – с. 77-81.
124. СТ СЭВ 5497-86. Дороги автомобильные международные. Определение несущей способности дорожных конструкций и их конструктивных слоев установкой динамического нагружения (УДН) [Электрон. ресурс]. – Введен 1987-07-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013
125. Шнайдер В.А. Новая классификация типов укрепления откосов земляного полотна / В.А. Шнайдер, В.В. Сиротюк / Вестник СибАДИ : Научный рецензируемый журнал. – Омск: СибАДИ. – № 3 (21). – 2011. – 24-28 с.
126. Насымбаева Э.С. Образование травяного покрова на откосах земляного полотна / Э.С. Насымбаева, А.А. Стебенюк. Науч. рук.: В.А. Шнайдер // VIII международная научно-

- техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России» (14-16 мая 2014 г.). – ФГБОУ ВПО «ВолгГАСУ», 2014.
127. Лунев А.А. Некоторые экологические аспекты использования золошлаковых материалов в дорожном строительстве / Е.А. Беззубова, А.А. Лунев // Доклад на Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов «Казанские научные чтения студентов и аспирантов – 2013» имени В.Г. Тимирязева г. Казань, 20 декабря 2013 г.
 128. ГОСТ 30772-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения [Электрон. ресурс]. – Введен 2002-07-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 129. Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ «Об отходах производства» (с изменениями на 25 ноября 2013 года) [Электрон. ресурс]. – Введен 1998-06-30 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 130. Приказ Минприроды России (Министерства природных ресурсов и экологии РФ) от 15.06.2001 № 511 [Электрон. ресурс]. – Введен 2001-06-15 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 131. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» [Электрон. ресурс]. – Введен 2009-09-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 132. СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010)» [Электрон. ресурс]. – Введен 2010-09-17 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013
 133. СТО 82982783.001-2010. Материалы золошлаковые омских ТЭЦ для дорожного строительства. Технические условия. Утв. Приказом Открытого акционерного общества Омского филиала «Территориальная генерирующая компания №11» от 23 мая 2011 г. № 141: Введен в действие 23.05.2011. – Омск.: Омский центр стандартизации и метрологии, 2011. – 70 с.
 134. СТО 82982783.002-2011. Материалы золошлаковые ТЭС ОАО «ТГК-11» для вертикальной планировки территорий, исправления неудобий, обратных засыпок и рекультивации карьеров. Технические условия. Утв. Приказом Открытого акционерного общества Омского филиала «Территориальная генерирующая компания №11» в 2011 г.: Введен в действие 2011. – Омск.: Омский центр стандартизации и метрологии, 2011. – 32 с.
 135. Приказ Минприроды России (Министерства природных ресурсов и экологии РФ) от 30.09.2011 № 792 «Об утверждении порядка введения государственного кадастра отходов» [Электрон. ресурс]. – Введен 2014-08-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 136. Руководство по сооружению земляного полотна автомобильных дорог / Союздорнии; ред. К. М. Ивановская. – М.: Транспорт, 1982. – 160 с.
 137. Золошлаковые материалы и золоотвалы / В. Г. Пантелеев и др.; под ред. В. А. Мелентьева. – М.: Энергия, 1978. – 288 с.
 138. Берлева А.В. Применение технологии гидронамыва золошлаковых смесей при строительстве участка северного обхода г. Омска / А.В. Берлева, Е.В. Иванов // Межвузовский сборник научных трудов молодых ученых, аспирантов и студентов / СиБАДИ. – Омск, 2012. Выпуск 9. – с. 23-28.
 139. МДС 81-35.2004 Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации (с Изменениями) [Электрон. ресурс]. – Введен 2004-03-09 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 140. МДС 81-25.2001 Методические указания по определению величины сметной прибыли в строительстве [Электрон. ресурс]. – Введен 2001-03-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.
 141. МДС 81-33.2004 Методические указания по определению величины накладных расходов в строительстве (с Изменениями и Дополнениями) [Электрон. ресурс]. – Введен 2004-01-12 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – СПб., 2013.

