ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КРИОСФЕРЫ ЗЕМЛИ
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Коротков Евгений Анатольевич

ВЛИЯНИЕ МОРОЗОЗАЩИТНОГО СЛОЯ ИЗ ГРАНУЛИРОВАННОЙ ПЕНОСТЕКЛОКЕРАМИКИ НА МОРОЗНОЕ ПУЧЕНИЕ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Специальность: 25.00.08 – инженерная геология,
мерзлотоведение и грунтоведение

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Иванов Константин Сергеевич

Научный консультант:
доктор геолого-минералогических наук
Колунин Владимир Сергеевич

Тюмень - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР 13
1.1 Морозное пучение грунтов земляного полотна 13
1.2 Современные подходы к устройству морозозащитных слоев дорожных одежд автомобильных дорог в Российской Федерации 18
1.3 Дорожно-строительные материалы для устройства морозозащитных слоёв 21
1.4 Зарубежный опыт устройства морозозащитных слоев в конструкциях автомобильных дорог 27
1.5 Гранулированная пеностеклокерамика 45
Выводы по первой главе и задачи исследования 57
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 59
2.1 Разработка экспериментального стенда 59
2.2 Используемые материалы и оборудование 65
2.3 Контрольно-измерительная аппаратура 82
2.4 Проведение экспериментальных исследований 92
Выводы по второй главе 101
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 103
3.1 Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований 103
3.2 Сопоставление экспериментальных данных с результатами математического моделирования 114
Выводы по третьей главе 119
ГЛАВА 4 ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ 121
4.1 Опытно-экспериментальный участок автомобильной дороги 121
4.2 Теплотехнический расчет дорожных конструкций для опытно-экспериментального участка 125
4.3 Рекомендации по технологии строительства 131

4.4 Рекомендации по использованию гранулированной пеностеклокерамики при строительстве автомобильных дорог в районах распространения многолетнемерзлых грунтов 137
Выводы по четвертой главе 149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 154
ПРИЛОЖЕНИЯ 168
Приложение А. Дорожная конструкция: пат. 154137 РФ: МПК E01C3/06 / В.П. Мельников, Е.А Коротков, К.С. Иванов 168
Приложение Б. СТО № 90903792.001 – 2015. «Материал «ДиатомИК» теплоизоляционный гранулированный. Технические условия» 170
Приложение В. Письмо о согласовании в ФДА «РОСАВТОДОР» СТО № 90903792.001 – 2015. «Материал «ДиатомИК» теплоизоляционный гранулированный. Технические условия» 171
Приложение Г. Технические условия (ТУ) по применению гранулированного теплоизоляционного материала «ДиатомИК» для стабилизации земляного полотна 172
Приложение Д. Акты внедрения результатов исследования 173

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Результаты многолетних исследований для территории средней и южной частей Западной Сибири, показали, что изменение транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильных дорог во многом определяется динамикой природно-климатических условий, особенно в районах с избыточным увлажнением и глубоким сезонным промерзанием грунтов [37].

Глубокое сезонное промерзание, широкое распространение пучинистых грунтов и повышенная увлажненность территории являются основными условиями появления большого количества деформаций и разрушений дорожных конструкций после каждого цикла промерзания/оттаивания грунта земляного полотна. Данный факт значительно снижает качество и долговечность работы автомобильных дорог. Подобное сочетание природных условий предполагает организацию противопучинистых мероприятий для проектируемых и существующих дорожных конструкций.

Разрушения дорожных конструкций (снижение ровности дорожного покрытия и разуплотнение насыпей) являются характерными проблемами дорожного строительства для территории I, II, III, IV дорожно-климатических зон (всех регионов с сезонным промерзанием грунтов). Повреждения транспортных сооружений, обусловленные морозным пучением, являются достаточно сложными для проведения ремонтных работ и предполагают увеличение затрат на содержание дорог [91]. Так, предотвращение разрушений дорожных конструкций в результате морозного пучения грунтов является актуальным для 90% площади Российской Федерации (РФ).

Интенсивность негативных последствий глубокого промерзания на объектах транспортной инфраструктуры напрямую зависит от устойчивости многослойных конструкций и грунтов основания к циклам промерзания/оттаивания. При промерзании происходят существенные изменения в матрице грунт-вода-воздух.

Вода в порах скелета грунта замерзает, провоцируя морозное пучение грунтов земляного полотна.

В течение последних десятилетий различные технические решения использовались для снижения последствий морозного пучения. Самым простым и наиболее распространенным методом борьбы с морозным пучением является замена местного грунта грунтом менее подверженным морозному пучению. Данное решение не всегда оправданно с технической или экономической точки зрения. Местные грунты, используемые при строительстве земляного полотна автомобильных дорог, являются типичными представителями лёссовидных отложений, широко распространенных в большинстве регионов РФ. Например, мощность лёссовидных пород юга Тюменской области составляет порядка 3-8 м (для Ишимской равнины), породы уплотнены, по гранулометрическому составу преобладают средние и тяжелые суглинки, реже глины. В гранулометрическом составе отмечается, типичное для лессовидных отложений, достаточно высокое содержание пылевидной фракции [2, 50]. Соответственно, использование местных пучинистых грунтов в качестве земляного полотна автомобильных дорог предполагает устройство дополнительных морозозащитных слоев дорожных одежд.

Современные подходы к проектированию дополнительных морозозащитных слоев дорожных одежд в условиях сезонного промерзания/оттаивания далеко не всегда демонстрируют необходимую эффективность борьбы с морозным пучением. Наиболее распространенным инженерным решением в дорожном строительстве является устройство морозозащитных слоев из крупнозернистого песка [69, 91]. Ограниченность сырьевой базы качественных строительных песков в большинстве регионов РФ предопределяет важность поиска альтернативных технических решений, позволяющих использовать местные грунты для устройства земляного полотна автомобильных дорог, при сохранении высоких эксплуатационных характеристик дорожных конструкций.

Широкое распространение для устройства морозозащитных слоев получили различные теплоизоляционные материалы, способные снизить глубину промерзания, тем самым минимизировать процессы морозного пучения.

Существенное улучшение состояния транспортной инфраструктуры предполагает совершенствование норм проектирования автомобильных дорог и, конечно, внедрение новых материалов для устройства дополнительных морозозащитных слоев в основании дорожной одежды, которые позволили бы повысить долговечность и безаварийность дорожных конструкций. Одним из таких материалов может стать гранулированная пеностеклокерамика (ГПСК), получаемая на основе кремнистого сырья [44, 89, 122]. Материал обладает достаточным набором характеристик для использования в различных видах транспортного строительства.

Применение местных материалов в транспортном строительстве является залогом стабильного экономического развития любого региона РФ. Производство ГПСК ориентировано на местную сырьевую базу, и способно повысить конкурентоспособность строительного сектора, снизить необходимость импорта строительных материалов из других регионов.

Целью настоящей диссертационной работы является исследование влияния морозозащитного слоя из гранулированной пеностеклокерамики на температурный режим и морозное пучение грунтов земляного полотна при моделировании инженерных сооружений, работающих в режиме сезонного промерзания.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели последовательно решались следующие задачи:

1. Выполнить анализ и систематизацию существующих методов устройства морозозащитных слоев в конструкциях автомобильных дорог на основе отечественного и зарубежного опыта инженеров-дорожников, геологов, геокриологов, теплофизиков, мерзлотоведов.

2. Разработать экспериментальный стенд, необходимый для моделирования и исследования процессов промерзания в конструкциях инженерных сооружений.

3. На разработанном экспериментальном стенде провести исследования температурного, влажностного и деформационного режима грунтов земляного полотна инженерных сооружений, работающих в режиме промерзания, с морозозащитным слоем из ГПСК в сравнении с другими теплоизоляционными материалами и без них.

4. На основании проведенных исследований обосновать конструктивные решения и разработать практические рекомендации по проектированию и модернизации автомобильных дорог на пучинистых участках с использованием ГПСК в качестве морозозащитного слоя.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

1. Разработан универсальный экспериментальный стенд, позволяющий исследовать температурный, влажностный и деформационный режим грунтов земляного полотна инженерных сооружений, функционирующих в режиме сезонного промерзания.

2. С использованием разработанного экспериментального стенда установлены закономерности влияния морозозащитного слоя из ГПСК на температурный, влажностный и деформационный режим грунтов земляного полотна при моделировании инженерных сооружений, функционирующих в режиме сезонного промерзания.

3. Установлен характер влияния морозозащитного слоя из ГПСК на процессы морозного пучения грунтов земляного полотна моделей в сравнении пенополистирольными плитами и вариантом без устройства морозозащитного слоя. Получены экспериментальные доказательства равносильного воздействия морозозащитных слоёв из ГПСК и пенополистирольных плит на динамику морозного пучения и водно-тепловой режим грунтов моделей при толщине слоёв 60 и 30 мм соответственно.

4. Разработаны новые конструктивно-технологические решения строительства автомобильных дорог с использованием ГПСК в качестве морозозащитного слоя дорожной одежды в районах с сезонным промерзанием/оттаиванием. Новизна предложенных дорожных конструкций подтверждается патентом на полезную модель – дорожная конструкция: пат. 154137 РФ: МПК E01C3/06 / В.П. Мельников, Е.А Коротков, К.С. Иванов – опубл: 20.08.2015. – Бюл. №21. – 4 с. (приложение А).

Практическая значимость. Разработанный экспериментальный стенд позволяет воспроизвести условия промерзания дорожной конструкции и сравнить эффективность морозозащитных слоев из разных теплоизоляционных материалов в конструкциях инженерных сооружений, работающих при различных температурных и грунтовых условиях. Полученные данные необходимо использовать при принятии проектных решений в пользу тех или иных конструкций.

Материалы исследований использованы при разработке серии нормативно-технической документации:

1. Стандарт организации (СТО) 90903792.001 – 2015. «Материал «ДиатомИК» теплоизоляционный гранулированный. Технические условия» (приложение Б). Разработан ФАУ «РОСДОРНИИ». СТО 90903792.001 – 2015 согласован Федеральным дорожным агентством «РОСАВТОДОР» Министерства транспорта РФ письмом № 01-29/9134 от 30.03.2016 года в части, касающейся автомобильных дорог и сооружений на них (приложение В).

2. Технические условия (ТУ) по применению гранулированного теплоизоляционного материала «ДиатомИК» для стабилизации земляного полотна (приложение Г). Разработан АО «ВНИИЖТ» и согласован в Управлении пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры – филиал ОАО «РЖД».

3. По проведенным исследованиям были сделаны предложения по разработке нормативного документа «Свод правил (СП) по проектированию и строительству автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты» взамен ВСН 84-89 «Изыскание, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах

распространения вечной мерзлоты». Предложения были рассмотрены ЗАО «ПРОМТРАНСНИИПРОЕКТ» и внесены в новую редакцию СП (приложение Д).

По результатам исследования были даны рекомендации по ремонту участка автомобильной дороги с устройством морозозащитного слоя из ГПСК «Бескозобово-Евсино-Ламенский» км 47+540 – км 47+690 (Голышмановский район, Тюменская область).

Полученные в ходе исследования результаты использованы при выполнении дипломных проектов по специальности 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение».

Методы исследования. Исследования основаны на теории тепломассопереноса в дисперсных однородных средах и методах расчета водно-теплового режима земляного полотна инженерных сооружений.

В процессе выполнения диссертационной работы использованы методы исследования, включающие: литературный и патентный поиск; анализ и систематизация существующих методов устройства морозозащитных слоев в конструкциях автомобильных дорог на основе отечественного и зарубежного опыта инженеров-дорожников, инженеров-геологов, геокриологов, теплофизиков, мерзлотоведов; выполнены теоретические исследования и теплофизические эксперименты с использованием методов математического моделирования и математической статистики.

Для обработки полученных данных применялись прикладные программные пакеты MS Excel, MicroStation V8 XM Edition, Corel Draw X7, Golden Software Grapher, QFrost.

Исследования основных физико-технических характеристик ГПСК проведены в аккредитованной лаборатории бетонных и каменных материалов ФАУ «РОСДОРНИИ» (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.22), согласно действующим нормативным документам РФ: ГОСТ 25137-82*, ГОСТ 32496-2013, ГОСТ 9758-2012, ГОСТ 8269.0-97, ГОСТ 30108-94 [20, 23, 24, 26, 29].

Достоверность научных положений и выводов подтверждается:

1. Методологической базой исследований, основанной на фундаментальных теоретических положениях механики грунтов, инженерной геологии и теплофизики.

2. Соблюдением основных принципов физического и математического моделирования.

3. Достаточным объемом экспериментальных данных, полученных с помощью современных апробированных и оттарированных контрольно-измерительных комплексов, первичных преобразователей и поверенных приборов.

4. Применением методов математической статистики по обработке полученных данных на всех этапах исследования с использованием современных программных комплексов.

5. Сопоставлением полученных результатов физического моделирования с результатами математического моделирования, а также с данными исследований других авторов.

Личный вклад автора состоит в анализе существующей научной и нормативно-технической литературы; подготовке экспериментальной базы для проведения исследований; изготовлении экспериментального стенда, включая подбор современного оборудования, конструирование схемы подключения комплекса измерительных приборов, изготовление температурных преобразователей (термопар), градуировку и калибровку измерительного оборудования, сборку, настройку и пуско-наладку всей системы; проведении и получении результатов экспериментальных исследований, их анализе и обработке; участии при разработке нормативных документов по результатам исследования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика проведения исследований и разработанный экспериментальный стенд для физического моделирования и исследования процессов промерзания в конструкции инженерного сооружения.

2. Результаты экспериментальных исследований температурного, влажностного и деформационного режима грунтов земляного полотна на опытных

моделях инженерных сооружений с морозозащитным слоем из разных теплоизоляционных материалов, работающих в режиме сезонного промерзания.

3. Инженерные рекомендации по применению ГПСК в качестве морозозащитного слоя в конструкциях автомобильных дорог, работающих в условиях сезонного промерзания/оттаивания, для регулирования водно-теплового режима.

Апробация результатов. Результаты исследований докладывались и обсуждались: на научно-практических семинарах ИКЗ СО РАН; на всероссийском научно-практическом семинаре «Некрасовские чтения-2015: криогенные ресурсы и риски» (Тюмень, Институт криогенных ресурсов ТюмГНГУ, 6-7 февраля 2015 года); на XVII международной научно-практической конференция «Водные ресурсы и ландшафтно-усадебная урбанизация территорий России в XXI веке» (Тюмень, ТюмГАСУ, 20 марта 2015 года); на международной конференция «Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы» (Тюмень, ИКЗ СО РАН, 2-5 июля 2015 года); на VI международном инновационном форуме «НЕФТЬГАЗТЭК-2015» (Тюмень, 16-17 сентября 2015 года); на II международном симпозиуме по проблемам земляного полотна в холодных регионах – TranSoilCold-2015 (Новосибирск, СГУПС, 24-26 сентября 2015 года); на XIII международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» (Москва, МИИТ, 31 марта – 1 апреля 2016 года).

Список публикаций. По результатам исследований опубликовано 13 работ, в том числе 7 работ в изданиях, включённых в Перечень ВАК РФ, получен один патент на полезную модель № 154137 РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 167 страниц машинописного текста, 75 рисунков, 23 таблицы, список литературы из 129 наименований и 5 приложений.

Весь объем диссертационной работы выполнен в Институте криосферы Земли СО РАН.

Специальность, которой соответствует диссертация. Согласно сформулированной цели научной работы, ее научной новизне, установленной практической значимости, диссертация соответствует паспорту специальности 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение, пункту 3 «Напряженное состояние массивов пород (грунтовых толщ), оценка их прочности, устойчивости и деформируемости при природных и техногенных нагрузках»; пункту 12 «Физическое, математическое, аналоговое и другое моделирование геологических, геокриологических и инженерно-геологических процессов, прогноз их развития во времени-пространстве, оценка и управление геологическими опасностями и геологическими рисками»; пункту 15 «Оценка и прогноз изменений инженерно-геологических и геокриологических условий месторождений полезных ископаемых, урбанизированных и сельских территорий, объектов промышленного, гражданского, энергетического и других видов строительства».

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю кандидату технических наук, старшему научному сотруднику ИКЗ СО РАН Иванову Константину Сергеевичу и научному консультанту доктору геолого-минералогических наук, главному научному сотруднику ИКЗ СО РАН Колунину Владимиру Сергеевичу за постановку научной проблемы, выработку методик, неоднократное обсуждение исследуемой тематики, помощь в выполнении экспериментальных исследований, анализ полученных результатов и формулировку выводов.

Особую признательность автор выражает академику РАН Мельникову Владимиру Павловичу, кандидату технических наук Русакову Николаю Линовичу и заведующему лаборатории тепломассообменных явлений ИКЗ СО РАН доктору геолого-минералогических наук Якову Борисовичу Горелику за отзывчивое отношение, поддержку и предоставление всех возможностей для выполнения диссертационной работы.

ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В РФ изучением морозоустойчивости дорожных конструкций занимались и занимаются В.Н. Ефименко, В.И. Рувинский, М.Б. Корсунский, П.Д. Россовский, Г.В. Волчанский, М.В. Бадина, А.М. Каменев, К.Х. Ильясов, В.О. Орлов, Ю.Д. Дубнов, Н.Д. Меренков, В.И. Федоров, А.И. Шеслер, В.П. Корюков, С.А. Кудрявцев, А.М. Бургонутдинов и многие другие. Результаты их исследований нашли свое отражение в работах [6, 34, 35, 36, 37, 47, 48, 49, 59, 60, 62, 70, 78, 80, 91, 95, 102].

За рубежом вопросам обеспечения морозоустойчивости дорожных конструкций уделено внимание таких авторов как M. Meyer, A. Emersleben, T.E. Frydenlund, R.O. Aabøe, E. Oiseth, I. Hoff, I. Horvli, E. Øiseth, K. Henry, L. Eriksson, J. Hägglund, L. Bakløkk, A-O. Håøya, G. Breedved, S. Moen, C. Engelsen, T. Auvinen, J. Pekkala, J. Forsman и др. [104, 105, 109, 110, 113, 115, 119, 120, 121, 124, 125].

Большой вклад в развитие исследований процессов промерзания/оттаивания грунтов оснований инженерных сооружений в сложных климатических условиях внесли А.В. Павлов, Н.А. Цытович, М.И. Сумгин, Л.Н. Хрусталев, Я.Б. Горелик, В.С. Колунин, В.Г. Чеверев, Н.Л. Русаков, В.Н. Феклистов, И.А. Золотарь, Н.А. Пузаков, В.М. Сиденко, Г.В. Порхаев, В.О. Орлов, Ю.Д. Дубнов, Н.Д. Меренков, А.А. Невзоров, И.А. Комаров [16, 17, 18, 39, 40, 41, 54, 67, 70, 92, 93, 96, 98, 99, 100, 101, 116, 117].

Устройство морозозащитных слоев в дорожной одежде автомобильных дорог регламентировано многочисленными нормативно-техническими документами [12, 13, 19, 69, 75, 88].

1.1 Морозное пучение грунтов земляного полотна

Морозное пучение грунта – это результат объемного расширения воды (примерно на 9 %), находящейся в нем еще до промерзания и дополнительно мигрирующей к границе промерзания из нижних слоев грунта в процессе перехода воды из жидкого состояния в твердое (лёд) [69].

Пучинами называют деформации дорожных одежд и земляного полотна, проявляющиеся в холодный период года во взбугривании и потере ровности покрытия, а в период оттаивания при проезде автомобилей – в проломах дорожной одежды, вызванных снижением прочности переувлажненных грунтов [78].

Бугром называют вспученный локальный участок. Впадиной называют локальный участок с меньшим по сравнению с равномерным или нулевым поднятием, а границу между двумя зонами равномерного пучения с разной высотой поднятия – перепадом (рисунок 1.1).

Характерным признаком пучинистых участков являются горбы, впадины, перепады, просадки, сетка трещин, концентрирующаяся у вершины бугров пучения (рисунок 1.2), колейность, выбоины и т.д. [91].

Рисунок 1.1 – Бугор пучения [91]

Рисунок 1.2 – Сетка трещин на пучинистом участке (фото автора)

Процессы морозного пучения происходят при одновременном сочетании трех факторов:

1. Интенсивное морозное влагонакопление, при котором в верхней части земляного полотна наблюдается повышенная влажность.

2. Промерзание грунта под дорожной одеждой на глубину более 0,5 м.

3. Наличие мелких пылеватых песков и супесей, пылеватых суглинков или других пучинистых грунтов [91].

Согласно СНиП 2.05.02-85 [88] грунты разделяются на 5 групп по степени пучинистости (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Классификация грунтов по степени пучинистости при замерзании

Группы грунтов по пучинистости	Степень пучинистости	Грунт
I	Непучинистый	Песок гравелистый, крупный и средней крупности с содержанием частиц мельче 0,05 до 2 %
II	Слабопучинистый	Песок гравелистый, крупный и средней крупности с содержанием частиц мельче 0,05 до 15 %, мелкий с содержанием частиц мельче 0,05 до 15 %, супесь легкая крупная
III	Пучинистый	Супесь легкая; суглинок легкий и тяжелый, глины
IV	Сильнопучинистый	Песок пылеватый; супесь пылеватая; суглинок тяжелый пылеватый
V	Чрезмернопучинистый	Супесь тяжелая пылеватая; суглинок легкий пылеватый

Практически вся территория Российской Федерации характеризуется сезонным промерзанием грунтов [73]. На участках автомобильных дорог, имеющих неблагоприятные геолого-гидрологические условия, интенсивно образуются деформации, связанные с различными криогенными процессами [69, 91]. На многих территориях РФ для весеннего и осеннего сезона характерна неустойчивая погода с резкими колебаниями температуры воздуха. Положительная температура сменяется резкими похолоданиями и обратно (суточный или периодичный перепад температуры). Данный факт говорит о повторяющихся многократно циклах промерзания/оттаивания. Грунты за небольшой период

времени могут находиться в разных состояниях: мерзлое, талое. Это ведет к многократным процессам морозного пучения и разуплотнения грунтов насыпи под дорожной одеждой.

К пучиноопасным относятся следующие участки со сложными геолого-гидрологическими условиями:

1. Насыпи и выемки в пылеватых грунтах.
2. Равнинные участки с поверхностным застоем воды в придорожной полосе (рисунок 1.3).
3. С торфорастительной прослойкой в основании насыпи.
4. С высоко расположенным горизонтом грунтовых вод.
5. Выпуклые и вогнутые переломы продольного профиля.
6. Затяжные уклоны автомобильных дорог.
7. Места пересечения микрологов, узких складок местности.
8. Места выхода грунтовых и наледных вод [91].

Рисунок 1.3 – Поверхностный застой воды в придорожной полосе (фото автора)

Наличие пучинистых участков на автомобильных дорогах приводит к снижению транспортно-эксплуатационных качеств покрытия, следовательно, к росту аварийности (рисунок 1.4).

Рисунок 1.4 – Проблемные участки автомобильной дороги федерального значения Р402 (фото автора)

Ликвидация последствий влияния криогенных процессов на дорожные конструкции и сооружения требует значительных ежегодных затрат на ремонтные работы. В соответствии с требованиями по безопасности дорожного движения дорожные службы в короткие сроки обязаны восстановить ровность на данных участках дорог. Исходя из этого изучение процессов промерзания грунтов и поиск методов борьбы с морозным пучением весьма актуально для территорий с суровым климатом и неблагоприятными инженерно-геологическими условиями [91].

Комплекс проектных решений должен быть направлен на достижение эксплуатационной надежности автомобильных дорог в течение всего жизненного цикла автомобильной дороги.

Устранить морозное пучение – это значит увеличить долговечность и ровность покрытия. Теоретически этого можно добиться заменой пучинистых грунтов на всю глубину промерзания кондиционным песком, песчано-гравийной смесью, гравием, укрепленным грунтом и другими непучинистыми материалами. Практически сделать это невозможно в районах, где глубина промерзания под

дорожной одеждой достигает 2,0 м и более [91]. Глубина промерзания под дорожной одеждой значительно выше, чем на притрассовых участках на которых роль теплоизолятора играют значительный снежный покров и ненарушенный мохово-растительный слой. В результате того, что с основной площадки дороги снег счищается снегоуборочной техникой, происходит более интенсивное промерзание грунтов насыпи и естественного основания через оголенный участок.

В зависимости от выявленных причин повреждения дорожной одежды на пучинистом участке дороги назначают мероприятия по улучшению водно-теплового режима земляного полотна, к которым относятся:

1. Устройство по перехвату и отводу воды, поступающей с верховой стороны по слоям дорожной одежды из зернистых материалов, при наличии затяжных продольных уклонов и обратных уклонов (поперечные дрены).
2. Устройство по устранению влияния поверхностных вод на влажность грунтов рабочего слоя на участках с необеспеченным поверхностным стоком (бермы, уположенные откосы, экраны, кюветы).
3. Устройство по устранению влияния подземных вод на влажность грунтов рабочего слоя на участках с верховодкой и близким залеганием грунтовых вод (дренажи глубокого заложения, гидроизолирующие и капилляропрерывающие прослойки).
4. Мероприятия по уменьшению глубины промерзания земляного полотна автомобильной дороги.
5. Замена пучинистых грунтов (непучинистыми материалами) [91].

1.2 Современные подходы к устройству морозозащитных слоев дорожных одежд автомобильных дорог в Российской Федерации

В данном параграфе приводятся основные принципы, регламентирующие устройство дополнительных морозозащитных слоев дорожной одежды.

Дополнительные слои дорожной одежды должны выполнять теплоизоляционные, морозозащитные и дренажные функции и предохранять

дорожную конструкцию от недопустимых деформаций и осадок, обеспечивать эффективное осушение верхней части земляного полотна при сохранении прочностных характеристик всей конструкции [69].

1.2.1 Дополнительные морозозащитные слои в основании дорожных одежд

Морозозащитные слои устраивают из стабильных зернистых материалов, таких, как песок, песчано-гравийная смесь, гравий, щебень, шлаки и др., а также из грунтов, укрепленных вяжущими, или гидрофобизированных грунтов, или других непучинистых материалов. Показателем пригодности материала по морозоустойчивости является степень пучинистости материала, определяемая в лабораторных условиях согласно действующему ГОСТ [19, 69].

Толщина морозозащитного слоя устанавливается расчетом в соответствии с методическими рекомендациями. Ширина морозозащитного слоя должна превышать ширину вышележащего слоя не менее чем на 0,5 м с каждой стороны.

В местах примыкания разных конструкций дорожной одежды следует предусматривать переходную зону.

Для особо неблагоприятных грунтово-гидрологических условий («мокрые» выемки, земляное полотно в нулевых отметках, низкие насыпи), пучиноопасные участки следует предусмотреть специальный слой из водостойких теплоизоляционных материалов.

В качестве теплоизолятора могут быть использованы легкие бетоны, теплоизоляционные композиции из укрепленных вяжущими местных материалов (грунтов), отходы промышленности, пористые заполнители (керамзит, перлит, аглопорит, гранулированный полистирол, измельченные отходы пенопласта), пенополистирольные блоки и плиты, различные пенопласты.

Расстояние от поверхности покрытия до теплоизолирующего слоя должно быть не менее 0,5 м (для исключения повышенной опасности гололедообразования).

Теплоизолирующий слой должен быть шире проезжей части на 0,5…1,5 м с каждой стороны в зависимости от глубины промерзания земляного полотна, а при расчете на недопущение промерзания грунтов под дорожной одеждой на 1,2 - 2,0 м.

Толщину и расположение теплоизоляционного слоя в конструкции определяют теплотехническим расчетом.

Минимальную глубину расположения теплоизолятора от поверхности покрытия устанавливается по данным регионального опыта эксплуатации конструкций с теплоизолирующими слоями.

Оптимальная конструкция и тип теплоизолятора выбирается на основании технико-экономического сравнения вариантов, равноценных по морозоустойчивости [5, 58, 69, 88].

Основными характеристиками теплоизоляционных материалов, непосредственно влияющих на глубину промерзания, являются: теплопроводность, морозостойкость, влажность. Роль каждого конкретного свойства может существенно изменятся в зависимости от методов строительства и качества используемых материалов. При устройстве морозозащитных слоев необходимо использовать материалы с высокими теплоизоляционными характеристиками.

1.2.2 Дополнительные дренирующие слои дорожных одежд

Дренирующие слои устраивают на участках с земляным полотном из недренирующих грунтов во всех случаях при 3-й схеме увлажнения рабочего слоя земляного полотна; при 1-й и 2-й схемах увлажнения в районах с большим количеством осадков (II-III ДКЗ), а также на участках, в основании проезжей части которых возможно скопление воды, проникающей с поверхности [58].

Дренирующие слои, как правило, устраивают из песка, гравийных материалов, отсортированного шлака. В конструкциях, где дренирующий слой находится выше глубины сезонного промерзания, материалы, используемые при устройстве слоя, должны обладать высокой морозостойкостью и прочностью.

Коэффициент фильтрации материала дренирующего слоя, необходимый в конкретном случае, определяются путем специального расчета, с учетом геометрии проезжей части. Независимо от результатов расчета он должен быть не менее 1 и 2 м/сут. [58, 88].

В случае устройства морозозащитного слоя из зернистых материалов с коэффициентом фильтрации не менее 1-2 м/сут он может также выполнять функцию дренирующего слоя. В этом случае морозозащитный слой нужно устраивать на всю ширину земляного полотна с выходом на откосы насыпи или укладкой трубчатых дрен или других водоотводящих устройств [58, 88].

1.3 Дорожно-строительные материалы для устройства морозозащитных слоёв

К основным строительным материалам, используемым для устройства морозозащитных слоев в дорожных конструкциях РФ, относятся: крупнозернистый кондиционный песок, щебеночно-песчаная смесь, песчано-гравийная смесь, гравий, пенополистирольные плиты [69].

В таблице 1.2 приведены теплофизические и механические характеристики конструктивных слоев из различных дорожно-строительных материалов [69].

Таблица 1.2 – Теплофизические и механические характеристики конструктивных слоев из различных дорожно-строительных материалов [69]

№ п/п	Материал	Плотность ρ, кг/м^3	Нормативные значения модуля упругости, Е, МПа	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(мК)
1	2	3		4
1	Асфальтобетон горячий плотный	2400	-	1,40
2	Аглопоритовый щебень, обработанный вязкий битумом	800	400	0,23
3	Керамзитовый гравий, обработанный вязким битумом	1100	500	0,64
4	Песок мелкий, одномерный, укрепленный 10 % цемента	2100	-	1,62

№ п/п	Материал	Плотность ρ, кг/м^3	Нормативные значения модуля упругости, Е, МПа	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(мК)
1	2	3		4
5	Пенопласт	38,5-60	13,0-33,5	0,03-0,052
6	Щебень из гранита	1800	-	1,86
7	Песок средней крупности талый	1950	-	1,91
	То же, мерзлый	1950		2,44
8	Песок пылеватый талый	1750	-	1,80
	То же, мерзлый	1750		2,20
9	Суглинок и глина талые	2000	-	1,62
	То же, мерзлые	2000		1,97
10	Гравийно-песчаная смесь	2000	-	2,10

1.3.1 Крупнозернистый кондиционный песок и щебеночно-песчаная смесь

Во многих регионах РФ для устройства морозозащитных слоев чаще всего используется песок средний и крупный, щебеночно-песчаная смесь оптимального гранулометрического состава в соответствии с ГОСТ 25607 [21]. В первую очередь такой слой выполняет дренирующую функцию, отводя воду и осушая тем самым земляное полотно [19, 69, 88]. Чем крупнее песок и чем меньше в нем глинистых частиц, тем быстрее и легче будет отводиться через него вода в кювет. Песок должен отвечать требованиям ГОСТ 25607 [21].

Высокими теплоизоляционными характеристиками песчаный слой не обладает и поэтому земляное полотно в холодный период года промерзает на значительную глубину. Если песок некачественный или заилился в процессе эксплуатации, то он не способен справляться со своей основной функцией – водоотведением. Дорожная конструкция промерзает и в ней неизбежно протекают процессы морозного пучения не только ниже морозозащитного слоя, но и в самом слое.

По расчетам на некоторых участках с неблагоприятными грунтово-гидрологическими условиями толщина морозозащитного слоя из песка может

достигать более одного метра. На таких участках трудно обеспечить необходимое количество кондиционных песчаных грунтов высокого качества для устройства морозозащитных слоев. Во многих районах возникают технологические сложности при добыче таких качественных грунтов или они совсем отсутствуют: под ногами тяжелые глины и суглинки. Дальность перевозки кондиционных песков составляет десятки и сотни километров [78]. Устройство морозозащитных слоев становится технологически и экономически нецелесообразным инженерным мероприятием.

1.3.2 Пенополистирольные теплоизоляционные материалы в дорожном строительстве

На сегодняшний день, основным типом теплоизоляционных материалов, применяемых в дорожном строительстве РФ являются синтетические теплоизоляционные материалы – экструзионные пенополистирольные плиты, выпускаемые для дорожной промышленности [3, 4, 7, 69, 96]. На рисунке 1.5 изображен поперечный разрез дорожной конструкции с устройством морозозащитного слоя из пенополистирольных плит [78]. На рисунке 1.6 изображен процесс укладки пенополистирольных плит в конструкцию автомобильной дороги.

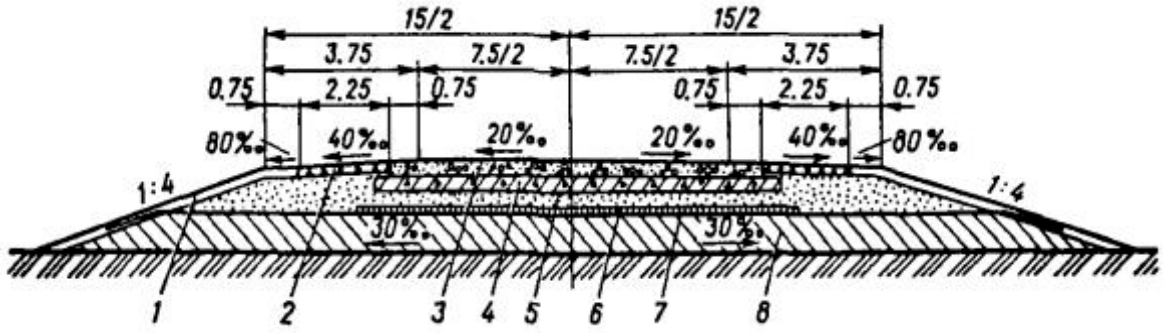


Рисунок 1.5 – Поперечный профиль дорожной конструкции с устройством морозозащитного слоя из пенополистирольных плит [78]:

1 – засев трав по слою растительности грунта толщиной 0,15 м; 2 – щебеночный материал (0,1 м) с разливом битума (1,5 л/м2); 3 – цементобетон (0,24 м); 4 – щебень, укрепленный 6 % цемента (0,21); 5 – песок (0,20 м); 6 – пенополистирольные плиты (0,10 м); 7 – геотекстиль «дорнит»; 8 – грунт (глина легкая пылеватая)

Рисунок 1.6 – Процесс укладки пенополистирольных плит в конструкцию автомобильной дороги

Согласно таблице 1.2 из всех дорожно-строительных материалов плиты из экструзионного пенополистирольного материала обладают самым низким коэффициентом теплопроводности (λ=0,035 Вт/(мК)).

Применение пенополистирольных плит в дорожном строительстве регламентировано многочисленной нормативной документацией [3, 4, 7, 69, 96]. Пристально изучением вопроса об использовании пенополистирольных плит в дорожном строительстве занимался А.А. Рувинский [78, 79, 80]. Свое внимание автор уделял обоснованию применения пенополистирольных плит в дорожном строительстве, а именно расчетам толщины слоев и всевозможными направлениям использования.

Среди дорожных инженеров и ученых до сих пор не существует единого мнения об эффективности применения синтетических теплоизоляторов для районов с глубоким сезонным промерзанием в условиях избыточного увлажнения [3, 7, 30, 106]. Следует отметить, что мнения ученых по поводу применения пенополистирольных плит разделились. С одной стороны, есть сторонники использования плит и многочисленная регламентирующая документация, обосновывающая применение, с другой стороны существуют и противники использования пенополистирольных плит.

Авторы Б.С. Баталин, А.Н. Боков, Л.Д. Евсеев и В.В. Мальцев в своих статьях [10, 11] подвергают сомнению массовый рекламный материал о значительных свойствах пенополистирола, его долговечности, пожарной и экологической безопасности. Авторы подчеркивают, что бездоказательная и широковещательная реклама свойств пенополистирола никак не подтверждается научными исследованиями. В научной литературе нет подтверждения большинства указываемых в рекламных материалах положительных свойств пенополистирола. Прогнозируемые производителями сроки службы пенополистирола, не соответствуют реальной экологической и пожарной безопасности материала. Свойства пенополистирола меняются от воздействия неконтролируемых случайных факторов, и выбор данного материала в качестве утеплителя экономически не выгоден (при эксплуатации инженерного сооружения более 10 лет) и потенциально опасен. Физико-механические свойства пенополистирольных утеплителей (прочность, плотность, теплопроводность, водопоглощение) зависят от способа производства и изменяются с течением времени под воздействием природных, технологических и эксплуатационных воздействий [10, 11].

А.А. Кетов говорит об изменении эксплуатационных свойств пенополистирола со временем: «Деструкция пенополистирола – разрушение макромолекул под действием тепла, кислорода, света, проникающей радиации, механических напряжений, биологических и других факторов. В результате деструкции уменьшается молекулярная масса полимера, изменяется его строение, физические и механические свойства, полимер становится непригодным для практического использования» [51].

Вопросами долговечности и старения полимерных строительных материалов занимался А.Г. Зайцев [38].

Проведенный анализ литературы и многочисленные консультации с дорожными инженерами позволили выявить следующие недостатки использования экструзионных пенополистирольных плит для устройства морозозащитных слоев:

1. Высокая вероятность застоя влаги на поверхности теплоизоляционного слоя (особенно при неправильной укладке). Плиты из экструзионного пенополистирола являются влаго- и паронепроницаемыми и не способны осуществлять дренаж. Вода неизбежно будет скапливаться на горизонтальном плиточном слое. Вышележащие грунты переходят в водонасыщенное, текучее состояние, что приводит к резкому снижению несущей способности и устойчивости, снижая тем самым эффективность технического решения. Также скопившаяся вода в холодный период года будет замерзать, вызывая морозное пучение под дорожным покрытием.

2. Необходимость устройства выравнивающих слоев из песка снизу и сверху плиточного слоя [78], что усложняет технологический процесс по укладке.

3. Возможность сжатия материала в процессе эксплуатации с дальнейшей потерей теплоизоляционных характеристик [129].

4. Высокая вероятность брака при уплотнении первого слоя грунта, отсыпанного на плиты. Под давлением катков плиты разрушаются, разъезжаются в разные стороны, выступают за пределы насыпи и образуют зазоры на стыках плит. Целостность слоя нарушается, соответственно, и теплоизоляционная функция снижается.

5. Пенополистирольная плита работает только при отсутствии неравномерных деформаций в ее основании. По этой причине подстилающие и верхние слои из песка не должны иметь комковатых включений, что в отдельных случаях сложно обеспечить. Иначе в плите возникают различного рода повреждения (трещины, вмятины), вследствие чего теплоизолирующая способность уменьшается. Это обстоятельство существенно ограничивает область применения указанного теплоизолирующего слоя.

6. Отсутствие данных многолетнего мониторинга, подтверждающих эксплуатационную надежность теплоизоляционного слоя из пенополистирольных плит [103].

7. Ручной труд по укладке пенополистирольных плит. Бригада из трех человек способна уложить за смену 2500 м^2 плит в один слой и 1300м^2 в два слоя,

другого способа укладки не существует. Данный факт существенно увеличивает сроки строительства объекта.

8. Высокая вероятность возникновения конфликтов между заказчиком и подрядной организацией из-за качества монтажа при приемке работ.

9. Высокие логистические издержки, обусловленные значительной дальностью возки готовой продукции от производителя до районов предполагаемого использования. Крупные заводы по производству синтетических теплоизоляционных материалов находятся в европейской части Росси. Принято считать, что применение теплоизоляционных материалов является целесообразным с экономической точки зрения при дальности возки менее 500 км, так как теплоизоляционные материалы имеют низкую плотность [76].

10. Большой риск повреждения плит в процессе транспортировки из-за их хрупкости.

Результаты современных отечественных и зарубежных исследований свидетельствуют о том, что эксплуатационные характеристики материала, как правило, заметно завышаются производителями.

Учитывая сложность устройства слоя материала, возможность значительного снижения заявленных характеристик в процессе эксплуатации, использование альтернативных теплоизоляционных материалов, в частности ГПСК, является более целесообразным для устройства морозозащитных слоев в дополнительных слоях дорожной одежды.

1.4 Зарубежный опыт устройства морозозащитных слоев в конструкциях автомобильных дорог

1.4.1 Гранулированное пеностекло (foam glass)

Пеностекло является одним из наиболее перспективных видов теплоизоляционных материалов, применяемых в различных областях промышленного и гражданского строительства. Основными преимуществами

пеностекла по сравнению с другими материалами являются: малый объемный вес, низкое водопоглощение, небольшая теплопроводность, высокая устойчивость против агрессивных сред и огнестойкость [52, 64].

Впервые способ получения пеностекла был разработан еще в 30-х годах XX века И.И. Китайгородским в СССР. В дальнейшем технология получения материала была усовершенствована и подготовлена для промышленного производства Б.К. Демидовичем [31, 51].

При этом следует отметить, что данный материал не нашел широкого применения в Советском Союзе: из четырех заводов, производивших пеностекло в СССР, до настоящего времени функционирует только Гомельский (ОАО “Гомельстекло”) [64].

В последние 15-20 лет в России наблюдается заметный рост интереса к повышению энергоэффективности и ресурсосбережения в строительстве за счет применения современных теплоизоляционных материалов, в том числе пеностекла.

