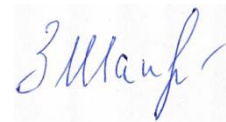


На правах рукописи



Шанхоев Зураб Шабазгиреевич

**УСТОЙЧИВОСТЬ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ
АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ
ДЛИТЕЛЬНО СТОЯЩИХ ВОД**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Краев Алексей Николаевич

Официальные оппоненты:

Сахаров Игорь Игоревич

доктор технических наук, профессор,

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева»,
профессор ученого совета

Коннов Артём Владимирович

кандидат технических наук,

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», старший научный сотрудник лаборатории «Основания, фундаменты и подземные сооружения»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический)
федеральный университет имени М.В.
Ломоносова»

Защита диссертации состоится «23» октября 2025 г., в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.419.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д.2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте www.tyuiu.ru.

Автореферат разослан «05» августа 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Степанов Максим Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В практике строительства и эксплуатации линейных сооружений в районах распространения *многолетнемерзлых грунтов* (ММГ) накоплены и опубликованы обширные данные по развитию деформаций и разрушений конструкции автомобильной дороги (АД) за счет естественной динамики климата и эволюции ландшафтов, а также при техногенных воздействиях. В связи с повышением среднегодовых температур и увеличением осадков наблюдается рост обводненных участков линейных сооружений, прогноз появления которых на стадии проектирования затруднен.

Скопление *поверхностных длительно стоящих вод* (неглубокие водоемы) вдоль откосных частей земполотна (ЗП) способствует дополнительному тепловому потоку за счет конвективного теплообмена, инфлюации на границе «вода-откос» и фильтрации воды на границе «основание-земполотно». Данные факторы существенно влияют на оттаивание ММГ и оказывают негативное воздействие на устойчивость основания. Низкая эффективность водоотводных устройств и обводнение вдоль сооружения влияют на изменение температурного режима (ТР) и формирование в основании ЗП *наклонной верхней границы* ММГ (НВГММГ) относительно горизонтальной плоскости.

В основании, выше границы прочного водонепроницаемого ММГ, формируется переувлажненная зона с низкими прочностными характеристиками грунта, которая является *наиболее вероятной границей поверхности скольжения* (НВГПС). Потеря устойчивости вдоль данной границы сопровождается развитием деформаций на дорожном покрытии в виде продольных и поперечных трещин. Таким образом, исследование и разработка подходов к расчету изменения устойчивости основания ЗП и проектированию конструктивно-технологических мероприятий (КТМ) при воздействии неглубоких водоемов является **актуальной задачей**.

Степень разработанности темы исследования. Основной вклад в исследование устойчивости геотехнической системы «основание-земполотно» внесли: Б.Г. Аксенов, Е.С. Ашпиз, Б.В. Белоусов, Е.А. Бедрин, И.Г. Валынец, С.Е. Гречищев, Я.Б. Горелик, П.И. Дыдышко, В.А. Давыдов, И.Е. Евгеньев, Э.Д. Ершов, С.М. Жданова, И.А. Золотарь, В.А. Иванов, А.В. Кажарский, В.Д. Казарновский, И.С. Клейн, В.Г. Кондратьев, С.А. Кудрявцев, В.А. Кретов, Я.А. Кроник, С.Я. Луцкий, Ю.М. Львович, В.Н. Лонский, А.А. Малышев, Г.Д. Михайлов, А.А. Мельников, Н.А. Пузаков, В.В. Пассек, А.А. Цернант, Л.Н. Хрусталеv, А.Н. Шуваев, G. Cheng, J. Liu, A. Nurmikolu, T. Osterkamp, V.E. Romanovsky, B. Tai, Y. Tian, L. Zhang и др.

Объект исследования: основание АД с многолетнемерзлыми грунтами на участках с неглубокими водоемами вдоль откосных частей сооружения.

Предмет исследования: изменение устойчивости основания АД с неглубокими водоемами вдоль откосных частей сооружения на наклонной верхней границе ММГ.

Цель исследования: выявить закономерности изменения устойчивости основания АД с неглубокими водоемами вдоль откосных частей сооружения на наклонной верхней границе ММГ, как на наиболее вероятной границе поверхности скольжения, и разработать КТМ, обеспечивающее устойчивость основания.