Химический состав зол-уноса ТЭС от сжигания различных углей

Таблица А.1 – Диапазоны изменения содержания оксидов в золе-уноса

Зола-унос	Содержание элементов, %: в расчёте на оксиды									П.п.п.	Удельная поверхность, тыс.см ² /г:	
	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>	<i>SO₃</i>	<i>CaO_{св}</i>		эл. фильтр	циклон
Кузнецкие угли марки Т	46-55	22-39	5-17	2-5	0,2-2,4	0,2-1	0,1-0,7	0,2-1,6	1	0,2-1,3	1,5-5,2	1,3-2,4
Кузнецкие угли марок Г и Д	59-67	16-23	4,4-13	2,1-7,2	1,1-4,3	1,2-4,2	1,4-1,6	0,4-1,8	0,6	2,7-12,5	1,86-3,66	
Кузнецкие угли марки СС	57-60	16-25	6-13	3,5-5,2	1,3-2,7	0,2-1,5	1-1,8	0,8-1,6	1	2,2-6	4-4,5	
Донецкие угли марки АШ	35-56	12-28	9-18	1-5	0,2-3	2,5-5	0,6-2	0,2-3	1,5	8-22	3-5	
Донецкие угли марок ГСШ, Г, Д	45-58	20-32	7-18	2-6	0,4-2,5	1,5-4	0,5-1,5	0,4-1,5	2	0,5-10	2-4	
Подмосковные угли	46-55	22-39	5-17	2-5	0,2-2,4	0,2-1	0,1-0,7	0,2-1,6	1	0,2-1,3	1,53-4	0,88-24
Челябинские угли	49-60	21-27	6-20	2-4	1,5-3,5	0,7-2,5	0,7-1,1	0,3-1,2	1	0,2-3,5	1-3	
Воркутинский уголь	61-67	16-21	6,8-10	0,7-3,1	1,7-2,6	1,6-2,6	0,6-1,6	0,3-1,3	1	1,4-6,4	2,3-2,73	
Интинские угли	51-60	16-19	11-16	3,6-6	2,4-3,4	1,1-1,6	1,3-1,5	0,7-2,3	1,4	0,5-4,3	1,8-2,6	
Экибастузские угли	54-65	21-30	2-13	0,3-3,6	0,1-1,5	0,3-1,4	0,1-0,6	0,1-2	1	0,3-5	2,63-5,44	
Нерюнгринский уголь	50-60	20-30	6-18	2-11	1-3,5	0,2-1,3	0,2-0,6	0,5-1,2	1	10-20	2,5-6,5	
Ирша-бородинский уголь	27-60	1,6-12,2	6-15,7	18-40	2,3-9,3	0,1-2,6	0,2-0,9	0,3-5	0,7-13	2	3-4,9	0,77-2,1
Назаровский уголь	21-35	6-13	12-17	28-46	2,7-6	0,2-0,6	0,1-0,6	2,3-9	3,2-13	2,5	1,86-4,1	0,95-1,26
Березовский уголь	13-45	6-16	5-13	34-60	5-10	0,2-1	0,1-1,1	1-18	5-24	1-12	1,74-4	
Прибалтийские сланцы	19-34	3-9,3	3,5-5,3	32-59	2-6,4	1-6	0,3-4	10	5-27	3	2-4	

Примечания:

1. В таблице указаны диапазоны изменения содержания оксидов.
2. *CaO_{св}* – содержание оксида кальция, находящегося в свободном, несвязанном состоянии.
3. П.п.п. – потеря массы при прокаливании (содержание горючие веществ).