На сегодняшний день на территории России существуют действующие производства пеностекла в Московской области (ООО «Пеностек», Орехово-Зуево), в Перми (АО «Пеноситал»), во Владимире («СТЭС-Владимир»), в Чебоксарах («Дизайн-М»), в Калужской области (ООО «АйСиЭм Гласс») [66]. Предприятия, осуществляющие производство пеностекла в России, характеризуются достаточно малыми объемами выпуска продукции и не в состоянии обеспечить весь спрос на материал в стране.

Основными видами выпускаемой продукции являются блочные изделия из пеностекла; гранулированное пеностекло производится в основном как побочный продукт в небольших объемах.

Единственным объективно существующим недостатком пеностекла является достаточно высокая стоимость материала [66], которая во многом обуславливается ограниченностью сырьевой базы. В качестве исходного сырья для производства пеностекла, как правило, используется стеклобой, сбор и переработка которого недостаточно хорошо организованы в большинстве регионов страны [64]. Именно поэтому пеностекло в основном применяется в виде блочных изделий при

строительстве сооружений с повышенными требованиями эксплуатационной надежности и безопасности (АЭС, крупные промышленные предприятия и высотные здания), где использование дорогостоящих материалов становится оправданным [51].

Гранулированное пеностекло является не менее перспективным материалом, чем блочные изделия. В странах Скандинавии гранулированное пеностекло уже более 20-ти лет с успехом используется в транспортном строительстве для устройства теплоизоляционных слоев в дорожных конструкциях [110, 113]. Подобное использование материала в Российской Федерации возможно при снижении стоимости производства и использовании альтернативных, более дешевых видов сырья.

1.4.2 Пеностекло в дорожном строительстве Норвегии и других европейских странах

Природные условия Норвегии отличаются наибольшей суровостью среди всех стран Европы: расчлененный горный рельеф, избыточное количество осадков и достаточно продолжительная зима с частыми заморозками. В условиях переувлажнения и продолжительных периодов с отрицательными температурами деформации дорожного полотна (рисунок 1.7), обусловленные морозным пучением грунтов основания, являются одной из основных проблем, возникающих в процессе эксплуатации автомобильных дорог страны [112, 125].

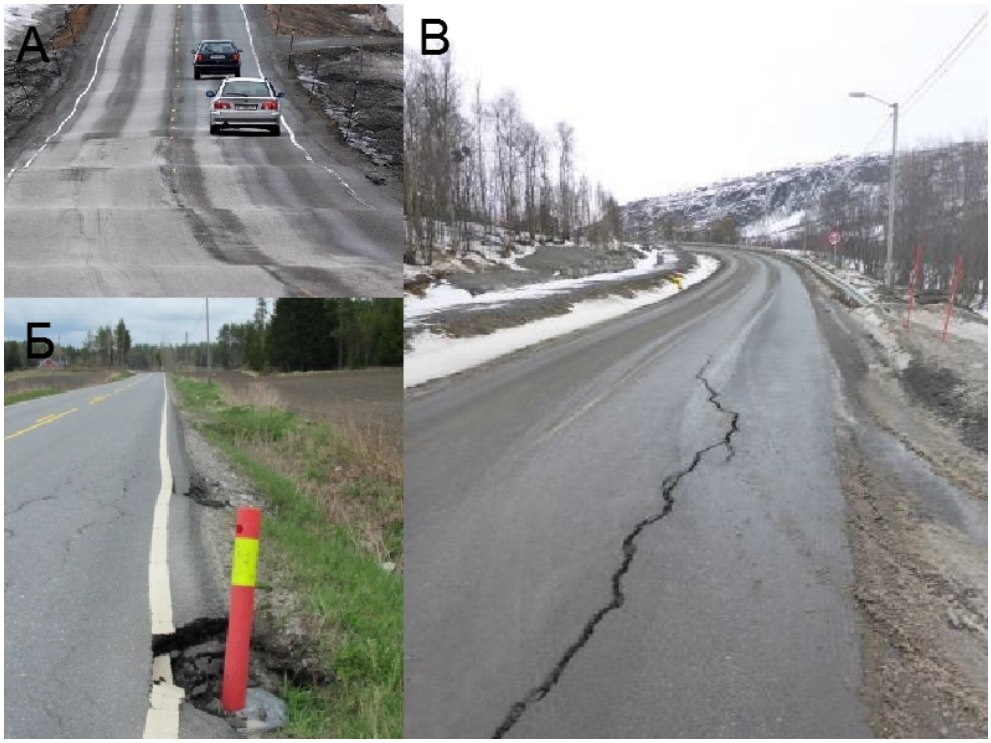


Рисунок 1.7 – Повреждения полотна автомобильных дорог, обусловленные морозным пучением на дорогах Норвегии: А – Rv 17 (автор Martin Ystenes), Б – Fv 114 [112], В – трасса FV26 (автор Lars Andreas Solås)

Для предотвращения деформаций морозного пучения в документации, регламентирующей строительство и эксплуатацию дорог в Норвегии (Norwegian pavement design manual), предусматривается устройство дополнительных морозозащитных слоев дорожной одежды, для чего могут использоваться различные материалы (рисунок 1.8): щебень скальных пород, песок, плиты из экструзионного пенополистирола (XPS), керамзитовый гравий (LWA) и т.д. [57, 112, 118, 125].

Толщина морозозащитного слоя для дорог Норвегии определяется на основании метеорологических условий для конкретного участка (глубина сезонного промерзания) и интенсивности трафика (AADT). В зависимости от интенсивности движения максимальная толщина дорожной конструкции с учетом морозозащитного слоя (дорожной одежды) не должна превышать 1,2-1,5-1,8 м соответственно (для высокой интенсивности движения – 2,4 м). Для дорог с низкой интенсивностью движения морозозащитный слой не предусмотрен [118].

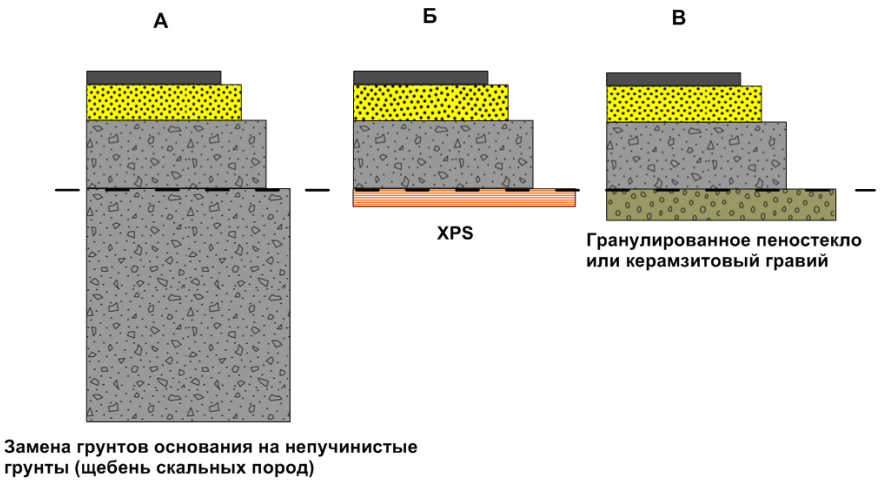


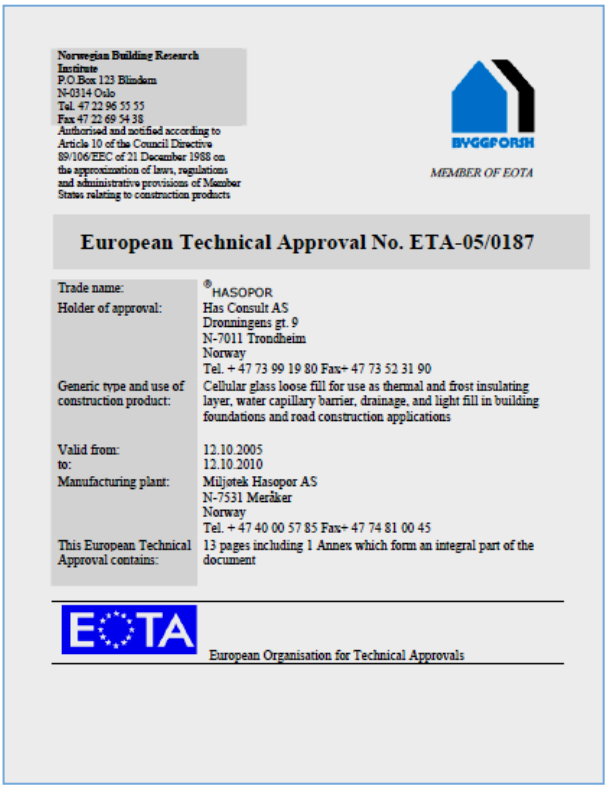
Рисунок 1.8 – Варианты устройства дополнительного морозозащитного слоя дорожных одежд Норвегии с применением различных материалов: А – непучинистый грунт основания (щебень скальных пород), Б – морозозащитный слой из пенополистирольных плит, В – морозозащитный слой из насыпного теплоизоляционного материала (керамзитовый гравий или гранулированное пеностекло)

Активизация экологической политики, принятие новых международных норм в области охраны окружающей среды и переработки отходов, соответствующие изменения общественного сознания стали одним из основных факторов повторного использования различных отходов для нужд дорожного строительства. В этих условиях Норвежское управление дорогами общего пользования (NPRA) инициировала специальную программу использования переработанных материалов в дорожном строительстве. Одним из таких материалов стало гранулированное пеностекло [113, 115].

Гранулированное пеностекло (рисунок 1.9) получают путем переработки промышленных и бытовых отходов стекла. Технологическая схема производства гранулированного пеностекла включает процесс получения тонкоизмельченного порошка из стекла, смешивание с активирующим веществом и получение пеностекольного материала в результате обжига [105, 115].

Рисунок 1.9 – Гранулированное пеностекло «Hasopor» (внешний вид) [105]

Исследование и сертификация материала Hasopor, применяемого в дорожном строительстве Норвегии, проводилась при участии таких авторитетных организаций, как Норвежский научно-исследовательский институт гражданского строительства (Norwegian Building Research Institute (NBI)) и исследовательской группой SINTEF. В ходе исследований был получен сертификат ETA на продукт (рисунок 1.10). Лабораторные и полевые исследования материала производились в соответствии с общеевропейскими стандартами EN, EN ISO.



Norwegian Building Research Institute
P.O.Box 123 Blindern
N-0314 Oslo
Tel. 47 22 96 55 55
Fax 47 22 69 54 38
Authorised and notified according to Article 10 of the Council Directive 89/106/EEC of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of Member States relating to construction products

BYGGFORSK
MEMBER OF EOTA

European Technical Approval No. ETA-05/0187

Trade name:	®HASOPOR
Holder of approval:	Has Consult AS Dronningens gt. 9 N-7011 Trondheim Norway Tel. + 47 73 99 19 80 Fax+ 47 73 52 31 90
Generic type and use of construction product:	Cellular glass loose fill for use as thermal and frost insulating layer, water capillary barrier, drainage, and light fill in building foundations and road construction applications
Valid from: to:	12.10.2005 12.10.2010
Manufacturing plant:	Miljøtek Hasopor AS N-7531 Meråker Norway Tel. + 47 40 00 57 85 Fax+ 47 74 81 00 45
This European Technical Approval contains:	13 pages including 1 Annex which form an integral part of the document

EOTA
European Organisation for Technical Approvals

Рисунок 1.10 – Сертификат ETA на пеностекло

Специалисты других европейских стран тщательно исследуют норвежский опыт, и пропагандируют использование гранулированного пеностекла в дорожном строительстве своих стран.

В таблице 1.3 приведены средние значения характеристик пеностекла, применяемого в дорожном строительстве европейских стран.

Таблица 1.3 – Характеристики пеностекла различных производителей, используемого в дорожном строительстве европейских стран [105, 107, 110, 111, 119, 126]

Показатель	Данные из различных источников [105, 107, 110, 111, 119, 126]
Фракционный состав материала	10-50 / 10-60 мм
Насыпная плотность (сухой)	180…230 кг/м^3
Насыпная плотность (после уплотнения) [111, 119, 126]	225…290 кг/м^3
Насыпная плотность (плотность материала в дорожной конструкции) [110, 111]	270…530 кг/м^3
Насыпная плотность (в периодически подтопляемой насыпи)	600 кг/м^3
Насыпная плотность в условиях постоянного подтопления	1000 кг/м^3
Угол сцепления	36…45°
Коэффициент уплотнения (сжимаемость)	1.15-1.25
Прочность при сжатии (10%) [105, 107, 111, 119, 126]	0.3-0.4 МПа
Прочность при сжатии (20%) [111, 115, 119]	0.77-0.92 МПа
Теплопроводность [104, 105, 107, 110]	0.11-0.15 Вт/м*К (0,1 – сухой, 0,15 – влажный, до 0,2 – мокрый)
Водопоглощение (4 недели) [105, 110, 119]	30…60 (%)
Водопоглощение (длительное, 1 год) [105, 110, 119]	40…116 (%)
pH [111]	10

ГПСК на основе опал-кристобалитовых пород Урала и Западной Сибири (диатомитов, трепелов и опок), по набору характеристик ничем не уступает гранулированному пеностеклу зарубежных производителей (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Характеристики ГПСК и гранулированного пеностекла, используемого в дорожном строительстве, ведущих европейских производителей [42, 44, 57]

Материал		Размер гранул, мм	Теплопроводность λ, W/м*K		Прочность, МПа*	Насыпная плотность кг/м^3	Водопоглощение по объему %
			Сухого	Влажного			
«GEOCELL® SCHAUMGLASS-CHOTTER» (Германия)		10-60	0,08	0,095	1,2-2,4	130-190	< 10
«HASOPOR®» (Норвегия)	Light	10-60	0,099	0,190	0,8-2,4	180	0,75
	Standard		0,107	0,215		225	0,7
Гранулированная пеностеклокерамика		5-40	0,07	0,10	0,8-2,8	300-350	< 6

Низкая стоимость и значительные запасы сырья для производства ГПСК на основе кремнесодержащих горных пород [81, 82, 84] позволяет уже в ближайшее время ожидать появления нового материала в дорожном строительстве России.

Гранулированное пеностекло, производимое в Европе, является материалом, который по своим свойствам и характеристикам наиболее схож с предложенной ГПСК. Соответственно, актуальным является анализ европейского опыта (в первую очередь, норвежского) использования пеностекла при строительстве объектов транспортной инфраструктуры. Необходимо изучить технические и экономические аспекты использования пеностекла в дорожном строительстве европейских стран, выявить те сложности, с которыми сталкиваются зарубежные специалисты.

Наиболее подробно в научной литературе освещено использование пеностекла марки «Hasopor» (Норвегия) в дорожном строительстве европейских стран. Пеностекло «Hasopor» представляет собой угловатый щебеночно-гравийный материал; максимальный размер агрегатов - 60 мм. Материал может быть получен с различными насыпными плотностями (180 - 250 кг/м^3) с теплопроводностью 0,155 Вт/мК при 10°С; теплоизоляционные характеристики пеностекла также изменяются в зависимости от температуры и содержания воды [113, 105, 107, 110]. Кроме того, еще один вид гранулированного пеностекла, применяемого в

транспортном строительстве, выпускается в Норвегии под торговой маркой «Glasopor».

Основным производителем гранулированного пеностекла для дорожного строительства Финляндии является компания «Uusioaines Ltd». Пеностекло марки «Foamit» данного производителя применялось в Финляндии при реализации таких крупных инфраструктурных проектов, как реконструкция городских улиц в Kangasala и при строительстве транспортной развязки E12 [104].

В Германии щебень из пеностекла начал активно применяться при строительстве объектов инфраструктуры в последние 7-8 лет, хотя сам материал уже давно производится на крупнейших в Европе заводах в промышленных масштабах. Основные производители гранулированного пеностекла в Германии, Швейцарии и Австрии: «GEOCELL Schaumglas GmbH», «Glapor», «Misapor», «TECHNOpor», «ECOGLAS». Отдельные попытки использовать гранулированное пеностекло для устройства морозозащитных слоев дорожной одежды предпринимались еще в 60-70-х годах XX века в Швейцарии и Австрии [57, 124].

1.4.3 Устройство дополнительных морозозащитных и дренирующих слоев дорожной одежды

Наиболее распространенной областью применения пеностекла в дорожном строительстве европейских стран является устройство морозозащитных слоев дорожных одежд.

В этой связи крайне интересными представляются результаты полевых исследований эффективности пеностекла в дорожной одежде, проведенные специалистами NPRA на опытно-экспериментальном участке Melhus [125].

Melhus – сельская местность к югу от Тронхейма. Климат Тронхейма является приморским, поэтому в Melhus погода достаточно теплая по сравнению с восточной и северной частями Норвегии. Среднегодовая температура воздуха в Melhus составляет 4,5 °C. Данная территория была выбрана для полевых исследований эффективности использования различных теплоизоляционных

материалов для устройства дополнительных морозозащитных слоев дорожной одежды: керамзитового гравия (LWCA), плит из экструзионного пенополистирола (XPS) и пеностекла [112, 125].

Опытно-экспериментальный участок был разделен на 4 секции: одна секция без изоляции (стандартная дорожная одежда) и 3 секции с плитами из экструзионного пенополистирола (XPS), керамзитовым гравием («Leca») и гранулированным пеностеклом («Hasopor»). Песок использовался для увеличения толщины дорожной одежды и основания до 80 см в соответствии с принятыми нормами проектирования. В секции с XPS толщина плит составила 3 см; в секциях с LWCA и пеностеклом толщина слоя материала (после уплотнения) составила 15 см. Конструкция дорожной одежды и общий вид опытно-экспериментального участка (для всех 4-х секций) показаны на рис. 1.11 [112, 125].

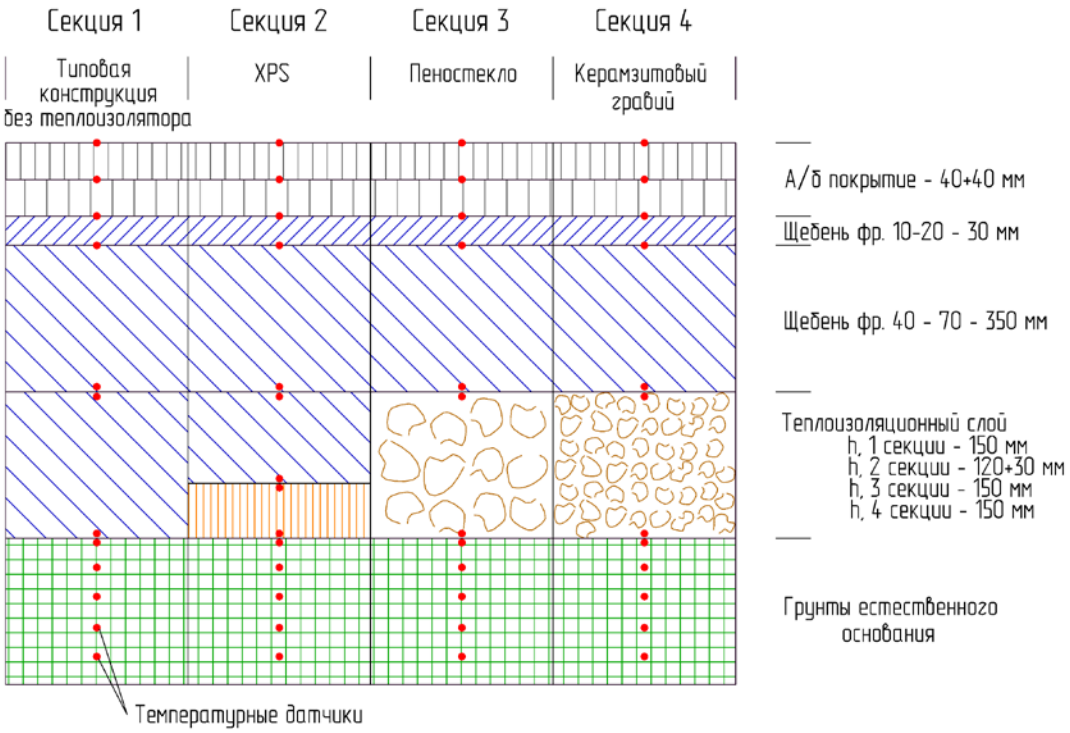


Рисунок 1.11 – Схема опытно-экспериментального участка Melhus [125]

Дорожная одежда участка имеет следующее строение: два 40-миллимитровых слоя асфальтобетона, 30 мм выравнивающего слоя из щебня размером 10-20 мм и 350 мм щебня размером 40-70 мм. Нижняя часть дорожной одежды состоит из 150 мм щебня или из 150 мм LWCA (керамзитового гравия), или

из 150 мм пеностекла. Для секции с пенополистирольными плитами – из 120 мм щебня и 30 мм плит XPS [125].

В рамках секций опытно-испытательного участка были установлены 43 датчика температуры, подключенные к логгеру и автоматически осуществляющие запись показателей температуры каждые 10 мин. Записанные данные автоматически передавались на компьютер. Сбор данных осуществлялся в течение трех лет [120, 121, 125].

Результаты мониторинга показали, что положительный эффект от применения керамзитового гравия LWCA оказался несколько ниже, чем предполагалось, в то время как эффект от применения двух других теплоизоляционных материалов (пеностекло и пенополистирольные плиты) соответствует результатам предварительных расчетов. Распределение температур в конструкциях дорожных одежд с использованием различных материалов на 13 марта 2006 года представлено на рисунке 1.12.

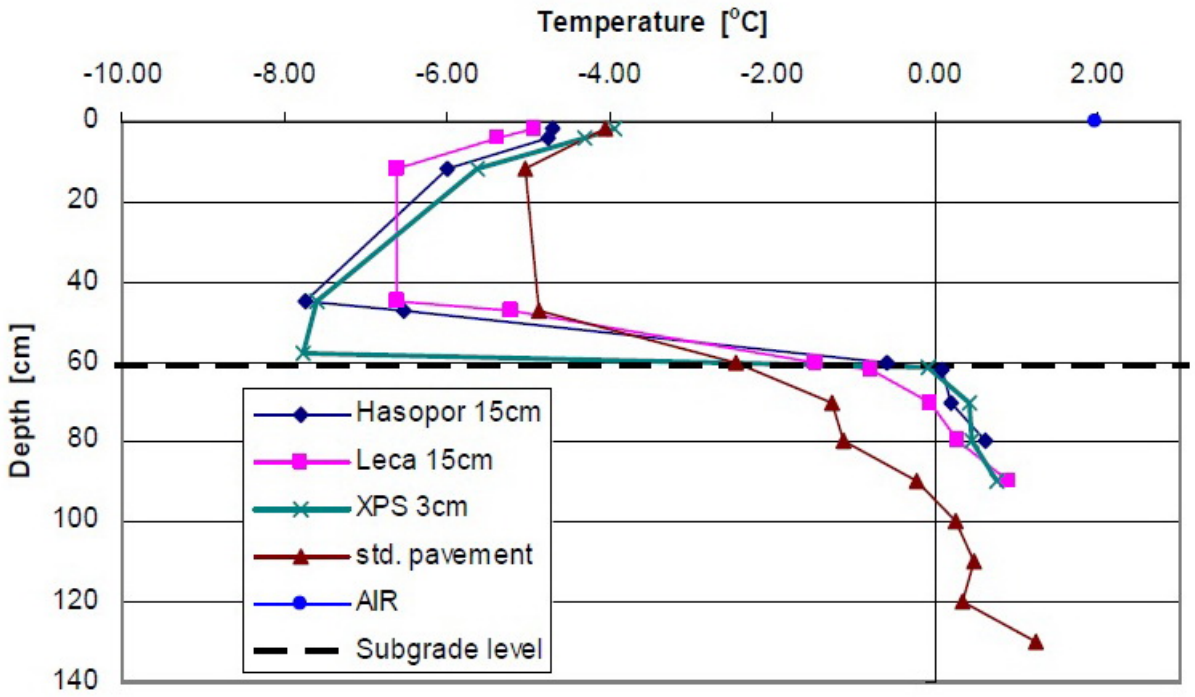


Рисунок 1.12 – Распределение температур в конструкциях дорожных одежд с использованием различных материалов на 13 марта 2006 года, по оси X – температура в ^{0}C, по оси Y – глубина в см: секция с пеностеклом «Hasopor» (15 см), секция с керамзитовым гравием «Leca» (15 см), секция с XPS (3 см), секция без теплоизолятора [125]

Результаты мониторинга свидетельствуют о высокой эффективности гранулированного пеностекла как теплоизоляционного материала для устройства дополнительных морозозащитных слоев дорожной одежды. По теплоизоляционным характеристикам слой гранулированного пеностекла превосходит керамзитовый гравий и сопоставим со слоем экструзионного пенополистирола. В сравнении не учитывается способность слоя материала обеспечивать свободный отток влаги, простота устройства слоя, что также следует отнести к аргументам в пользу применения пеностекла и аналогичных материалов для устройства морозозащитных слоев.

1.4.4 Строительство в сложных грунтово-геологических условиях, устройство высоких и сверхвысоких насыпей, замена слабых грунтов эрозионных склонов

Другим перспективным направлением применения материала является строительство в сложных грунтово-гидрологических условиях. Низкая насыпная плотность материала (270-530 кг/м^3) позволяет существенно снизить нагрузки на грунт основания дорожной конструкции. Ниже приводится описание и результаты мониторинга нескольких эксплуатируемых дорожных конструкций с использованием пеностекла (рисунок 1.13).

Рисунок 1.13 – Объекты с использованием пеностекла в транспортном строительстве Норвегии: А, Б – участки транснорвежской дороги Е6, В – устройство морозозащитного слоя на участке шоссе Rv 35, Г - укрепление склона на участке шоссе Fv 115 [118]

Ниже приводится описание нескольких объектов с использованием пеностекла как сверхлегкого насыпного материала для строительства на слабых грунтах и укрепления эрозионно-опасных склонов.

Национальная автодорога № 17. Укрепление осыпающегося склона в районе Rosendal

Вследствие процессов эрозии произошло обрушение склонов на участке диной 30 м. Дорожная насыпь имела высоту около 10 м. Долина реки и ее склон, на котором находилась дорожная насыпь, были сложены просадочными глинистыми грунтами. Для того чтобы вновь открыть дорогу и не допустить дальнейшего разрушения берегов реки и склонов, необходимо было в течение кратчайшего срока осуществить противоэрозионные мероприятия. Противоэрозионные мероприятия были произведены за счет укрепления склона взорванной горной породой. На втором этапе для укрепления склона использовалось пеностекло марки «Hasopor». Материал был доставлен на место и

выгружен прямо на склон. Пеностекло было распределено отдельными слоями толщиной 0,5 м с помощью 30-тонного экскаватора на гусеничном ходу и уплотнено за 3 - 4 прохода гусеничными лентами (коэффициент уплотнения 1,4). Таким образом, общий объем материала (300 м^3) был размещен в течение 4 часов. Визуальные наблюдения, измерения плотности и фракционного состава материала были выполнены через 3 года после того, как склон был восстановлен. Дорога хорошо функционирует без каких-либо признаков разрушения дорожного покрытия или проседания [105, 113].

Пешеходная/велосипедная дорожка в Lodalen

Пеностекло было применено для формирования насыпи на склоне с высоким уровнем эрозионной опасности при строительстве пешеходной/велосипедной дорожки. Для этих целей был использован самый легкий тип пеностекла, имеющий насыпную плотность 180 кг/м^3. Любая дополнительная нагрузка на склон привела бы к обрушению. Поэтому было принято решение заменить часть естественного грунта склона пеностеклом. Всего для этих целей было использовано 1200 м^3 пеностекла. Пеностекло было размещено слоем толщиной до 2 м. Верхняя поверхность склона была выровнена экскаватором; уплотнение было произведено при помощи гусеничной ленты экскаватора. На склонах легкое уплотнение осуществлялось также экскаватором при помощи ковша. Слой пеностекла просел примерно на 10 см после того, как было устроено основание пешеходно/велосипедного полотна. Важно отметить, что деформации в краевой части возникли сразу же после того, как слой пеностекла был уложен и уплотнен [113].

Набережная на Национальном шоссе № 120

В районе, находящемся примерно в 50 км к северу от Осло, на участках распространения просадочных глинистых грунтов, пеностекло использовалось в качестве легкого насыпного материала наравне с основным материалом-конкурентом LCWA. Дорога в поперечном сечении была срезана с одной стороны и отсыпана с другой. Высота насыпи составила 4 м. Пеностекло марки «Hasopor»

общим объемом до 3950 м^3 с насыпной плотностью 180 кг/м^3 было использовано для формирования слоя насыпи толщиной 3 м. Пеностекло отсыпалось толстыми слоями высотой до 1 м. Слабые признаки деформаций и разрушения материала в процессе эксплуатации были выявлены исключительно под колеей [113].

Результаты мониторинга дорожных конструкций с использованием пеностекла, проведенные для объектов в различных районах Норвегии, приведены в таблице 1.5 и 1.6. Полученные данные свидетельствуют о том, что применение пеностекла в дорожном строительстве существенно снижает риск возникновения деформации при реализации объектов на участках эрозионно-опасных склонов и распространения слабых грунтов.

Таблица 1.5 – Результаты мониторинга объектов с использованием пеностекла «Hasopor» (характеристики материала) [113]

Объект	Тип материала	Год	Год полевых исследований	Объем материала, м^3	Влажность, %	Плотность, кг/м^3
Lodalen	Light	2001	2001	1500	3-18	325
Rv 120	Light	2001	2001	2900		500
E6 Mule	Light	2002	2002	550		295
E6 Eggemarka	Std.	2002	2003	1000	15-20	345
Postterminalen	Std.	2000	2000	2750		
E6 Rosendal	Std.	1999	2002	310	18	530
E6 Klemetsrud	Light	2003	2003	1100	0,5	271

Таблица 1.6 – Результаты мониторинга объектов с использованием пеностекла «Hasopor» (просадки) [113]

Объект	Высота насыпи, м	Коэффициент уплотнения	Просадки, возникшие непосредственно после завершения строительства, %	Просадки, возникшие после длительных сроков эксплуатации, %	Просадки на склонах, %
Lodalen	2	1,25	1,5 – 2,5	+ 0 – 0,5	4

Rv 120	3	1,6	1	+ 0 – 0,5	2-3
E6 Mule	3	1,25			
E6 Eggemarka	4		1		1,5
E6 Rosendal	2,5	1,4		+ 0	
E6 Klemetsrud	3	1,2	1		

Результаты полевых и лабораторных испытаний, проведенные в Норвегии с 1999 года и продолжающиеся в настоящее время, свидетельствуют о том, что пеностекло имеет хорошие изоляционные и дренажные свойства. Вследствие угловатой формы агрегатов слой материала обладает высокой стабильностью и устойчивостью к проседанию. Для целей дорожного строительства материал имеет более гибкие характеристики в сравнении с обычным гравием, обычно используемым в качестве материала для отсыпки основания дорожной насыпи. Пеностекло может конкурировать с другими видами легких насыпных материалов, такими как керамзитовый гравий.

1.4.5 Керамзитовый гравий – Lightweight clay aggregate (LWCA)

LWCA (рисунок 1.14) производят путем спекании глины в специальной печи, в результате образуются твердые зерна (гранулы) различных размеров (как правило, 0-32 мм). LWCA имеет насыпную плотность приблизительно 280 кг/м^3. Среднее содержание влаги материала в слое земляного полотна составляет 25% по весу (7,7% по объему). Соответствующий коэффициент теплопроводности при 10°C равен 0,18 Вт/мК, но данная характеристика материала может заметно изменяется в зависимости от температуры и содержания влаги [120, 125].

Эти гранулы применяются при изготовлении строительных блоков и плит. В конце 50-х годов прошлого века отходы от производства блоков и плит использовались в качестве сырья для производства легких насыпных материалов. Еще более важно, что данный материал обладает хорошими теплоизоляционными свойствами и при достаточной толщине может выступать в роли морозозащитного

слоя. Сегодня он достаточно часто используется в качестве легкого насыпного материала в дорожном строительстве в Норвегии (рисунок 1.15).

Рисунок 1.14 – Керамзитовый гравий производства LECA [125]

Рисунок 1.15 – Устройство морозозащитного слоя с использованием керамзитового гравия (LWCA) [108]

1.4.6 Пенополистирольные плиты (XPS) и блоки (EPS)

Кроме того в дорожном строительстве Норвегии широко используется пенополистирольны плиты (XPS) и блоки (EPS). На рисунке 1.16 и 1.17 показано использование даных материалов в дорожном строительстве Норвегии.

Рисунок 1.16 – Использование блоков EPS при строительстве моста, Норвегия [114]

Рисунок 1.17 – Укладка пенополистирольных теплозоляционных плит (XPS), Норвегия [125]

Плиты XPS и блоки EPS являются далеко не самыми экологически безопасными материалами. Керамзитовый гравий не обладает достаточными

теплоизоляционными характеристиками. Именно поэтому норвежские специлисты обратили внимание на гранулированное пеностекло.

Пеностекло известных европейских производителей («Hasopor», «Foamit», «Glasopor» и т.д.) является перспективным насыпным материалом для применения в дорожном строительстве (если его цена является экономически выгодной по сравнению с конкурирующими продуктами). Состоящие из стекла материалы полностью устойчивы к различным видам химического воздействия и агрессивным средам.

1.5 Гранулированная пеностеклокерамика

1.5.1 Характеристики

ГПСК представляет собой окатанный материал в виде гравия серо-зеленого цвета разных фракций (рисунок 1.18): фракция 5-10 мм (рисунок 1.19 А), фракция 10-20 мм (рисунок 1.19 Б). ГПСК имеет высокую пористость, за счет чего достигаются высокие теплоизоляционные характеристики материала (λ=0,07-0,1 Вт/м*К) [43, 44, 89, 94, 122].

Рисунок 1.18 – Гранулированная пеностеклокерамика разных фракций

Рисунок 1.19 – Гранулированная пеностеклокерамика:
А - фракция 5-10 мм, Б - фракция 10-20 мм

Технология получения ГПСК запатентована (патент РФ № 2569138) [89], также на материал разработаны технические условия (ТУ 5764-001-90903792-2013) [94]. В процессе производства используется основной сырьевой компонент – опал-кристобалитовые горные породы (диатомит, трепел, опока), которые подвергаются первичному измельчению, сушке и тонкому помолу. Затем происходит смешивание с раствором каустика, формование сырцовых гранул, их подсушка, дробление до требуемых размеров и вспенивание во вращающейся барабанной печи при 800 ^{o}C [44, 89, 122].

Полученный таким образом материал на изломе напоминает застывшую стеклянную пену (рисунок 1.20). Каждая отдельная пора является закрытой и паронепроницаемой, что обуславливает высокие эксплуатационные характеристики ГПСК: прочность, долговечность, морозостойкость и низкое водопоглощение.

Рисунок 1.20 – Гранулированная пеностеклокерамика на изломе

В основе технологического процесса получения материала лежит процесс выщелачивания аморфного SiO_2 из диатомита раствором щёлочи. Данный подход, используемый для получения жидкого стекла, не нашёл широкого применения в промышленном производстве из-за образования нерастворимого остатка и сложностей, связанных с его отделением. В то же время, при производстве пеностеклокерамических материалов, этот остаток может являться важным компонентом сырьевой смеси [44, 122].

Процесс взаимодействия аморфного кремнезёма с гидроксидом натрия можно охарактеризовать следующей химической реакцией:

$$mSiO_2 \cdot nH_2O + 2NaOH \rightarrow Na_2O \cdot mSiO_2 \cdot (n+1)H_2O,$$

где m – силикатный модуль образующегося гидратированного силиката натрия. При дальнейшем нагревании происходит образование ячеистой структуры за счёт удаления молекулярной и силанольной воды с последующей поликонденсацией кремнекислородных анионов.

Новизна предложенной технологии заключается в проведении предварительной гидротермальной обработки опалового сырья при 90 °C, позволяющей ускорить процесс выщелачивания аморфного SiO_2 из диатомита, а образующиеся при этом растворимые щелочные силикаты способствуют её вспениванию при обжиге и снижают среднюю плотность образцов [44].

Ранее сотрудниками ИКЗ СО РАН были определены основные технические характеристики ГСПК [44, 94, 122], которые приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Основные свойства гранулированной пеностеклокерамики [43, 44, 94, 122]

Наименование показателя		Значения, по фракциям, мм			
		1,25 - 2,5	2,5 - 5	5 - 10	10 - 20
Насыпная плотность, кг/м^3		350	270	220	190
Прочность при сжатии в цилиндре, МПа		2,8	2,2	1,7	1,2
Теплопроводность, Вт/(м·К)	в сухом состоянии	0,090	0,085	0,086	0,082
	в водонасыщенном	-	0,205	0,159	0,143
Водопоглощение по массе, %		-	-	4 - 6	
Морозостойкость, циклы		-	-	150	
Потеря массы при испытании на стойкость против силикатного распада, %		-	-	0,1	

Теплопроводность различных фракций в сухом и водонасыщенном состоянии лежит в пределах 0,082-0,092 Вт/(м·К) и 0,143-0,205 Вт/(м·К), соответственно, это позволяет применять материал также и во влажных условиях. Материал обладает высокой прочностью: 1,5-2,8 МПа при насыпной плотности 190-350 кг/м3. Для сравнения, традиционные пористые сыпучие материалы (например, керамзитовый гравий) при насыпной плотности 350 кг/м3 имеют прочность 1,0-1,5 МПа [43, 44, 94, 122].

1.5.2 Сырьевая база на примере УРФО

Сырьем для производства материала служат диатомиты, трепелы и опоки Зауральской субпровинции Западно-Сибирской провинции опал-кристобалитовых пород. Диатомиты представляют собой мягкие легкие тонкодисперсные породы (рисунок 1.21 и 1.22), сложенные в основной массе обломками и целыми панцирями диатомей, имеющих размер от 0,01 до 0,04 мм. Электронная микроскопия проб диатомита представлена на рисунке 1.23 [82]. Обломки диатомей состоят из аморфного $Si0_2$.

Рисунок 1.21 – Внешний вид породы – диатомит Ирбитского месторождения (Свердловская область)

Рисунок 1.22 – Обнажение пород Ирбитского месторождения (Свердловская область)

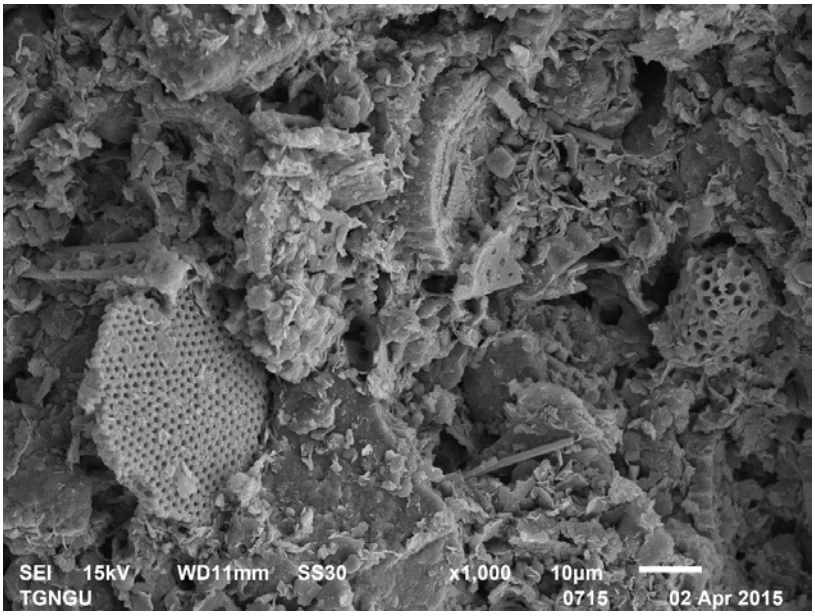


Рисунок 1.23 – Общий вид кремнистой породы под электронным микроскопом (фото: В.Т. Чернышев) [82]

Регионы УРФО обладают колоссальными запасами высококачественного кремниевого сырья. Кремниевые опал-кристобалитовые породы (диатомиты, опоки, кремнистые глины) широко представлены в мезозойско-кайнозойском осадочном чехле Западно-Сибирской геосинеклизы [14, 68]. Породы относятся к числу полезных ископаемых, характеризующихся значительным набором полезных характеристик и разнообразными областями применения. На территории Зауралья (в границах Свердловской, Челябинской и Курганской областей) месторождения опал-кристобалитовых пород были обнаружены в 1930-50-х гг. прошлого века по результатам детального изучения верхнемеловых и эоценовых отложений. По состоянию на 2015 г выявлено 107 месторождений кремниевых пород, 24 из которых детально разведаны и обладают запасами промышленных категорий общим объемом в 174 млн. м^3 диатомитов и 49 млн. м^3 опок. Основные разведанные запасы сосредоточены в пределах трех месторождений: Потанинского (Челябинская область, 25 млн. м^3), Камышловского и Ирбитского (Свердловская область, 15 и 7 млн. м^3 соответственно). Общий ресурсный потенциал территории оценивается У.Г. Дистановым в 15-20 млрд. м^3 [32].

На юге Тюменской области (рисунок 1.24) перспективы расширения минеральной базы кремнистого сырья связаны, прежде всего, с псаммито-диатомито-алевритовыми породами туртасской свиты верхнего олигоцена [83].