Задачи диссертационного исследования:

1. Произвести анализ зарубежного и отечественного опыта по повышению устойчивости основания АД в районах распространения ММГ на мокрых участках с постоянным избыточным увлажнением.

2. Оценить воздействие неглубоких водоемов вдоль откосных частей сооружения на ТР и изменение угла НВГММГ в основании ЗП, влияющего на устойчивость основания АД.

3. Разработать КТМ, направленное на повышение устойчивости основания АД при воздействии неглубоких водоемов путем регулирования ТР грунтов основания, влияющего на угол НВГММГ.

4. Выявить влияние геометрических параметров предложенного КТМ на изменение ТР и угла НВГММГ основания.

5. Разработать методику расчета изменения во времени устойчивости основания АД на НВГММГ с учетом выявленных закономерностей влияния геометрических параметров КТМ на изменение ТР и угла НВГММГ основания.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Установлены закономерности воздействия неглубоких водоемов вдоль откосных частей сооружения на изменение ТР и угла НВГММГ в основании ЗП, влияющего на устойчивость основания АД.

2. Предложено КТМ, обеспечивающее регулирование ТР, влияющего на формирование угла НВГММГ в основании ЗП, и способствующее повышению устойчивости основания на обводненных участках вдоль откосов сооружения, а также препятствующее фильтрации воды на границе «основание-земполотно».

3. Выявлены закономерности изменения ТР и формирования угла НВГММГ в основании ЗП, влияющего на устойчивость основания АД, при воздействии неглубоких водоемов, на основе численного моделирования, с учетом варьирования геометрических размеров КТМ.

4. Разработана методика расчета изменения во времени устойчивости основания АД с учетом ТР, влияющего на формирование угла НВГММГ в основании АД на участках с неглубокими водоемами вдоль откосных частей сооружения.

Теоретическая значимость работы: обоснованы и выявлены закономерности изменения устойчивости основания АД на НВГММГ с неглубокими водоемами вдоль откосных частей сооружения при изменении геометрических параметров КТМ.

Практическая значимость проведенных исследований и их результатов состоит в разработке методики расчета изменения во времени устойчивости основания АД на НВГММГ, и разработке КТМ, повышающего устойчивость основания за счет регулирования ТР, сформированного в процессе эксплуатации сооружения, путем снижения теплового воздействия от неглубоких водоемов, образовавшихся вдоль откосных частей, и препятствующее фильтрации воды на границе «основание-земполотно».

Результаты исследований внедрены на участке АД ПК597+20 – ПК597+45 «Новый Уренгой – Надым п. Пангоды (км870) – п. Правохеттинский (км936)»; на участке АД «Устье – Кемпедяй», согласно письму Министерства транспорта и дорожного хозяйства Республики Саха (Якутия) № 483.

Методология и методы исследования:

- анализ существующих методов оценки устойчивости основания АД в районах распространения ММГ на основе отечественного и зарубежного опыта в области строительства и проектирования дорог;
- экспериментальные полевые исследования ТР и напряженного состояния многолетнемерзлого основания участка АД при воздействии неглубоких водоемов;
- численные расчеты ТР многолетнемерзлого основания АД при воздействии неглубоких водоемов методом конечных разностей;
- аналитические и численные расчеты устойчивости многолетнемерзлого основания АД при воздействии неглубоких водоемов методом конечных элементов;
- экспериментальные маломасштабные исследования основания АД с ММГ при воздействии неглубоких водоемов вдоль откосных частей сооружения, с учетом КТМ.

Личный вклад соискателя состоит в разработке КТМ, направленного на регулирование процесса изменения ТР и повышение устойчивости основания АД на НВГММГ на участках с неглубокими водоемами вдоль откосов сооружения; в проведении натурных, маломасштабных, численных экспериментальных исследований и выявлении влияния геометрических размеров предложенного КТМ на изменение ТР и устойчивости основания АД а также в разработке методики расчета изменения во времени устойчивости основания АД на НВГММГ при воздействии неглубоких водоемов.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты полевых исследований изменения ТР и напряженного состояния многолетнемерзлого основания АД при воздействии неглубоких водоемов;
- КТМ, направленное на регулирование ТР и угла НВГММГ в основании ЗП, влияющее на устойчивость основания АД при воздействии неглубоких водоемов;

– результаты численных и маломасштабных экспериментов по установлению закономерностей влияния геометрических параметров КТМ на изменение ТР и повышение устойчивости основания АД при воздействии неглубоких водоемов;

– методика расчета изменения во времени устойчивости основания АД при воздействии неглубоких водоемов и подход к назначению параметров КТМ, обеспечивающего регулирование ТР и изменение угла НВГММГ в основании ЗП, с учетом выявленных закономерностей.