Результаты экспериментальных исследований золошлаковых смесей ТЭС Западной Сибири

Таблица Б.1 – Определение модуля деформации ЗПС при оптимальной влажности

Номер пробы	Глубина отбора H , м	Оптимальная влажность W_{opt} , % по массе	Модуль деформации E_{def} , МПа, при вертикальном давлении		
			0,0981 МПа	0,1962 МПа	0,2943 МПа
ТЭЦ-4 г. Омска					
1	1,0	28	8,00	36,86	27,65
2	2,0	30	7,80	15,93	55,29
3	1,0	30	12,67	13,87	27,65
4	2,0	30	11,70	17,52	26,44
5	0,5	30	23,39	33,44	50,69
6	1,0	30	14,14	23,91	26,44
7	2,0	30	14,14	16,60	20,97
ТЭЦ-2 г. Омска					
1	3,0	30	9,81	12,36	16,90
2	4,0	26	10,86	19,18	21,72
3	1,0	28	10,67	15,64	20,97
4	2,0	28	11,48	16,54	26,44
5	1,0	28	11,93	16,10	23,39
6	2,0	28	11,48	16,54	25,34
7	3,0	28	13,22	25,96	22,53
8	4,0	28	11,93	28,37	22,53
ГРЭС-2 г. Томска					
1	–	38	14,31	23,45	33,79
2	–	38	16,22	23,96	31,19
3	–	40	14,66	23,00	35,78
4	–	42	15,40	22,17	32,88
5	–	42	16,66	26,64	27,03
Беловская ГРЭС					
1	–	14	5,65	10,85	12,14
2	–	14	4,86	8,35	11,56
3	–	12	5,92	8,24	11,04
Барабинская ГРЭС					
1	0,1	32	1,60 / 3,99	2,69 / 8,88	3,50 / 14,31
2	1,5	32	2,09 / 3,99	2,81 / 7,34	2,42 / 13,21
3	3,0	34	2,96 / 3,30	3,57 / 6,47	1,65 / 9,54
4	0,1	30	2,42 / 3,18	3,63 / 6,22	4,09 / 11,45
5	0,1	26	2,86 / 2,86	3,29 / 8,82	1,97 / 7,80
Березовская ГРЭС					
1	1,0-1,5	40	2,49 / 3,90	3,04 / 33,73	3,99 / 19,08
2	2,0-2,5	42	2,64 / 4,52	3,10 / 24,15	4,19 / 10,10
3	4,0-4,5	42	2,56 / 5,20	3,04 / 28,23	4,09 / 11,44
4	1,0-1,5	46	2,96 / 5,05	2,75 / 24,19	3,73 / 24,53
5	2,0-2,5	48	2,52 / 4,09	2,88 / 18,75	3,43 / 10,73
6	4,0-4,5	46	2,45 / 5,54	2,88 / 15,41	2,38 / 19,07

Примечание – перед чертой даны значения модуля деформации при естественной (природной) влажности, после черты при оптимальной влажности