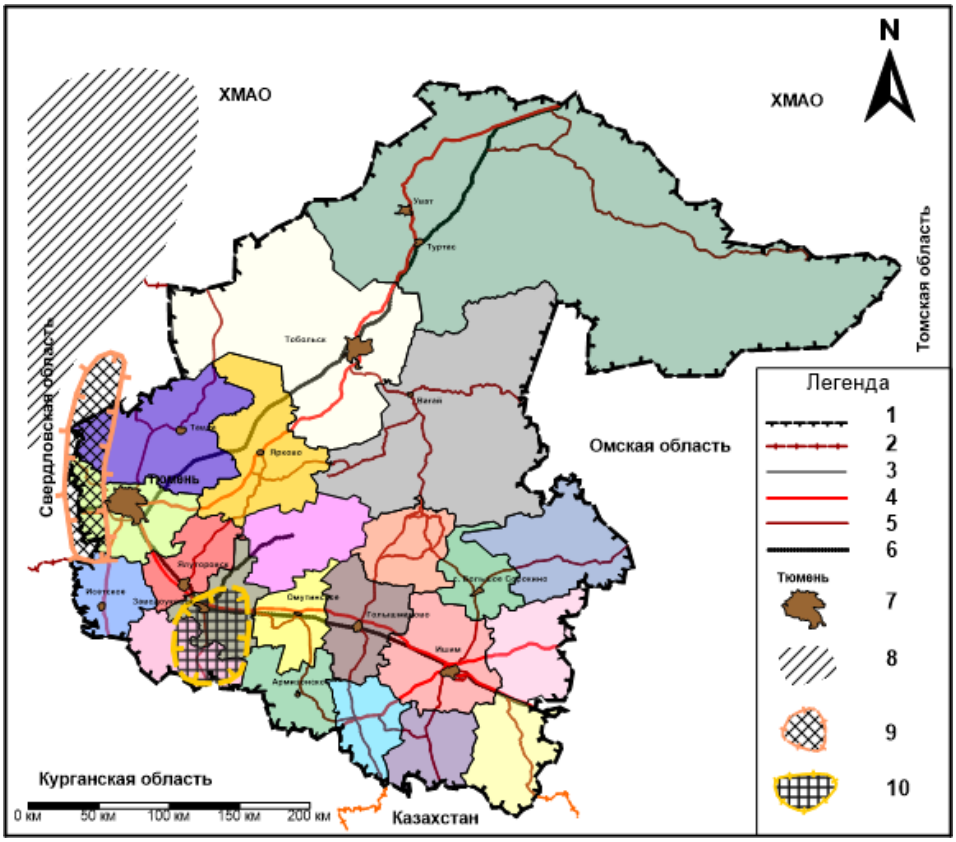


Рисунок 1.24 – Сырьевая база для производства гранулированной пеностеклокерамики: 1 – административная граница Тюменской области, 2 – прочие административные границы, 3 - административные границы районов Тюменской области, 4 – важнейшие автомобильные дороги, 5 – сеть автомобильных дорог регионального значения, 6 – железные дороги региона, 7 – населенные пункты, 8 – Зауральская провинция опал-кристобалитовых пород, 9,10 – перспективные области на кремнистое сырье на юге Тюменской области

Согласно [69, 88] рекомендуется максимально задействовать при строительстве автомобильных дорог строительные материалы местного происхождения или производства. Применение местных материалов в транспортном строительстве является залогом стабильного экономического развития. Производство ГСПК ориентировано на местную сырьевую базу региона, и способно повысить конкурентоспособность строительного сектора, а также снизить необходимость импорта строительных материалов из соседних регионов.

1.5.3 Применение в автодорожном строительстве

В диссертационной работе рассматриваются перспективные направления использования ГПСК для устройства дополнительных морозозащитных слоев дорожных одежд (рисунок 1.25). Предполагается, что морозозащитный слой из ГПСК позволит ограничить пучение допустимыми нормами или полностью предотвратить промерзание подстилающего грунта земляного полотна.

Рисунок 1.25 – Дорожная конструкция с дополнительным морозозащитным слоем из гранулированной пеностеклокерамики

Внедрение новых материалов, обеспечивающих дополнительный запас прочности дорожных конструкций и улучшающих водно-тепловой режим, может

стать оптимальным решением при строительстве автомобильных дорог и других объектов транспортной инфраструктуры в условиях сезонного промерзания.

1.5.4 Функциональные и конструктивные особенности дополнительных и морозозащитных слоев дорожных одежд с использованием гранулированной пеностеклокерамики

Дополнительные слои дорожной одежды должны выполнять теплоизоляционные, морозозащитные и дренажные функции и предохранять дорожную конструкцию от недопустимых деформаций и осадок, обеспечить эффективное осушение верхней части земляного полотна при сохранении прочностных характеристик всей конструкции [69, 88]. Многофункциональный дополнительный слой дорожной одежды, отсыпанный из ГПСК, может обладать всеми вышеперечисленными свойствами.

Теплоизоляционная функция

Теплоизоляционная функция слоя из ГПСК достигается за счет высоких теплоизоляционных характеристик материала. Среднее значение теплопроводности составляет 0,07 Вт/м*К, теплопроводность в уплотненном состоянии – 0,085 Вт/м*К [43, 44, 89, 94, 122].

Дренажная функция

Слой из ГПСК обеспечивает свободную миграцию жидкости (диффузию), каждая отдельная гранула является водонепроницаемой и паронепроницаемой, что способствует морозостойкости и не приводит к разрушению и деформациям самих гранул при промерзании и оттаивании. Коэффициент фильтрации отсева дробления – 4 м/сут [90].

Капилляропрерывающая функция

ГПСК из-за большого размера гранул характеризуется значительным поровым пространством, поэтому слой может использоваться как слой

обеспечивающий разрыв капилляров, тем самым предотвращать капиллярное поднятие влаги из нижележащих слоев.

Кроме того, следует отметить, что ГПСК является достаточно прочным материалом (марка по прочности П50) и ее использование в конструкциях инженерных сооружений не уменьшает общих прочностных характеристик (при соответствующем расчете) [90].

1.5.5 Расположение слоя материала ГПСК в дорожной конструкции

Существует несколько вариантов расположения многофункционального слоя ГПСК в дорожной конструкции для I, II, III или IV дорожно-климатической зоны: непосредственно в качестве дополнительного морозозащитного и/или дренирующего слоя дорожной одежды, в качестве теплоизоляционного, дренирующего или капилляропрерывающего слоя в теле насыпи [69, 88].

При разработке предлагаемого технического решения были проведены консультации с отечественными и зарубежными специалистами по дорожному строительству, материаловедению и геокриологии: Норвежский технологический институт, Норвежское управление дорогами общего пользования (Norwegian Public Road Administration), ИКЗ СО РАН, ФАУ «РОСДОРНИИ», ЗАО «ПРОМТРАНСНИИПРОЕКТ», ОАО «ВНИИЖТ», ООО «ТюменНИИгипрогаз», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет», ООО «Уренгойдорстрой», Государственное казенное учреждение Тюменской области «Управление автомобильных дорог» и т.д. Замечания и рекомендации, полученные в ходе консультаций, были учтены – материал получил высокую оценку.

На основе полученного опыта разработан вариант типовой автодорожной конструкции для регионов с глубоким сезонным промерзанием (рисунок 1.26). На предлагаемую дорожную конструкцию получен патент на полезную модель – дорожная конструкция: пат. 154137 РФ: МПК E01C3/06 / В.П. Мельников, Е.А Коротков, К.С. Иванов – опубл: 20.08.2015. – Бюл. №21. – 4 с. (приложение А).

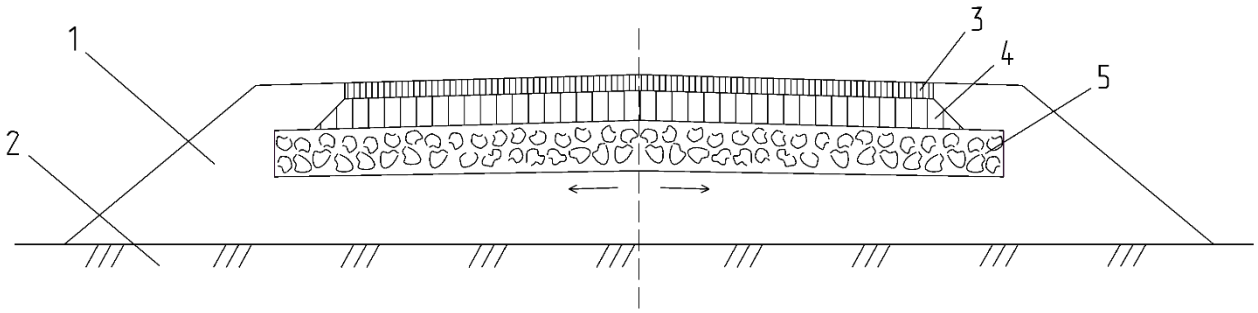


Рисунок 1.26 – Дорожная конструкция с дополнительным морозозащитным слоем из гранулированной пеностеклокерамики №2: 1 – земляное полотно автомобильной дороги из местных грунтов, 2 – естественное основание, 3 – асфальтобетонное покрытие, 4 – щебень, 5 – слой из ГПСК

Предложенная конструкция является типовой и для правильного проектирования необходимо разрабатывать индивидуальные варианты конструкций на основе специфических грунтово-геологических и природно-климатических условий региона строительства. Конкретный вариант расположения и толщина слоя ГПСК должны определяться соответствующими расчетами, в которых должны быть учтены грунтовые и гидрологические условия участка проведения работ и свойства материалов (грунтов), используемых при строительстве земляного полотна автомобильной дороги, а также тип планируемой дорожной одежды. Методика расчета общепринятая, согласно ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд» [69].

При проектировании региональных дорожных конструкций следует также учитывать специализацию дорожно-строительных организаций, обеспеченность региона дорожно-строительными материалами, предусматривать максимальную механизацию и индустриализацию строительных процессов, стремиться к снижению трудоемкости и затрат ручного труда [69].

В ряде случаев борьба с пучинами традиционными методами малоэффективна, а в некоторых случаях просто невозможна. Например, если дорога проходит в насыпи высотой 1 метр, местность равнинная, поверхностный сток не обеспечен, под насыпью залегает супесь пылеватая, имеются подземные воды (верховодка), уровень которых совпадает с поверхностью земли, глубина

промерзания в открытом поле более 1,5 м [78]. В таком случае единственно возможным решением, способным исключить процессы пучения в грунтах земляного полотна, является устройство теплоизоляционного слоя в основании дорожной одежды из ГПСК.

В конструкциях дорожных одежд на контакте слоев из ГПСК со смежными слоями следует предусматривать устройство разделяющих прослоек из геотекстиля исключающих взаимопроникновение материалов смежных слоев и снижения в связи с этим теплоизоляционных и дренажных характеристик слоя из ГПСК (рисунок 1.25).

При высокой категории автомобильной дороги и больших нагрузках следует предусматривать применение слоя из ГПСК при выполнении дополнительных мероприятий по обработке слоя минеральными вяжущими материалами (цемент), полиминеральными композициями или органическими вяжущими материалами (битум, битумные эмульсии) [69].

1.5.6 Ожидаемый результат от устройства дополнительных слоев дорожных одежд из гранулированной пеностеклокерамики

При устройстве дополнительных морозозащитных слоев дорожной одежды из ГСПК положительный эффект, в виде стабилизации температурного и водного режима дорожной конструкции будет наблюдаться уже в первый год эксплуатации. Грунт естественного основания и тела насыпи приобретет дополнительную устойчивость к сезонным циклам промерзания/оттаивания, что существенно скажется на устойчивости и долговечности всей конструкции.

Внедрение новейших дорожных конструкций с применением ГСПК должно существенно снизить риск деформаций, обусловленных морозным пучением грунтов, повысить ровность и долговечность дорожного покрытия и увеличить межремонтные сроки.

ГСПК может быть использована при новом строительстве, реконструкции и капитальном ремонте сети существующих автомобильных дорог: автомобильные

дороги регионального и муниципального значения, федеральные трассы, автомагистрали, подъезды к населенным пунктам, городские улицы, местные проезды, парковые дороги, частные промысловые дороги нефтегазовых месторождений, частные дороги промышленных и сельскохозяйственных предприятий и т.д.

Выводы по первой главе и задачи исследования

1. По итогам литературного обзора был сделан вывод о том, что в РФ в регионах со сложными природно-климатическими и грунтово-геологическими условиями существует проблема пучения грунтов земляного полотна автомобильных дорог при глубоком сезонном промерзании. Морозное пучение грунтов вызывает серьезные деформации и разрушения дорожных конструкций. Исходя из этого, изучение процессов промерзания грунтов и поиск методов борьбы с морозным пучением весьма актуален.

2. Современные подходы к проектированию дополнительных морозозащитных слоев дорожных одежд в условиях сезонного промерзания/оттаивания далеко не всегда демонстрируют необходимую эффективность борьбы с морозным пучением. Существующие дорожно-строительные материалы для устройства морозозащитных слоев обладают рядом недостатков.

3. Для устройства морозозащитных слоев в конструкциях автомобильных дорог предлагается новый строительный теплоизоляционный материал – ГПСК (λ=0,07-0,1 Вт/м*К). Предположено, что устройство морозозащитного слоя из такого материала позволит ограничить пучение допустимыми нормами или полностью предотвратить промерзание подстилающего грунта земляного полотна.

4. Подобные материалы не применялась в автодорожном строительстве, поэтому существует явный пробел в экспериментальных исследованиях влияния морозозащитного слоя из ГПСК на морозное пучение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. Следует детально изучить способность слоя материала

выполнять теплоизоляционные свойства и снижать глубину промерзания в сложных геокриологических условиях. В связи с этим поставлены и реализованы следующие задачи:

- разработать экспериментальный стенд необходимый для моделирования и исследования процессов промерзания в конструкциях инженерных сооружений;
- на разработанном экспериментальном стенде провести исследования температурного, влажностного и деформационного режима грунтов земляного полотна инженерных сооружений, работающих в режиме промерзания, с морозозащитным слоем из ГПСК в сравнении с другими теплоизоляционными материалами и без них;
- на основании проведенных исследований обосновать конструктивные решения и разработать практические рекомендации по проектированию и модернизации конструкций автомобильных дорог на пучинистых участках с использованием ГПСК в качестве морозозащитного слоя.

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной главе приведено описание экспериментальной установки, контрольно-измерительного оборудования, используемых материалов и объектов исследования. Также описывается методика проведения экспериментальных исследований.

2.1 Разработка экспериментального стенда

С целью изучения влияния слоя из ГПСК на глубину промерзания дорожной конструкции в лаборатории тепломассообменных явлений ИКЗ СО РАН поставлена серия экспериментов на разработанном экспериментальном стенде. Разработанный экспериментальный стенд позволяет в лабораторных условиях моделировать процессы промерзания грунтов земляного полотна и проводить измерения температурного режима и морозного пучения, изучение которых имеет практическую значимость в строительстве автомобильных дорог на территориях, подвергающихся сезонному промерзанию.

Проведенные исследования построены на методе сравнения. Выполнение исследований в одинаковых условиях дает равнозначное значение влияния случайных факторов на всю серию экспериментов, что позволяет сделать качественную оценку полученных данных. Полученный результат важен как для оценки того, что рекомендуемые конструкции обеспечивают достаточный уровень защиты от сезонного промерзания, так и для адекватного сравнения теплоизоляционных материалов.

Лабораторные исследования на разработанном экспериментальном стенде позволяют многократно повторить эксперимент с соблюдением одинаковых условий, что практически невозможно сделать на реальных объектах. Предлагаемый способ экономичнее, доступнее и быстрее чем в натурных условиях на автомобильной дороге.

Внешний вид экспериментального стенда представлен на рисунке 2.1. Общая схема показана на рисунке 2.2.

Рисунок 2.1 – Внешний вид экспериментального стенда: А – основная часть экспериментального стенда, Б – контрольно-измерительное оборудование

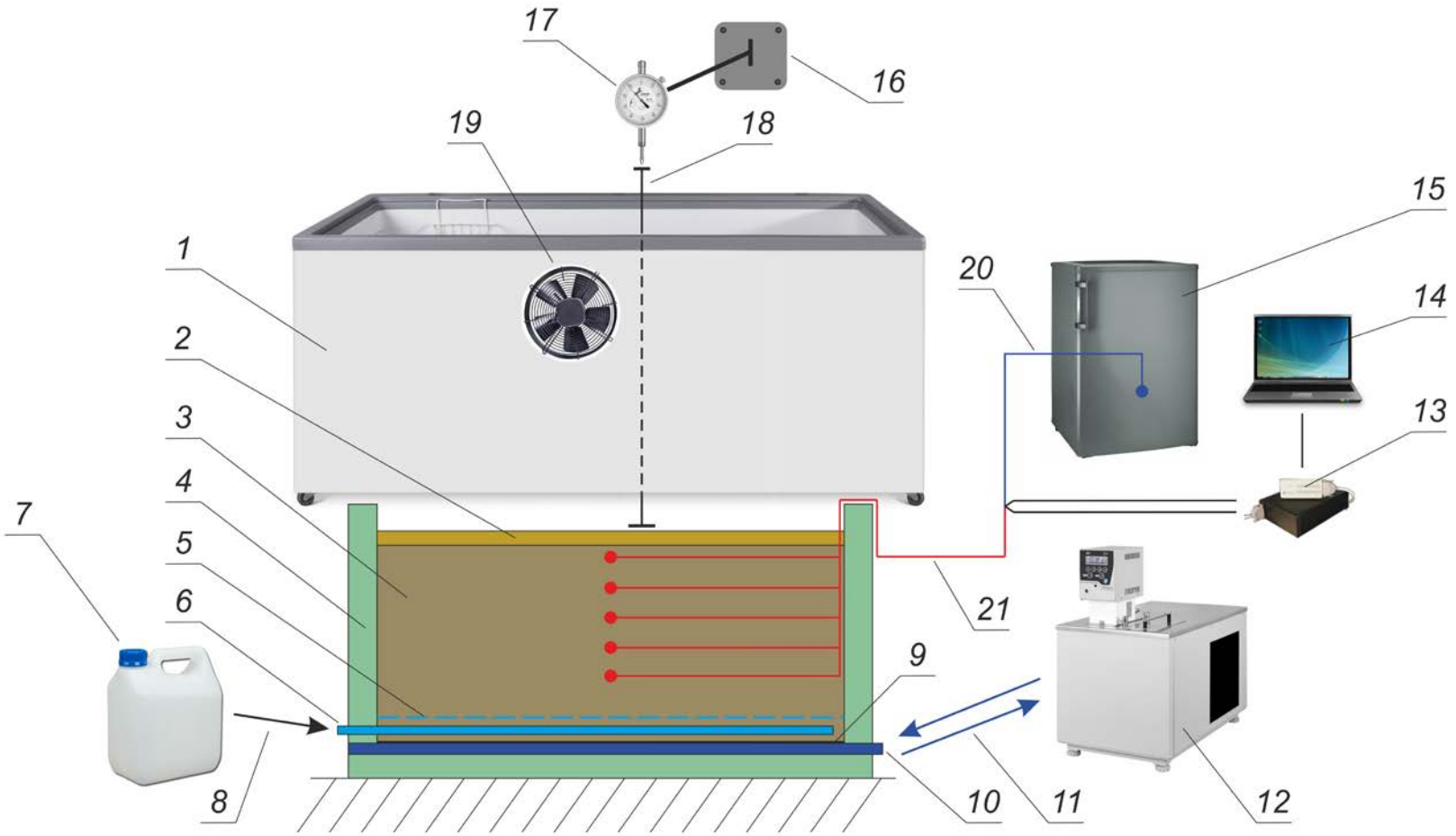


Рисунок 2.2 – Общая схема экспериментального стенда: 1 – морозильная камера, 2 – теплоизоляционный слой, 3 – грунт, 4 – грунтовый лоток, 5 – уровень грунтовых вод, 6 – перфорированная трубка, 7 – внешний резервуар для подачи воды, 8 – патрубок для подачи воды, 9 – металлическая пластина, 10 – трубчатая охладительная система, 11 – входящий и исходящий патрубки подачи хладагента, 12 – термостат, 13 - измеритель температуры многоканальный, 14 – ноутбук, 15 – холодильная камера, 16 – устройство крепления индикатора часового типа, 17 – индикатор часового типа, 18 – металлический стержень, 19 – вентилятор (внутри морозильной камеры), 20 – шлейф с нулевыми спаями разностных термопар, 21 – шлейф с измерительными спаями разностных термопар

Основным элементом экспериментального стенда является грунтовый лоток 4 с открытым верхом, в котором в качестве исследуемых образцов, размещаются фрагменты экспериментальных моделей. Размер лотка составляет 900 × 500 × 550 мм. Земляное полотно 3 в лотке устраивается путем послойной (h=25мм) укладки грунта с заданными характеристиками. В верхней части дорожной модели укладывался теплоизоляционный слой 2.

Через верхнюю открытую часть лотка 4 происходит промораживание исследуемой модели с помощью морозильной камеры 1. Предварительно дно морозильной камеры было удалено в соответствии с размерами верхней части лотка. Морозильная камера устанавливалась сверху на лоток. Дополнительно, чтобы исключить вероятность свободного теплообмена между воздухом в лаборатории и исследуемой моделью предприняты следующие мероприятия:

1. Боковые поверхности лотка снаружи и изнутри теплоизолированы пенополистирольными плитами толщиной 30 мм и 100 мм соответственно.

2. Стыки между боковыми гранями пенополистерольных плит и дном лотка были герметизированы.

3. Образовавшиеся пустоты между морозильной камерой 1 и лотком 4 закрыты тканевым теплоизоляционным материалом.

Данные мероприятия позволяют сохранить постоянные условия внутри системы, не обращая внимания на температуру окружающей среды.

С целью равномерного промораживания модели в морозильной камере производилось перемешивание воздушного массива с помощью вентилятора 19, подключенного к сети через частотный преобразователь, позволяющий регулировать скорость вращения лопастей.

Для того чтобы избежать большой градиент между температурой нижней точки грунта и температурой воздуха в морозильной камере и приблизить условия к натурным (природным), с нижней стороны лотка осуществляется поддержание постоянной температуры через специально разработанную систему охлаждения. Данная система представляет собой жидкостный низкотемпературный термостат 12, необходимый для

поддержания заданной температуры термостатирующей жидкости на протяжении всего эксперимента, и внешний циркуляционный контур 10, состоящий из восьми медных трубок диаметром 10 мм, вмонтированных в верхнюю часть плиты из пенополистирола толщиной 100 мм. Между собой трубки соединены силиконовыми шлангами. Плита из пенополистирола расположена между камерой и бетонным полом в лаборатории с целью предотвращения теплопотерь. Передача холода от термостата осуществляется посредством входящего и исходящего патрубков 11 теплоносителем ТОСОЛ А-40, способным работать при температуре до -40° С без потери своих свойств. Выбор данного теплоносителя связан с тем, что работа может осуществляться в отрицательных температурах. Используемая модель жидкостного низкотемпературного термостата «КРИО-ВТ-01» позволяет задавать температуру хладагента от -30° С до +100° С с точностью до 0,01^{o} С. Поддержание заданной температуры теплоносителя осуществляется электронным регулятором. С целью равномерного распределения температурного поля по нижней грани моделируемой дорожной конструкции дно камеры выполнено из цельного металлического листа 9, расположенного между грунтом и охладительными медными трубками.

Таким образом, конструкция экспериментального стенда обеспечивает промерзание моделей только с верхней части. С нижней стороны поддерживается постоянный температурный режим. Модель в таком исполнении максимально приближена к реальным условиям промерзания дорожной конструкции в холодный период года.

Согласно ГОСТ 28622–90 [22] испытания на морозное пучение проводятся при непрерывном подтоке воды к границе промерзания.

Нижняя часть грунтовой модели находится в контакте с внешним резервуаром воды 7. В грунтовый лоток 4 вмонтирована перфорированная трубка 6, на которую подается вода. Тем самым происходит водонасыщение нижней части грунтового массива. Внешний резервуар соединен с перфорированной трубкой посредством патрубка 8. Уровень воды 5 в

грунтовом массиве и внешнем резервуаре устанавливались равными. Разработанная система подачи воды позволяет моделировать уровень грунтовых вод.

Для накопления фактических данных по температурному режиму были изготовлены и установлены в экспериментальные модели высокоточные датчики температуры – дифференциальные термопары, позволяющие фиксировать температуру с точностью до 0,1° С. Термопары закладываются по оси перпендикулярно горизонта в центральной части опытной модели через 25 мм совместно с послойной отсыпкой грунта на поверхности отсыпаемого слоя. Каждой термопаре присваивается порядковый номер. Все датчики подключены к аналого-цифровому преобразователю, который служит для обработки и преобразования сигналов от термопары и вывода данных на ПК. Запись значений температуры осуществляется каждую минуту. Записанные данные автоматически передаются и записываются на компьютер в текстовый файл.

Фиксация величины морозного пучения осуществлялась при помощи измерителя перемещений 17 с точностью 0,01 мм. Измеритель перемещений представляет собой индикатор часового типа (ИЧ-10). Измеритель перемещений с одной стороны жестко крепился к стене лаборатории. Показания перемещений от морозного пучения передавались через металлический стержень 18 опертый непосредственно на экспериментальную модель. Нижняя часть стержня выполнена в виде пластины.

Показания с индикатора часового типа снимаются с помощью фотофиксации циферблата 2 раза в сутки.

Разработанный экспериментальный стенд позволяет:

1. Изучить температурный режим конструкций инженерных сооружений.

2. Предоставить количественные данные о процессах, возникающих в конструкциях инженерных сооружений при сезонном промерзании.

3. Оценить эффективность разных теплоизоляторов, используемых в качестве морозозащитного слоя в конструкциях автомобильных дорог.

4. Сравнить различные варианты дорожных конструкций по условию морозоустойчивости.

5. Охватить широкий круг исследуемых задач: возможность вариаций темпом замораживания/оттаивания; моделирование различных конструкций инженерных сооружений – подбор толщин слоев, грунтов земляного полотна, теплоизоляционных материалов; широкий интервал рабочих температур; высокая степень автоматизации при проведении эксперимента и т. д.

Экспериментальный стенд позволяет многократно воспроизвести эксперимент с соблюдением идентичных условий, что практически невозможно сделать на реальных объектах. Предлагаемый способ экономичнее, доступнее и быстрее чем в натурных условиях на автомобильной дороге.

Полученные результаты могут служить основой для решения практических задач, связанных со строительством и эксплуатацией инженерных сооружений, расположенных в районах с сезонным промерзанием.

2.2 Используемые материалы и оборудование

2.2.1 Конструкция грунтового лотка

Грунтовый лоток с открытым верхом представляет собой емкость в виде параллелепипеда с размером сторон 900 × 500 × 550 мм (рисунок 2.3).

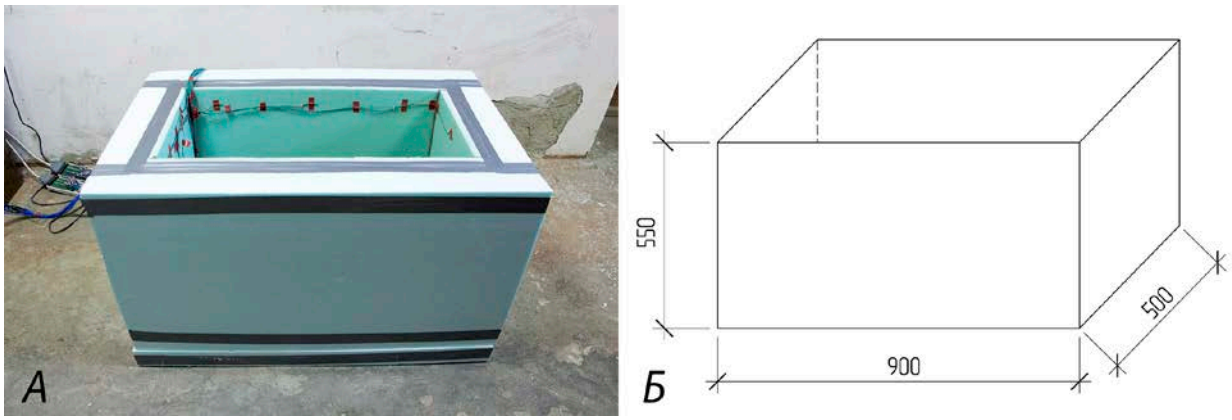


Рисунок 2.3 – Грунтовый лоток: А – внешний вид, Б – схема

Боковые грани камеры выполнены из листов ДСП, что придает жесткость конструкции. Далее боковые поверхности камеры изнутри и снаружи теплоизолировались пенополистирольными плитами толщиной 30 мм и 100 мм соответственно. Стыки в местах контакта пенополистирольных плит герметизированы во избежание изменения влажности в процессе эксперимента.

2.2.2 Морозильная камера

Для промораживания моделей использовалась автоматическая морозильная камера Caravell 535-930, обеспечивающая необходимый температурный режим. Дно морозильной камеры предварительно демонтировалось, а с верхней стороны плотно укладывались пенополистирольные плиты толщиной 50 мм (рисунок 2.4). При проведении эксперимента поддержание в морозильной камере одинаковой температуры во всех точках объема обеспечивалось установленным вентилятором (рисунок 2.5). Вращающиеся лопасти перемешивают воздух для создания однородного температурного поля. Двигатель вентилятора запитывается от источника переменного тока.

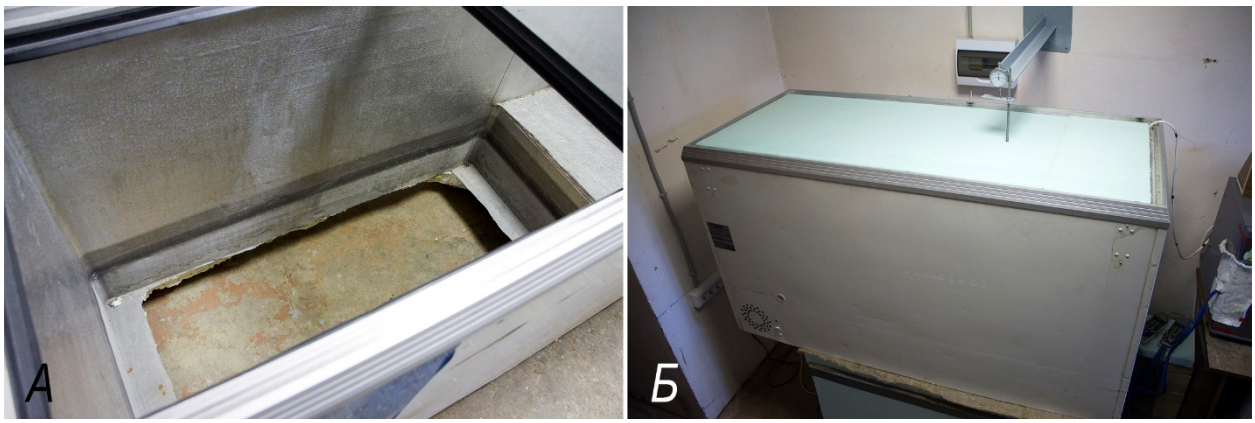


Рисунок 2.4 – Морозильная камера: А – нижняя часть, Б – верхняя часть

Рисунок 2.5 – Вентилятор, установленный в морозильную камеру

2.2.3 Термостат

Для задания и поддержания постоянной температуры с нижней грани моделей разработана циркуляционная система. Основной рабочей частью системы служит термостат «КРИО-ВТ-01», выполненный в настольном исполнении [61]. Внешний вид термостата показан на рисунке 2.6. Конструкция термостата состоит из блока регулирования температуры 1 и корпуса 2 (рисунок 2.6 А), внутри которого расположена рабочая ванна 3 и размещена холодильная машина 4 (рисунок 2.6 Б). В рабочей ванне, кроме погружаемой части блока регулирования, расположен теплообменник 5

(рисунок 2.6 Б) по которому прокачивается хладагент при работе холодильной машины [61].

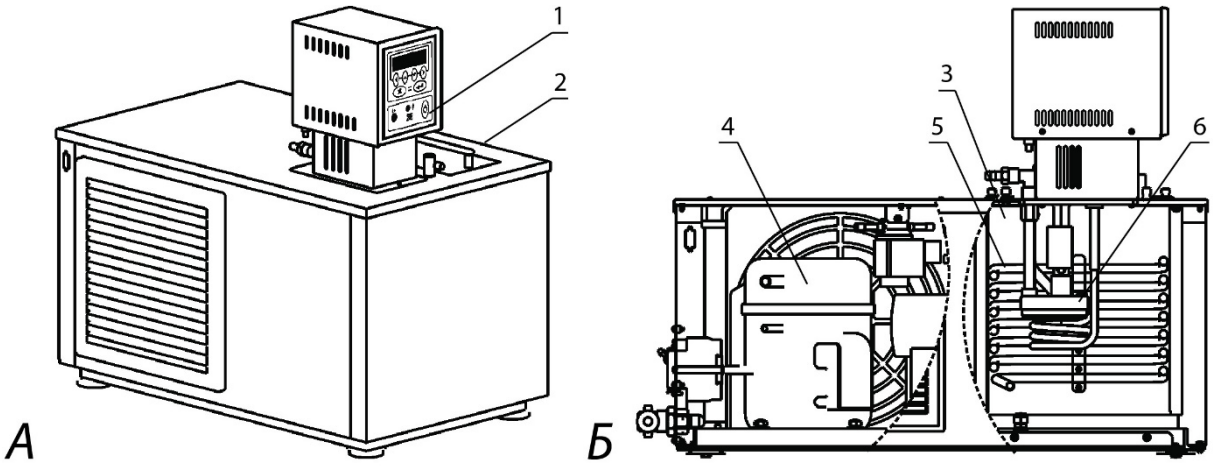


Рисунок 2.6 – Термостат «КРИО-ВТ-01»: А – внешний вид, Б – схема [61]

Работа термостата заключается в поддержании заданной температуры теплоносителя, циркулирующего в подключенном внешнем потребителе. В качестве внешнего потребителя был собран циркуляционный контур (рисунок 2.7).

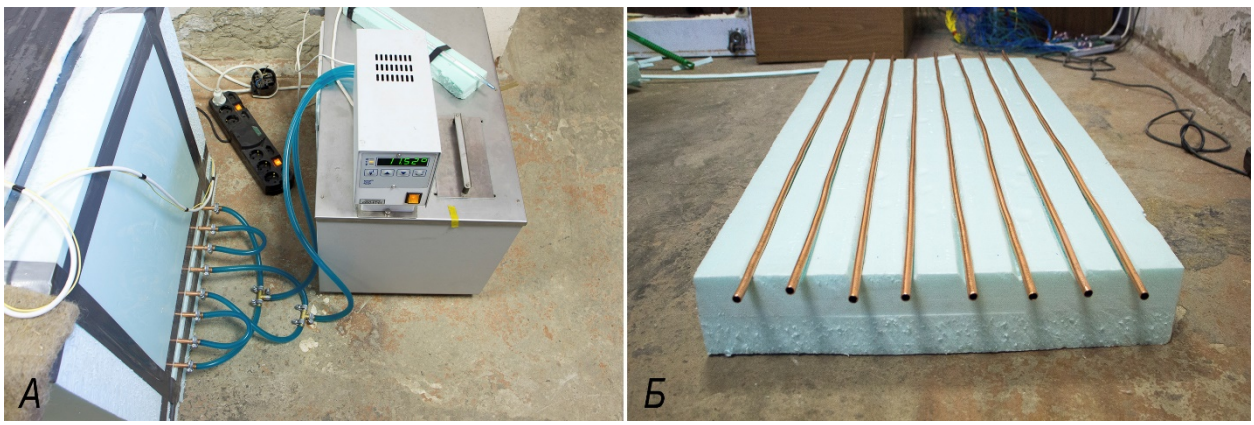


Рисунок 2.7 – Циркуляционная система: А – собранный вид, Б - монтаж медных трубок в пенополистирольную плиту

Циркуляция теплоносителя обеспечивается центробежным насосом, расположенным в блоке регулирования температуры. В качестве теплоносителян выбран ТОСОЛ А-40, способный работать при температуре

до -40° С без потери своих свойств. Поддержание заданной температуры теплоносителя осуществляется электронным регулятором, расположенными в блоке регулирования температуры 1 (рисунок 2.6 А). Охлаждение теплоносителя осуществляется с помощью холодильной машины 4 посредством теплообменника 5, установленного в рабочей ванне 3 (рисунок 2.6 Б). При проведении эксперимента на терморегуляторе выставляется требуемое значение температуры в диапазоне от -30° С до +100° С с точностью до 0,01° С.

Внешний циркуляционный контур имеет конструкцию, изображенную на рисунке 2.8.

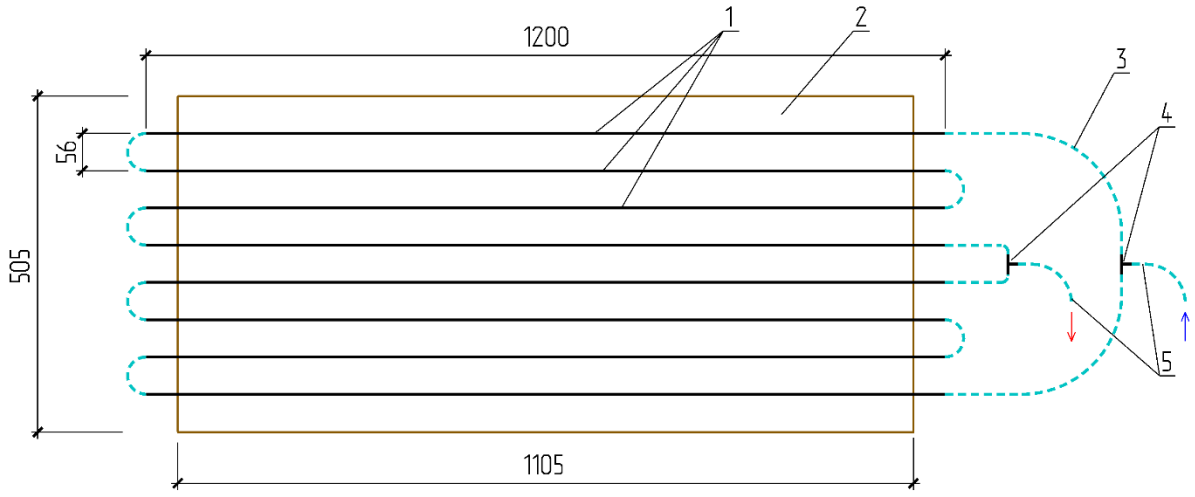


Рисунок 2.8 – Внешний циркуляционный контур: 1 – медные трубки, 2 – пенополистирольная плита, 3 – силиконовые соединительные шланги, 4 – тройник, 5 – входящий и исходящий патрубки

Циркуляционный контур представляет собой 8 медных трубок 1 диаметром 10 мм, вмонтированных в верхнюю часть пенополистирольной плиты 2 толщиной 100 мм и соединенных с термостатом и между собой посредством силиконовых шлангов 3. Расстояние между трубками 56 мм. Места соединений скреплены хомутами. Таким образом, создается замкнутое пространство для циркуляции теплоносителя. Пенополистирольная плита

расположена между камерой и бетонным полом в лаборатории и служит для изоляции от внешней среды и предотвращения теплопотерь.

Теплоноситель из термостата подается на крайние трубки, движется к центральной части и через центральные трубки подается обратно в термостат. Стрелками на рисунке 2.8 показано направление движения жидкости теплоносителя. Такое движение теплоносителя и количество трубок приняты для того, чтобы модель дорожной конструкции охлаждалась равномерно, и температура была одинакова во всех точках на нижней грани. Патрубки 5 служат для подвода и отвода теплоносителя от циркуляционного контура.

Сверху медных трубок расположена металлическая термостатированная плита для равномерного распределения температуры по нижней грани модели. В процессе работы циркуляционной системы происходит охлаждение нижней части исследуемой модели. Таким образом металлическая термостатированная плита автоматически поддерживает заданную температуру на протяжении всего эксперимента.

2.2.4 Система моделирования уровня грунтовых вод

Для подачи воды к промораживаемому массиву грунта была разработана специальная система. Внешний вид конструкции системы показан на рисунке 2.9.

Рисунок 2.9 – Система моделирования уровня грунтовых вод: А – внешняя часть системы, Б – внутренняя часть системы

В нижней части грунтового лотка укалывалась полиэтиленовая пленка для создания водонепроницаемого поддона. В боковую грань лотка монтировалась пластиковая перфорированная трубка. Созданный поддон заполнялся на высоту 7,5 см капиллярно-пористым материалом (крупнозернистый песок). Для того чтобы песчаный грунт не закупоривал отверстия в трубке, она была обернута в три слоя медицинским бинтом. На перфорированную трубку подавалась вода из внешнего резервуара через соединительный патрубок. Вся система выполнена в герметичном исполнении, чтобы не происходило утечек жидкости.

2.2.5 Грунтовые условия

Для имитации грунтовых условий в проведенных экспериментах использовался суглинистый легкий пылеватый грунт нарушенной структуры, отобранный с места естественного залегания вблизи с. Успенка Тюменской области (рисунок 2.10). Согласно таблице 1.1 суглинок легкий пылеватый относят к V группе грунта по степени пучинистости (чрезмерно пучинистый).

Такой грунт взят из следующих соображений: именно такие грунты характерны для земляного полотна автомобильных дорог на пучинистых участках. В связи с этим для обеспечения морозного пучения моделей необходимо было задействовать склонный к морозному пучению грунт.

Рисунок 2.10 – Место обора грунта (с. Успенка, Тюменская область)

Грунт отбирался с места залегания с тщательным удалением присутствующих органических остатков. При этом отслеживалась однородностью текстуры и при наличии прослоек другого грунта образцы забраковывались. Отобранный грунт транспортировался к месту проведения эксперимента.

Перед засыпкой в лоток грунт предварительно перемешивался в специально подготовленной таре до образования однородной массы. Земляное полотно в камере формировалось послойной отсыпкой по 25 мм с уплотнением и консолидацией каждого слоя. Такой подход позволил провести эксперименты в одном диапазоне грунтовых условий.

Перед использованием в экспериментальных исследованиях определялась начальная влажность как средняя по трем отобранным образцам. Влажность грунта определялась как отношение массы влаги, содержащейся в грунте, к массе сухого грунта по формуле 2.1.

$$W = m_{влаги}/m_{сух.грунта} \quad (2.1)$$

Где W – влажность грунта, %; $m_{влаги}$ – это масса влаги, гр; $m_{сух.грунта}$ – масса сухого грунта, гр.