Достоверность результатов обеспечивается:

– выполнением натурных и лабораторных экспериментальных исследований с помощью современных известных и поверенных контрольно-измерительных комплексов;

– сопоставлением полученных экспериментальных и численных результатов с данными исследований известных авторов;

– сравнением полученных экспериментальных данных с результатами численных и аналитических решений.

Апробация: основные результаты диссертационной работы докладывались на научно-практических конференциях (с международным участием) в Воронеже, Москве, Новочеркасске, Перми, Тюмени, Санкт-Петербурге, Салехарде, Челябинске, (2015-2025 гг.).

Публикации. В рамках научного исследования опубликовано 11 научных работ, в том числе 1 патент на изобретение. 4 работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях. 1 работа в издании, входящем в международную базу цитирования Scopus.

Объем и структура работы. Структура диссертационной работы представлена введением, четырьмя главами, заключением, списком литературы и приложений. В объем работы входит 155 страниц напечатанного текста, 113 рисунков, 67 таблиц, 111 источников литературы.

Специальность, которой соответствует диссертация. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.1.2 Основания и фундаменты, подземные сооружения п.п. 5, 11, 12.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, а также приведена общая характеристика работы.

В первой главе рассматривается обзор научных трудов и подходов проектирования геотехнической системы «основание-земполотно» в районах распространения ММГ. В работах [Е.С. Ашпиза, С.М. Ждановой, Я.В. Клочкова, В.Г. Кондратьева, И.П. Лукина, Е.С. Михаленко, В.В. Миронова, В.В. Пассека, Д.А. Разуваева, П.Г. Ташлыкова, С.Н. Юсупова, и др.] представлены КТМ, позволяющие повысить устойчивость основания за счет сохранения ВГММГ путем размещения теплоизоляционного, геосинтетического и каменного материалов, металлических изделий, СОУ, системы воздушно-конвективного охлаждения, солнцезащитных навесов и т.д. При этом ни в

одном из известных мероприятий не исследовано влияние застоя неглубоких водоемов вдоль откосных частей сооружения на ТР и изменения *верхней границы ММГ* (ВГММГ) основания в период эксплуатации.

В процессе эксплуатации ЗП в основании формируется НВГММГ, которая рассматривается как НВГПС (рис. 1).

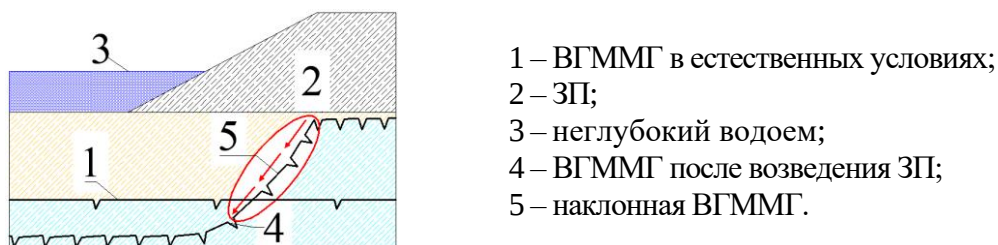


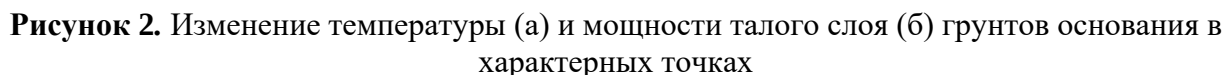
Рисунок 1. Наклонная ВГММГ в основании ЗП

В результате проведенного анализа литературных источников были сформированы **цель и задачи исследования**.

Во второй главе оценены факторы, влияющие на ТР и формирование угла НВГММГ в основании ЗП в процессе эксплуатации при воздействии неглубоких водоемов вдоль откосных частей, и представлены результаты натурных наблюдений за ТР и напряженным состоянием (НС) основания ЗП.

