

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

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....</b>	<b>13</b>
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
<b>ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>59</b>
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
<b>ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>103</b>
3.1 Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований .....	103
3.2 Сопоставление экспериментальных данных с результатами математического моделирования .....	114
Выводы по третьей главе.....	119
<b>ГЛАВА 4 ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ .....</b>	<b>121</b>
4.1 Опытно-экспериментальный участок автомобильной дороги .....	121
4.2 Теплотехнический расчет дорожных конструкций для опытнo- 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
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	151
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	154
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	168
<b>Приложение А.</b> Дорожная конструкция: пат. 154137 РФ: МПК E01C3/06 / В.П. Мельников, Е.А Коротков, К.С. Иванов.....	168
<b>Приложение Б.</b> СТО № 90903792.001 – 2015. «Материал «ДиатомИК» теплоизоляционный гранулированный. Технические условия» .....	170
<b>Приложение В.</b> Письмо о согласовании в ФДА «РОСАВТОДОР» СТО № 90903792.001 – 2015. «Материал «ДиатомИК» теплоизоляционный гранулированный. Технические условия».....	171
<b>Приложение Г.</b> Технические условия (ТУ) по применению гранулированного теплоизоляционного материала «ДиатомИК» для стабилизации земляного полотна .....	172
<b>Приложение Д.</b> 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 лёссовидных 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 теплопереноса в дисперсных однородных средах и методах расчета водно-теплого 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 конференции «Водные ресурсы и ландшафтно-усадебная урбанизация территорий России в XXI веке» (Тюмень, ТюмГАСУ, 20 марта 2015 года); на международной конференции «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, ведущему 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.