Образцы грунта взвешивались на лабораторных весах с точностью до 0,05 г, после чего высушивались в течение 2 часов в сушильном шкафу с температурой 105-110 °С до постоянного веса и снова взвешивались. Массу влаги получали вычитанием из общей первоначальной массы массу сухого грунта. А затем по формуле 2.1 вычисляли влажность грунта. Начальная влажность грунта составляла W=17%. Данные определения влажности трех образцов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Данные определения начальной влажности грунта

№ пробы	$m_{вл.грунта}$, гр	$m_{сух.грунта}$, гр	$m_{влаги}$, гр	W, %
1	181,15	154,60	26,55	17
2	115,10	98,40	16,7	17
3	168,75	143,35	25,4	18

Для поставленных экспериментов главным образом необходимо было добиться равных условий и оценить эффективность теплоизоляторов. При моделировании данный факт соблюден, так как в каждой модели воспроизведены одинаковые грунтовые условия.

2.2.6 Определение основных физико-технических характеристик гранулированной пеностеклокерамики

В данном параграфе представлены результаты лабораторных исследований физико-технических свойств ГПСК.

ГПСК на основе опалового сырья – новый класс материалов для дорожного строительства. В настоящее время в дорожном строительстве в РФ не применяются. В нормативной документации отсутствуют данные о проведении лабораторных испытаний подобных материалов с целью определения их пригодности для дорожной отрасли.

В связи с этим была поставлена и решена задача по изучению физико-технических характеристик ГПСК. В рамках совместной работы с ФАУ «РОСДОРНИИ» в лаборатории бетонных и каменных материалов (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.22) в период май-июль 2015 года были проведены лабораторные исследования основных физико-технических свойств нового строительного материала – ГПСК. Исследования были проведены в лабораторных условиях, согласно действующим нормативным документам РФ: ГОСТ 25137-82*, ГОСТ 32496-2013, ГОСТ 9758-2012, ГОСТ 8269.0-97, ГОСТ 30108-94 [20, 23, 24, 26, 29].

Опытный образец представлял собой окатанный материал в виде гравия серо-зеленого цвета фракции 5-20 мм с исходной влажностью 0,1 % (рисунок 2.11).

Рисунок 2.11 – Внешний вид исследуемой пробы (исходная фракция 5-20 мм)

Определение зернового состава

Лабораторные исследования зернового состава проводились в соответствии с ГОСТ 9758-2012 [29]. Анализ полученных данных показывает, что фракция 20-40 мм составляла менее 5% по массе, мелкая фракция 5-10 мм – чуть более 2% по массе. Основная масса материала была представлена двумя фракциями: 10-15 мм и 15-20 мм. Для оценки особенностей его строения и свойств была выполнена детализация пробы по указанным дополнительным фракциям (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Результаты определения зернового состава

Наименование показателей	№ пробы	Размер контрольных сит, мм				
		20	15	10	5	меньше 5
Частные остатки, г	1	243,89	1101,95	3422,90	115,32	23,38
	2	141,63	632,91	2539,99	64,16	8,81
Частные остатки, %	1	4,97	22,45	69,75	2,35	0,48
	2	4,18	18,68	74,98	1,90	0,26

	среднее	4,57	20,57	72,37	2,12	0,37
Полные остатки, %		4,57	24,14	97,51	99,63	100
Полный проход, %		95,43	74,86	2,49	0,37	0

Зерновой состав материала является крайне важным показателем для насыпного теплоизолятора. Минимальное содержание фракции менее 5 мм в исследованной пробе свидетельствует о потенциальной способности слоя материала быстро дренировать избыток влаги.

Таким образом, состав фракции гравийного материала соответствует требованиям ГОСТ 32496-2013 [24] по зерновому составу.

Определение марки по насыпной плотности и истинной плотности зерен материала

Испытанная ГПСК фракции 5-20 мм характеризуется насыпной плотностью 313 кг/см^3 со средневзвешенным значением 318 кг/см^3, что позволяет отнести ее к легким заполнителям по ГОСТ 25137-82* [20]. Результаты определения насыпной плотности приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты определения насыпной плотности

Размер фракции, мм	15 – 20	10 – 15	5 – 10	5 – 20
Насыпная плотность, кг/м^3	268,00	331,00	371,00	313,00
Средневзвешенное значение	318,00			
Требования ГОСТ 32496-2013 [24]	В соответствии с табл. 3 при насыпной плотности гравия фракции 5-20 мм от 300 до 350 кг/см^3 марка по насыпной плотности – 350			

В соответствии с требованиями ГОСТ 32496-2013 [24] к легким минеральным заполнителям относятся материалы с насыпной плотностью менее 1200 кг/м^3. Данное заключение подтверждено определением средней плотности зерен гравия, которая составляет 0,495 г/см^3, т.е. меньше 2 г/см^3, что в соответствии с требованием ГОСТ 25137-82* дает основание отнести материал к легким [20].

Истинная плотность гранулированного материала составляет 2,42 г/см^3.

Определение пористости зерен

Пористость является одним из важнейших показателей нового материала. Именно благодаря высокой пористости зерен достигаются его высокие теплоизоляционные характеристики и низкая насыпная плотность.

Важно отметить, что, несмотря на значительный объем порового пространства зерен материала (от 72,2 до 81,8% в зависимости от фракции), поры являются закрытыми: паро- и водонепроницаемыми.

Результаты определения пористости зерен материала по фракциям приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты определения пористости зерен

Размер фракции, мм	Истинная плотность, ρ, г/см^3	Средняя плотность зерен, ρср, г/см^3	Пористость зерен, % $V_{пор} = (1 – ρср / ρ)*100$ %
5 – 10	2,42	0,71	73,2
10 – 15	2,42	0,51	78,8
15 – 20	2,42	0,44	81,8

Определение водопоглощения

Результаты определения водопоглощения для различных фракций по ГОСТ 9758-2012 [29] представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты определения водопоглощения

Размер фракции, мм	№ испытания	Масса пробы, г		Водопогло-щение, % по массе	Требования ГОСТ 32496-2013 [24]
		в сухом состоянии	после выдерживания в воде в течение 1 ч		
15 – 20	1	40,0	42,86	7,1	Для материалов с маркой по насыпной плотности до
	2	43,98	46,31	5,3	
	3	17,85	18,62	4,3	

	среднее значение			5,6	М400 водопоглощение в течение 1 ч не более 30% по массе
10 – 15	4	40,00	41,53	3,8	
	5	37,09	38,94	5,0	
	6	540,16	573,79	6,2	
	7	17,74	18,46	4,1	
	8	18,40	19,38	5,3	
	среднее значение			4,9	
5 – 20	9	42,40	45,0	6,1	

Результаты определения длительного водопоглощения материала представлены в таблице 2.6 и на рисунке 2.12.

Таблица 2.6 – Результаты определения длительного водопоглощения

Размер фракции, мм	Масса пробы, г							Водопоглощение,% по массе через одни сутки					
	в сухом состоянии	после выдерживания в течение одних суток											
		4	5	6	11	12	14	4	5	6	11	12	14
5 – 20	35,89	38,47	38,76	39,22	39,64	39,65	39,79	7,2	8,0	9,3	10,45	10,5	10,9

Полученные данные показывают, что интенсивное водопоглощение продолжается до 6-7 суток, в дальнейшем его интенсивность существенно снижается.

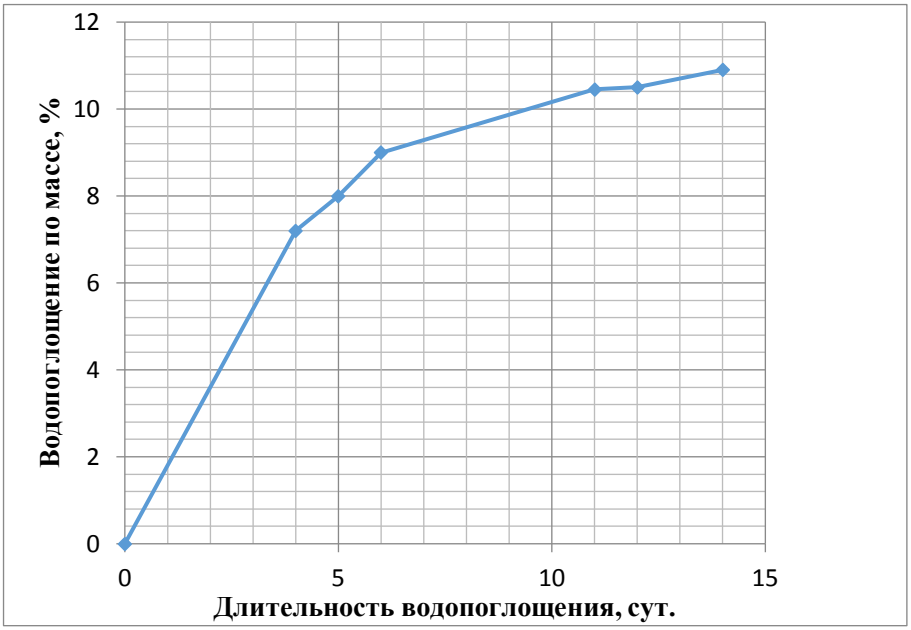


Рисунок 2.12 – Кинетика длительного водопоглощения

Определение прочности

Прочность при сдавливании в цилиндре ГПСК составляет 1,0 МПа, что соответствует марке по прочности П50. Соотношение марки по прочности его марки по насыпной плотности соответствует требованиям ГОСТ 32496-2013 [24] (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Определение прочности

Размер фракции, мм	Состояние	Средняя плотность г/см^3	Прочность при сдавливании в цилиндре, МПа	Коэффициент размягчения	Марка по дробимости по ГОСТ 32496-2013 [24]
15 – 20	сухое	0,27 0,25	1,00 1,10	0,87	При прочности при сдавливании в цилиндре от 0,7 до 1,0 марка материала по прочности – П50; коэффициент размягчения – не менее 0,75
	среднее значение		1,05		
	влажное, после 1 ч водонасыщения	-	0,91		
10 – 15	сухое	0,33 0,30	1,54 1,48	0,79	
	среднее значение		1,51		
	влажное, после 1 ч водонасыщения	-	1,18		
5 – 20	сухое	0,313	0,58	0,9	

			0,59		
	среднее значение		0,60		
	влажное, после 1 ч водонасыщения	0,321	0,56		
средневзвешенное значение			1,00		

Определение морозостойкости

Результаты определения морозостойкости материала представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Определение морозостойкости

Размер фракции, мм	Масса пробы, г		Потеря массы, %	Количество циклов испытания	Марка по морозостойкости
	до испытания	после испытания			
15 – 20	130,73 144,14	123,29 139,32	5,69 3,34	25	При потере массы не более 8% марка по морозостойкости – F25
	среднее значение		4,50		
10 – 15	135,55 147,61	133,33 144,63	1,64 2,02		
	среднее значение		1,83		
5 – 20	185,24	193,5	4,46		
Средневзвешенное значение			3,50		

При допустимой потере массы 8% после 25 циклов испытаний по ГОСТ 32496-2013 [24] полученные результаты испытаний свидетельствуют о высокой морозостойкости ГПСК.

Определение дробимости и коэффициента фильтрации дробленого отсева ГТМ «ДиатомИК» фракции 0-5 мм

Величина давления при определении дробимости по ГОСТ 9758-2012 [29] соответствует уровню давления легких катков (до 5,0 МПа) на укладываемый слой ГПСК.

При определении дробимости ГПСК количество дробленого отсева фракции 0,5 мм составило 11%, что превышает традиционно допустимое значение для готовых смесей – 10%. В этом случае необходимо определение коэффициента фильтрации дробленого отсева фракции 0-5 мм (таблица 2.9).

Таблица 2.9 – Определение величины дробления

Масса навески образца, г	Масса дробленой части меньше 5 мм	
	г	%
580,55	64,21	11%

Результаты определения коэффициента фильтрации свидетельствуют о том, что при дроблении зерен ГПСК в процессе укладки и уплотнения дренирующие свойства слоя не изменяются. При этом коэффициент фильтрации отсева дробления составляет 4 м/сут., что соответствует классификации сыпучего материала как сильноводопроницаемого и непучинистого в соответствии с требованиями ОДН 218.046-01 [69].

Проведенные исследования по оценке возможности применения ГПСК в дорожном строительстве, показали следующее:

1. При марке по насыпной плотности М350 ГПСК фракции 5-20 мм относится к легким. В соответствии с требованиями ГОСТ 32496-2013 [24] к легким относятся минеральные заполнители с насыпной плотностью менее 1200 кг/м^3. Данное заключение подтверждено определением средней плотности зерен гравия, которая составляет 0,495 г/см^3, т.е. меньше 2 г/см^3, что в соответствии с требованием ГОСТ 25137-82* [20] дает основание отнести материал к легким. Исходя из полученных данных все последующие испытания проведены в соответствии с ГОСТ 9758-2012 [29], ГОСТ 32496-2013 [24] (взамен ГОСТ 9757-90).

2. ГТМ «ДиатомИК» удовлетворяет требованиям ГОСТ 32496-2013 [24] по следующим показателям:

- зерновому составу;

- насыпной плотности (марка М350);

- прочности при сдавливании в цилиндре (марка по прочности П50);

- показателям устойчивости структуры ко всем видам распадов;

- суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов (класс материала 1);

- по морозостойкости (F25);

- по устойчивости к размягчению при увлажнении ($К_{разм}$ =0,9);

- по коэффициенту фильтрации отсева дробления ($К_{ф}$=4 м/сут).

3. Следует отметить, что по показателям прочности, устойчивости структуры, морозостойкости и неразмокаемости ГПСК превосходит свойства аналогичных по прочности керамзитового, шунгизитового и аглопоритового гравия.

4. Учитывая возможность некоторого дробления зерен заполнителя при укладке и уплотнении конструктивного слоя дорожной одежды из легкой ГПСК, был исследован полученный отсев дробления по зерновому составу и определен его коэффициент фильтрации. Не смотря на содержание в отсеве частиц мельче 0,05 мм более 5%, полученный отсев является сильноводопроницаемым материалом. Его содержание в уплотненном слое не влияет на дренирующие свойства уложенного слоя, что подтверждает способность слоя ГПСК выполнять не только теплоизоляционную, но и дренирующую функции.

5. Полученные результаты исследований ГПСК фракции 5-20 мм, полученного из опал-кристобалитовых горных пород, позволяют сделать вывод о возможности применения этого материала в дорожном строительстве при устройстве морозозащитных, теплоизоляционных и дренирующих слоев.

2.3 Контрольно-измерительная аппаратура

2.3.1 Изготовление дифференциальных термопар

Для накопления фактических данных по температурному режиму грунта в экспериментальных моделях были изготовлены 32 дифференциальных медь-копелевых термопары. Термопара (термоэлектрическая пара, термоэлемент) – это датчик температуры, состоящий из двух сваренных (спаянных) разнородных по составу проводников тока, называемых термоэлектродами. Медь-копелевую термопару применяют при измерении температур от -200 до +100 °С [25].

Термопара состоит из двух ветвей медного проводника 4 и соединительного копелевого провода 3 (рисунок 2.13). У дифференциальной термопары отличают рабочее соединение 2 (спай) подлежащее воздействию температуры, которую необходимо измерить и свободное соединение 1 (спай) находящееся при известной температуре, с которой сравнивают измеряемую температуру [25].

При измерениях свободный спай термопары погружен в сосуд Дьюара 5 с тающим льдом в калориметрической жидкости (t = О °С). Рабочий спай помещен в среду измеряемой температуры 6. Два свободных конца 4 соединяют с измерительным прибором 7.

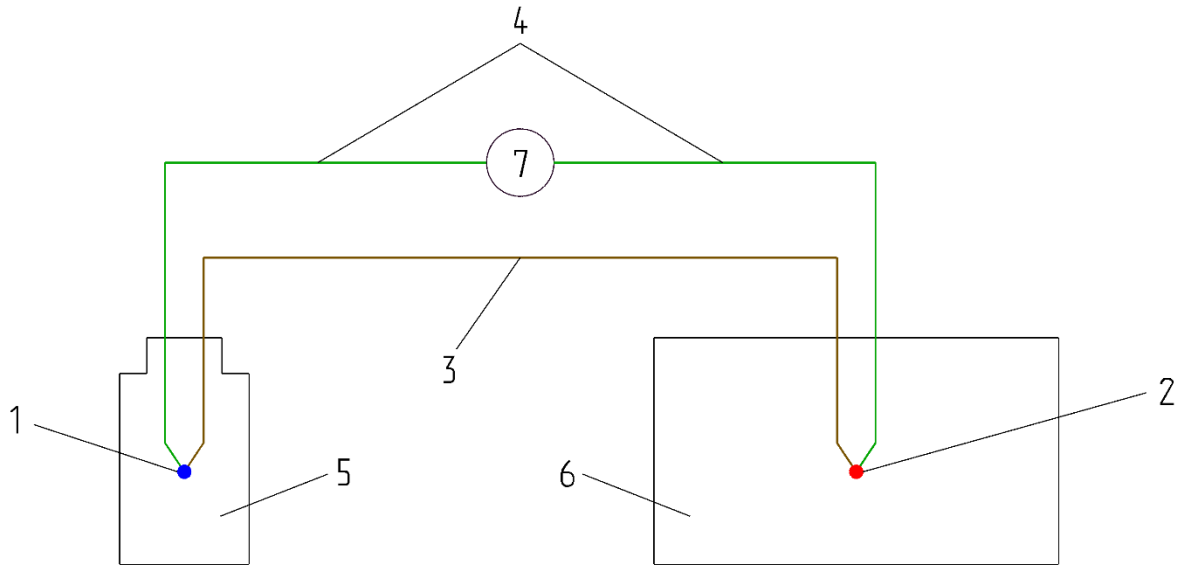


Рисунок 2.13 – Схема дифференциальной термопары: 1 – свободный спай, 2 – рабочий спай, 3 – соединительный копелевый провод, 4 – медный провод, 5 – сосуд Дьюара, 6 – среда с измеряемой температурой

Соединение термоэлектропроводов 3 и 4 (рисунок 2.14) осуществлялось электрической сваркой графитовым стержнем. Диаметр спая 1 не превышал 0,8 мм. Перед изготовлением термопары оголенные концы проводов отжигались для снятия разнообразных напряжений. Качество спаев проверялось внешним осмотром через увеличительное стекло.

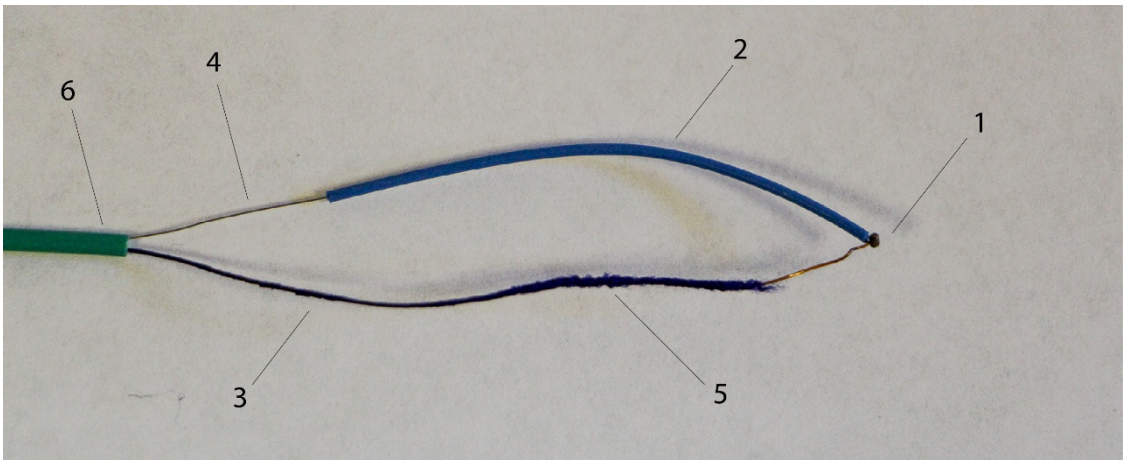


Рисунок 2.14 – Соединение термоэлектропроводов: 1 – спай, 2 – кембрик, 3 – медный провод, 4 – копелевый провод, 5 – нитяная изоляция медного провода, 6 – термоусадочная трубка

Спаянные провода необходимо тщательно защитить от возможных загрязнений, механического и влажностного воздействия и от контакта, как друг с другом, так и с другими проводниками.

Используемая для изготовления термопар медная проволока имеет нитяную изоляцию 5, поэтому исключение соприкосновения с копелевым проводом необходимо только в 5 см от спая. Разделение оголенных концов осуществлялось с помощью кембрика 2.

После спайки все провода помещаются в термоусадочные трубки 6 и фиксируются потоком нагретого воздуха с помощью строительного фена. В термоусадочные трубки с концов термопар плотно устанавливали заглушки длиной 5 мм таким образом, чтобы они не касались спая. Дополнительно концы термопар заливались гидроизолирующим клеем с целью исключения попадания воды к спаям (рисунок 2.15). Каждой термопаре был присвоен порядковый номер (рисунок 2.16).

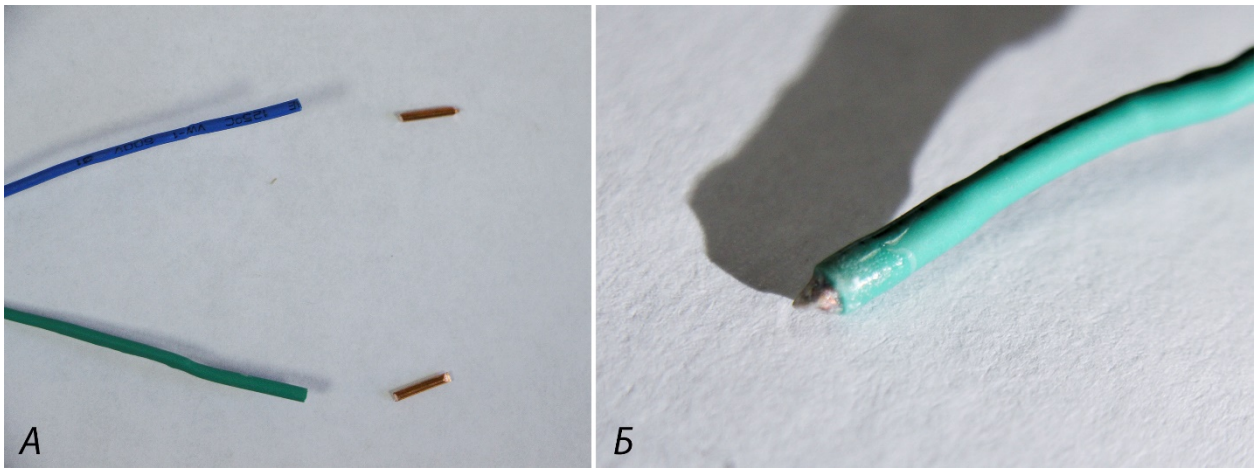


Рисунок 2.15 – Спай термопары в герметичном исполнении: А – установка гидроизолирующих заглушек, Б – готовый гидроизолированный спай

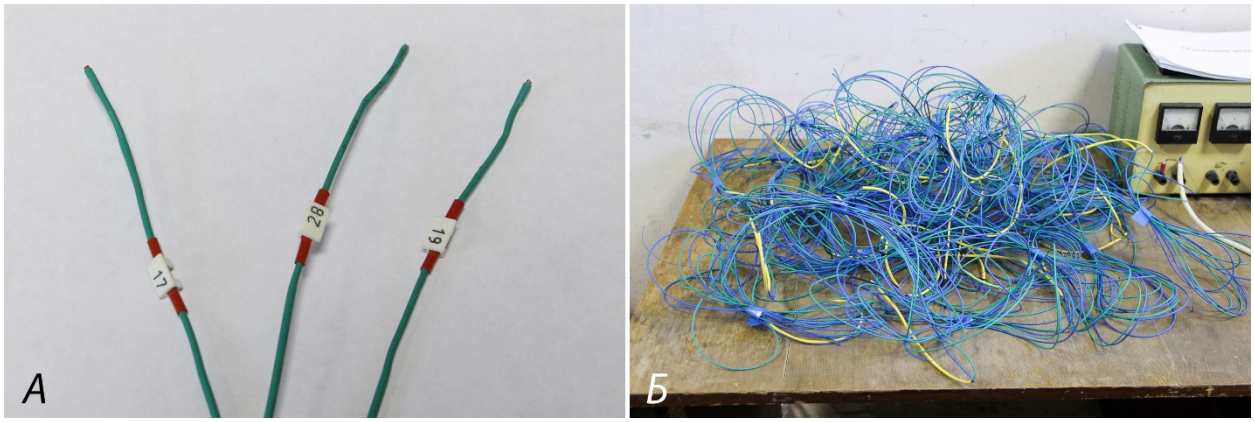


Рисунок 2.16 – Дифференциальный термопары: А – пронумерованные термопары, Б – в готовом виде

Свободные спаи собирались в один шлейф и опускались в специально изготовленный сосуд Дьюра (рисунок 2.17). В качестве калориметрической жидкости использовалась дистиллированная вода. Поддержание температуры жидкости около 0 °С на протяжении всего эксперимента достигается за счет установки сосуда Дьюара с колотым льдом в холодильную камеру – длительный процесс таяния льда.

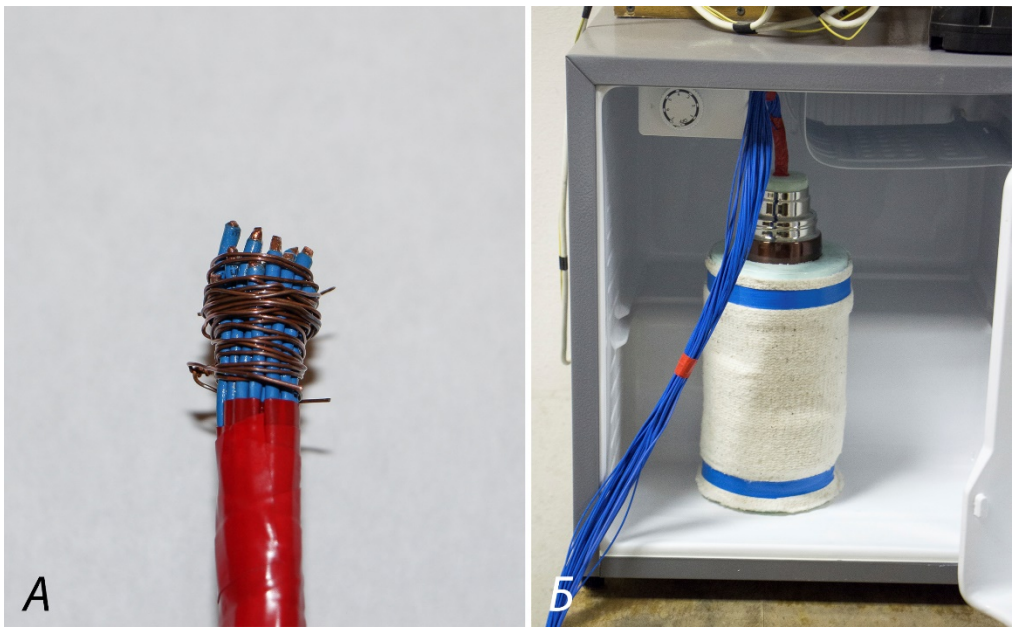


Рисунок 2.17 – Установка свободных концов термопар в сосуд Дьюара: А – шлейф со свободными концами термопар, Б — сосуд Дьюара в холодильной камере

2.3.2 Аналогово-цифровой преобразователь

Для обработки данных поступающих с дифференциальных термопар и последующей передачи данных на ПК использовался аналогово-цифровой (АЦП) преобразователь ИТ-2 производства ОАО НПП «ЭТАЛОН» (рисунок 2.18). Данный прибор имеет паспорт и проходит тарировку на заводе изготовителе.

Измеритель температуры многоканальный ИТ-2 предназначен для измерения напряжения (мВ) или температуры (°С) по 32 каналам при помощи подключаемых к прибору термопар (рисунок 2.19) с последующей передачей данных на ЭВМ. Сбор показаний с термопар ведется в автоматическом режиме. Запись показаний происходит каждые 30 секунд. Результаты измерения в мВ, Вт/м2 или °С выводятся на экран компьютера в виде таблицы [1].

Рисунок 2.18 – Измеритель температуры многоканальный ИТ-2 [1]

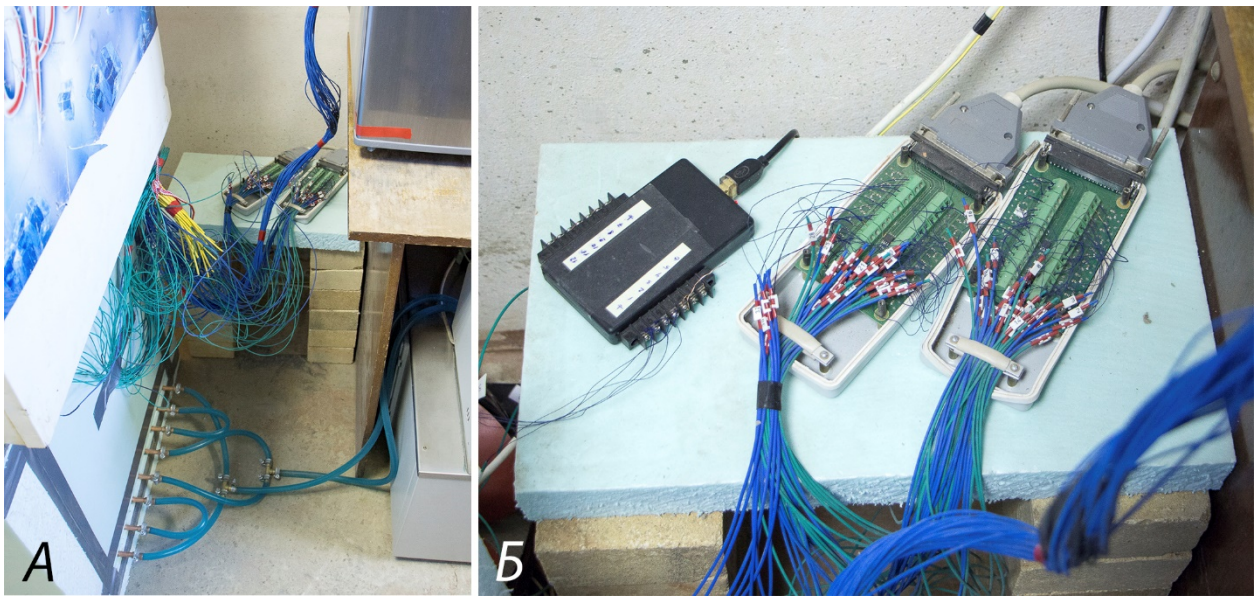


Рисунок 2.19 – Подключенные термопары А – общий вид, Б – 2 клеммные коробки по 16 каналов

2.3.3 Градуировка термопар

Градуировка термопар заключается в установлении зависимости (K) величины термоэлектродвижущей силы (ЭДС) от разницы температур спаев термопары. В интервале температур от -30 до +300 °С градуировку термопар можно проводить по эталонному стеклянному ртутному термометру [27].

Градуировка термопар осуществлялась следующим образом. Свободные спаи термопар погружались в сосуд со льдом Т=0 °С. Тающий лед дает возможность достаточно просто и точно фиксировать одну из температур относительно которой выполняется градуировка. Рабочие спаи вместе с эталонным ртутным стеклянным термометром при комнатной температуре помещались в коробку теплоизолированную ватой (рисунок 2.20). Такая конструкция обеспечивает заданную температуру в течение 1 часа с предельными отклонениями ±0,1 °С, что позволяет проводить измерения с высокой точностью.

Рис. 2.20 – Укладка рабочих спаев термопар в теплоизолированную коробку

Перед снятием показаний система выдерживалась в течении 1 часа. Через 1 час записывали показания термометра (температура, t°C) и термопар (милливольт (U), mV). Показания термопар приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Показания ЭДС термопар при проведении градуировки в теплоизолированной коробке

№ термопары	1	2	3	4	5	6	7	8
U, mV	1005	1006	1006	1006	1007	1006	1006	1007
№ термопары	9	10	11	12	13	14	15	16
U, mV	1006	1005	1006	1007	1006	1006	1006	1006
№ термопары	17	18	19	20	21	22	23	24
U, mV	1006	1006	1006	1006	1005	1005	1006	1006
№ термопары	25	26	27	28	29	30	31	32
U, mV	1006	1007	1006	1005	1006	1006	1006	1005

По полученным значениям находим среднее арифметическое $U_{ср}$, в данном случае оно составляет 1006 милливольт. При этом показания термометра составили 21,4 °С. Находим поправочный коэффициент по формуле $K=t/U_{ср}=21,4/1006=0,0213$°С/милливольт.

Для того чтобы убедиться в точности полученных данных был поставлен второй опыт по градуировке термопар в котором рабочие спаи вместе с эталонным ртутным стеклянным термометром помещались в сосуд с водой, находящийся при комнатной температуре (рисунок 2.21). Показания термопар приведены в таблице 2.11.

Рисунок 2.21 – Монтаж рабочих спаев термопар в сосуд с водой

Таблица 2.11 – Показания ЭДС термопар при проведении градуировки в сосуде с водой

№ термопары	1	2	3	4	5	6	7	8
U, mV	973	973	973	973	974	973	973	971
№ термопары	9	10	11	12	13	14	15	16
U, mV	973	974	974	973	973	973	973	974
№ термопары	17	18	19	20	21	22	23	24
U, mV	974	974	973	973	972	974	972	973
№ термопары	25	26	27	28	29	30	31	32
U, mV	973	973	973	973	973	972	973	972

Среднее арифметическое значение $U_{ср}$ составило 973 милливольта. При этом показания термометра составили 20,7 °С. Находим поправочный коэффициент по формуле $K=t/U_{ср}=20,7/973=0,0213$°С/милливольт.

Поправочный коэффициент в обоих опытах получился одинаковым, что говорит о высокой точности градуировки.

Далее в программном комплексе на ПК в поле ввода поправки необходимо ввести полученную поправку показаний. Таким образом показания с термопар записываются в текстовый файл сразу в градусах.

При проведении градуировки термопар использовались повереные органами государственной метрологической службы и аккредитованные в установленном порядке ртутные стеклянные термометры с ценой деления 0,1 °С и погрешностью по [28].

Одновременно с градуировкой наблюдалась работоспособность и герметичность термопар.

2.3.4 Индикатор часового типа

В ходе промораживания экспериментальных моделей вертикальную деформацию морозного пучения измеряли индикаторами часового типа (ИЧ-2) с ценой деления 0,01 мм.

ИЧ предназначены для измерения линейных размеров абсолютным и относительным методами, определения величины отклонений от заданной геометрической формы и взаимного расположения поверхностей на промышленных предприятиях.

Индикторы представляют из себя цилиндрический корпус со встроенным часовым механизмом, круговой шкалой внутри ободка и двумя втулками, расположенными в диаметральной плоскости корпуса, служащими направляющими для измерительного стержня, который передает измеряемое значение параметра через часовой механизм стрелке. По положению стрелки относительно шкалы производится отсчет величины измеряемого параметра.

Совмещение стрелки с любым делением шкалы (настройка на нуль) производится посредством ободка. Нижняя втулка (гильза) служит присоединительным элементом для установки индикатора в стойки, штативы и другие устройства.

Установка для фиксирования подъёма грунта при морозном пучении имеет конструкцию, изображенную на рисунке 2.22. К стене лаборатории прикреплена горизонтальная стойка, к которой фиксировался ИЧ-2. Между ИЧ-2 и моделью устанавливался металлический стрежень таким образом, чтобы перемещения грунта через него передавались на ИЧ-2. К низу стержня прикреплялась квадратная пластина с длиной стороны 10 см, которой он соприкасался с экспериментальной моделью. Подъем и опускание модели передавалось стержню, а показания стрелки ИЧ-2 давали возможность определить высоту поднятия модели под стержнем.

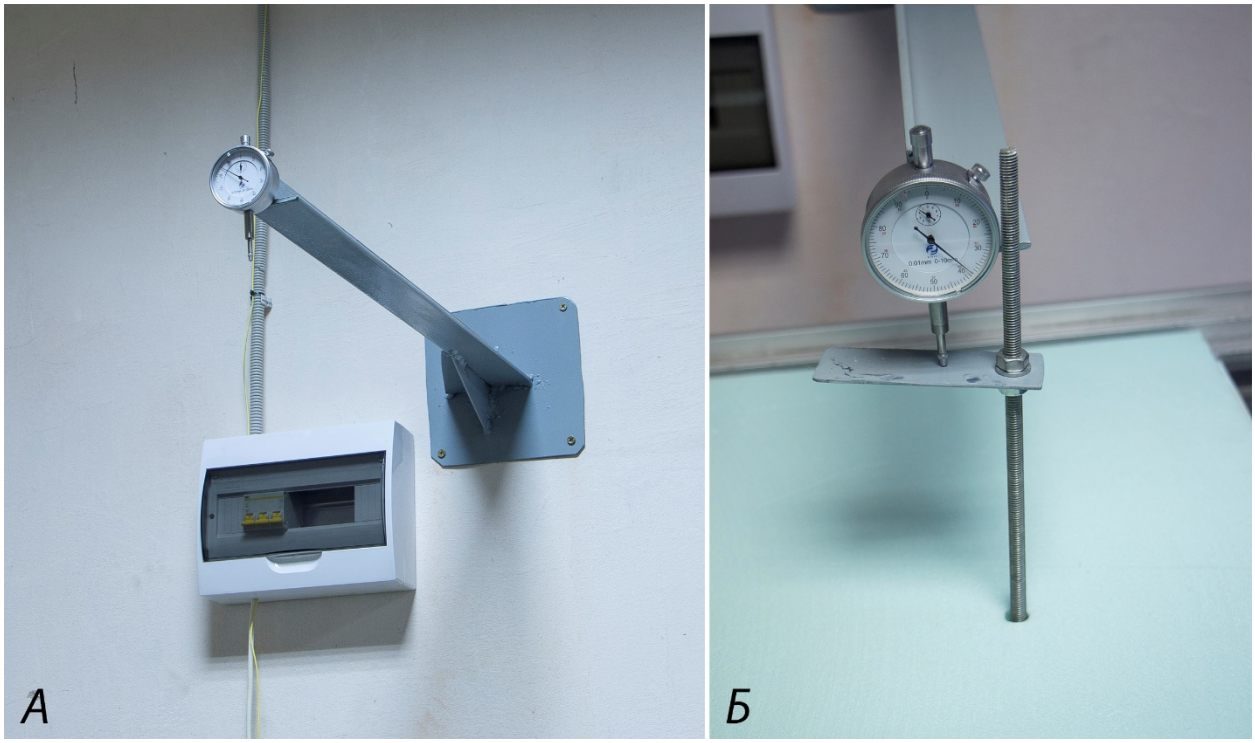


Рисунок 2.22 – Конструкция установки для измерения величины морозного пучения: А – горизонтальная стойка, Б – индикатор часового типа в рабочем положении

2.4 Проведение экспериментальных исследований

2.4.1 Описание экспериментальных моделей

Эксперименты проводились для 3 моделируемых конструкций: модель с пенополистиролом, модель с ГПСК фракции 5-10 мм и в дополнение к двум моделям с устройством слоя каждого из перечисленных теплоизоляционных материалов, была организована одна дополнительная модель без теплоизолятора. Конструкции испытуемых моделей показаны на рисунке 2.23.

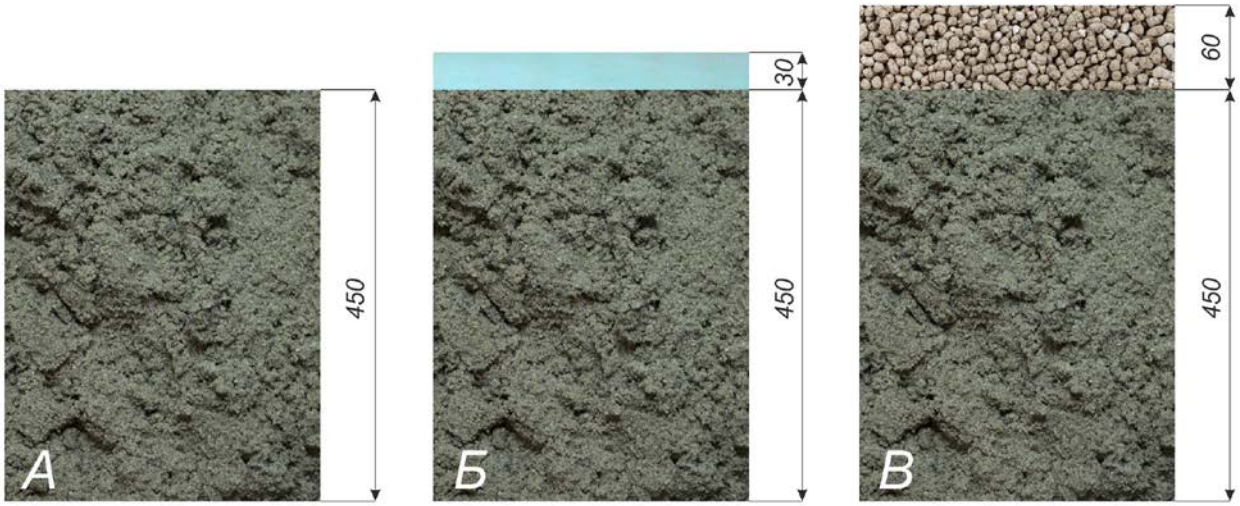


Рисунок 2.23 – Экспериментальные модели: А – модель без теплоизоляции, Б – модель с пенополистиролом, В – модель с гранулированной пеностеклокерамикой

В качестве земляного полотна использовался суглинок легкий пылеватый с изначальной влажностью 17%, приготовленный по методике, описанной в параграфе 2.2.5. В модели с пенополистиролом толщина морозозащитного слоя составила 30 мм, так как это стандартная толщина пеноплистирольной плиты, отпускаемой с завода. В связи с тем, что коэффициент теплопроводности ГПСК примерно вдвое превышает коэффициент теплопроводности пенополистирола, в модели с ГПСК толщина морозозащитного слоя была принята вдвое больше – 60 мм. Характеристики материалов, взятых для испытаний, представлены в таблицах 1.2 и 1.7.

Предполагается, что модель без теплоизолятора должна промерзать на значительную глубину, что инициирует процессы морозного пучения. Модели с устройством теплоизоляционного слоя должны промерзать на значительно меньшую глубину (при этом незначительное промораживание земляного полотна является приемлемым [69]).