Для оценки изменения ТР основания и угла НВГММГ выполнены теплотехнические расчеты с представительными грунтами. Варьируемые параметры при численном моделировании: вид грунта (песок; супесь; суглинок; глина); влажность грунта (20; 25; 30; 35 %); плотность грунта (14; 16; 18 кН/м³); заложение откоса ЗП (1:2; 1:3; 1:4), глубина водоема ($h_v=0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1$ м), высота насыпи ($H_{зп}=1; 2; 3; 4$ м). Коэффициент фильтрации (Кф) воды через прослойку торфа на границе «основание-земполотно» принимался по натурным измерениям, равный 0,005 м³/ч. Остальные базовые геометрические параметры сооружения назначались согласно нормативной документации. Климатические и инженерно-гидрометеорологические условия при численном моделировании назначались по метеостанции г. Надым, теплофизические характеристики грунтов основания ЗП принимались согласно СП 25.13330.2020. Для оценки ТР многолетнемерзлого основания были выбраны характерные точки на границе «основание-земполотно» (верхняя бровка, середина откоса), температура в которых свойственна ТР основной площадки (точка 1) и откосной части основания сооружения (точка 2).

Численным моделированием установлено, что подъем уровня водоема в период 12-й летней эксплуатации сооружения приводит к повышению температуры в характерных точках. Наибольшее повышение температуры зафиксировано под серединой откоса (точка 2) на величину $\Delta T = 1,8^{\circ}\text{C}$ (рис.2 а). Повышение глубины водоема не способствует увеличению глубины талого слоя под бровкой (точка 1), но существенно влияет на увеличение глубины протаивания под серединой откоса (точка 2) $\Delta d_{ht(t)=12 \text{ лет}} = 2,7$ м (рис.2 б), а разности глубины талого слоя в характерных точках 1 и 2 будут формировать угол НВГММГ.



Увеличение крутизны откоса ЗП (от 1:4 до 1:2) приводит к уменьшению угла НВГММГ на величину $\Delta\alpha_{t=12\text{лет}} = 2 \div 5^\circ$. Данный фактор объясняется уменьшением площадки притока тепла с более крутым откосом за счет конвективного теплообмена на границе «вода-откос».

Изменение высоты ЗП ($H_{ЗП,t=12\text{лет}} = 1 \div 2$ м) приводит к увеличению среднего значения угла НВГММГ на $\Delta\alpha_{t=12\text{лет}} = 5^0$. Дальнейшее увеличение высоты ЗП ($H_{ЗП,t=12\text{лет}} = 3 \div 4$ м) приводит к уменьшению угла НВГММГ в среднем до $\Delta\alpha_{t=12\text{лет}} = 4^0$. Из представленного анализа установлено, что наиболее значимым фактором, влияющим на изменение формируемого угла НВГММГ, является глубина водоема.

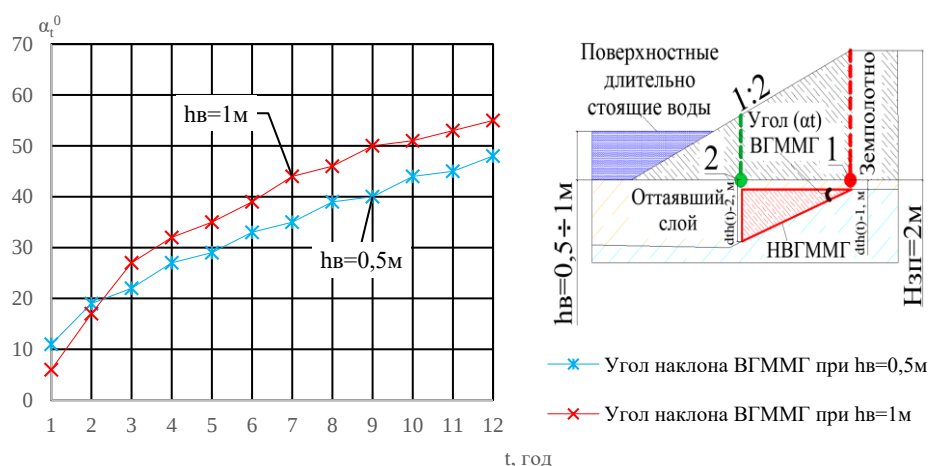


Рисунок 3. Изменения угла НВГММГ в основании ЗП в зависимости от глубины водоема

На основании численного моделирования была предложена гипотеза о возможности управления формируемой и изменяемой во времени НВГММГ относительно горизонтальной плоскости, влияющей на устойчивость основания за счет регулирования ТР грунтов основания ЗП путем устройства теплоизоляционного материала, уменьшающего влияние теплового потока от неглубоких водоемов на грунты основания и устройства водонепроницаемого геосинтетического материала (рис.4) в конструкцию и в основание ЗП, препятствующего инфильтрации и инфлюации воды.