Таблица Б.2 – Определение сдвиговых характеристик ЗШС при оптимальной влажности

Номер пробы	Глубина отбора H , м	Сопротивление сдвигу τ , МПа при нормальном давлении			Угол внутреннего трения φ , град	Удельное сцепление C , МПа
		0,1 МПа	0,2 МПа	0,3 МПа		
ТЭЦ-4 г. Омска						
1	1,0	0,0772	0,1569	0,2305	37,80	0,002
2	2,0	0,0784	0,1594	0,2330	38,02	0,002
3	1,0	0,0809	0,1545	0,2330	37,58	0,004
4	2,0	0,0809	0,1570	0,2379	38,46	0,002
5	0,5	0,0809	0,1594	0,2354	38,02	0,004
6	1,0	0,0834	0,1643	0,2440	39,11	0,003
7	2,0	0,0858	0,1741	0,2538	40,36	0,003
ТЭЦ-2 г. Омска						
1	3,0	0,0711	0,1447	0,2134	35,76	0,001
2	4,0	0,0760	0,1521	0,2232	36,68	0,003
3	1,0	0,0773	0,1521	0,2244	36,68	0,004
4	2,0	0,0772	0,1545	0,2256	36,91	0,004
5	1,0	0,0736	0,1521	0,2207	36,68	0,002
6	2,0	0,0772	0,1570	0,2305	37,80	0,002
7	3,0	0,0809	0,1594	0,2404	38,89	0,001
8	4,0	0,0785	0,1521	0,2281	37,13	0,003
ГРЭС-2 г. Томска						
1	–	0,0785	0,1521	0,2281	37,13	0,003
2	–	0,0736	0,1668	0,2256	37,58	0,003
3	–	0,0760	0,1766	0,2354	38,89	0,003
4	–	0,0711	0,1447	0,2085	34,81	0,004
5	–	0,0687	0,1496	0,2060	34,81	0,004
Беловская ГРЭС						
1	–	0,07112	0,20601	0,24280	40,97	0,002
2	–	0,08829	0,19375	0,27223	42,93	0,001
3	–	0,08829	0,20601	0,27713	43,68	0,002
Барабинская ГРЭС						
1	0,1	0,10301	0,16922	0,23054	33	0,040
2	1,5	0,10791	0,17903	0,23544	33	0,047
3	3,0	0,09810	0,17168	0,21582	32	0,044
4	0,1	0,10301	0,17658	0,22073	31	0,049
5	0,1	0,09810	0,17658	0,22563	33	0,039
Березовская ГРЭС						
1	1,0-1,5	0,181	0,245	0,309	33	0,118
2	2,0-2,5	0,184	0,245	0,319	34	0,114
3	4,0-4,5	0,174	0,240	0,324	37	0,096
4	1,0-1,5	0,181	0,265	0,338	38	0,105
5	2,0-2,5	0,167	0,233	0,314	37	0,091
6	4,0-4,5	0,167	0,231	0,324	37	0,090

Таблица Б.3 – Определение характеристик влажности ЗШС

Номер пробы	Глубина отбора Н, м	Влажность, % по массе				Влагоемкость, % по массе	
		Фактическая W_{ϕ}	Гигроscopicкая W_2	Максимальная гигроscopicкая $W_{2, \max}$	Оптимальная $W_{\text{опт}}$, % по массе	Максимальная молекулярная $W_{\text{м.м.в}}$	Полная $W_{\text{п.в}}$
ТЭЦ-4 г. Омска							
1	1,0	42	1,98	2,08	28	22	64
2	2,0	42	1,95	2,12	30	17	81
3	1,0	37	1,91	2,13	30	19	62
4	2,0	61	1,82	2,11	30	21	67
5	0,5	–	2,01	2,16	30	22	61
6	1,0	–	2,04	2,24	30	18	75
7	2,0	–	1,93	2,13	30	21	63
ТЭЦ-2 г. Омска							
1	3,0	92	1,98	2,07	30	30	88
2	4,0	92	1,67	1,84	26	28	73
3	1,0	76	1,93	2,38	28	26	74
4	2,0	82	1,87	2,04	28	31	72
5	1,0	85	1,87	3,09	28	27	73
6	2,0	69	1,9	2,07	28	25	72
7	3,0	91	1,77	2,80	28	24	72
8	4,0	91	1,77	2,40	28	23	72
ГРЭС-2 г. Томска							
1	–	–	1,00	2,05	38	18	46
2	–	–	1,10	2,08	38	19	46
3	–	–	1,08	2,10	40	20	46
4	–	–	1,20	2,15	42	21	48
5	–	–	1,26	2,30	42	20	47
Беловская ГРЭС							
1	–	–	2,0	29	14	–	51
2	–	–	2,0	24	14	–	54
3	–	–	1,0	14	12	–	59
Барабинская ГРЭС							
1	0,1	33	–	–	32	21	43
2	1,5	42	–	–	32	22	39
3	3,0	35	–	–	34	23	43
4	0,1	31	–	–	30	22	36
5	0,1	48	–	–	26	24	53
Березовская ГРЭС							
1	1,0-1,5	147	–	–	40	28	101
2	2,0-2,5	113	–	–	42	26	59
3	4,0-4,5	133	–	–	42	24	59
4	1,0-1,5	122	–	–	50	26	73
5	2,0-2,5	111	–	–	50	24	77
6	4,0-4,5	130	–	–	50	27	63