Пенополистирол укладывался на подготовленное суглинистое земляное полотно одной плитой в соответствии с размерами открытой части лотка 900×500 мм. В модели с ГПСК засыпка материала производилась на всю площадь подготовленного суглинистого земляного полотна из гранул фракции 5-10 мм.

2.4.2 Схема установки датчиков в экспериментальные модели

В каждой экспериментальной модели термопары устанавливались в 3 плоскостях А-А, Б-Б и В-В (рисунок 2.24).

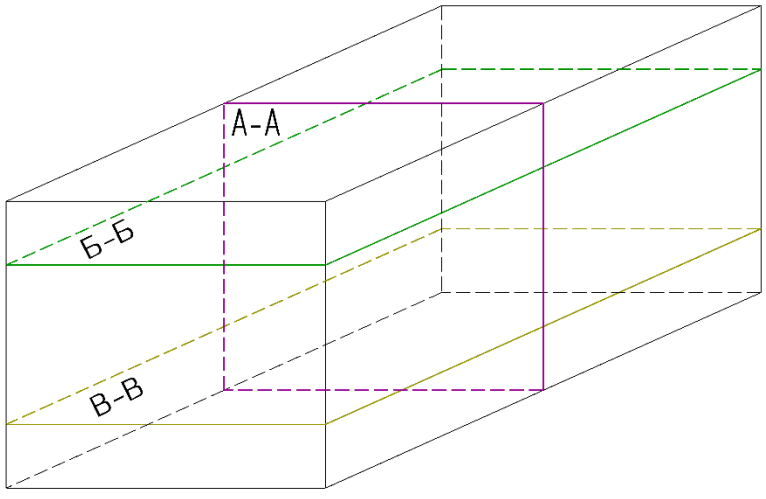


Рисунок 2.24 – Плоскости расположения термопар

В плоскости А-А термопары устанавливались по оси перпендикулярно горизонта через каждые 2,5 см совместно с послойной отсыпкой грунта на поверхности отсыпаемого слоя. На рисунке 2.25 показана схема расположения

и нумерация термопар в каждой из 3-х экспериментальных моделях (Т-1, Т-2, … Т-20 – номер термопары).

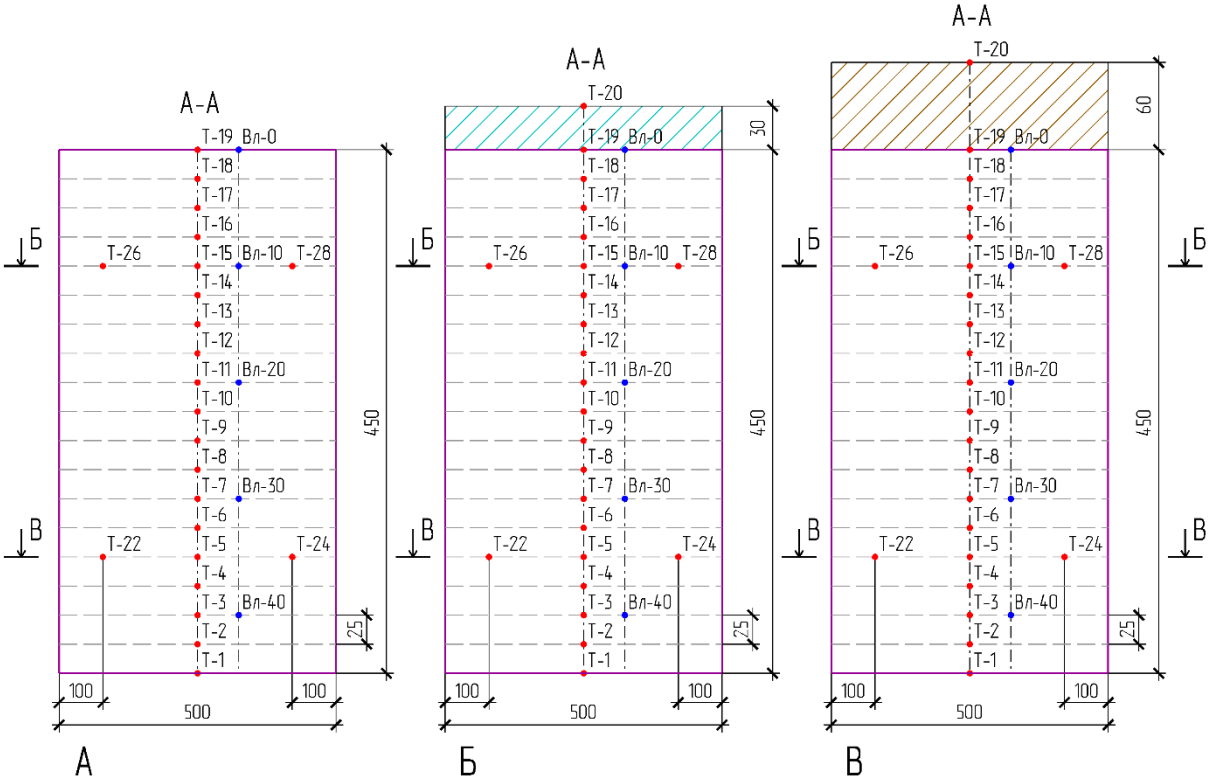


Рисунок 2.25 – Схема расположения термопар в плоскости А-А и точек отбора проб грунта: А – модель без теплоизолятора, Б – модель с пенополистиролом, В – модель с гранулированной пеностеклокерамикой

В плоскостях Б-Б и В-В закладка датчиков необходима для контроля боковых влияний от воздействия температуры воздуха в лаборатории на ход эксперимента. Закладка термопар производилась по схеме, изображенной на рисунке 2.26. Плоскость Б-Б расположена на глубине 10 см, а плоскость В-В на глубине 35 см. Термопары устанавливались в 10 см от боковых стенок лотка по горизонтальным осям относительно центра опытных конструкций.

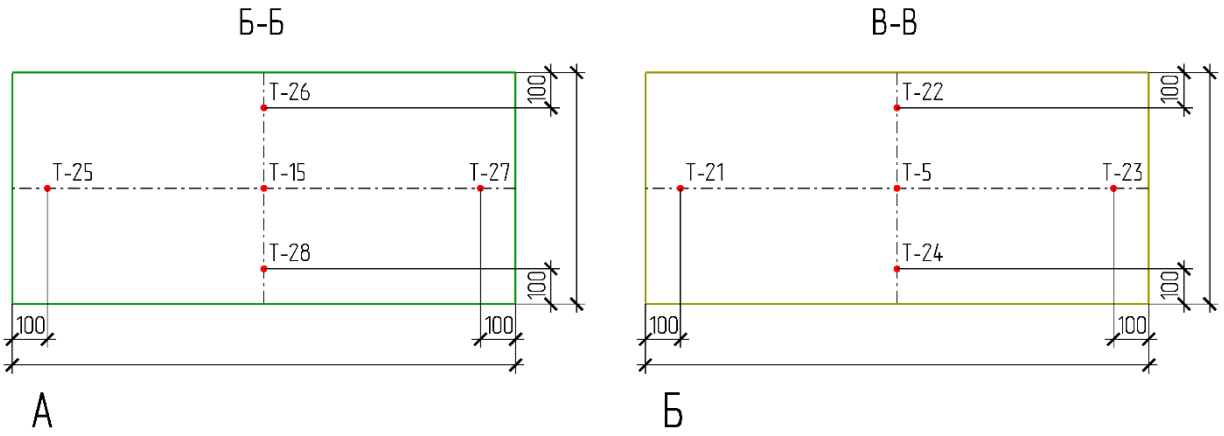


Рисунок 2.26 – Схема расположения термопар: А – плоскость Б-Б, Б – плоскость В-В

2.4.3 Порядок проведения экспериментов

1. В нижнюю часть лотка помещался капиллярно-пористый материал (крупнозернистый песок) толщиной 7,5 см. На верхнюю часть слоя укладывался водопропускаемый тканевый материала для предотвращения перемешивания различных грунтовых сред.

2. Приготовленный для эксперимента влажный грунт (W=17%) послойно укладывался в лоток под некоторым усилием для устранения воздушных прослоек и пустот. Совместно с укладкой грунта устанавливались термопары согласно описанным выше схемам (рисунок 2.27). На момент закладки датчиков они уже были пронумерованы, подключены к АЦП и готовы к работе. Для каждого эксперимента использовался новый грунт, доставленный с места отбора.

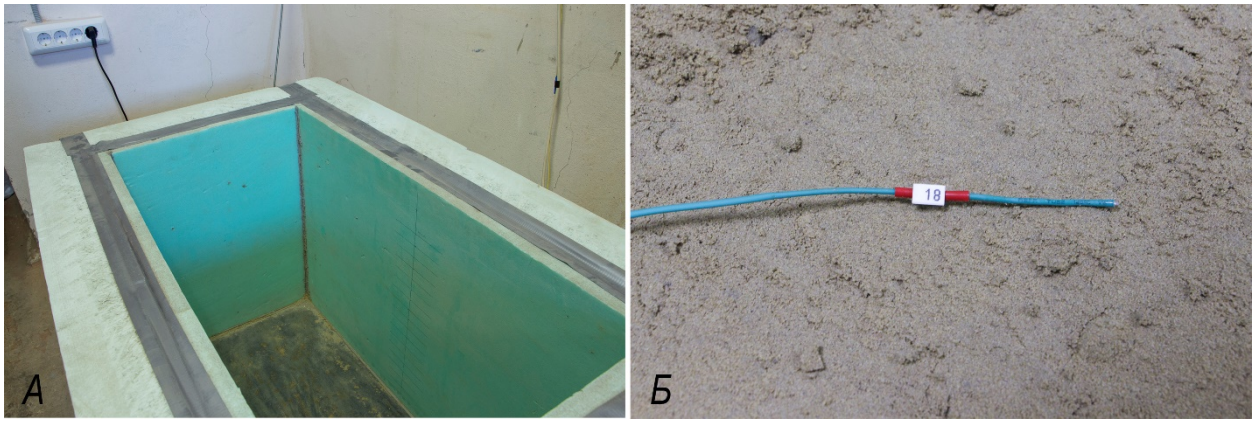


Рисунок 2.27 – 2 этап проведения эксперимента: А – лоток перед укладкой грунта, Б – закладка термопары

3. В систему моделирования уровня грунтовых вод добавлялась вода.

4. Уложенный послойно влажный грунт оставлялся на 12 часов для восстановления локального перераспределения полей влажности, возникших в ходе укладки до равномерного состояния. А также для достижения нулевой величины плотности теплового потока в слоях массива грунта, а, следовательно, и равенства температур в каждой точке по объему. Снятие данных по температурному режиму осуществлялось по установленным термопарам. Таким образом начальная температура t_0 массива грунта на момент проведения эксперимента по показаниям термопар была положительна и постоянна по глубине и составляла 22 °С.

5. На следующем этапе предусматривалась укладка теплоизоляционного материала (рисунок 2.28). В модель без теплоизолятора (эксперимент №1) дополнительно на поверхность грунта укладывалась полиэтиленовая пленка во избежание изменения влажности в процессе эксперимента за счет испарения. С этой же целью засыпка ГПСК в эксперименте №3 производилась на полиэтиленовую пленку. В эксперименте № 2 пенополистирол укладывался сразу же на подготовленный грунт.

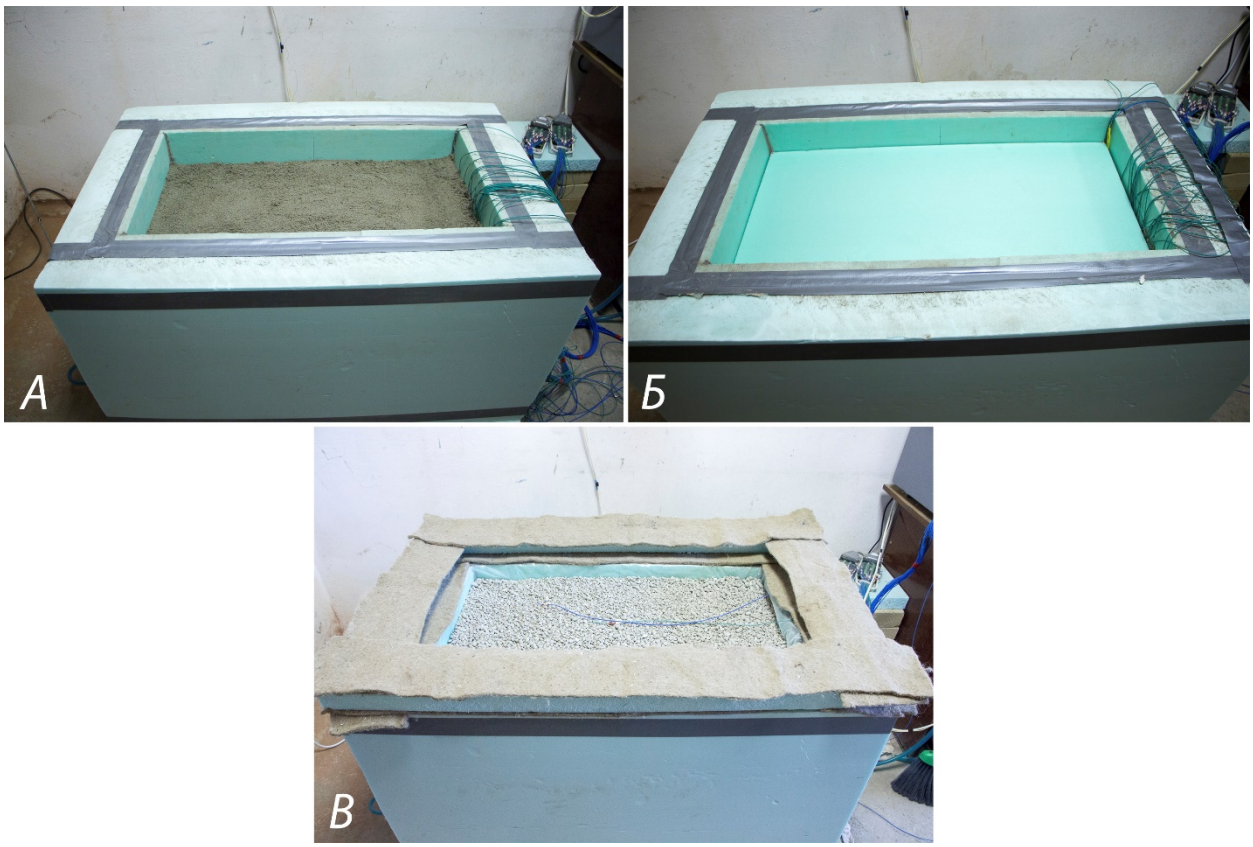


Рисунок 2.28 – Подготовленные к проведению эксперимента модели: А – модель без теплоизолятора, Б – модель с пенополистиролом, В – модель с гранулированной пеностеклокерамикой

6. Перед установкой морозильной камеры на боковые грани лотка укладывались теплоизоляционные прослойки из плотного тканевого материала, чтобы избежать больших щелей в местах соприкосновения морозильной камеры с лотком. Сверху на лоток устанавливалась морозильная камера. Дополнительно с внутренней стороны камеры тщательно изолировались образовавшиеся щели между морозильной камерой и лотком мягким тканевым материалом во избежание теплообмена с внешней средой в процессе эксперимента (рисунок 2.29).

Рисунок 2.29 – Изоляция щелей между морозильной камерой и лотком мягким тканевым материалом

7. На подготовленные подставки в центр морозильной камеры устанавливался и фиксировался вентилятор. Далее монтировался металлический прут с квадратной подножкой на грунт или слой теплоизоляционного материала (в зависимости от модели) и одновременно сверху морозильная камера закрывалась теплоизолирующей крышкой. Прут крепился к датчику перемещений (ИЧ-2) для измерения вертикальных деформаций (рисунок 2.30).

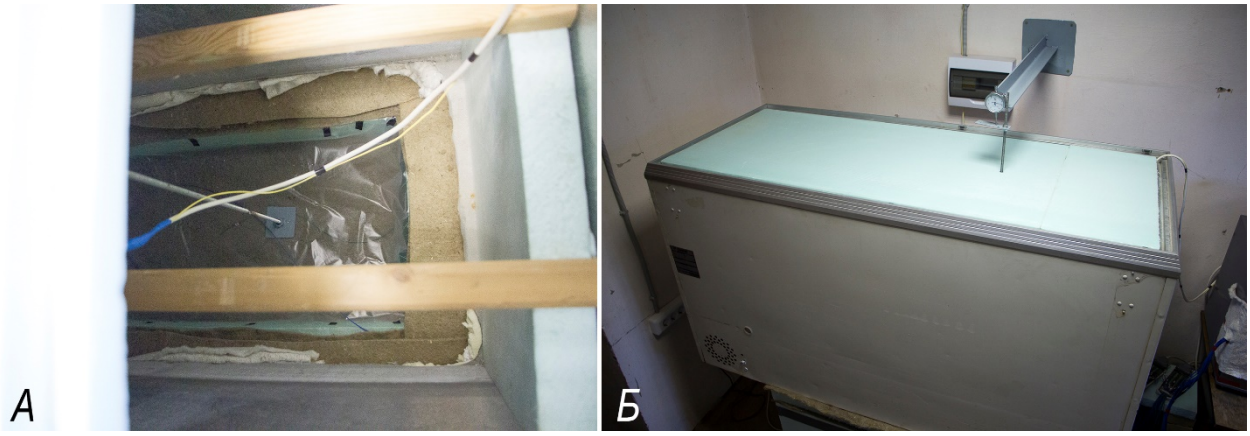


Рисунок 2.30 – 7 этап проведения эксперимента: А – установка металлического прута, Б – монтированная теплоизолирующая крышка

8. На следующем этапе включали термостат и выставляли заданную температуру на терморегуляторе равную 0°С. Циркуляционная жидкость приобретает данную температуру в течение 20 минут и путем перекачки тосола по циркуляционному замкнутому контуру передает ее металлической плите, установленной в нижней части лотка. В свою очередь плита начинает равномерно охлаждать до нужной температуры нижние слои грунта экспериментальной модели. Проверка температуры циркулирующей жидкости осуществлялась путем термопары под номером Т-30, установленной в ванну с тосолом в термостате. Отклонений от заданной температуры не наблюдалось. Это говорит о том, что поддержание температуры строго соблюдалось на протяжении всего эксперимента. По различным источникам в природных условиях температура почвы в осенний период до начала промерзания на глубине 50 см колеблется около 0°С и меняется для конкретной местности в зависимости климатической зоны [46]. Исходя из этих соображений значение температуры для нижней границы экспериментальной модели принимается равным 0°С.

9. После включения и настройки термостата на нужный режим подключалась морозильная камера. При проведении экспериментальных испытаний в морозильной камере поддерживалась температура воздуха минус 8,5 °С. Согласно заданным условиям промораживание экспериментальных моделей осуществляется только с верхней границы, что отражает реальный процесс промерзания дорожных конструкций. Теплоизоляция всей экспериментальной установки в целом достаточно эффективна, чтобы исключить существенный приток тепла извне. На протяжении хода экспериментов контроль температуры в морозильной камере осуществлялся установленной в нее термопарой под номером Т-29. Скачков температуры не наблюдалось.

10. Далее включался вентилятор с необходимой скоростью вращения лопастей.

11. На последнем этапе включался АЦП и переводился в мониторинговый режим. Запись данных с термопар осуществлялась каждые 30 секунд.

В общей сложности каждый эксперимент по промораживанию опытной модели длился 120 часов, в течение которых в грунте формируется поле влажности и температуры. По исходу 120 часов показания термопар уже практически не изменялись, что указывает на окончание процесса промерзания.

Условия и последовательность проведения экспериментов по предложенной методике близки к условиям, вызывающим зимнее пучение глинистых грунтов земляного полотна автомобильных дорог. Подобие водно-теплового режима земляного полотна в лабораторных условиях достигается соблюдением следующих условий [22, 99]:

– промерзание допускается только с верхней грани;

– в процессе промерзания обеспечивается непрерывный подток воды к границе промерзания.

2.4.4 Сбор показаний

На протяжении каждого эксперимента опрос термопар осуществлялся через 30 секунд. Данные температуры сохранялись в текстовый файл с указанием времени опроса датчиков.

Показания морозного пучения с датчика часового типа (ИЧ-2) фиксировались каждые 12 часов.

По окончанию каждого эксперимента по промораживанию моделей проводился эксперимент по определению влажности грунта. Для определения влажности извлекались и нумеровались образцы грунта с 5 разных глубин: с поверхности (Вл-0), с глубины 10 см (Вл-10), с глубины 20 см (Вл-20), с глубины 30 см (Вл-30), с глубины 40 см (Вл-40). Точки отбора проб грунта показаны на схеме, изображенной на рисунке 2.25. Далее влажность

пронумерованных образцов определялась по методике, описанной в параграфе 2.2.5.

Выводы по второй главе

1. Разработан универсальный экспериментальный стенд, позволяющий в лабораторных условиях моделировать процессы промерзания грунтов земляного полотна и проводить измерения температурного режима и морозного пучения, изучение которых имеет практическую значимость в строительстве автомобильных дорог на территориях, подвергающихся сезонному промерзанию.

2. Разработанный экспериментальный стенд позволяет:

- изучить температурный режим конструкций инженерных сооружений;
- предоставить количественные данные о процессах, возникающих в конструкциях инженерных сооружений при сезонном промерзании;
- оценить эффективность разных теплоизоляторов, используемых в качестве морозозащитного слоя в конструкциях автомобильных дорог;
- сравнить различные варианты дорожных конструкций по условию морозоустойчивости;
- охватить широкий круг исследуемых задач: возможность вариаций темпом замораживания/оттаивания; моделирование различных конструкций инженерных сооружений – подбор толщин слоев, грунтов земляного полотна, теплоизоляционных материалов; широкий интервал рабочих температур; высокая степень автоматизации при проведении эксперимента и т. д.

3. Разработана методика и последовательность проведения экспериментальных работ на разработанном стенде, приближенная к условиям, вызывающим морозное пучение глинистых грунтов земляного полотна автомобильных дорог.

4. Исследования физико-технических свойств ГПСК фракции 5-20 мм, полученной из опал-кристобалитовых горных пород, позволили сделать вывод о возможности применения этого материала в дорожном строительстве при устройстве морозозащитных, теплоизоляционных и дренирующих слоев.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований

В натурных условиях температурное поле в земляном полотне формируется с учетом горизонтальных теплопотоков, и их влияние существенно меньше чем вертикальных [97]. Во многих расчетах принимается одномерная схема промерзания. Исходя из этого в поставленном эксперименте моделировалось только вертикальное промораживание.

Для того чтобы убедиться в равномерном промораживании и минимизации боковых теплопотоков в моделируемые конструкции были установлены термопары в горизонтальных плоскостях Б-Б и В-В по схеме, изображенной на рисунке 2.26 в параграфе 2.4.2. По показаниям этих термопар определялась равномерность распределения температуры в горизонтальных плоскостях экспериментальных моделей. Показания термопар на 108 час проведения экспериментов приведены в таблице 3.1. Обозначения Т-5, Т-15, Т-21, Т-22, Т-23, Т-24, Т-25, Т-26, Т-27 и Т-28 соответствуют маркировке термопары. Расположение термопар в экспериментальной модели показано на схеме, изображенной на рисунке 2.26 в параграфе 2.4.2.

Таблица 3.1 – Показания термопар (в милливольтах) в плоскости Б-Б и В-В

№ экспер.	Плоскость Б-Б					Плоскость В-В				
	Т-15	Т-25	Т-26	Т-27	Т-28	Т-5	Т-21	Т-22	Т-23	Т-24
1	-1,535	-1,547	-1,507	-1,455	-1,501	0,408	0,437	0,422	0,432	0,424
2	-0,012	0,083	0,105	0,952	-0,076	0,673	0,74	0,743	0,768	0,728
3	-0,417	-0,455	-0,334	-0,356	-0,476	0,484	0,515	0,546	0,579	0,572

Показания термопар в центре экспериментальной модели и у боковых граней лотка практически одинаковы. Некоторая разница в пределах 0,1 ^{o}C может быть связана с погрешностью измерений.

Таким образом, в разработанном экспериментальном стенде промораживание моделей идет строго вертикально и влияние горизонтальных теплопотоков на показания термопар, установленных по оси, исключено.

3.1.1 Мониторинг динамики промерзания и морозного пучения

По данным показаний датчиков были построены кривые зависимости температуры от времени для каждой термопары, а также кривая зависимости пучения от времени. Полученные зависимости для эксперимента №1 (модель без теплоизолятора) представлены на рисунке 3.1, для эксперимента №2 (модель с пенополистиролом) на рисунке 3.2, для эксперимента №3 (модель с ГПСК) на рисунке 3.3. По горизонтальной оси отложено время в часах, по вертикали отложены температура в ^{o}C и величина морозного пучения в мм. Обозначения Т-2, Т-4, Т-6 и т.д. соответствуют маркировке термопары. Расположение термопар в экспериментальной модели показано на схеме, изображенной на рисунке 2.25 в параграфе 2.4.2.

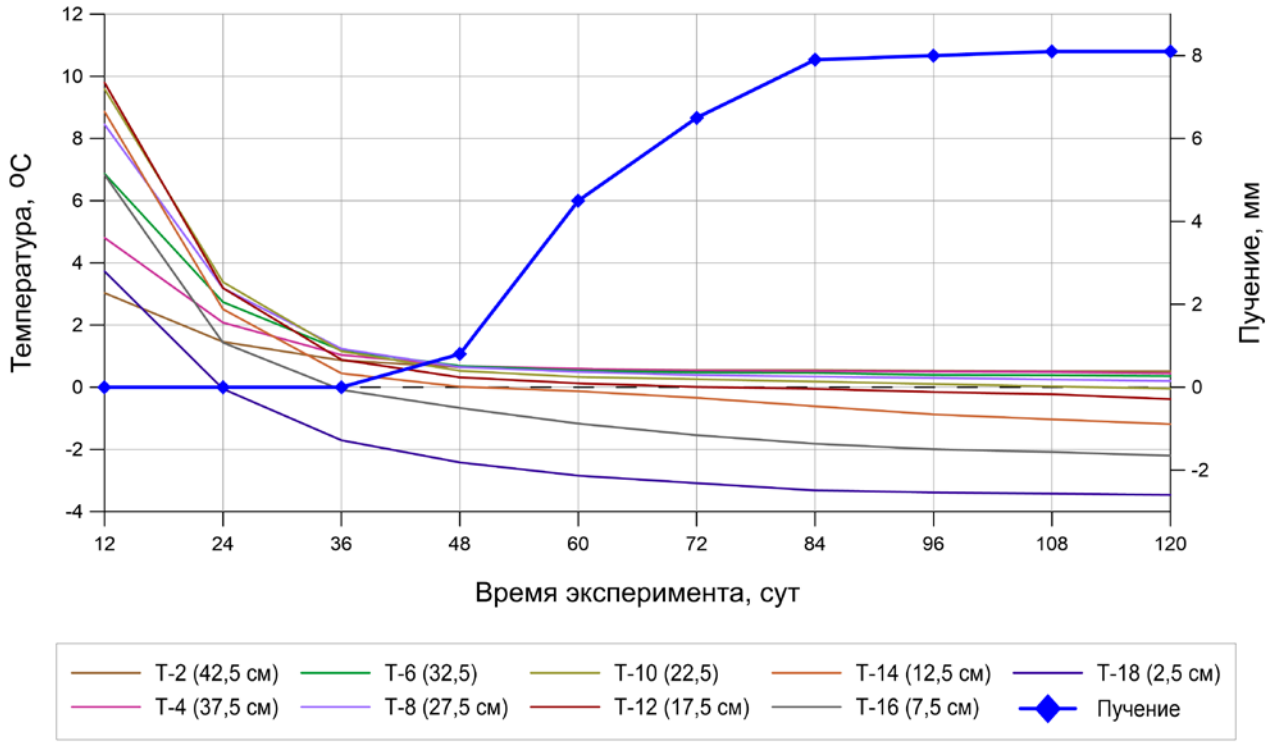


Рисунок 3.1 – Динамика температуры и морозного пучения в эксперименте № 1

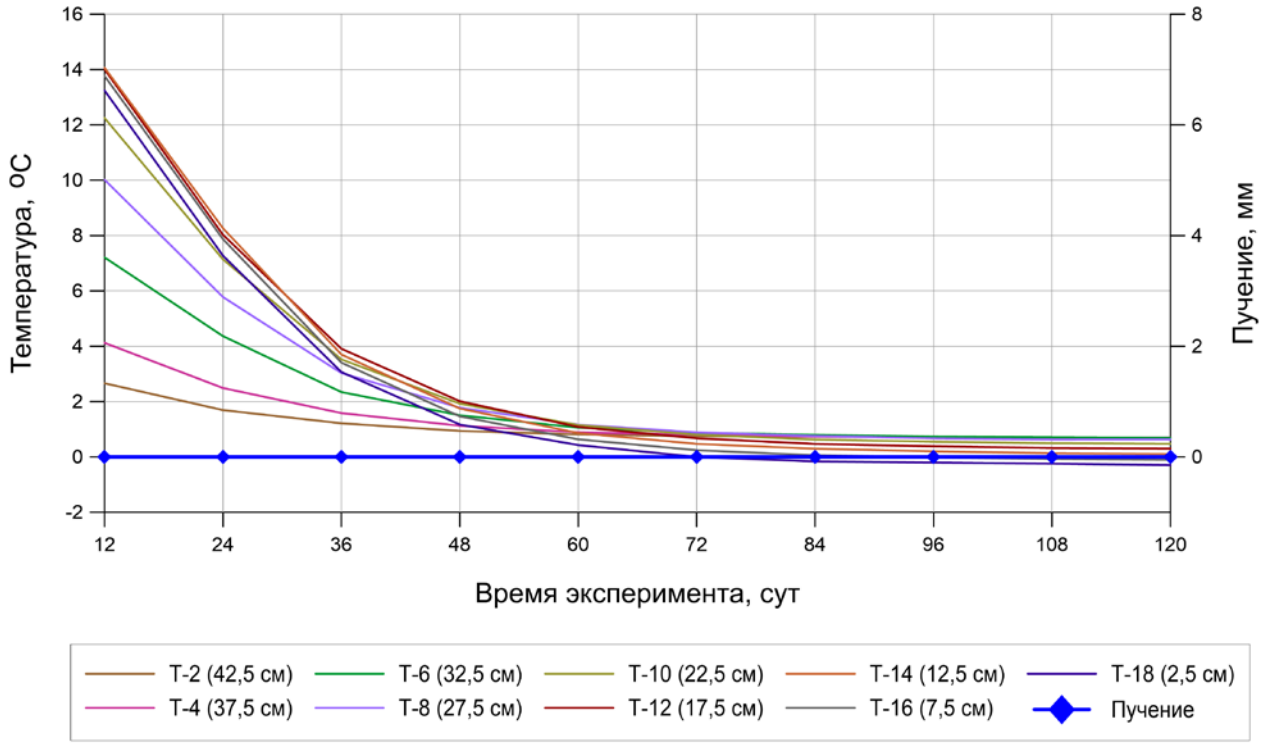


Рисунок 3.2 – Динамика температуры и морозного пучения в эксперименте № 2

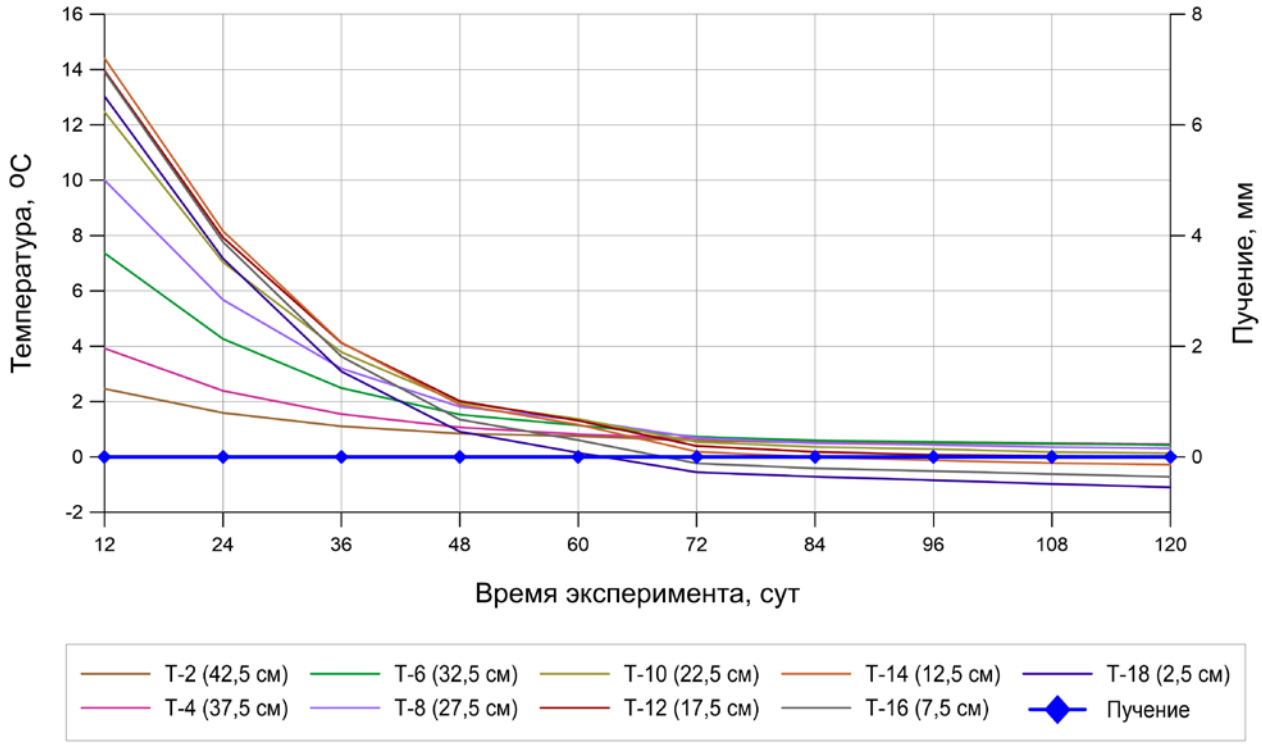


Рисунок 3.3 – Динамика температуры и морозного пучения в эксперименте № 3

Из построенных зависимостей наблюдается, что основные процессы морозного пучения и образования температурного поля близкого к стационарному в моделях наблюдаются в первые 108 часов эксперимента. Далее мы имеем относительно прямые линии, говорящие о затухании тепломассообменных процессов.

Результаты измерений морозного пучения в различные периоды времени и динамика температуры на глубине 2,5 см и 7,5 см в экспериментальных моделях представлены в виде графиков на рисунке 3.4. На таких глубинах наиболее ярко прослеживается динамика температуры. По горизонтальной оси отложено время в часах, по вертикали отложены температура в ^{o}C и величина морозного пучения в мм. Обозначения Т-16 и Т-18 соответствуют маркировке термопары. Расположение термопар в экспериментальной модели показано на схеме, изображенной на рисунке 2.25 в параграфе 2.4.2.

Поднятие грунта в экспериментальной модели №1 начинается с момента промерзания верхнего слоя грунта (переход через 0 ^{o}C) и заканчивается при достижении температурного поля, близкому к стационарному. Процесс морозного пучения начал развиваться на 36 ч эксперимента и остановил свой ход на 108 ч. Высота поднятия составила 8,1 мм. Поднятие грунта в экспериментах №2 и №3 не наблюдается. Разницу в поднятии можно объяснить различной глубиной промерзания, которая напрямую зависит от теплоизолятора.

Рассматривая динамику температуры на графике видно, что на глубине 2,5 см для модели без теплоизолятора на конец эксперимента установилась температура минус 3,5 ^{o}C, для эксперимента №2 – минус 0,2 ^{o}C, для эксперимента №3 – минус 0,6 ^{o}C.

На глубине 7,5 см для модели №1 на конец эксперимента установилась температура минус 2,2 ^{o}C, для эксперимента №2 – минус 0,1 ^{o}C, для эксперимента №3 – минус 0,6 ^{o}C.

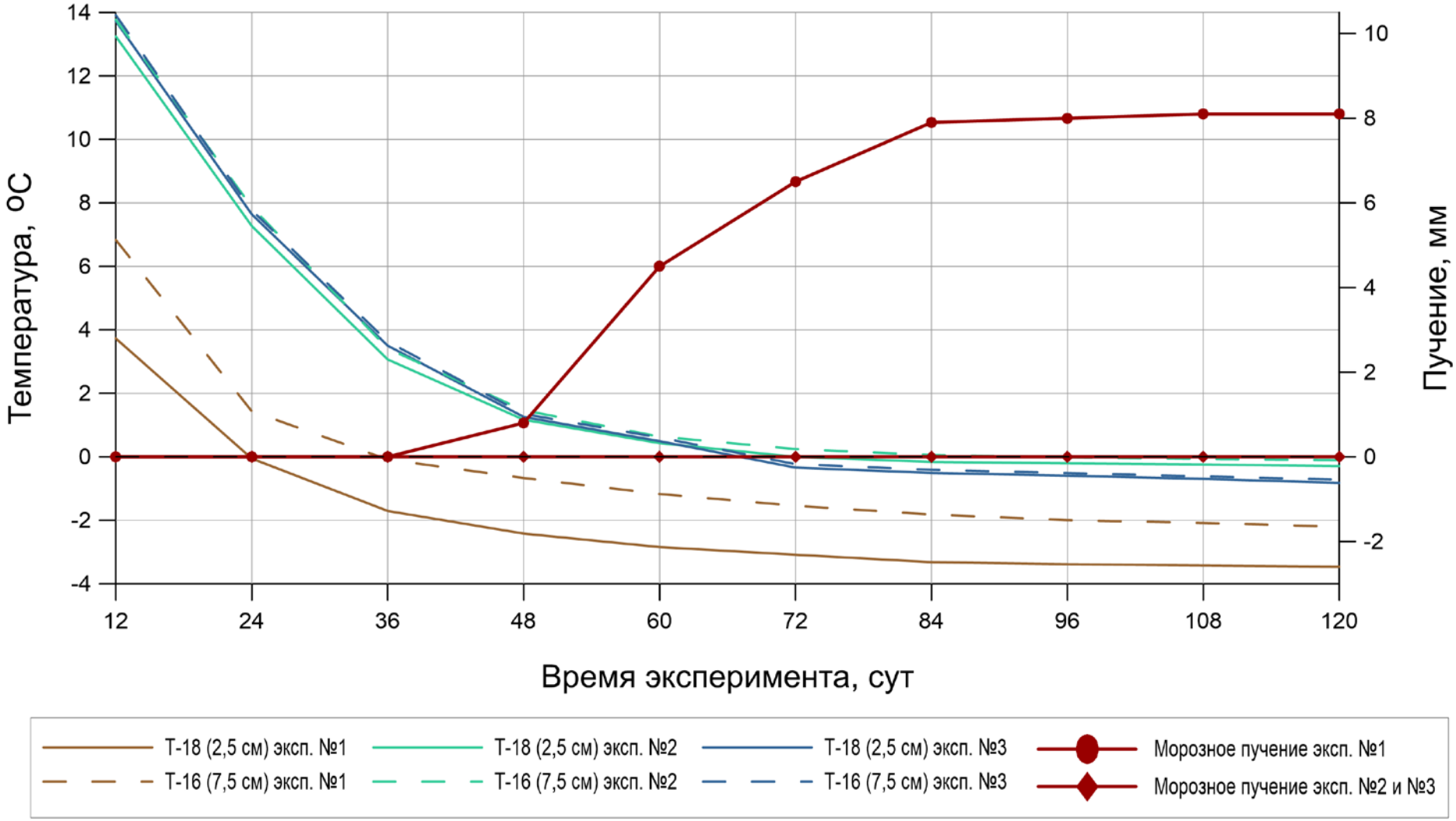


Рисунок 3.4 – Динамика морозного пучения и температуры на глубине 2,5 см и 7,5 см в экспериментальных моделях

Так же из графиков видно, что переход через 0 °С на глубине 2,5 см произошел в эксперименте №1 через 24 ч, в эксперименте №2 через 72 ч, в эксперименте №3 через 69 ч. Переход через 0 °С на глубине 7,5 см произошел в эксперименте №1 через 36 часа, в эксперименте №2 через 102 ч, в эксперименте №3 через 69 ч.

Полученные данные ясно указывают на теплоизоляционные свойства пенополистирола и ГПСК. Укладка теплоизоляционного материала способствует снижению глубины промерзания и уменьшению величины морозного пучения.

3.1.2 Исследование влажностного режима

Первые пробы для определения влажности взяты до начала экспериментов и являются исходными для следующих сравнений (см. параграф 2.2.5). Начальная влажность грунта составляла 17 % по всему объему. Характер распределения влажности в моделях по окончанию экспериментов приведен в таблице 3.2. Обозначения Вл-0, Вл-10, Вл-20, Вл-30 и Вл-40 соответствуют маркировке точки отбора пробы грунта в экспериментальной модели. Точки отбора проб грунта показаны на схеме, изображенной на рисунке 2.25 в параграфе 2.4.2.

Таблица 3.2 – Данные по определению влажности

№ пробы	$m_{вл.грунта}$, гр	$m_{сух.грунта}$, гр	$m_{влаги}$, гр	W, %
Эксперимент №1. Модель без теплоизолятора				
Вл-0	158,1	135,6	22,5	17
Вл-10	186,9	148,05	38,85	26
Вл-20	201,8	156,3	45,5	29
Вл-30	254,45	192,95	61,5	32
Вл-40	253,15	177,2	75,95	43
Эксперимент №2. Модель с пенополистиролом				
Вл-0	121,65	103,75	17,9	17
Вл-10	306,15	110,3	18,75	17
Вл-20	154,5	132,3	22,2	17

Вл-30	140,1	116,75	23,35	20
Вл-40	204,7	144	60,7	42
Эксперимент №3. Модель с гранулированной пеностеклокерамикой				
Вл-0	133	114,45	18,55	16
Вл-10	147,15	125,55	21,6	17
Вл-20	180,4	154,35	26,05	17
Вл-30	168,1	137,65	30,45	22
Вл-40	254,7	176,6	78,1	44

Наблюдения за влажностным режимом показывают, что распределение влаги в экспериментах неодинаково. В эксперименте №1 наблюдается явное перенасыщение влагой в верхних слоях относительно начальной влажности.

Образовавшееся распределение влаги связано с проходящими теплофизическими процессами подсоса влаги к фронту промерзания с льдообразованием. Модель без теплоизолятора начинает промерзать значительно быстрее моделей с теплоизоляторами и на значительно большую глубину.

В моделях с теплоизоляторами небольшое повышение влажности наблюдается только на отсечке Вл-30, что, по всей видимости, связано с силами капиллярного поднятия. Выше отсечки Вл-30 наблюдается начальная влажность грунта. Неизменившееся влажностное поле в верхних слоях в моделях с теплоизоляторами говорит об отсутствии подсоса влаги к фронту промерзания в ходе экспериментов.

Анализируя распределение влажности и величину пучения можно с уверенностью сказать, что в поставленном эксперименте №1 наблюдается процесс притока влаги из немерзлой зоны в промерзающую зону, где происходит замерзание избытка влаги с образованием шлиров льда и пучением грунта. Условия возникновения этих режимов довольно подробно охарактеризованы в литературе [16, 17, 18, 99].

3.1.3 Исследование температурного режима

Грунты естественного природного происхождения, применяемые обычно для строительства земляного полотна (суглинок, 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. Объем пор заполнен вовлеченным воздухом и водой, присутствующей в любом, даже высушенном грунте. 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 [45, 74].

Изменение влажности ведет к изменению теплофизических свойств грунта – теплопроводности и теплоемкости, что влияет на глубину промерзания: коэффициент теплопроводности грунтов возрастает с увеличением их влажности, [63]. В результате фазового перехода при промерзании, происходит выделение тепла, и необходимо время для его отведения из зоны промерзания. Количество образуемого тепла зависит от влажности и содержания незамерзшей влаги в грунте при данной температуре.

Приведенные факты и полученные данные распределения влажности были учтены при математическом моделировании в параграфе 3.2 и 4.2.

По показаниям термопар были построены графики распределения температур по центральной оси моделей в различные моменты времени. Результаты приведены на рисунках 3.5 - 3.7.

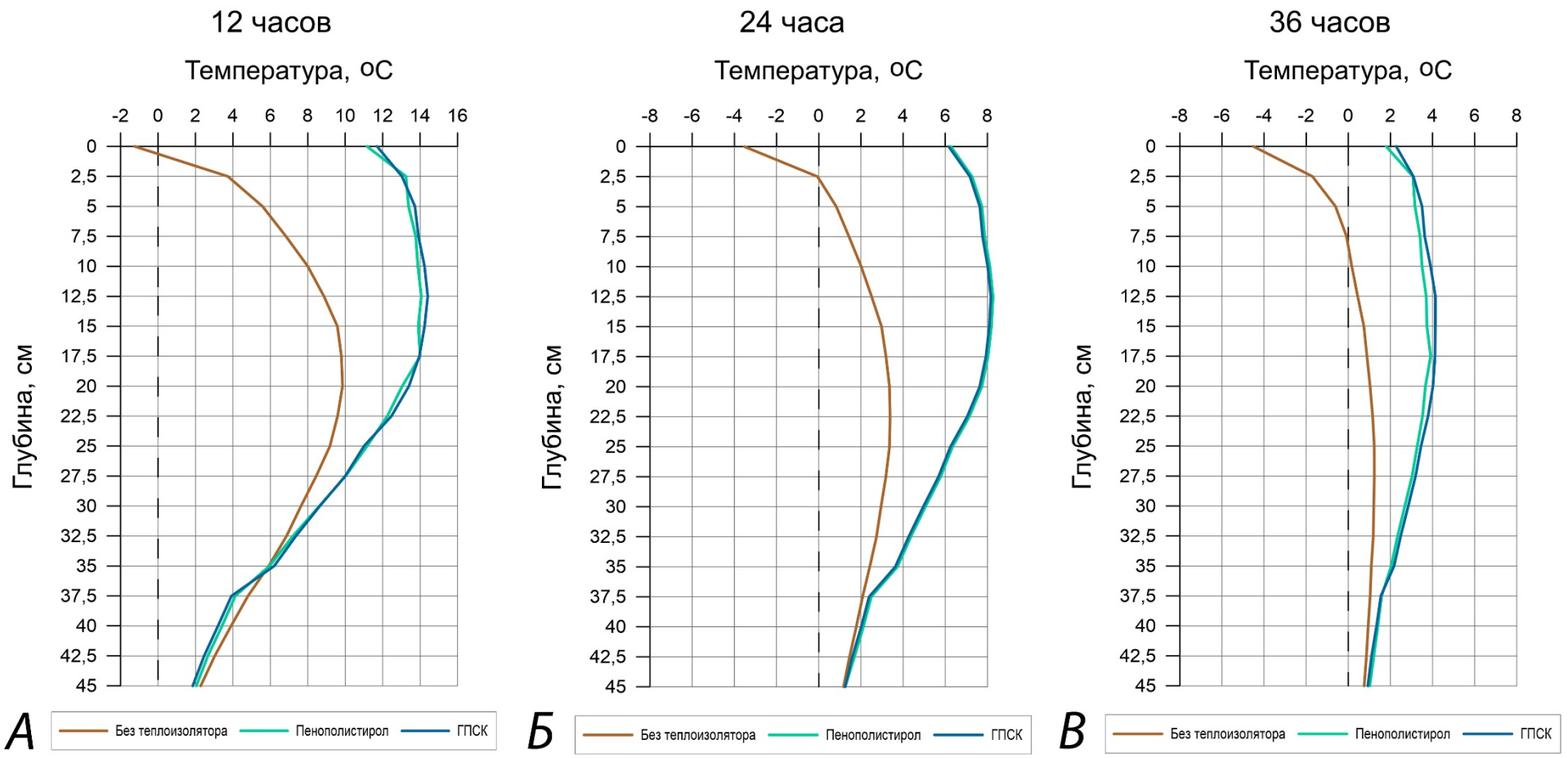


Рисунок 3.5 – Распределение температуры по глубине:
А – на 12 час эксперимента, Б – на 24 час эксперимента, В – на 36 час эксперимента

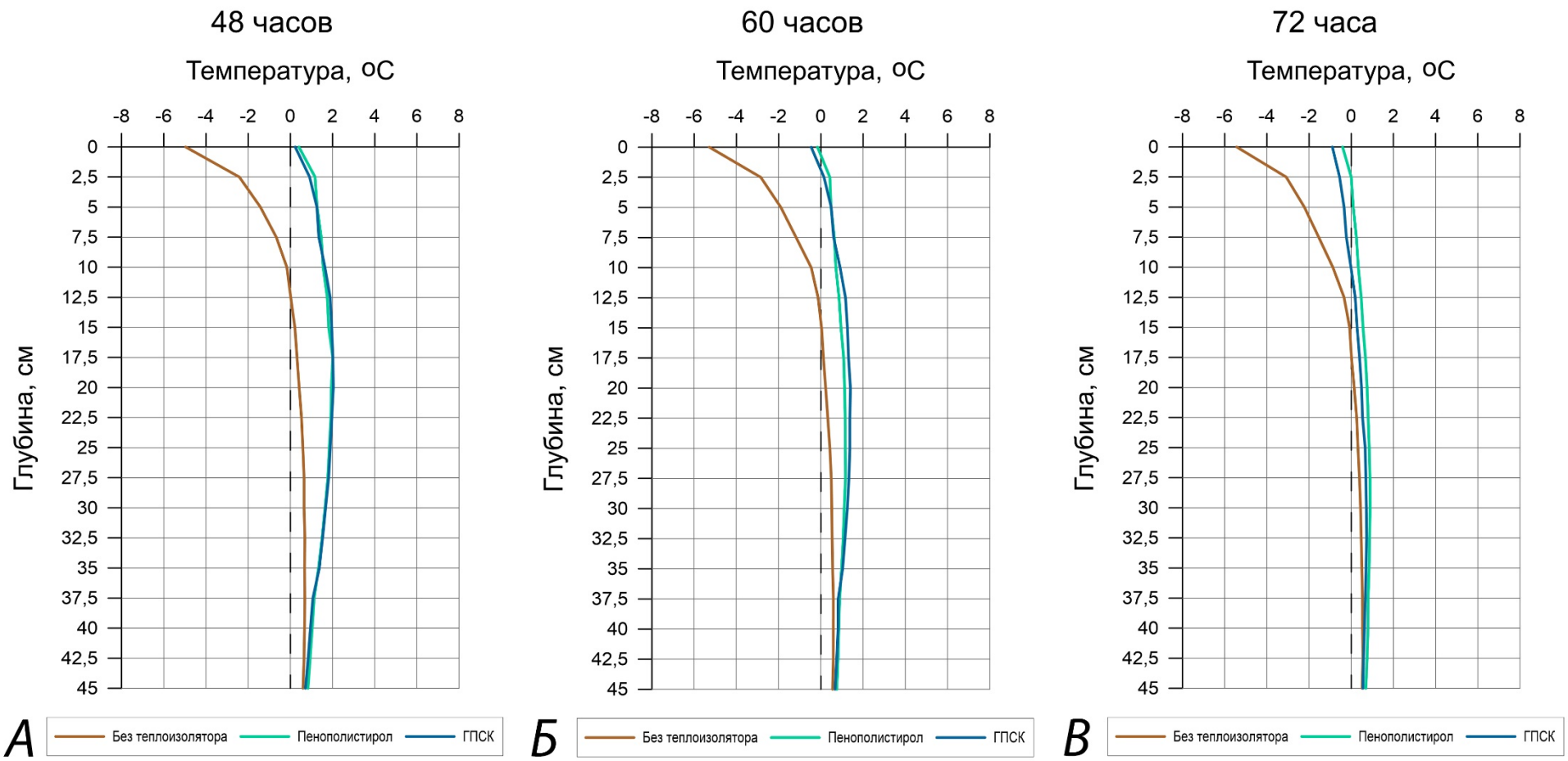


Рисунок 3.6 – Распределение температуры по глубине:
А – на 48 час эксперимента, Б – на 60 час эксперимента, В – на 72 час эксперимента

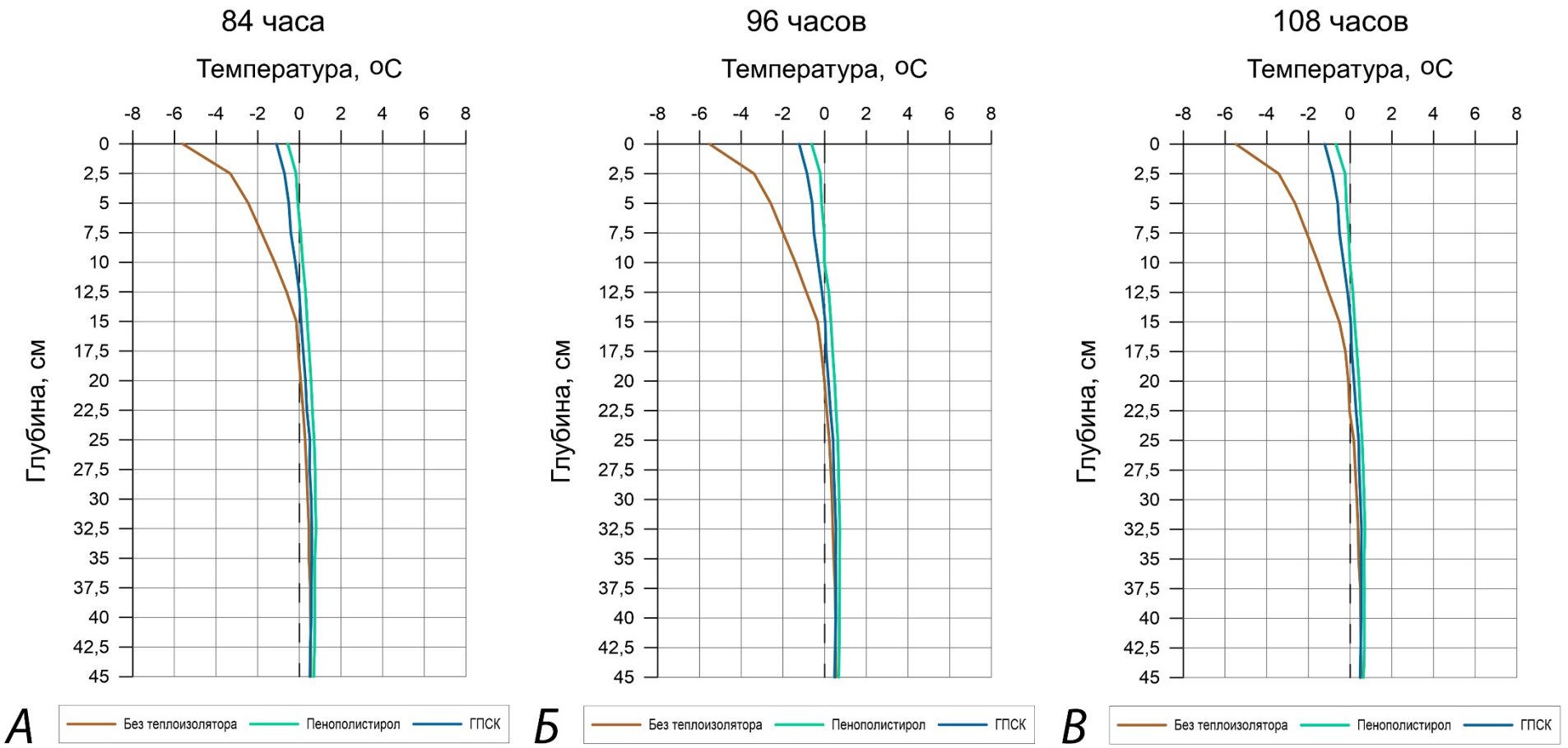


Рисунок 3.7 – Распределение температуры по глубине:
А – на 84 час эксперимента, Б – на 96 час эксперимента, В – на 108 час эксперимента

Анализируя графики видно, что возникает фронт промерзания, который разделяет образовавшийся мерзлый и нижележащий не мерзлый слой грунта. С ходом эксперимента фронт промерзания для различных моделей с разной скоростью движется к низу моделей и практически останавливается на разных глубинах. Наглядно просматривается влияние теплоизоляоров на «заторможенность» промерзания.

По данным графика на рисунке 3.7 В видно, что глубина промерзания грунта на 108 час в эксперименте №1 составила 24 см, в эксперименте №2 – 10,5 см, в эксперименте №3 – 13,5 см.

В верхних слоях температура в модели без теплоизолятора падает быстрее, чем в моделях с теплоизолятором. Ниже 27,5 см падение температуры во всех экспериментах почти одинаково (кривые сливаются).

Почти одинаковый характер промерзания грунта показывают эксперимент №2 и №3, это говорит о том, что пенополистирол толщиной 3 см с коэффициентом теплопроводности 0,035 Вт/м*К (таблица 1.2) и ГПСК толщиной 6 см с коэффициентом теплопроводности 0,086 Вт/м*К (таблица 1.7) являются хорошими теплоизоляторами.

Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с данными натурных экспериментов, проведенных норвежскими исследователями и описанных в параграфе 1.4 [125].

3.2 Сопоставление экспериментальных данных с результатами математического моделирования

В данном параграфе выполнено сопоставление экспериментальных результатов исследования с результатами математического моделирования.

Численное моделирование температурного режима экспериментальных моделей выполнялось решением системы дифференциальных уравнений теплопроводности применительно к расчету процессов промерзания в программном комплексе «QFrost».

«QFrost» – программа для моделирования теплофизических процессов в грунтах. Она позволяет решать разнообразные задачи геокриологии, в частности проводить расчёты теплового взаимодействия инженерных сооружений с грунтами естественного основания с учетом изменения граничных условий [71].

В геокриологии постоянно встречаются задачи, решение которых затруднено или невозможно при использовании аналитических методов, точных и приближённых. Такие задачи, как правило, могут быть решены численно. Один из возможных способов их численного решения основывается на методе конечных разностей. При решении задач инженерной геокриологии, связанных с кондуктивным теплообменом с наличием фазовых переходов, давно используется и хорошо себя зарекомендовала двухслойная явная схема с применением метода балансов с энтальпийной формулировкой задачи [71].

Алгоритм расчета, используемый данной программой, впервые был предложен Л.Н. Хрусталёвым и изначально реализован сотрудниками кафедры геокриологии геологического факультета МГУ в пакете программ «Тепло», которая используется уже почти 2 десятка лет (в том числе ведущими российскими проектными институтами «Гипротрубопровод» и ООО «Газпром ВНИИГАЗ»). Программа «QFrost» использует тот же математический метод, но её отличает современный интерфейс и новые возможности. Этот же метод описан в нормативном документе РСН 67-87 [71, 77].

Основным достоинством этого программного продукта является использование математического алгоритма, нормированного в РСН 67-87 [77], в основе которого лежит решение нестационарного уравнения теплопроводности с подвижными фазовыми границами методом конечных разностей с использованием явной схемы аппроксимации исходного дифференциального уравнения, записанного в «энтальпийной» форме [72].

Выбор данной расчетной модели обусловлен тем, что она характеризуется высокой степенью применимости для моделирования геотехнических систем, симметрия температурного поля которых позволяет пренебречь третьей пространственной координатой, например, для линейных сооружений.

Для установления степени сходимости экспериментальных данных с результатами расчетов, полученных при помощи программного комплекса «QFrost» смоделированы 3 исследуемые экспериментальные модели.

Теплофизические характеристики моделируемого грунта принимались в соответствии с полученным распределением влажности (таблица 3.2, параграф 3.1.2). Необходимые для расчета теплофизические характеристики грунтов и материалов приведены в таблице 3.3 в соответствие с [43, 86, 87, 94].

Таблица 3.3 – Расчетные характеристики грунтов и теплоизоляционных материалов [43, 86, 87, 94]

Материал	Влажность весовая, %	Толщина слоя, м	Коэффициент Теплопроводности, Вт/(м*°С)		Теплоемкость, Вт*ч/(м^3*°С)
			Талого	Мерзлого	
Песок	0,25	0,075	2,50	2,92	750
Суглинок	0,40	-	1,57	1,80	950
Суглинок	0,30	-	1,45	1,65	950
Суглинок	0,25	-	1,33	1,58	950
Суглинок	0,20	-	1,10	1,31	950
Суглинок	0,15	-	0,87	0,99	950
Пенополистирол	-	0,03	0,035	0,035	1530
ГПСК	-	0,06	0,086	0,086	840

Фактически температурное поле в моделях формировалось в результате вертикального процесса теплопередачи без учета горизонтальных

теплопотоков. В практических расчетах правомерность применения одномерной схемы промерзания вполне оправдана.

На нижней границе расчетной области, которая соответствует металлическому листу, охлаждаемому циркуляционным контуром, задавалось граничное условие I рода с постоянной температурой 0,5 ^{o}C. На верхней границе расчетной области также задавалось граничное условие I рода с постоянной по времени температурой воздуха соответствующее температуре в морозильной камере -8,5 ^{o}C. На боковых границах расчетной области задавалось граничное условие II рода с нулевым теплопотоком.

Кроме граничных условий для осуществления моделирования задавались также начальные условия. Начальными условиями для получения температурного поля служит распределение температуры в моделях до начала проведения эксперимента и составляет 22°C по всему объему.

Для установления степени сходимости результатов математического моделирования с результатами экспериментального физического моделирования были построены графики распределения температур, которые соответствуют 108 часу промораживания экспериментальных моделей. Полученные изоплеты представлены на рисунке 3.8.

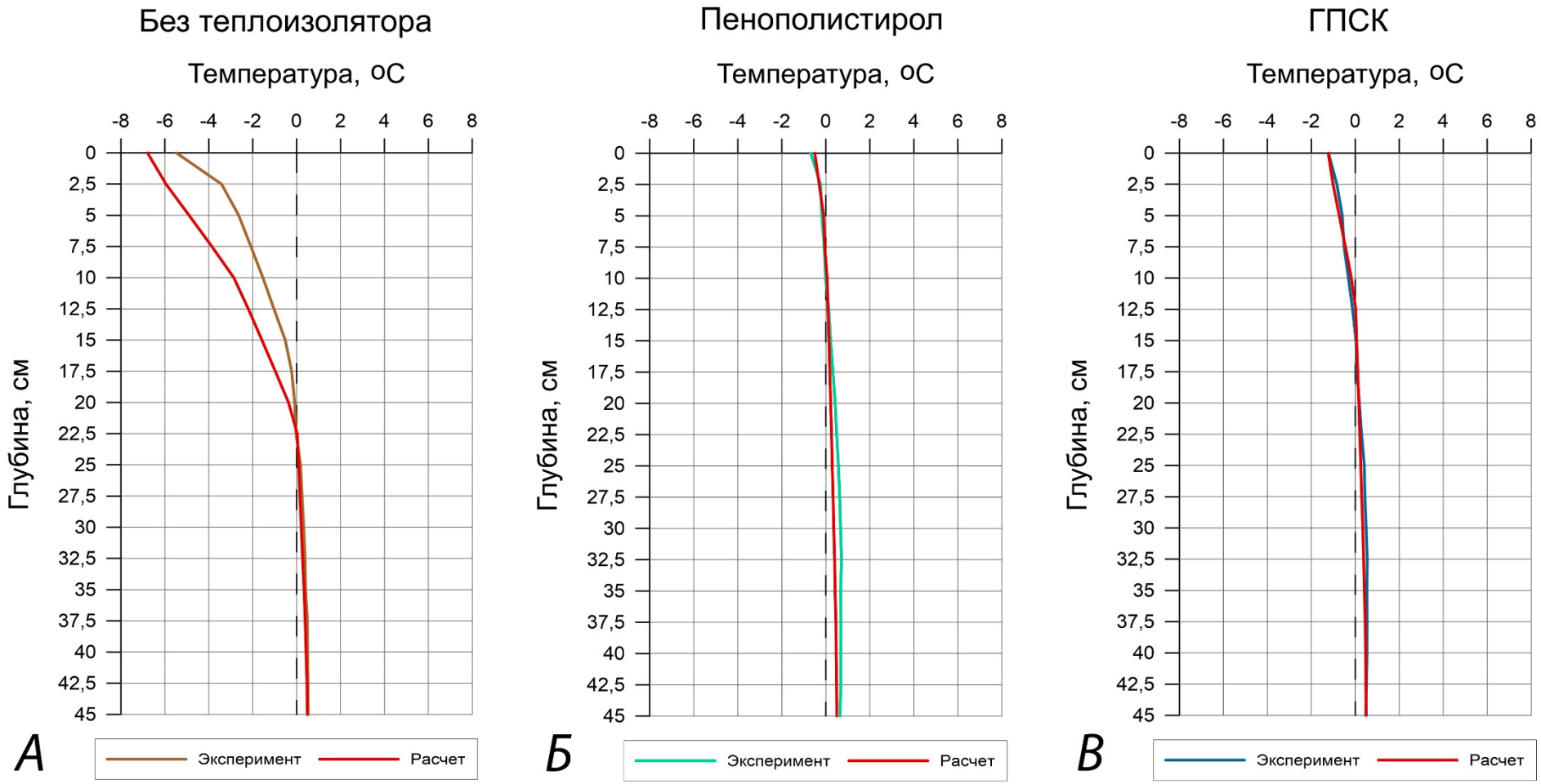


Рисунок 3.8 – Распределение температур по результатам математического и экспериментального физического моделирования на 108 час: А – модель без теплоизолятора, Б – модель с пенополистиролом, В – модель с гранулированной пеностеклокерамикой

Анализ графиков показывает, что общая картина развития промерзания моделей по результатам физического и математического моделирования имеет сопоставимый характер. Данные находятся в хорошей сходимости.

Фактическая замеренная глубина промерзания модели без теплоизолятора составила 24 см, по результатам математического моделирования глубина промерзания составила 22,5 см. Фактическая замеренная глубина промерзания модели с пенополистиролом составила 10,5 см, по результатам математического моделирования глубина промерзания составила 8,5 см. Фактическая замеренная глубина промерзания модели с ГПСК составила 13,5 см, по результатам математического моделирования глубина промерзания составила 12,5 см.

Расхождение экспериментальных данных с результатами математического моделирования глубины промерзания экспериментальных моделей составляет 5-10%. Расхождение результатов моделирования в программном комплексе «QFrost» обусловлено сложностью описания процессов движения воды в грунтовой среде, за счет чего грунтовая среда имеет изменчивый коэффициент теплопроводности.

Таким образом можно сделать вывод о том, что проведенные экспериментальные исследования имеют хорошее согласие с результатами математического моделирования, выполненного с помощью современного программного комплекса «QFrost».

Выводы по третьей главе

1. Проведена серия экспериментов по исследованию температурного, влажностного и деформационного режима грунтов земляного полотна инженерных сооружений в условиях промерзания для 3 моделируемых конструкций: модель с плитами из экструзионного пенополистирола, модель с ГПСК и модель без теплоизолятора.

2. В результате проведенных исследований определено:

- наблюдение за температурным режимом показало, что глубина промерзания в одинаковых условиях на конец эксперимента составила: в модели без теплоизолятора – 24 см, в модели с пенополистиролом – 10,5 см, в модели с ГПСК – 13,5 см;
- наблюдение за морозным пучением показало, что высота поднятия грунта в модели без теплоизолятора составила 8,1 мм, при тех же условиях поднятие грунта в моделях с теплоизоляторами не зафиксировано;
- наблюдение за влажностным режимом показало, что в модели без теплоизолятора наблюдались процессы подсоса влаги к границе промерзания с образованием шлиров льда, в моделях с пенополистиролом и ГПСК таких процессов не зафиксировано.

3. Результаты экспериментальных исследований показали, что положительный эффект от использования ГПСК для устройства морозозащитного слоя в конструкции инженерного сооружения достигается за счет снижения глубины сезонного промерзания грунтов земляного полотна, и, следовательно, исключении процессов морозного пучения.

4. Сопоставление экспериментальных данных с результатами математического моделирования показало хорошую сходимость – расхождение результатов физического и математического моделирования составляет 5-10%.

ГЛАВА 4 ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ

4.1 Опытно-экспериментальный участок автомобильной дороги

По результатам проведенных исследований Государственным казенным учреждением Тюменской области «Управление автомобильных дорог» совместно с правительством Тюменской области был определен участок ремонта автомобильной дороги «Бескозобово-Евсино-Ламенский» км 47+540 – км 47+690 (Голышмановский район, Тюменская область) для проведения натурных испытаний морозозащитного слоя из ГПСК (рисунок 4.1). Опытно-экспериментальный участок был разделен на 2 секции: традиционная конструкция, применяемая в данном регионе, с морозозащитным слоем из песка мелкого толщиной 30 см и конструкция с морозозащитным слоем из ГПСК 25 см.

Рисунок 4.1 – Участок автомобильной дороги «Бескозобово-Евсино-Ламенский» км 47+540 – км 47+690 (Голышмановский район, Тюменская область)

4.1.1 Характеристика района и объекта проведения работ

Район проведения работ характеризуется длительными и сильными морозами в зимний период года. Данное обстоятельство значительно влияет на высокую глубину промерзания дорожной конструкции. Глубина промерзания под дорожной одеждой значительно выше, чем на притрассовых участках на которых роль теплоизолятора играет значительный снежный покров. С основной площадки

дороги снег счищается снегоуборочной техникой и холодные температуры воздуха через дорожную одежду беспрепятственно передаются на грунты насыпи и естественного основания.

Грунты насыпи и основания перенасыщены влагой. Низкая насыпь и высокий уровень грунтовых вод предполагает капиллярное поднятие влаги к нижней границе дорожной одежды. Также на влагонакопление грунтов насыпи влияют обильные осадки, застаивающиеся воды вдоль насыпи (рисунок 4.2), подсос влаги к границе промерзания.

Рисунок 4.2 – Застаивающиеся воды вдоль низкой насыпи

Для весеннего и осеннего сезона характерна неустойчивая погода с резкими колебаниями температуры воздуха. Плюсовая теплая погода сменяется резкими похолоданиями и обратно (суточное или периодичное колебание). Данный факт говорит о повторяющихся многократно циклах промерзания/оттаивания. Грунты за небольшой период времени могут находиться в разных состояниях: мерзлое, текучее. Это ведет к многократным процессам морозного пучения и разуплотнения грунтов насыпи под дорожной одеждой.

Местные грунты, используемые при строительстве земляного полотна автомобильных дорог в районе проведения работ, являются типичными представителями лёссовидных отложений, широко распространенных в пределах

южной части Западной Сибири. Мощность лёссовидных пород юга области составляет порядка 3-8 м (для Ишимской равнины), породы уплотнены, по гранулометрическому составу преобладают средние и тяжелые суглинки, реже глины. В гранулометрическом составе отмечается, типичное для лессовидных отложений, достаточно высокое содержание пылевидной фракции [2, 50].

Наличие разрушений дорожной одежды и отремонтированных участков (рисунок 4.3) говорит о повторяющихся многократно процессах морозного пучения грунтов насыпи и естественного основания. Внешними признаками пучинистых мест в зимний период являются неравномерное поднятие участков покрытия, образование отдельных бугров или группы бугров на покрытии. Значительная часть из них имеет сетку трещин, концентрирующуюся у вершины бугров пучения, которые разрушают покрытие на отдельные куски различной величины и формы. Образование пучин может развиваться как по ширине проезжей части, так и вдоль нее. В весенний период после схода снега на пучинистых участках могут появляться влажные пятна (рисунок 4.3А, 4.3Б, 4.3В), а также волнообразные колебания дорожной конструкции при наезде тяжеловесных транспортных средств (см. рис. 4.3Г). Эти участки имеют, как правило, значительно пониженную прочность и интенсивно разрушаются (образование выбоин, просадок и т.д.) [91].

Рисунок 4.3 – Автомобильная дорога «Бескозобово-Евсино-Ламенский» км 47+540 – км 47+690 (Голышмановский район, Тюменская область): А, Б – сетка трещин, В – образование выбоин и просадок, Г – движение тяжеловесных транспортных средств

Анализ проведенных исследований на автомобильной дороге «Бескозобово-Евсино-Ламенский» показал, что основной причиной появления деформаций на дорожном покрытии является пучение сезонно промерзающих пылеватых грунтов земляного полотна.

Для обеспечения стабильной работы земляного полотна в рассматриваемых условиях необходимы мероприятия по снижению или полному исключению промерзания дорожной конструкции.

4.1.2 Конструкция новой дорожной одежды для опытно-экспериментального участка

По проекту дорожная одежда опытно-экспериментального участка имеет следующее строение:

1. Верхний слой покрытия из асфальтобетонной смеси марки II, тип Б, толщина 5 см.

2. Нижний слой покрытия из крупнозернистой асфальтобетонной смеси марки II, толщина 7 см.

3. Верхний слой основания из щебня, толщина 15 см.

4. Нижний слой основания из щебня, толщина 15 см.

5. Дополнительный морозозащитный слой основания дорожной одежды из песка природного для строительных работ мелкого (существующий карьер в с. Медведево) для первой секции толщиной 30 см. Для второй секции морозозащитный слой из ГПСК толщиной 25 см, прикрытый сверху и снизу прослойкой из НСМ «Дорнит-2».

4.2 Теплотехнический расчет дорожных конструкций для опытно-экспериментального участка

Прогноз теплового взаимодействия дорожной конструкции с грунтами основания для условий строительства опытно-экспериментального участка «Бескозобово-Евсино-Ламенский» км 47+540 – км 47+690 (Голышмановский район, Тюменская область) проводился с использованием компьютерного моделирования температурного режима грунтов в программном комплексе «QFrost».

Целью расчётов является составления прогноза влияния морозозащитного слоя из разных материалов на температурный режим грунтов земляного полотна при долгосрочной эксплуатации объекта.

Математическое моделирование было выполнено для трех дорожных конструкций с применением различных материалов в качестве морозозащитного слоя. Первая и вторая конструкция, принятые по проекту – 0,3 м из песка (традиционная конструкция) и 0,25 м из ГПСК. Дополнительно был выполнен теплотехнический расчет для дорожной конструкции с морозозащитным слоем из

ГПСК толщиной 0,15 м с целью сравнения влияния толщины морозозащитного слоя из ГПСК на глубину промерзания грунтов земляного полотна.

Автомобильная дорога, для которой производился расчет, рассматривается как бесконечная в линейном направлении. Конструкция насыпи для расчетов принята согласно проекту и является типичной для условий данного региона. Она характеризуется следующими параметрами: многослойная дорожная одежда, толщиной по оси 0,42 м (асфальтобетон – 0,12 м и щебень 0,3 м), для трех разных конструкций дополнительные морозозащитные слои в основании дорожной одежды мощностью 0,3 м из мелкого строительного песка, 0,25 м из ГПСК и 0,15 м из ГПСК.

Высота насыпи принята 1,1 м, ширина по низу 13,4 м. Крутизна откосов насыпи 1:2.

Геометрические пропорции насыпи и схема конструкции с различными вариантами морозозащитного слоя приведены на рисунках 4.4 и 4.5.

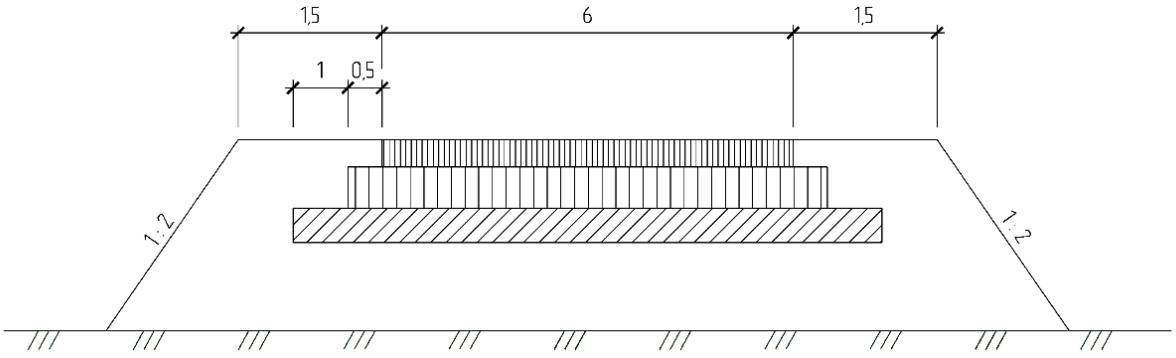


Рисунок 4.4 – Геометрические пропорции насыпи

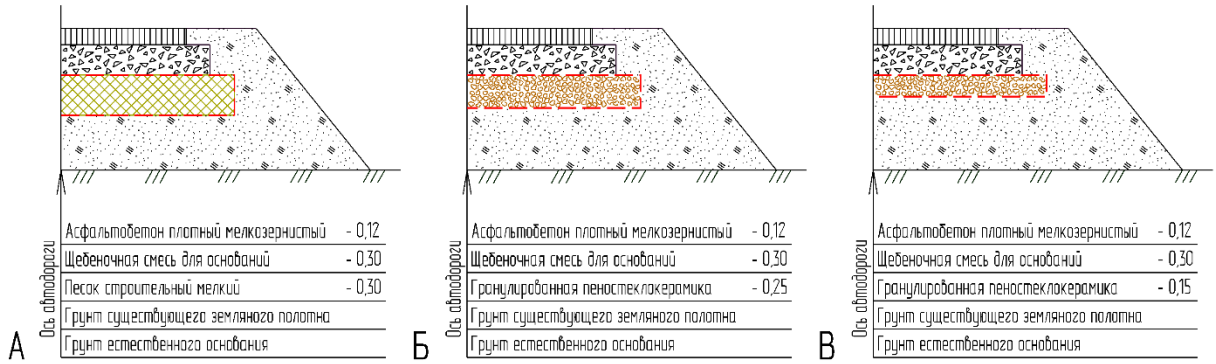


Рисунок 4.5 – Схемы строения дорожных конструкций, принятых для расчета: А – морозозащитный слой из строительного песка толщиной 0,30 м, Б – морозозащитный слой гранулированной пеностеклокерамики толщиной 0,25 м, В – морозозащитный слой гранулированной пеностеклокерамики толщиной 0,15 м

Земляное полотно отсыпается из местных грунтов – пылеватых супесей. Под насыпью залегают грунты ненарушенного сложения мощностью 10 м – тяжелые суглинки. Необходимые для расчета теплофизические характеристики грунтов и материалов приведены в таблице 4.1 в соответствие с [43, 86, 87, 94].

Таблица 4.1 – Расчетные характеристики грунтов и материалов дорожной конструкции

Грунт/материал	Глубина/ мощность слоя, м	Коэффициент Теплопроводности, Вт/(м*°С)		Теплоемкость, Вт*ч/(м^3*°С)	Влажность весовая, %
		Талого	Мерзлого		
Разрез-представитель для района строительства опытно-экспериментальной дороги					
Суглинок тяжелый	10	1,57	1,80	950	40
Материалы, применяемые в дорожной конструкции					
Асфальтобетон	0,12	1,05	1,05	1680	-
Щебень	0,3	2,0	2,0	840	-
Строительный песок	0,3	2,50	2,43	750	20
Гранулированная пеностеклокерамика (фр. 5-20)	-	0,084	0,084	840	-
Супесь пылеватая	-	1,80	2,00	850	25

Климатические характеристики района приняты по СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» [85]. При построении математической модели необходимо учитывать сезонные колебания температуры воздуха, высоту снежного покрова на откосах и радиационный баланс подстилающей поверхности, влияющие на глубину промерзания грунта под насыпью автомобильной дороги.

На нижней границе расчетной области, которая соответствует глубине нулевых годовых амплитуд температур (0,5 ºС для 10 м), задавалось граничное условие I рода с постоянными для всех сезонов года температурами. На верхней границе расчетной области задавалось граничное условие III рода с переменными по времени среднемесячной температурой воздуха и величиной теплового потока на единицу площади с учетом сопротивления снежного и мохового покровов на откосах насыпи и прилегающей территории. На покрытии и обочинах задавалось условие III рода с переменными по времени среднемесячной температурой воздуха исходя из тех соображений, что снег с этих элементов дорожной конструкции счищается снегоуборочной техникой. На боковых границах расчетной области задавалось граничное условие II рода с нулевым теплопотоком.

Таблица 4.2 – Граничные условия расчетной области

Параметры граничных условий	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	IVIII	IX	X	XI	XII
T^0C (среднегодовая температура воздуха по месяцам)	−15	−13,3	−5,3	3,7	11,3	17,1	18,8	15,8	9,6	3,1	−7	−13
α, Вт/(м^2 *°С), коэффициент теплообмена [135]	0,48	0,41	0,41	0,43	0,68	2,7	2,7	2,7	4,06	2,03	0,82	0,52

Кроме граничных условий для осуществления моделирования задавались также начальные условия. Начальными условиями для получения температурного поля естественного основания послужило линейное распределение температуры

грунта в массиве, обусловленное моделированием естественных природных условий на протяжении 20 лет с 1 июля 1996 года по 1 июля 2016 года.

Основная задача решалась, начиная со строительства опытно-экспериментального участка автомобильной дороги в 2016 году и до 2021 года. Запись результатов расчета изменения температурного поля дорожной конструкции проводилась на конец зимнего сезона 28 февраля 2017 и 2021 годов (1 и 5 лет эксплуатации дорожной конструкции).

По результатам математического моделирования построены температурные графики зависимости значений температуры по оси дороги от глубины (рисунок 4.6).

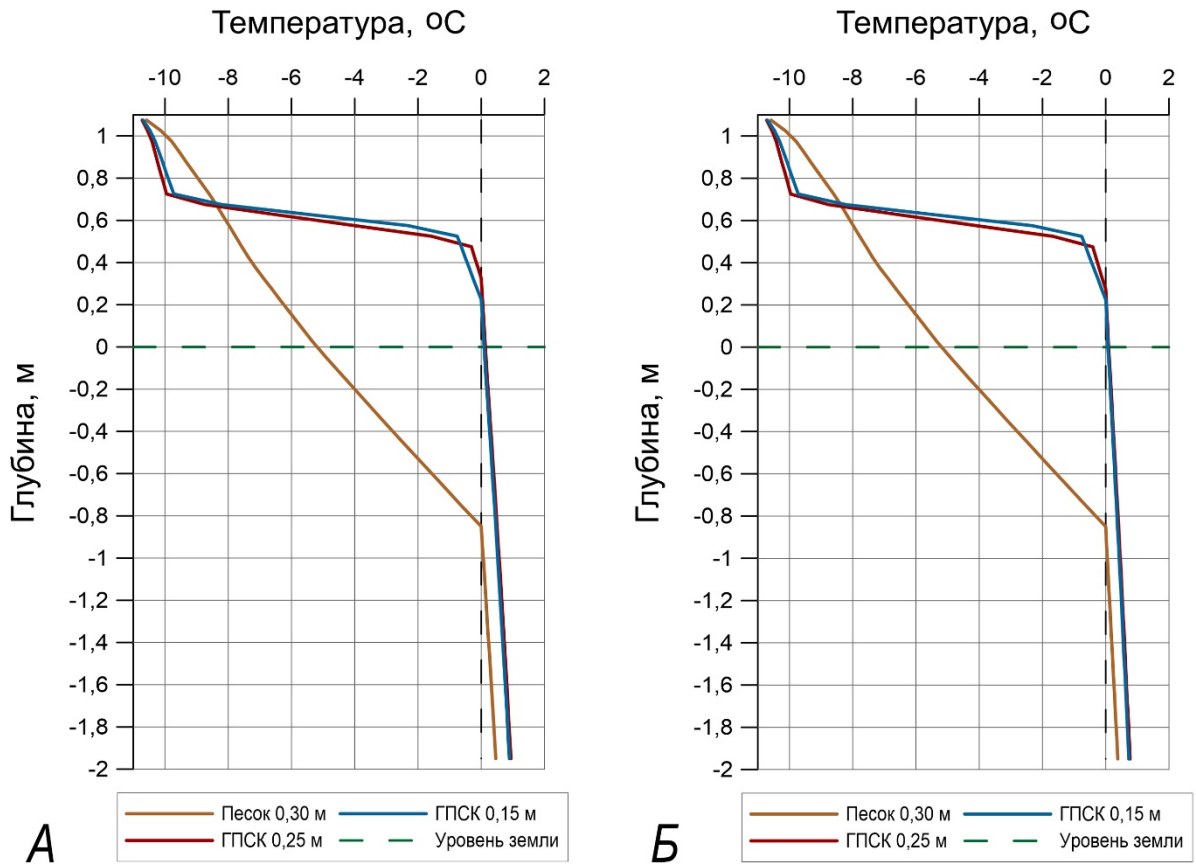


Рисунок 4.6 – Распределение температур по оси дороги:
А – 28 февраля 2017 года, Б – 28 февраля 2021 года

Результаты моделирования показали, что глубина промерзания в дорожной конструкции с морозозащитным слоем из песка толщиной 0,3 м составила 1,23 м

от низа дорожной одежды на 28 февраля 2017 года. В конструкциях с морозозащитным слоем из ГПСК толщиной 0,25 м и 0,15 м глубина промерзания составила 0,18 м и 0,23 м соответственно.