Результаты испытаний золошлаковых смесей на морозное пучение

Таблица В.1 – Степень морозного пучения ЗШС Беловской ГРЭС

№ пробы	Среднее значение относительного деформации пучения ε_f , %	Степень пучинистости	
		по СП 34.13330.2012	по ГОСТ 25100-2011 и ГОСТ 28622-2012
1	1,3	Слабопучинистый	Слабопучинистый
2	1,6		
3	2,3		
4	1,5		
5	2,0		
6	5,8	Пучинистый	Среднепучинистый
7	1,6	Слабопучинистый	Слабопучинистый
Среднее значение	2,3	Слабопучинистый	Слабопучинистый

Таблица В.2 – Степень морозного пучения ЗШС Новокемеровской ТЭЦ

№ пробы	Среднее значение относительного деформации пучения ε_f , %	Степень пучинистости	
		по СП 34.13330.2012	по ГОСТ 25100-2011 и ГОСТ 28622-2012
1	7,3	Сильнопучинистый	Сильнопучинистый и чрезмерно пучинистый
2	9,7		
3	10,0		
4	1,1	Слабопучинистый	Слабопучинистый
5	6,9	Пучинистый	Среднепучинистый
6	1,7	Слабопучинистый	Слабопучинистый
Среднее значение	6,11	Пучинистый	Среднепучинистый

**Технико-экономическое обоснование использования золошлаковой смеси
в верхней части земляного полотна автомобильной дороги НОВ-2
в сторону НОВ-1 на территории золоотвала СП ТЭЦ-5**

Исходные данные по расчету:

1. Местоположение объекта проектирования: Омская область, Омский район, Богословское сельское поселение, в районе села Ульяновка, на расстоянии 12 км от СП ТЭЦ-5.
2. Материалы для сопоставления: Золошлаковая смесь; грунт карьера
3. Дальность транспортировки: ЗШС - до 5 км; грунт - до 3 км
4. Номинальный объем для проведения ТЭО: 1000м3 (ЗШС и грунт)

№	Наименование		Рабочий слой земляного полотна		
			из ЗШС (с 4% цемента)	из ЗШС (без 4% цемента)	из суглинка
1	Стоимость отсыпки земляного полотна (условный объем V= 1000 куб.м) в текущих ценах 2 кв.2012г. с НДС, тыс.руб	Локальный сметный расчет №1, №2, №3	342,62	132,42	133,02
2	Экономия за счет платы за размещение 1000 куб.м ЗШС согласно данным Отдела экологического контроля ОАО ТГК №11 (Служебная записка Исх.31-41/13408 от 08.08.2012г.). Плотность ЗШС в естественном заложении 1,2т/м3 (пункт Д.7 СТО82982783.001-2010), тыс.руб	0,03006x1000x1,2	36,07	36,07	-
3	Экономия за счет отсутствия необходимости строительства дополнительной секции золоотвала объемом 1000 куб.м, тыс.руб	по данным СМР полусекции 4Б Золоотвала СП ТЭЦ-5 (216,65руб./м3)	216,65	216,65	-
4	Экономия за счет отсутствия необходимости подготовки землеустроительной документации и отвода (выкупа) земель для размещения карьера грунта, тыс.руб	по данным ЗАО "Сибирский центр ценообразования в строительстве, промышленности и энергетики".	6,62	6,62	-
5	ИТОГО	п.1- п.2- п.3-п.4	83,28	-126,92	133,02

Составил



Сапрыгин Е.В.