Произведенные расчеты позволяют предположить, что в конструкции автомобильной дороги теплоизоляционные свойства слоя материала ГПСК мощностью 0,25 м сопоставимы со свойствами слоя ГПСК мощностью 0,15 м. Данное обстоятельство правомерно только для участка проведения работ, так как моделирование проводилось для климатических и грунтовых условий этого участка. Для других регионов распределение температур будет другим.

При отсутствии теплоизоляционного слоя для аналогичной конструкции происходит промораживание тела насыпи на всю глубину уже в первый год эксплуатации. Дополнительно фронт промерзания распространяется под насыпь на глубину 0,85 м в естественное основание. Следует предположить, что при неблагоприятных грунтово-гидрологических условиях неизбежно будут протекать процессы морозного пучения, вызывающие разрушение дорожных конструкций.

Аналогичные геокриологические процессы наблюдаются на 5й год эксплуатации дорожной конструкции. Это объясняется не совершенностью современных программных комплексов, которые не способны прогнозировать изменение температурных условий из года в год. Программа каждый год моделирует с идентичными условиями, заданными для условий II и III рода. В реальных условиях зимние периоды с аномально низкими температурами чередуются с зимами с более благоприятными температурами.

По результатам моделирования динамики температурного поля грунтов в дорожных конструкциях можно отметить, что для полного предотвращения промерзания земляного полотна или для ограничения глубины промерзания допустимыми пределами целесообразно укладывать морозозащитный слой из ГПСК. При укладке морозозащитного слоя из ГПСК наблюдается стабилизация водно-теплового режима автомобильной дороги, следовательно, обеспечивается устойчивость и эксплуатационная надежность.

4.3 Рекомендации по технологии строительства

Устройство морозозащитных слоев из ГПСК не требует больших трудозатрат и специальной подготовки дорожного персонала. Процесс устройства слоя механизирован.

Основной задачей при выборе схемы расположения слоя ГПСК в дорожной конструкции перед дорожным инженером является необходимость исключения водонасыщения этого слоя. Скапливание воды в слое ГПСК будет напрямую сказываться на общем коэффициенте теплопроводности, который неизбежно будет стремиться к коэффициенту теплопроводности заполнителя: в летнее время вода (λ=0,556 Вт/(мК)); в зимнее время лед (λ=2,33 Вт/(мК)). Исходя из этих соображений следует рекомендовать инженерные решения, не позволяющие скапливаться воде в слое и тем более замерзать в нем в зимнее время.

Добиться сухого состояния слоя из ГПСК в дорожной конструкции можно следующими инженерными решениями:

1. Укладка ГПСК в обойму из гидроизолирующего геосинтетического материала (геомембрана). Обойма из гидроизолирующего материала будет защищать теплоизоляционный слой от попадания в него воды при фильтрации из насыпи (оттаивание грунта насыпи в теплый период, выпадающие осадки и т.д.).

2. Устройство слоя из ГПСК с уклоном от оси дороги к кювету. За счет того, что коэффициенты фильтрации у грунтов насыпи и слоя ГПСК на порядок различаются, излишки влаги будут стекать в кювет по грунтовому слою, не успевая просачиваться в грунт.

Уплотнение слоя из ГПСК должно производиться легкими катками. Количество проходов определяется исходя из принятого коэффициента уплотнения. Коэффициент уплотнения должен варьироваться в соотношении от 1,2:1 до 1,6:1 в зависимости от категории дороги и интенсивности движения [127].

4.3.1 Определение необходимого количества материала

Необходимое количество материала находится по формуле 4.1 и является произведением опорной поверхности, умноженной на готовую рабочую высоту и на коэффициент уплотнения (рисунок 4.7). Опорной поверхностью называется любая поверхность, на которую планируется отсыпать ГПСК [127].

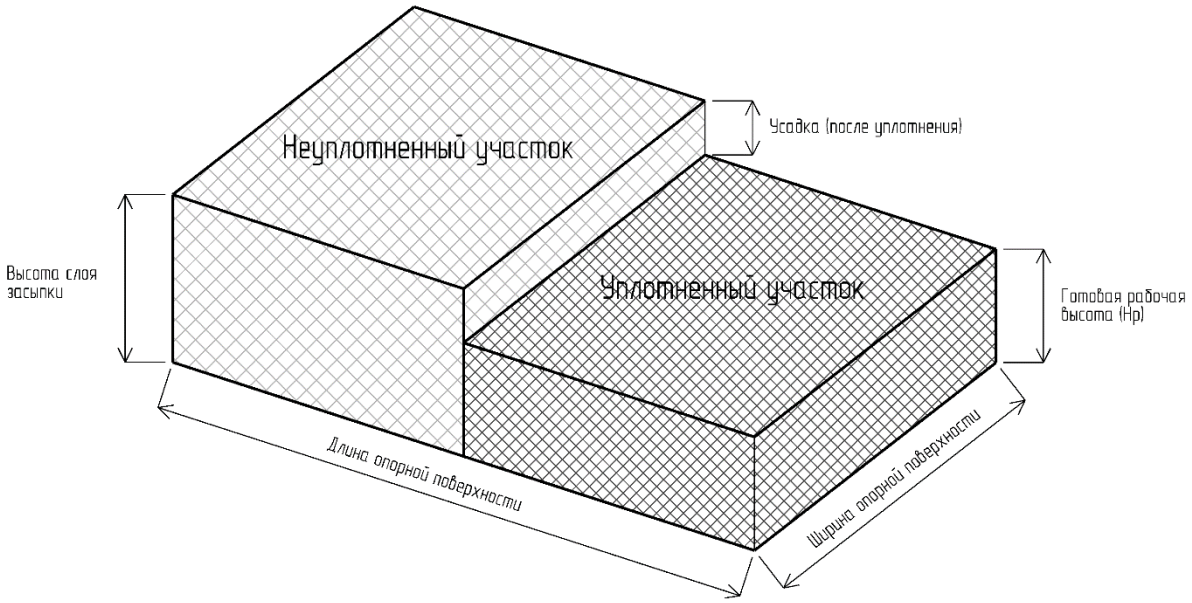


Рисунок 4.7 – Схема определения необходимого количества материала

$$V = S \times H_p \times К_{упл} \quad (4.1)$$

Где V – необходимое количество материала, м^3; S – опорная поверхность, м^2; $H_р$ – готовая рабочая высота, м; $К_{упл}$ – коэффициент уплотнения.

Площадь опорной поверхности находится по формуле 4.2.

$$S = L \times N \quad (4.2)$$

Где L – длина опорной поверхности, м; N – ширина опорной поверхности, м.

Ниже приведен пример расчета на основе опытно-экспериментального участка:

$S=50x9=450$ м^2

$H_Р=0,25$ м

$K_{упл}=1,4$

$L=450x0,25x1,4=157,5$ м^3

Высота слоя засыпки H_z составляет $0,25x1,4=0,35$ м

Дробление ГПСК в процессе уплотнения допустимо, а в некоторых случаях необходимо для придания прочности слою. Дробление ГПСК ведет к появлению новых частей материала меньших фракций с угловатой формой, которые выполняют в слое расклинивающую функцию и увеличивают угол внутреннего трения.

Дробление ГПСК не играет существенной роли на изменение физико-технических характеристик слоя. Каждая отдельная часть гранулы выполняет те же функции, что и цельная. На изломе гранула напоминает застывшую стеклянную пену с закрытопористой структурой, не впитывающей влагу (рисунок 1.20). Поэтому дробление материла не снижает теплофизические характеристики.

Учитывая возможность некоторого дробления зерен заполнителя при укладке и уплотнении конструктивного слоя дорожной одежды из ГПСК, был исследован полученный отсев дробления по зерновому составу и определен его коэффициент фильтрации. Не смотря на содержание в отсеве частиц мельче 0,05 мм более 5%, полученный отсев является сильноводопроницаемым материалом. Его содержание в уплотненном слое не влияет на дренирующие свойства уложенного слоя, что подтверждает способность слоя ГПСК выполнять не только теплоизоляционную, но и дренирующую функции [90].

При готовой рабочей высоте слоя более 0,3 м ГПСК укладывается и уплотняется в два слоя.

Для практической реализации предлагается конструкция с устройством слоя из ГПСК с уклоном от оси дороги к кювету (рисунок 4.8). Конструкция отличается высокой технологичностью. Она же была принята для ремонта автомобильной дороги на опытно-экспериментальном участке.

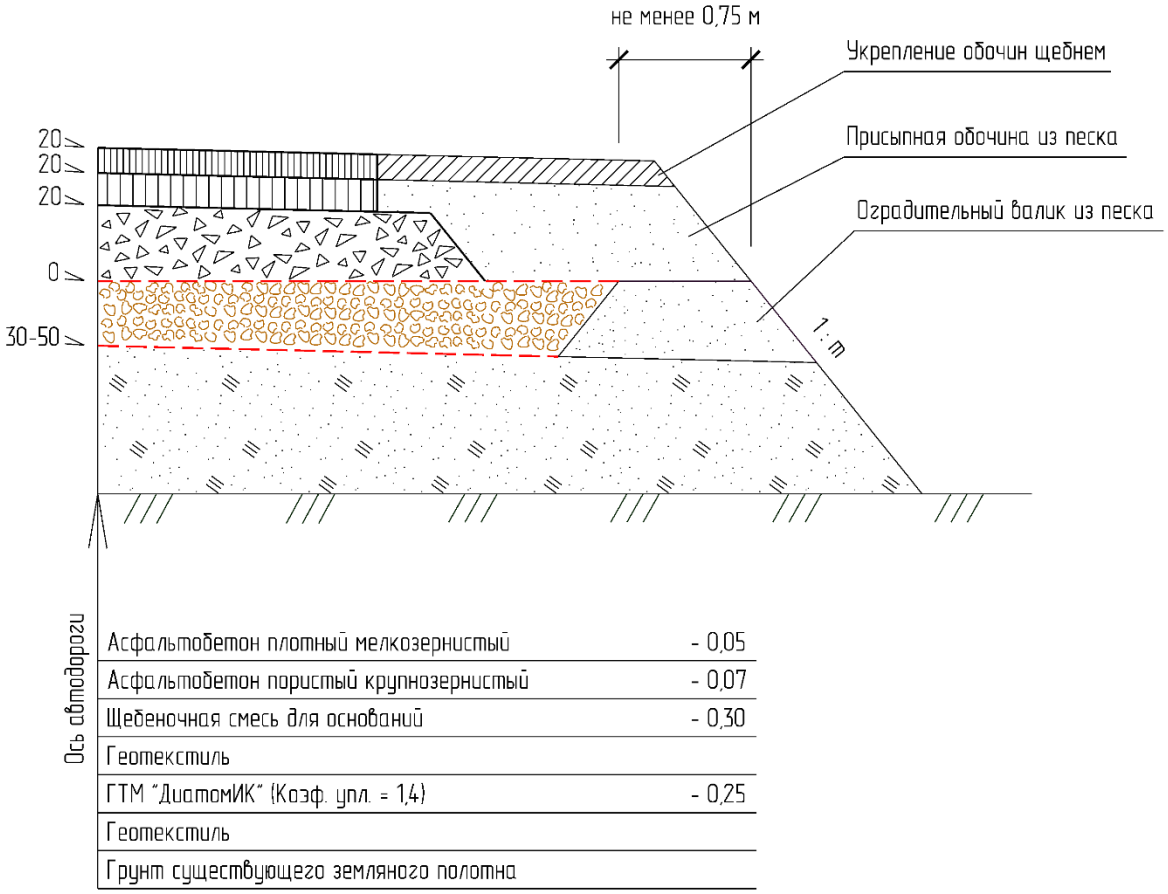


Рисунок 4.8 – Конструкция дорожной одежды, принятая для ремонта автомобильной дороги «Бескозобово-Евсино-Ламенский» км 47+540 – км 47+690 (Голышмановский район, Тюменская область)

4.3.2 Технология ремонта пучинистого участка автомобильной дороги с применением гранулированной пеностеклокерамики

Технология выполнения работ по ремонту участков дорог, подверженных пучинообразованию включает в себя следующие операции:

1 этап – подготовительный

Производится разборка существующего дорожного покрытия и основания. Осуществляется кирковка экскаватором с последующей погрузкой в автосамосвалы и транспортировкой материалов к месту утилизации, либо фрезой снимается существующий слой асфальтобетонного покрытия, который для дальнейшего использования транспортируется в автосамосвалах к месту хранения.

Далее производится подготовка подстилающего грунта верха земляного полотна – планировка и уплотнение поверхности.

Планировка осуществляется экскаватором или бульдозером с приданием поверхности продольного уклона в обе стороны от оси дороги. Поперечный уклон поверхности должен быть равен 30-50 ‰. Доуплотнение производится по общеизвестной технологии с использованием катков. Коэффициент уплотнения грунта должен соответствовать нормативным требованиям, поверхность не должна иметь колей, ям и других неровностей.

До начала укладки геосинтетического материала по спланированной призме необходимо уложить на расстояние не менее 0,75 м в краевых частях оградительные валики из грунта на принятую по проекту высоту слоя засыпки ГПСК (H_z). Оградительные валики необходимы для того чтобы при отсыпке ГПСК не происходило пересыпание материала за пределы насыпи. Для укладки валиков необходимо использовать хорошо дренирующий грунт, для того чтобы вода из слоя ГПСК беспрепятственно дренировалась через валик в кювет.

2 этап – укладка первого слоя геотекстильного материала

Для разделения насыпного материала и грунтов насыпи и улучшения теплоизоляционных свойств слоя ГПСК на подготовленную поверхность насыпи укладывается слой нетканого геотекстильного материала. Состав работ включает транспортировку, распределение по участку рулонов геотекстиля, их укладку и при необходимости соединение. Укладку полотен выполняют в продольном или поперечном направлении относительно оси насыпи. Полотна укладывают с перекрытием не менее 0,3 м.

3 этап – грузоперевозка ГПСК

Материал доставляется на место проведения работ большегрузными автомобилями и выгружается непосредственно в подготовленное корыто на уложенные полотна геотекстиля. За счет низкой насыпной плотности объемы материала до 100 м^3 могут быть перевезены за одну ходку (по принципу

автопоезда). Отсыпку ГПСК производят по способу «от себя» без заезда строительных машин на открытые полотна.

4 этап – разравнивание и планировка ГПСК

Разравнивают и профилируют ГПСК бульдозером на гусеничном ходу или автогрейдером методом «от себя» с учётом коэффициента запаса на уплотнение. На верхней границе слоя из ГПСК уклон не задается.

5 этап – уплотнение

Уплотнение производится лёгкими гладковальцовыми катками до проектного коэффициента уплотнения.

6 этап – укладка второго слоя геотекстильного материала

После завершения процесса уплотнения на слой ГПСК укладывается геосинтетический материал, для предотвращения проникновения щебня в слой ГПСК. Также геотестильный материал распределяет нагрузку, появляющуюся от уплотнения вышележащих слоев дорожной одежды.

7 этап – устройство щебеночного основания дорожной одежды

Устройство щебеночного основания дорожной одежды производится в две стадии. На первом этапе укладывается 1й слой щебня по методу «от себя» и уплотняется средними катками. На втором этапе укладывается 2й слой щебня продольным способом в соответствии с положениями нормативных документов и уплотняется тяжелыми катками.

8 этап – устройство покрытия дорожной одежды

Устройство слоев покрытия дорожной одежды производится по традиционной технологии в соответствии с положениями нормативных документов.

9 этап – формирование присыпной обочины

На последнем этапе производят работы по формированию присыпных обочин из песка или щебеночно-песчаной смеси и укреплению если это

предусмотрено проектом (используется старый материал основания на участке ремонта).

4.4 Рекомендации по использованию гранулированной пеностеклокерамики при строительстве автомобильных дорог в районах распространения многолетнемерзлых грунтов

Больше половины территории России находится в криолитозоне, характеризующейся широким распространением многолетнемерзлых грунтов. Южная граница распространения мерзлоты в европейской части страны проходит южнее Полярного круга, спускаясь в азиатской части до 50 градусов северной широты, захватывая юг Забайкалья и Амурской области и снова поднимаясь вверх в районе побережья Охотского моря [4].

В ряде регионов России (север страны и Дальний Восток) в период с начала апреля накладываются ограничения на движение тяжелого грузового транспорта и техники для того, чтобы снизить вероятность серьезных повреждений или разрушения дороги во время интенсивного сезонного протаивания грунтов. Подобная ситуация приводит к невозможности временно использовать целый ряд ключевых для отдельных регионов маршрутов и в конечном итоге ведет к значительным экономическим потерям.

Деформации дорожных конструкций, обусловленные осадкой при оттаивании льдистых грунтов или пучением при промерзании влажных дисперсных грунтов основания, относятся к числу основных проблем, которые вынуждены решать специалисты-проектировщики при строительстве автомобильных дорог в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов.

Основная причина подобных деформаций состоит в отепляющем воздействии земляного полотна автомобильных дорог на мерзлые грунты основания, которые меняют свои физико-механические свойства при оттаивании. Возведение дорожной насыпи приводит к значительным изменениям условий теплообмена грунта основания с атмосферой. При этом верхняя поверхность

насыпи (основная площадка) усиливает охлаждение грунта зимой за счет искусственного удаления с ее поверхности снега, а откосы, наоборот, уменьшают его за счет накопления на них снега, счищаемого с основной площадки, и в результате ветрового снегопереноса. На откосах также увеличивается отепление грунта летом за счет солнечной энергии, поступление которой возрастает из-за уменьшения отражательной способности поверхности откоса и его наклона к горизонту [4].

На сегодняшний день, как в отечественной, так и зарубежной практике отсутствуют универсальные методы защиты оснований дорожных конструкций от растепления для условий распространения многолетнемерзлых грунтов. За всю более чем вековую историю транспортного строительства в условиях криолитозоны никому и нигде не удалось построить объект транспортной инфраструктуры, который бы не испытывал описанных выше проблем [56].

4.4.1 Выбор принципа проектирования и анализ существующих подходов к проектированию для условий распространения многолетнемерзлых грунтов с точки зрения регулирования температурного режима дорожных конструкций

При строительстве в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов приходится делать сложный выбор между тремя принципами проектирования [88].

I принцип проектирования для районов распространения многолетнемерзлых грунтов

Строительство по первому принципу проектирования предполагает сохранение мерзлотных условий в основании дорожных конструкций, что требует специальных мероприятий по охлаждению грунтов и предотвращению оттаивания.

К традиционно применяемым мероприятиям по предотвращению растепления мерзлых грунтов относятся:

1. отсыпка насыпей из «самоохлаждающихся» грунтов;
2. устройство набросок и берм из фракционного камня;

3. установка охлаждающих устройств;

4. укладка слоев из теплоизоляционных материалов;

5. обеспечение стока воды на прилегающей территории и предотвращение образования термокарстовых явлений (устройство дренажных систем);

6. полная или частичная замена природных мерзлых грунтов привозными грунтами на наиболее сложных участках трассы.

Данные мероприятия, зачастую, требуют комплексного применения, а устройство СОУ и теплоизоляции из синтетических материалов существенно повышает проектную стоимость объекта.

На сегодняшний день основным типом искусственных теплоизоляционных материалов, применяемых при строительстве в условиях распространения мерзлых грунтов, являются пенолистирольные плиты. При этом среди специалистов (дорожников и мерзлотоведов) до сих пор не существует единого мнения об эффективности применения синтетических теплоизоляторов для районов распространения мерзлых грунтов [3].

Строительство по первому принципу является проверенным и надежным методом повышения надежности и долговечности дорожных конструкций для районов распространения мерзлых грунтов. Совершенствование конкретных инженерных решений, используемых при возведении объектов транспортной инфраструктуры по первому принципу проектирования, предполагает внедрение новых материалов и технологий, способных повысить не только качество выполняемых работ, но и их эффективность строительства (прежде всего, с экономической точки зрения).

II принцип проектирования для районов распространения многолетнемерзлых грунтов

При строительстве дорог в области распространения многолетнемерзлых грунтов по II-му принципу проектирования допускается некоторое растепление основания дорожной конструкции.

Анализ строительства дорог в области распространения многолетнемерзлых грунтов показывает, что дорожные конструкции, спроектированные по второму принципу и отсыпанные с использованием дренирующих грунтов, в большинстве случае имеют сверхнормативные, неравномерные эксплуатационные осадки [8]. Осадки продолжаются в течение длительного периода и приводят к повреждениям дорожных одежд, ухудшают ровность дорог и повышают интенсивность ремонтных мероприятий (в отдельных случаях требуют проведения внеплановых работ по реконструкции) [9].

Для снижения риска осадок в оттаивающих основаниях насыпей на мерзлых грунтах, в технических нормативах РФ в подобных случаях рекомендовалось максимально использовать прочные скальные, песчано-гравийные и песчаные грунты, что, в свою очередь, требует наличия сырьевой базы в регионе строительства.

Обеспечения «проектной экономичности» и снижения себестоимости дорогостоящего северного строительства, заставляет проектировщиков принимать при сравнении вариантов проекта тот, который соответствует второму принципу проектирования. Это позволяет на 30% снизить высоту дорожных насыпей на мерзлоте (назначаемую по теплотехническому расчёту) и за счёт снижения объёмов, повысить темпы строительства, а главное снизить его стоимость по данному варианту (но, не стоимость последующей эксплуатации).

Однако, несмотря на значительные затраты и применение дорогостоящих скальных, крупнообломочных, песчано-гравийных и песчаных грунтов, надёжная эксплуатационная устойчивость насыпей этих дорог на мерзлоте чаще всего так и не обеспечивается.

Основной причиной описанных выше неблагоприятных процессов является строительство по второму принципу проектирования с использованием дренирующих грунтов в основании дорожной насыпи. При допускаемой затем эксплуатационной осадке, дренирующий грунт тела насыпи оседает, а в оттаявшее основание превращается в водопроницаемую чашу. Данная «осадочная чаша» с дренирующим грунтом заполняется водой, что приводит к интенсификации

процессов дополнительного оттаивания мерзлых грунтов в основании насыпи, вплоть до её полного разрушения. Происходит значительное снижение прочностных характеристик грунтов основания (особенно для глинистых и пылеватых грунтов) и последующее возникновение тиксотропных процессов виброразжижения (с выдавливанием и осадкой) переувлажнённого грунта основания от динамического воздействия транспорта.

Кроме того, следует отметить, сама дорожная насыпь, высотой всего 1,0-1,5 м, построенная по второму принципу (особенно из более теплопроводных дренирующих грунтов) оказывает отепляющее воздействие на мёрзлые грунты основания (за счёт летнего избыточного прогрева откосов).

Второй принцип проектирования в дорожном строительстве сохранился скорее, как наследие советского времени (интенсивное освоение регионов Севера и Дальнего Востока в условиях практически полного отсутствия сети автомобильных дорог позволяло прибегать к любым проектным решениям, позволяющим снизить затраты на строительство). Применение данного принципа на практике, хотя и обеспечивает некоторое сокращение затрат и снижение времени строительства, совершенно не гарантирует долговечности и стабильности дорожных конструкций, особенно при длительных сроках эксплуатации. Практика показывает, что незначительная экономия на этапе строительства в дальнейшем может трансформироваться в существенное увеличение затрат на эксплуатацию объекта.

К тому же строительство по второму принципу требует проведения подробных инженерных изысканий с детальными исследованиями физических и механических свойств мерзлых грунтов основания вдоль всей трассы дороги, что также может увеличить стоимость объекта.

III принцип проектирования для районов распространения многолетнемерзлых грунтов

Строительство автомобильных дорог в области распространения многолетнемерзлых грунтов по третьему принципу проектирования предполагает полную или частичную замену мерзлого грунта основания на привозной грунт.

Данный метод характеризуется высокой степенью надежности, а его применение с большой долей вероятности гарантирует надежность и долговечность дорожной конструкции.

Главным недостатком строительства по третьему принципу проектирования является значительное повышение затрат. Данный подход к проектированию дорожных конструкций может применятся в отдельных случаях (на отдельных участках проектируемой дороги).

При строительстве по третьему принципу значительно увеличивается объем земляных работ и площадь земель, отводимых под карьеры и подъездные дороги. Увеличиваются и затраты энергоресурсов на транспортировку и замену грунтов. В странах северной Европы специалисты дорожной отрасли рекомендуют избегать использования данного метода, исходя из соображений охраны окружающей среды и рационального использования ресурсов [125].

4.4.2 Регулирование водного режима дорожной конструкции для районов распространения многолетнемерзлых грунтов

По мнению специалистов мерзлотоведов и дорожников, в подавляющем большинстве случаев деформации земляного полотна дорожных конструкций для районов распространения многолетнемерзлых грунтов обусловлены деятельностью поверхностных и надмерзлотных грунтовых вод, приводящей к постепенному растеплению грунтов в основаниях дорожных насыпей.

По мнению ведущих учёных Института мерзлотоведения АН СССР, основанном на большом количестве обширных и многолетних исследований различных зон распространения многолетнемерзлых грунтов, обводнение отдельных участков мерзлоты обычно предшествует явлениям термокарста и является чаще их причиной, чем следствием.

По этой причине крайне важно не допускать как попадания влаги в основания дорожной конструкции, так и обеспечить эффективное водоотведение из земляного полотна дорожных конструкций [7].

Эффективность типовых конструкций может реализовываться при выполнении следующих условий:

- Трасса и продольный профиль линии следует проектировать с учетом инженерно-геокриологических условий;
- Требуется устройство поверхностного водоотвода и дренажной системы для удаления избытка влаги из земляного полотна;
- Для предотвращения возникновения и развития термокарстовых явлений отвод воды от земляного полотна на участках с просадочными грунтами должен осуществляться с максимально возможным частым поперечным перепуском вод в низовую сторону;
- Водопропускные сооружения должны устраиваться в каждом понижении рельефа, так, чтобы протяжение продольных водоотводов максимально сокращалось;
- Отводы в зоне водопропускных сооружений должны быть организованы с максимальной точностью, чтобы не допустить образования в непосредственной близости от них и в пределах полосы отвода термокарстовых озер и вторичного заболачивания;
- На участках с льдистыми грунтами, где земляное полотно запроектировано по I принципу, должны предусматриваться конструктивные и технологические приемы по исключению нарушений поверхностных условий, которые могут привести к появлению в полосе отвода и в пределах водоохраной зоны оттаивания мерзлоты и образования термокарста.

Вышеперечисленные особенности проектирования автомобильных дорог в районах распространения многолетнемерзлых грунтов предполагают разработку конструктивно-технологических решений земляного полотна, устойчивых к неравномерным осадкам основания или полностью предотвращающим возможность оттаивания.

При этом новые конструктивные решения должны обеспечить длительную устойчивость температурного и водного режимов оснований дорожных насыпей даже с учетом возможных изменений климата.

Для снижения риска возможных дефектов земляного полотна предлагается применение нестандартных решений, использование которых в нижней части дорожной конструкции позволит:

- Предотвратить массовое просачивание влаги в нижнюю часть дорожных насыпей, даже в случае просадки грунтов основания;
- Повысить термическую устойчивость дорожных конструкций;
- Ускорить темпы строительства;
- Снизить общую стоимость автомобильных дорог;
- Повысить долговечность и надежность транспортной системы регионов Севера;
- Снизить негативное воздействие на окружающую среду при строительстве дорог;
- Сократить объемы земляных работ.

Предложенные типовые конструкции с устройством теплоизоляционно-дренирующего слоя ГПСК разработаны специально для условий криолитозоны, а их внедрение способно оказать комплексное положительное воздействие на дорожное строительство (по всем пунктам, перечисленным выше).

Слой ГПСК в различных вариантах типовых дорожных конструкций располагался в соответствие со следующими научно-обоснованными принципами:

1. Теплоизолятор, уложенный в насыпи, должен эффективно регулировать температурный режим грунтов основания и подстилающих вечномерзлых грунтов.

2. В низких насыпях теплоизолятор должен быть уложен непосредственно вблизи подошвы насыпи на всю ее ширину, что позволит снизить риск проникновения границы сезонного оттаивания в вечномерзлое основание.

3. В высоких насыпях теплоизолятор должен укладываться в основание откосов на всю их длину, что и обеспечит сохранение мерзлого состояния грунтов

основания. Для высоких насыпей толщина теплоизолятора будет напрямую зависеть от соотношения общей длины откосов и берм к ширине основной площадки, с ростом этого отношения она будет увеличивается.

4. Толщина слоя теплоизолятора должна назначаться на основе математического моделирования теплового взаимодействия насыпи с грунтами основания или аналитического расчета. Она зависит от высоты насыпи.

5. При увеличении площади поверхности отепления (откосы) и при неизменной поверхности охлаждения (основная площадка) для сохранения мерзлого состояния грунтов основании насыпи требуется большая величина термического сопротивления теплоизолятора на откосах.

6. Слой теплоизолятора, уложенный у поверхности основной площадки, снижает только оттаивание по оси пути. Только теплоизолятор, уложенный у подошвы насыпи, позволяет сохранить грунты основания под всей основной площадкой в мерзлом состоянии.

7. При укладке слоя теплоизоляционного материала толщины, при которой глубина сезонного оттаивания на откосе равна глубине сезонного промерзания, откос начинает оказывать охлаждающее влияние на всю дорожную конструкцию. Следовательно, обеспечение мерзлого состояния грунтов основания насыпи любой высоты (в независимости от ширины основной площадки) с помощью укладки слоя теплоизолятора без использования дополнительных охлаждающих средств (каменной наброски, вентиляционных коробов, СОУ), является возможным.

8. При укладке слоя теплоизолятора у поверхности основной площадки (для низких насыпей) происходит уменьшение охлаждающего влияния основной площадки при прежнем влиянии откоса. Соответственно, при таком расположении слоя теплоизолятора необходимо дополнительное утепление откоса.

Следует отметить, что не допускается применение ГПСК для устройства теплоизоляционных слоев зоне распространения многолетнемерзлых грунтов при близком залегании грунтовых вод или высокой обводненности территории без

специальных мероприятий по обеспечению дренажа и гидроизоляции слоя материала.

Ниже представлены типовые конструкции с использованием ГПСК для устройства теплоизоляционных слоев в автомобильных дорогах в условиях распространения ММП.

4.4.3 Типовые конструкции насыпей

Конструкции насыпи на низкотемпературной мерзлоте

Конструкции на рисунке 4.9 и 4.10 необходимо проектировать согласно первому принципу в 1_1 и 1_2 дорожно-климатических подзонах на участках, характиризующихся сплошным распространением ММП с температурой ниже минус 1,5°С.

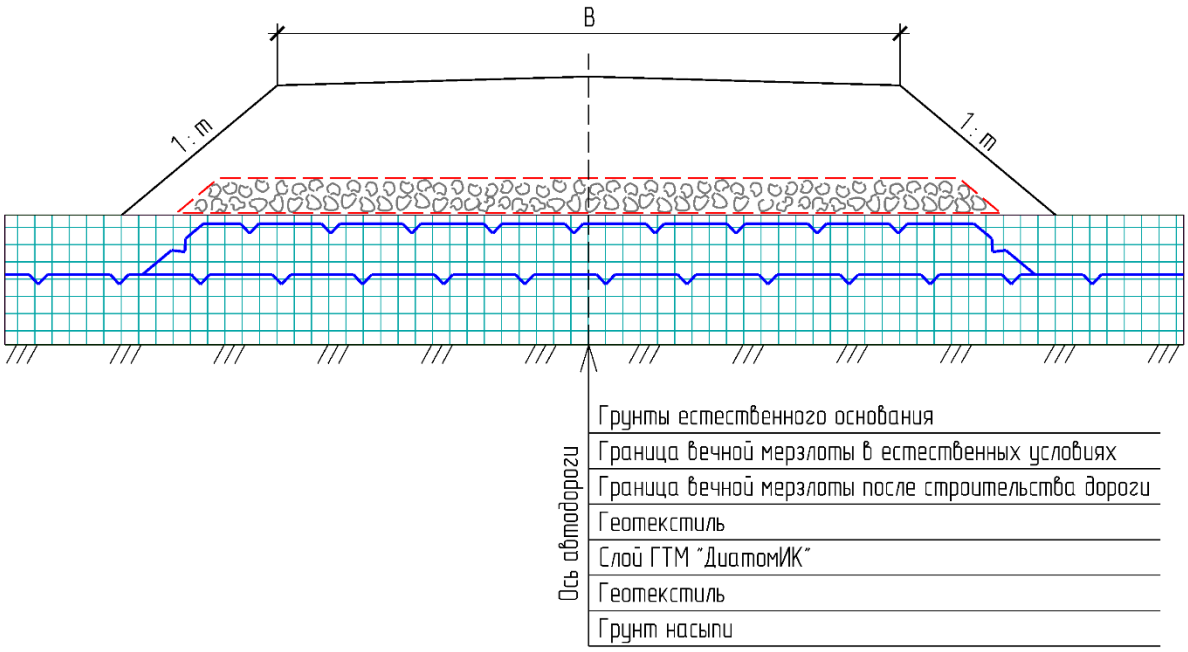


Рисунок 4.9 – Типовая конструкция насыпи на сухих участках

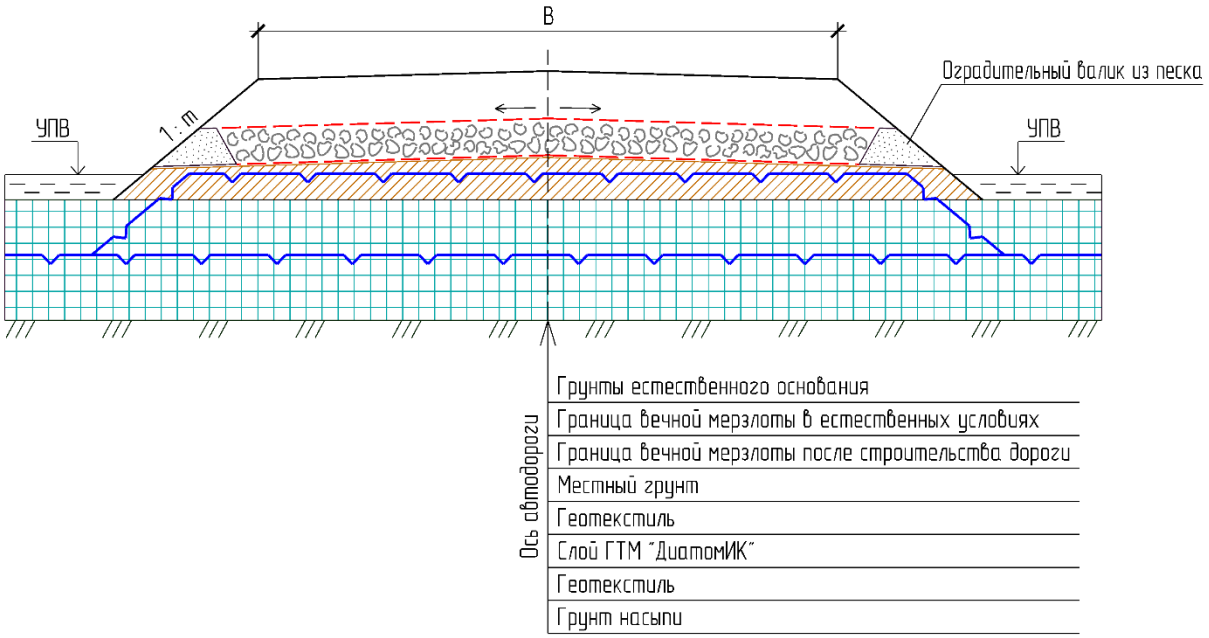


Рисунок 4.10 – Типовая конструкция насыпи на подтопляемых участках

Конструкция на рисунке 4.9 применительна к участкам с благоприятными грунтово-гидрологическими условиями (сухие места), где не требуется устройство поверхностного водоотвода и дренажной системы для удаления избытка влаги из земляного полотна и для предотвращения возникновения и развития термокарстовых явлений в основании.

В некоторых случаях отсыпку из ГПСК необходимо проектировать только в зоне подошвы откосов насыпи (подтверждается теплотехническим расчётом).

Конструкция на рисунке 4.10 применительна к участкам, где возможно скапливание кратковременно и долго стоящих поверхностных вод вдоль насыпи. Слой из ГПСК необходимо проектировать выше уровня поверхностных вод с уклоном 3-5% от оси к бровкам, что не позволяет свободно мигрировать застаивающейся воде в гранулированный теплоизоляционный слой. В нижней подтапливаемой части насыпи возможно использовать любой местный некондиционный грунт, так как он сохраняется в мерзлом состоянии на протяжении всего срока эксплуатации инженерного сооружения. Теплоизоляционный слой из ГПСК дополнительно выполняет дренирующую

функцию в теплый период года и отводит избыток воды из верхних слоев насыпи в кювет.

В дорожных конструкциях на контакте слоев ГПСК со смежными слоями следует предусматривать устройство разделяющих прослоек из геотекстиля, исключающих взаимопроникновение материалов смежных слоев и снижения в связи с этим теплоизоляционных и дренажных характеристик.

Конструкции насыпи на высокотемпературной мерзлоте

На высокотемпературной (выше минус 1,5°С) неустойчивой мерзлоте прерывистого и островного распространения преимущественно в 1_3 дорожно-климатической подзоне необходимо проектировать насыпи по I принципу согласно рисунку 4.9 и 4.10 с дополнительным устройством термосифонов – сезонно-охлаждающих устройств (СОУ) в основании насыпи под основной площадкой или откосной частью (выбор конструктивного решения обосновывается теплотехническим расчетом).

На высокотемпературной мерзлоте необходима дополнительная подзарядка холодом основания в зимний период с помощью СОУ, так как на прерывистой и островной высокотемпературной мерзлоте отсутствует боковой подток холода к основанию от мерзлых толщ. Накопленный холод посредством СОУ за зимний период в основании насыпи будет сохраняться на протяжении всего теплого периода года за счет устройства теплоизоляционного слоя из ГПСК в теле насыпи.

Конструкции теплоизоляции откосов насыпи

Теплоизоляцию откосов ГПСК проектируют с целью поднятия границы вечномерзлых грунтов в откосной части и предотвращению осадки насыпей на оттаивающих вечномерзлых грунтах.

Также покрытие откосов насыпей ГПСК назначают с целью предупреждения сплывов и оползаний за счет уменьшения глубины промерзания и величины морозного пучения грунта. Указанным деформациям подвержены, как правило, высокие (свыше 6 м) насыпи, сложенные глинистыми грунтами.

Теплоизоляцию откосной части с помощью ГПСК можно производить на проблемных участках существующей сети автомобильных дорог.

На рисунке 4.11 показано техническое решение предусматривающее отсыпку ГПСК в объемную георешетку.

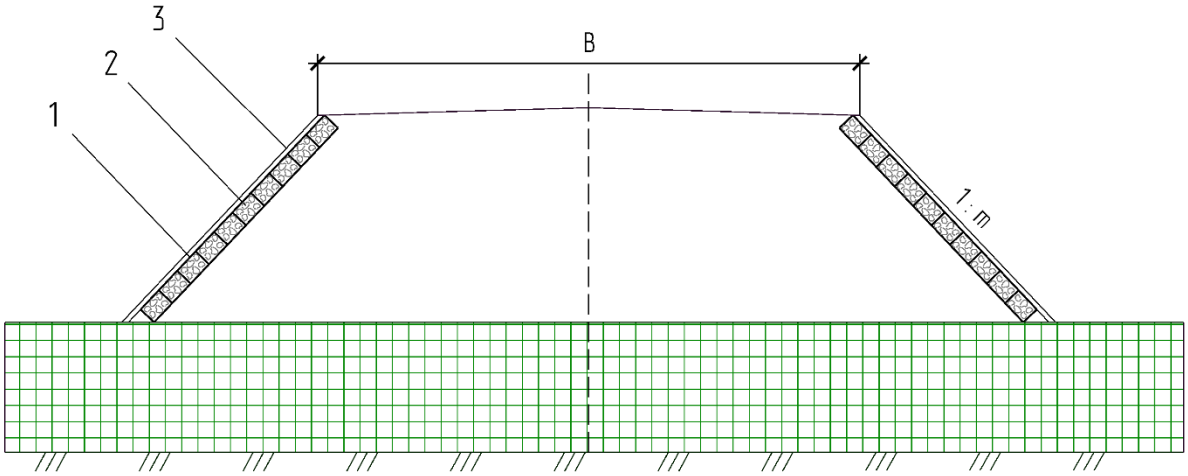


Рисунок 4.11 – Схема укладки гранулированной пеностеклокерамики на откосы насыпи: 1 – георешетка; 2 – ГПСК; 3 – укрепительный слой

Теплоизоляцию откосов выемки проектируют по такой же схеме.

Техническим результатом внедрения новых конструкций является повышение устойчивости насыпи за счет более надежного способа поддержания грунтов основания автомобильной дороги в промороженном состоянии, а также за счет укрепления отдельных зон тела насыпи, предотвращения сплошного водонасыщения, фильтрации и разжижения грунта при оттаивании льда.

Выводы по четвертой главе

1. Выполненный теплотехнический расчет в программном комплексе «QFrost» реальных дорожных конструкций с морозозащитным слоем из песка мелкого и ГПСК показал, что устройство морозозащитного слоя из ГПСК позволяет предотвратить промерзания земляного полотна или ограничить глубину промерзания допустимыми пределами. Глубина промерзания в дорожной конструкции с морозозащитным слоем из песка толщиной 0,3 м составила 1,23 м

от низа дорожной одежды через 1 год эксплуатации, а в конструкции из ГПСК толщиной 0,25 м составила 0,23 м. При укладке морозозащитного слоя из ГПСК наблюдается стабилизация водно-теплового режима автомобильной дороги, следовательно, обеспечивается устойчивость и эксплуатационная надежность.

2. По проведенным теоретическим и экспериментальным исследованиям для практической реализации предложена оптимальная дорожная конструкция с устройством морозозащитного слоя из ГПСК в основании дорожной одежды для предотвращения процессов морозного пучения в грунтах земляного полотна на пучинистых участках. Предложенная конструкция приминительна для ремонта, реконструкции, а также нового строительства автомобильных дорог.

3. Выработаны рекомендации по технологии ремонта пучинистого участка автомобильной дороги с применением ГПСК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Диссертационная работа выполнена на актуальную тему исследования по изучению процессов промерзания грунтов земляного полотна автомобильных дорог и поиску методов борьбы с морозным пучением. Предложено решение важной народно-хозяйственной задачи, позволяющее повысить эксплуатационную надежность и долговечность автомобильных дорог за счет устройства морозозащитного слоя в основании дорожной одежды из ГПСК в сложных природно-климатических и грунтово-геологических условиях.

2. Разработан универсальный экспериментальный стенд, позволяющий в лабораторных условиях моделировать процессы промерзания грунтов земляного полотна в условиях открытой и закрытой систем и проводить измерения температурного режима и морозного пучения, изучение которых имеет практическую значимость в строительстве автомобильных дорог на территориях, подвергающихся сезонному промерзанию. Разработанный экспериментальный стенд позволяет воспроизвести условия промерзания дорожной конструкции и сравнить эффективность морозозащитных слоев из разных теплоизоляционных материалов в конструкциях инженерных сооружений, работающих в различных температурных и грунтовых условиях.

3. Проведенная серия экспериментов по исследованию температурного, влажностного и деформационного режима грунтов земляного полотна инженерных сооружений в условиях промерзания для 3 моделируемых конструкций (модель с плитами из экструзионного пенополистирола, модель с ГПСК и модель без теплоизолятора) показала следующее:

- глубина промерзания в одинаковых условиях на конец эксперимента составила: в модели без теплоизолятора – 24 см, в модели с пенополистиролом – 10,5 см, в модели с ГПСК – 13,5 см;
- высота поднятия грунта в модели без теплоизолятора составила 8,1 мм, при тех же условиях поднятие грунта в моделях с теплоизоляторами не зафиксировано;

- в модели без теплоизолятора наблюдались процессы подсоса влаги к границе промерзания с образованием шлиров льда, в моделях с пенополистиролом и ГПСК таких процессов не зафиксировано.

4. Теплотехнический расчет реальных дорожных конструкций с морозозащитным слоем из песка мелкого и ГПСК показал следующее: глубина промерзания в дорожной конструкции с морозозащитным слоем из песка мелкого толщиной 0,3 м составила 1,23 м от низа дорожной одежды через 1 год эксплуатации, а в конструкции из ГПСК толщиной 0,25 м составила 0,18 м.

5. Выполненное физическое и математическое моделирование промерзания грунтов в дорожных конструкциях показало, что для полного предотвращения промерзания земляного полотна или для ограничения глубины промерзания допустимыми пределами целесообразно укладывать морозозащитный слой из ГПСК. При укладке морозозащитного слоя из ГПСК наблюдается стабилизация водно-теплового режима автомобильной дороги, следовательно, исключаются процессы морозного пучения грунтов земляного полотна.

6. Для практической реализации разработана дорожная конструкция с устройством морозозащитного слоя из ГПСК в основании дорожной одежды. Предложенная конструкция подходит для ремонта, реконструкции, а также нового строительства автомобильных дорог. Выработаны рекомендации по технологии ремонта пучинистого участка автомобильной дороги с применением ГПСК. Разработанная конструкция и технология строительства внедрены при ремонте участка автомобильной дороги с устройством морозозащитного слоя из ГПСК «Бескозобово-Евсино-Ламенский» км 47+540 – км 47+690 (Голышмановский район, Тюменская область).

7. Материалы исследований использованы при разработке серии нормативно-технической документации:

- Стандарт организации (СТО) 90903792.001 – 2015. «Материал «ДиатомИК» теплоизоляционный гранулированный. Технические условия» (приложение Б). Разработан ФАУ «РОСДОРНИИ». СТО 90903792.001 – 2015 согласован Федеральным дорожным агентством «РОСАВТОДОР» Министерства

транспорта РФ письмом № 01-29/9134 от 30.03.2016 года в части, касающейся автомобильных дорог и сооружений на них (приложение В).

- Технические условия (ТУ) по применению гранулированного теплоизоляционного материала «ДиатомИК» для стабилизации земляного полотна (приложение Г). Разработан АО «ВНИИЖТ» и согласован в Управлении пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры – филиал ОАО «РЖД».
- По проведенным исследованиям были сделаны предложения по разработке нормативного документа «Свод правил (СП) по проектированию и строительству автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты» взамен ВСН 84-89 «Изыскание, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты». Предложения были рассмотрены ЗАО «ПРОМТРАНСНИИПРОЕКТ» и внесены в новую редакцию СП (приложение Д).

8. Проведенные исследования свидетельствуют о перспективности использования нового материала в дорожном строительстве РФ. Внедрение новых дорожных конструкций с применением ГСПК является одним из возможных способов повышения эксплуатационной надежности и функционирования на долгосрочную перспективу транспортной инфраструктуры РФ.

9. В данном исследовании основное внимание уделено автомобильным дорогам, но необходимо отметить, что устройство морозозащитных слоев из ГПСК актуально и при строительстве других инженерных сооружений: железные дороги, аэродромы, площадки под здания и промышленные зоны, кустовые площадки нефтегазовых месторождений и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. II часть. КИП, пирометры, метрологическое оборудование, система температурного мониторинга протяженных объектов, приборное обеспечение энергоаудита [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.omsketalon.ru/catalog_2012/catalog_2012_2.pdf (12.03.2016).

2. Атлас Тюменской области. Главное управление геодезии и картографии Вып. 1. Москва-Тюмень, 1971.

3. Ашпиз Е.С. Использование синтетических теплоизоляторов для сохранения мерзлотных условий в основании железнодорожной насыпи / Е. Ашпиз, Л. Хрусталев, М. Ведерникова, Л. Емельянова // Криосфера Земли. – 2008. – Т. 12, №2. – С. 84–89.

4. Ашпиз Е.С. Проектирование земляного полотна железных дорог в зоне многолетнемерзлых грунтов / Е.С. Ашпиз // Транспортное строительство. – 2012. – № 4. – С. 18-21.

5. Бабков В.Ф. Проектирование автомобильных дорог / В.Ф. Бабков, О.В. Андреев // Учебник для вузов. − Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1987. – Ч.1. – 368 с.

6. Бадина М.В. Повышение качества проектирования и сроков службы дорожных конструкций за счет учёта региональных природно-климатических условий (II, III, IV дорожно-климатические зоны на территории Западной Сибири): дис. … канд. техн. наук. – Томск, 2009. – 199 с.

7. Бедрин Е.А. Обеспечение термической устойчивости основания земляного полотна автомобильных дорог [Текст]: монография / Е. А. Бедрин, А. М. Завьялов, М. А. Завьялов; М-во образования и науки РФ, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Сибирская гос. автомобильно-дорожная акад. (СибАДИ). – Омск: СибАДИ, 2012. – 178 с.

8. Бедрин Е. А. Прогнозирование термической (тепловой) устойчивости основания земляного полотна автомобильных дорог [Текст] / Е. А. Бедрин, А. М.

Завьялов, М. А. Завьялов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2012. – Вып. 2 (24). – С. 30-33

9. Бедрин Е. А. Стабилизация грунтов при строительстве оснований автомобильных дорог [Текст] / Е. А. Бедрин, В. Е. Ефименко, Т. П. Клинт // Инновации, качество, образование - перспективы развития дорожного комплекса России : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Барнаул, 2-5 апр. 2007 г. / АлтТГУ, СибАДИ. – Барнаул : Изд-во АлтТГУ, 2007. – Ч. 2. – С. 156-159.

10. Баталин. Б.С. Научно–обоснованной методики испытаний пенополистирола на долговечность не существует / Б.С. Баталин, А.Н. Боков, Л.Д. Евсеев, В.В. Мальцев // Зеленые строительные технологии. – 2012/13. – № 1 (1). – С. 37-40.

11. Баталин Б.С. Эксплуатационные свойства пенополистирола вызывают опасения / Б.С. Баталин, Л.Д. Евсеев // Строительные материалы. – 2009. – №10.

12. ВСН 46-72. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. Министерство транспортного строительства СССР. – М.: Транспорт, 1972. – 76 с.

13. ВСН 46–83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. Министерство транспортного строительства СССР. – М.: Транспорт, 1985. – 157 с.

14. Генералов П. П. Опалиты эоцена Западной Сибири [Текст] / П. П. Генералов, Н. Б. Дрожащих // Опалиты Западной Сибири. – Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1987. – С. 3-10.

15. Горелик Я.Б. Методы расчета деформаций инженерных конструкций, вызванных пуением пород промерзающего слоя // Криосфера Земли, 2010. – т. XIV. – № 1. – С. 50–62.

16. Горелик Я.Б. К теории сил морозного пучения грунтов // Опыт и проблемы проектирования обустройства нефтяных месторождений Западной Сибири. Тюмень. – СибНИИНП, 1981. – С. 112–123.

17. Горелик Я.Б., Колунин В.С. Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере. - Новосибирск : СО РАН, Филиал “Гео”, 2002. – 317 с.

18. Горелик Я.Б. О режимах льдообразования при промерзании грунтов // Криосфера Земли, 2007. – т. XI. – № 4. – С. 42–49.

19. ГОСТ 25100–95. Грунты. Классификация. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 31 с.

20. ГОСТ 25137-82*. Материалы нерудные строительные, щебень и песок плотные из отходов промышленности, заполнители для бетона пористые. Классификация. – Электрон. дан. – URL: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/3/3628/ (дата обращения: 16.09.2015).

21. ГОСТ 25607-2009 Смеси щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2010. – 11 с.

22. ГОСТ 28622-90. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости / Науч. рук. В.О. Орлов, В.Г. Чеверев. М. – Изд-во стандартов, 1990. – 7 с.

23. ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов». Электрон. дан. – URL: http://docs.cntd.ru/document/gost-30108-94 (дата обращения: 05.06.2016).

24. ГОСТ 32496-2013. Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2014. – 17 с.

25. ГОСТ 6616-94. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия // Минск, изд-во стандартов, 1998.

26. ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» (введен Постановлением Госстроя РФ от 06.01.1998 N 18-1) (ред. от 02.04.2009).

27. ГОСТ 8.338-2002 ГСИ. Преобразователи термоэлектрические. Методика поверки.

28. ГОСТР 8.585-2001. ГСОЕИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования // Москва, изд-во стандартов, 2002.

29. ГОСТ 9758-2012. Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний. – Электрон. дан. – М.: Стандартинформ. – 2014. – URL: http://docs.cntd.ru/document/1200100905 (дата обращения: 16.09.2015).

30. Гриценко, В.А. Оценка долговечности геопенопласта Styarofoam в составе дорожной конструкции / В.А. Гриценко, В.Н. Шестаков // Автомобильные дороги и мосты. – № 2. – 2003. – С. 25.

31. Демидович, Б.К. Производство и применение пеностекла / Б.К. Демидович. – Минск: Наука и техника, 1972. – 301 с.

32. Дистанов У.Г. Кремнистые породы СССР / ред. У.Г. Дистанов. - Казань: Татарское книжное издательство, 1976. – 412 с.

33. Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): справ, геофизика / под ред. Н. Б. Дортман. – М.: Недра, 1976. – 527 с.

34. Ефименко В.Н. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог при глубоком промерзании грунтов: дис. … канд. техн. наук. – М., 1978.

35. Ефименко В.Н. Обеспечение морозоустойчивости дорожных одежд в районах Западной Сибири / В.Н. Ефименко, М.В. Бадина // Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации транспортных сооружений: материалы I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2006. – Кн. 1. – С. 164-170.

36. Ефименко В.Н. Плазменная обработка гранулированного глинистого грунта при производстве керамического материала для строительства оснований дорожных одежд автомобильных дорог : дис. … докт. техн. наук. – Томск, 1994.

37. Ефименко В.Н. Пути обеспечения эксплуатационной надёжности автомобильных дорог в природных условиях Сибири / В.Н. Ефименко, С.В.

Ефименко, М.В. Бадина // Транспортное строительство / Транспорт Российской Федерации. – 2007. – № 1. – С. 18-19.

38. Зайцев А.Г. Вопросы долговечности и старения полимерных строительных материалов. – Москва. – ВНИИНСМ, 1967. – 85 с.

39. Звягин В.В. К оценке эффективности пенных экранов при тепловой мелиорации криолитозоны / В.В Звягин, В.П. Мельников, Н.Л. Русаков, В.Н. Феклистов // Докл. РАН. – 1993. – Т.330, N 6, с.778-781.

40. Золотарь И.А. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / И.А. Золотарь, Н.А. Пузакова, В.М. Сиденко. – М. : Транспорт, 1971. – 416 с.

41. Золотарь И.А. Прогноз величины и скорости пучения на автомобильных дорогах / И.А. Золотарь // Борьба с пучинами на железных и автомобильных дорогах // Труды совещания в г. Новосибирске в октябре 1963 г. – М., 1965. – С. 109-121.

42. Иванов К.С. Диатомиты в технологии гранулированного пеностекла / К.С. Иванов С.С. Радаев О.И. Селезнева // Стекло и керамика. – 2014. – № 5. – С. 15-19.

43. Иванов К.С. Диатомиты Ямала в технологии строительных материалов для арктических условий / К.С. Иванов, А.А. Мельникова, Е.А. Коротков, П.В. Смирнов // Промышленное и гражданское строительство. — Москва, 2016. — № 1. — С. 18-23.

44. Иванов К.С. Новый изоляционный материал для термостабилизации грунтов / К.С. Иванов // Криосфера Земли. – 2011. – т. XV. – №4. – с. 120-122.

45. Иванов Е. В. Обоснование применения золошлаковых смесей для строительства земляного полотна с учетом особенностей водно-теплового режима / Е.В. Иванов. – Дисс. … канд. техн. наук. – Омск, 2014. – 165 с.

46. Изучение пучин железнодорожного полотна / М.: Огиз-Гострансиздат, 1932. – 110 с.

47. Каменев А.М., Ильясов К.Х. Исследование водно-теплового режима и прочности городских дорог в засушливой зоне / А.М. Каменев, К.Х. Ильясов // Проектирование и строительство автомобильных дорог в пустынных и

полупустынных районах Казахстана. – Алма-Ата: Минавтодор КазССР, 1976. – С. 44-45.

48. Каменев А.М. Исследование водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог с целью уточнения норм его проектирования в предгорных районах Юго-Восточного Казахстана / А.М. Каменев. – Дисс. … канд. техн. наук. – Омск, 1977. – 185 с.

49. Каменев А.М. О морозостойкости дорожных конструкций в орошаемых районах Казахстана / А.М. Каменев // Материалы V Всесоюзного научно-технического совещания по основным проблемам научно-технического прогресса в дорожном строительстве. Сб. 3. – М.: СоюздорНИИ, 1971. – С. 191-199.

50. Каретин Л.Н. Почвы Тюменской области / Л.Н Каретин. – Новосибирск: «Наука», 1990. – 286 с.

51. Кетов А.А. О причинах отсутствия конкурентов у пеностекла на рынке теплоизоляции / А.А. Кетов // Стройкомплекс Среднего Урала. – 2006. – №1. – С. 4-11.

52. Китайгородский И.И. Пеностекло / И.И. Китайгородский, Т.Н. Кешишян. – М.: Промстройиздат, 1953. – 80 с.

53. Клименко В. Изменение климата и динамика толщ многолетнемерзлых пород на северо-западе России на ближайшие 300 лет / В. Клименко, Л. Хрусталев // Криосфера Земли. Т. 11. – 2007. – № 3. – С. 3–13.

54. Комаров И. А. Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах / И. А. Комаров. – М.: Научный мир, 2003. – 608 с.

55. Комплексные строительные решения STYROFOAM. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://building.dow.com/europe/ru/app/civil/thickness.htm (01.04.2016).

56. Кондратьев В.Г. Вековая, но не вечная же проблема железных дорог на вечной мерзлоте // Транспорт Российской Федерации. – 2008. – №. 3-4. – С. 16-17.

57. Коротков Е.А. Европейский опыт использования пеностекла в дорожном строительстве. Перспективы использования аналогичных материалов в РФ / Е.А.

Коротков, А.О. Константинов, П.В. Смирнов, К.С. Иванов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – №1. – С. 58-61.

58. Корочкин А.В. Проектирование нежёстких дорожных одежд, Учебное пособие. М.: МАДИ, 2005. – 130 с.

59. Корсунский М.Б. Регулирование водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог в районах сезонного промерзания / М.Б. Корсунский, П.Д. Россовский, Г.В. Волчанский // Труды СоюздорНИИ. – 1966. – №13. – С. 24-64.

60. Корюков В.П. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог на западе II дорожно-климатической зоны применительно к условиям БССР / В.П. Корюков. – Автореф. дисс. …канд. техн. наук. – М., 1976. – 26 с.

61. Криостат КРИО-ВТ-01. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://termexlab.ru/upload/filearchive/REH%20KRIO-VT-01%20v%200.1.pdf (15.03.2016).

62. Кудрявцев С.А. Влияние миграционной влаги на процесс морозного пучения сезонно промерзающих грунтов / С.А. Кудрявцев// Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2003. – №7. – С. 233-236.

63.Луцкий С. Я. Технологии для криолитозоны / С.Я. Луцкий, А.М. Черкасов, К.Н. Хрипков // Строительная техника и технологии. – 2012. – № 7. – С. 58-70

64. Мелконян Р.Г. Экологические и экономические проблемы использования стеклобоя в производстве стекла: учебное пособие / Р. Г. Мелконян, С. Г. Власова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 100 с.

65. Методические указания по проектированию морозозащитных и дренирующих слоев в основании проезжей части автомобильных дорог. – М.: Оргтрансстрой, 1965. – 52 с.

66. Минько Н.И. Пеностекло – современный эффективный неорганический теплоизоляционный материал / Н.И. Минько, О.В. Пучка, Е.И. Евтушенко, В.М. Нарцев, С.В. Сергеев // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6-4. – С. 849-854.

67. Невзоров А.А. Фундаменты на сезонно-промерзающих грунтах. Учебное пособие / А.А. Невзоров. – М.: Изд-во АСВ. – 2000. – 152 с.

68. Нестеров И.И. Западно-Сибирская провинция кремнисто-опаловых пород / И.И. Нестеров, П.П. Генералов, Л.Л. Подсосова // Советская геология. – 1984. – № 3. – С. 35-40.

69. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. Государственная служба дорожного хозяйства Министерства транспорта Российской Федерации. – М.: Информавтодор, 2001. – 145 с.

70. Орлов В.О. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений / В.О. Орлов, Ю.Д. Дубнов, Н.Д. Меренков – Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1977. – 184 с.

71. Песоцкий Д.Г. QFrost — ПО для моделирования теплофизических процессов в грунтах / Д.Г. Песоцкий, М.С. Торгонский. – 2009-2015. – URL: http://www.qfrost.net.

72. Попов А.П. Инновационные аспекты использования естественных криогенных ресурсов для обеспечения механической безопасности зданий и сооружений в криолитозоне / А.П. Попов, В.В. Самсонова // Международный журнал «Геотехника», 2011. – №5. – С. 4-21.

73. Порхаев Г.В. Теплофизика промерзающих и протаивающих грунтов / Г. В. Порхаев, Г. М. Фельдман, Д. И. Федорович [и др.]. – М.: Наука, 1964. – 129 с.

74. Пузаков Н.А. 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.

75. Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов. – М.: Стройиздат, 1986. – 72 с.

76. Российский рынок полистирольной теплоизоляции. Обзор агентства ABARUS Market Research [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www. stroyka.ru (12.03.2016).

77. РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза измерений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами / Госстрой РСФСР. М., 1988.

78. Рувинский В.И. Оптимальные конструкции земляного полотна / В.И. Рувинский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1992. – 240 с.

79. Рувинский В.И. Пособие по устройству теплоизолирующих слоёв из пенопласта Styrofoam на автомобильных дорогах России / В.И. Рувинский. – М. : Транспорт, 2000. – 71 с.

80. Рувинский В.И. Эффективность применения пенопласта в дорожном строительстве России / В.И. Рувинский. – М. : Транспорт, 1996. – 72 с.

81. Смирнов П.В. Западно-Сибирская провинция опал-кристобалитовых пород - минерально-сырьевая база многоцелевого назначения / П.В. Смирнов // Новые технологии - нефтегазовому региону: Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию ТИИ-ТюмГНГУ. – Тюмень, 2013. – С. 80-82.

82. Смирнов П.В. Литология пород туртасской свиты и возможности их использования в качестве сырья для производства пеностеклокерамики на примере Успенской площади (Тюменская область) / П.В. Смирнов, К.С. Иванов, А.О. Константинов // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – № 7. – С. 112-120.

83. Смирнов П.В. Объекты поисковых работ на кремнистые породы на юге Тюменской области / П.В. Смирнов // Сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции «Современные исследования в геологии». – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2015. – С. 42-44.

84. Смирнов П.В. Ресурсный потенциал бассейна р. Томчару-Яха на диатомовое сырье / Смирнов, П.В., Иванов К.С. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2015. – №2 (22). – С. 97-103.

85. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. М, 2000. – 58 с.

86. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий.

87. СП 25.13330.2012. Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (утв. Приказом Минрегиона России от 29.12.2011 N 622). - М.: Минрегион России, 2011.

88. СП 34.13330.2012. Свод правил. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* (утв. Приказом Минрегиона России от 30.06.2012 N 266) из информационного банка "Строительство".

89. Способ получения пористого строительного материала: пат. 2569138 РФ: МПК C04B38/00 / К.С. Иванов, В.П. Мельников; заявитель и патентообладатель – Общество с ограниченной ответственностью «Тюменское инновационное предприятие Института криосферы-1» – № 2014144842; заявл. 10.11.2014; опубл. 26.10.2015. – 4 с.

90. СТО № 90903792.001 – 2015. «Материал «ДиатомИК» теплоизоляционный гранулированный. Технические условия». – Тюмень: ТИП-ИК-1, 2015. – 20 с.

91. СТО 01 – 2013. «Методические рекомендации по восстановлению дорожных одежд на участках с пучинистыми грунтами. Способы ликвидации пучинобразований». – Пермь, 2013. – 98 с.

92. Сумгин М. И. Краткий курс дорожной геофизики / М. И. Сумгин. – М.: ОГИЗ, Трансиздат, 1931. – 119 с.

93. Сумгин М. И. Общее мерзлотоведение / М. И. Сумгин, С. П. Качурин, Н. И. Толстихин, В. Ф. Тумель. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. – 340 с.

94. ТУ 5764–001–90903792–2013 «Материал теплоизоляционный гранулированный универсальный «ДиатомИК». – Тюмень: ТИП-ИК-1, 2013. – 8 с.

95. Федоров В.И. Процессы влагонакопления и морозоопасность грунтов в строительстве / В.И. Федоров. – Владивосток.: Дальпресс, 1993. – 178 с.

96. Хрусталев Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне: Учебник. – М.: МГУ, 2005. – 544 с.

97. Цигипов А.Д. Эффективность применения теплоизоляции земляного полотна на пучинистых участках железнодорожного пути / А.Д. Цигипов. – Дисс. … канд. техн. наук. – Новосибирск, 2005. – 103 с.

98. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высш. школа, 1973. – 448 с.

99. Чеверев В.Г. Влияние внешней нагрузки на степень морозной пучинистости глинистых грунтов / В. Г. Чеверев, Р. С. Бурнаев, В. Е. Гагарин, Е. В. Сафронов // Криосфера Земли. – 2013. – № 4. – С. 45–51.

100. Чеверев В.Г. Природа криогенных свойств грунтов / В.Г. Чеверев. М. – Науч. мир, 2004. – 234 с.

101. Чеверев В.Г. Свойства связанной воды в криогенных грунтах (аналитический обзор) // Криосфера Земли, 2003. – т. VII. – № 2. – С. 30–41.

102. Шеслер А.И. Неравномерность деформации нежестких дорожных одежд под воздействием пучения-осадки грунтов / А.И. Шеслер. – Автореф. дисс. …канд. техн. наук. – М., 1968. – 26 с.

103. Ясин Ю. Д. Пенополистирол. Ресурс и старение материала. Долговечность конструкций / Ясин Ю. Д., Ясин В. Ю., Ли А. В. // Строительные материалы. - 2002. – №5. – С. 33-35.

104. Auvinen T. Covering the highway e12 in the centre of Hämeenlinna – innovative use of foamed glass as light weight material of approach embankment / T. Auvinen, J. Pekkala, J. Forsman. // The XXVIII International Baltic Road Conference, 2013. –Vilnius, Lithuania, 26-28 Autust 2013. – 10 p.

105. Bakløkk L. Hasopor Cellular Glass for the use in building and road construction applications (In Norwegian) / Bakløkk, L. // SINTEF report STF22 F01322, 2001.

106. Beaulac I., Doré, G. (2006) Airfields and Access Roads Performance Assessment in Nunavik, Quebec, Canada. Cold Regions Engineering 2006: pp. 1-12.

107. Byggforsk 2005. Hasopor, European Technical Approval No. ETA-05/0187.

108. Civil Engineering [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.netweber.co.uk/lecar-uk-lightweight-aggregate/help-and-advice/how-to-apply-our-products/civil-engineering.html (25.05.2016).

109. Emersleben A.; Meyer, N. (2012): Paved with Glas. Civil Engineering, ASCE, June 2012.

110. Eriksson, L. Manual for Foam Glass in soil and road construction. Information 18:1 / L. Eriksson, J. Hägglund // Linköping: The Swedish Geotechnical Institute (SGI), 2008. - 44 p.

111. Finnish Transport Agency 2011a. Design of light weight structures (Kevennysrakenteiden suunnittelu). Guidelines for road foundation construction 05/2011. 09.03.2011. – 48 p. ISBN 978-952-255-638-7.

112. Frost protection of Norwegian roads / statens vegvesens rapporter Nr. 338. - Norway, Oslo, 2013. - 75 p.

113. Frydenlund T.E. Foamglass – A New Vision in Road Construction / T.E. Frydenlund, R.O. Aabøe // The XXIInd PIARC World Road Congress, Durban, South Africa, 2003. – 12 p. - Режим доступа: http://www.vegvesen.no/_attachment/110363/binary/192292.

114. Frydenlund T.E. Long term performance and durability of eps as a lightweight filling material fills / T.E.Frydenlund, R. Aabøe // EPS Geofoam 2001, 3rd International Conference, Salt Lake City, December 2001.

115. Frydenlund T.E. Use of waste materials for lightweight fills / T.E.Frydenlund, R. Aabøe // International Workshop on Lightweight Geomaterials. – Tokyo, 2002. – Режим доступа: http://www.vegvesen.no/_attachment/110356/binary/192275.

116. Gorelik J.B., Kolunin V.S., Reshetninikov A.K. Applied aspects of the rigid – ice model // Proc. of the Intern. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Lulea, Sweden, 1997, p. 93–99.

117. Gorelik J.B. The mechanism of ice formation in connection with deformation of freezing layer // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost, Fairbanks, Alaska, 2008, p. 535–540.

118. Handbook 274 Ground reinforcement, embankments and slopes. Oslo: Norwegian Public Roads Administration-Technology Department. - 326 c.

119. Håøya A-O. Miljøpåvirkning fra gjenbruksmaterialer – Skumglass, Prosjektrapport nr 14d fra Gjenbruksprosjektet / A-O. Håøya, R. Aabøe, G. Breedved, S. Moen, C. Engelsen // Teknologirapport 2436, Statens vegvesen, 2006. - 34 p. – Режим доступа: http://www.vegvesen.no/_attachment/109125/binary/187995.

120. Hoff, I. Exclay Internordic Geoproject Field Test at Sandmoen, Norway, Construction and Instrumentation. Report no. STF22 F00612, SINTEF, Trondheim, Norway, 2000.

121. Horvli I. A review and reliability assessment of frost penetration models / I. Horvli, E. Øiseth, K. Henry. // 7th International Conference on the bearing capacity of roads, railways and airfields. - Trondheim, 2005.

122. Ivanov K.S. Diatomites in granular foam-glass technology / K.S. Ivanov, S.S. Radaev, O.I. Selezneva // Glass and Ceramics, Vol. 71, Nos. 5 - 6, September, 157 - 161, 2014.

123. LWAgeolight / Arnstein Watn, Even Øiseth, Mats Johanson, Juha Forsman, Henry Gustavson, Lennart Hagnestål // SINTEF Civil and Environmental Engineering, Trondheim, NORWAY.

124. Meyer M. Einsatzmöglichkeiten von recyceltem Altglas im Verkehrswegebau / M. Meyer, A. Emersleben // Recycling und Rohstoffe. B. 3. –Berlin: Verlag, 2010. – c. 441–451.

125. Oiseth E. Field Test Comparing Frost Insulation Materials in Road Construction / E. Oiseth, R. Aabøe, I. Hoff // Conference Proceedings, 2006. – Режим доступа: http://www.vegvesen.no/_attachment/110441/binary/192536.

126. Ramboll. 2012. FOAMIT foamed glass laboratory tests; Technical report. 03.02.2012. – 6 p.

127. Richtlinie über die Anwendung und Verarbeitung von Schaumglasschotter geocell / SGSgeocell 01/2010.

128. Wang S L, M i H Z. Permafrost change under roadbed after construction of asphalt pavement along with Qinghai-Tibet Highway [J] . Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, 15(4) : 566- 573.

129. Yan HY, Zhao GT, Cai DG, et al., 2015. Investigation of insulation layer dynamic characteristics for high-speed railway. Sciences in Cold and Arid Regions, 7(4): 0430–0437. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2015.00430.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Дорожная конструкция: пат. 154137 РФ: МПК E01C3/06 / В.П. Мельников, Е.А Коротков, К.С. Иванов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 154137

ДОРОЖНАЯ КОНСТРУКЦИЯ

Патентообладатель(ли): ***Общество с ограниченной ответственностью "Тюменское инновационное предприятие Института криосферы - 1" (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2015101357**

Приоритет полезной модели **19 января 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации ***20 июля 2015 г.***

Срок действия патента истекает **19 января 2025 г.**

Заместитель руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **154 137** (13) **U1**

(51) МПК
E01C 3/06 (2006.01)

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2015101357/03, 19.01.2015**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
19.01.2015

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **19.01.2015**

(45) Опубликовано: **20.08.2015** Бюл. № **23**

Адрес для переписки:
625048, г. Тюмень, а/я 1930, Журавлеву Виктору Сергеевичу

(72) Автор(ы):
Мельников Владимир Павлович (RU),
Коротков Евгений Анатольевич (RU),
Иванов Константин Сергеевич (RU)

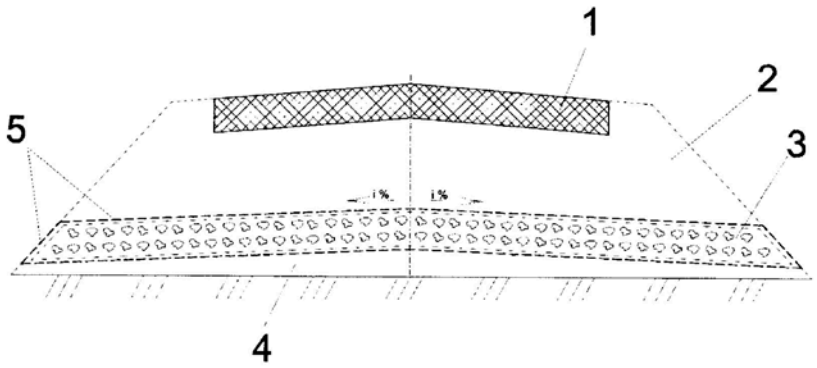
(73) Патентообладатель(и):
Общество с ограниченной ответственностью "Тюменское инновационное предприятие Института криосферы - 1" (RU)

RU 154137 U1

(54) ДОРОЖНАЯ КОНСТРУКЦИЯ

(57) Формула полезной модели

Дорожная конструкция, включающая дорожную одежду, тело насыпи, теплоизолирующий слой и дренирующий слой, отличающаяся тем, что теплоизолирующий слой и дренирующий слой выполнены в виде одного теплоизоляционно-дренирующего слоя из гранулированного строительного материала диатомик.



RU 154137 U1

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СТО № 90903792.001 – 2015. «Материал «ДиатомИК» теплоизоляционный гранулированный. Технические условия»

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«Тюменское инновационное предприятие Института криосферы-1»

ООО «ТИП-ИК-1»	**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ**	**СТО 90903792.001-2015**

УТВЕРЖДАЮ:

Директор
ООО «ТИП-ИК-1»
_____ Н.Л. Русаков

М.П. «14» августа 2015 г.

МАТЕРИАЛ «ДиатомИК» ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ГРАНУЛИРОВАННЫЙ

Технические условия

Тюмень
2015

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Письмо о согласовании в ФДА «РОСАВТОДОР» СТО № 90903792.001 – 2015. «Материал «ДиатомИК» теплоизоляционный гранулированный. Технические условия»

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
(РОСАВТОДОР)

Бочкова ул., д. 4, Москва, 129085
Телефон: (495) 687-88-40, факс: (495) 686-15-50
E-mail: rad@fad.ru, http://www.rosavtodor.ru

30 МАР 2016 № 01-29/9134

На № _____ от _____

Директору
ООО «ТИП-ИК-1»

Н.Л. Русакову

а/я 1230, г. Тюмень, 625000

О согласовании СТО

Уважаемый Николай Линович!

Федеральное дорожное агентство рассмотрело материалы ООО «ТИП-ИК-1» по стандарту организации СТО 90903792.001-2015 «Материал «ДиатомИК» теплоизоляционный гранулированный. Технические условия» и согласовывает стандарт организации в части, касающейся автомобильных дорог и сооружений на них, в представленной редакции.

Срок действия согласования стандарта организации – один год с даты регистрации настоящего письма. По истечении указанного срока необходимо направить в адрес Управления научно-технических исследований и информационного обеспечения Росавтодора аналитический отчет с результатами мониторинга и оценкой применения объекта стандартизации на федеральных автомобильных дорогах для принятия решения о продлении согласования.

Текст согласованного стандарта организации размещается на официальном сайте Федерального дорожного агентства www.rosavtodor.ru во вкладке «Стандарты организаций - Стандарты организаций, согласованные Росавтодором в 2016 году» подраздела «Научно-техническое обеспечение» раздела «Деятельность».

Заместитель руководителя И.Г. Астахов

О.В. Каширина
(495) 687-88-23 доб. 50-271

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Технические условия (ТУ) по применению гранулированного теплоизоляционного материала «ДиатомИК» для стабилизации земляного полотна

Открытое акционерное общество
«Российские железные дороги»
(ОАО «РЖД»)

Акционерное общество
«Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»
(АО «ВНИИЖТ»)

СОГЛАСОВАНО

Начальник Управления пути и
сооружений Центральной дирекции
инфраструктуры – филиала
ОАО «РЖД»

_____ А.В.Кучин

«30» 06 2016 г.

Технические условия по применению
гранулированного теплоизоляционного материала
«ДиатомИК» для стабилизации земляного полотна

(для опытного использования)

Заместитель Генерального директора
АО «ВНИИЖТ» А.Б.Косарев

«___» _____ 2016 г.

Заведующий отделением
«Путь и путевое хозяйство» А.Ю.Абдурашитов

Заведующий лабораторией
«Инженерные сооружения» А.А.Дорошкевич

Руководитель работы,
главный научный сотрудник П.И.Дыдышко

Москва - 2016 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акты внедрения результатов исследования

Закрытое Акционерное Общество
ПРОМТРАНСНИИПРОЕКТ
Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленного транспорта
119331, а/я 38, Москва, пр. Вернадского, 29
Телефон: 8(499)131-44-01Факс: 8(499)138-26-20
E-mail: main@ptniip.ru
ОКПО 02494704, ОГРН 1037739360713,
ИНН/КПП 7736020810/774501001

Closed Joint-Stock Company
PROMTRANSNIIPROJECT
Design & Research Institute of Industrial Transport
Moscow, 119331, POB 38;29, Vernadsky av.
Tel.:+7(499)131-44-01
Fax:+7(499)138-26-20
E-mail: main@ptniip.ru

От 03.08.2016__ № 01-05-662 E-mail : the_djon@bk.ru

АКТ
о внедрении результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Короткова Евгения Анатольевича

В соответствии с письмом №02-06 от 20.06.2016 «Тюменского инновационного предприятия Института криосферы-1» в наш адрес были направлены предложения по использованию разработанных Вашей организацией нового теплоизоляционного материала «ДиатомИК» с целью применения его в дорожных конструкциях в зоне многолетнемерзлых грунтов. ФАУ «РОСДОРНИИ» были проведены исследования физико-механических свойств этого материала и получено положительное заключение о возможности его использования в дорожных конструкциях. Также получено положительное заключение МЧС в отношении горючести материала.

С учетом результатов исследований были разработаны Технические условия ТУ 5764-001-90903792-2013 и стандарт организации СТО 90903792-2015 на основании которых проектные организации области включили этот материал в проектную документацию на строительство дорог в зоне многолетнемерзлых грунтов.

ЗАО «ПРОМТРАНСНИИПРОЕКТ» рассмотрел результаты испытаний теплоизоляционного гранулированного материала «ДиатомИК» и считает возможным включить его в разрабатываемый Минстроем РФ Свод правил «Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства».

Заместитель директора

Института по научной работе, д.т.н. Л.А. Андреева

АКТ

о внедрении результатов научной работы «Влияние морозозащитного слоя из гранулированной пеностеклокерамики на морозное пучение грунтов земляного полотна автомобильных дорог»

Настоящий акт составлен о том, что результаты исследования аспиранта ИКЗ СО РАН Короткова Е.А. на тему «Влияние морозозащитного слоя из гранулированной пеностеклокерамики на морозное пучение грунтов земляного полотна автомобильных дорог» использованы при разработке нормативного документа - «Стандарт организации (СТО) 90903792.001 - 2015. «Материал «ДиатомИК» теплоизоляционный гранулированный. Технические условия».

Заведующий лабораторией бетонов
и каменных материалов
ФАУ «РОСДОРНИИ», к.т.н. С.В. Гриневич

Подпись Гриневича Сергея Васильевича подтверждаю
Главный специалист Ковш
отдела кадров Камарова Н.И.

Отдел кадров

Главное управление строительства Тюменской области
Государственное казенное учреждение Тюменской области
«УПРАВЛЕНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ»
(ГКУ ТО «УАД»)
ул. Республики, 143, корп. 2, г Тюмень, 625026, телефон: (3452) 32-08-71, факс: (3452) 32-25-51, E-mail: tmnroads@yandex.ru

СПРАВКА

«15» 08 2016 г. № 7287/17

Настоящим подтверждаем, что в детальный план-график реализации государственной программы Тюменской области "Развитие транспортной инфраструктуры" до 2022 года на 2016-2018 годы включен объект: «Ремонт автомобильной дороги «Бескозобово-Евсино-Ламенский» км 47+540 – км 47+690 (Голышмановский район)». В рамках указанного объекта были использованы научные разработки и практические рекомендации Короткова Евгения Анатольевича по выбору конструкции и технологии устройства морозозащитного слоя из гранулированной пеностеклокерамики. Планируемые сроки проведения работ по ремонту сентябрь-октябрь 2016 года.

Начальник А.Н. Ковалев

Емельянов Евгений Викторович
8(34551) 2-23-72

Общество с ограниченной ответственностью
«Тюменское инновационное предприятие Института криосферы - 1»
ООО «ТИП-ИК-1»

Российская Федерация, Тюменская область,
Тюменский район, д. Патрушева, ул. Тюменская, д.15

Почтовый адрес: 625000, г. Тюмень, а/я1230
Тел.: +7 968 787-83-51

ИНН 7224045032 ОГРН 1117232014910 КПП 722401001
Уральский ф-л ПАО «Промсвязьбанк», г. Екатеринбург, БИК 046577975
р/счёт 40702810935000286701 к/счёт 30101810500000000975

Исх. № 18-08

от 02. 08. *2016 г.*

Акт о внедрении результатов научно-исследовательских работ

Мы, нижеподписавшиеся, директор ООО «Тюменское инновационное предприятие Института криосферы – 1» Русаков Н.Л. и заместитель директора по производству ООО «Тюменское инновационное предприятие Института криосферы – 1» Мальков В.А. составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательских работ аспиранта Короткова Е.А. по теме «Влияние морозозащитного слоя из гранулированной пеностеклокерамики на морозное пучение грунтов земляного полотна автомобильных дорог» были внедрены при разработке нормативного документа – «Стандарт организации (СТО) 90903792.001 – 2015. «Материал «ДиатомИК» теплоизоляционный гранулированный. Технические условия», а также при организации строительства опытно-экспериментального участка автомобильной дороги с устройством морозозащитного слоя из ГТМ «ДиатомИК» «Бескозобово-Евсино-Ламенский» км 47+540 – км 47+690 (Голышмановский район, Тюменская область).

Директор **Н.Л. Русаков**

Заместитель директора по производству **В.А. Мальков**