Для подтверждения предложенной гипотезы были проведены экспериментальные полевые наблюдения на участке АД «Сургут – Салехард, п. Пангоды (км 870) – п. Правохеттинский (км 936)». Исследуемый участок располагался на пересеченной местности с неглубоким водоемом, образованным вдоль южного откоса сооружения. Максимальная ширина участка водоема составляла до 10 м, длина – 25 м. Средняя глубина водоема составляла не более 1 м.

Для дальнейшего исследования были выполнены инженерно-геологические изыскания (ИГИ), по результатам которых глубина протаивания под южной откосной части основания составила до 4 м. В основании под северной частью глубина протаивания составила до 2 м.

На основании анализа результатов ИГИ и обследования экспериментального участка было предложено разработать и внедрить КТМ, направленное на повышение устойчивости основания ЗП (рис.4).

Предлагалось разработать в южной откосной части основания продольную траншею вдоль оси сооружения ниже нормативной глубины сезонного оттаивания слоя (не менее 2÷3 м) и разместить в траншее геосинтетический материал. После этого в ЗП формировалась грунтовая призма, верхняя граница которой планировалась параллельно существующему откосу сооружения. Ширина призмы составляла $l_2=2$ м, высота $h_1=0,5$ м $h_2=0,75$ м, внутренняя грань призмы размещалась на расстоянии $l_1=8$ м от оси сооружения (рис.4).

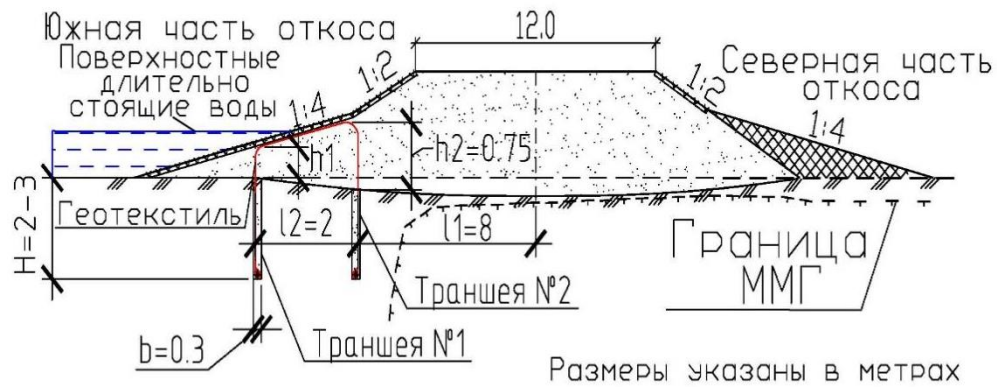


Рисунок 4. Схема КТМ

Предложенное КТМ направлено на повышение устойчивости основания за счет ограничения воздействия неглубокого водоема (инфильтрация) вдоль южного откоса сооружения на ТР многолетнемерзлого основания.

При реализации КТМ, в процессе разработки продольной траншеи (февраль-март), была зафиксирована фильтрация воды на границе «основание-земполотно» (рис.5), повышающая отепляющее воздействие на ММГ основания. Уплотнённый торфяной слой в основании ЗП является фильтрационным слоем, образовавшимся в процессе технологической операции при возведении ЗП по схеме «от себя». Вертикальные перемещения в геотехнической системе «основание-земполотно» замерялись грунтовыми марками. Вертикальные перемещения марок измерялись датчиками часового типа ИЧ с точностью измерения 0,01 мм. Для корректировки показаний перемещений производился дополнительный геодезический контроль данных высотного положения индикаторов часового типа и дорожного покрытия. Напряжения в грунтовом массиве измерялись мессдозами мембранного типа. Для измерения температуры грунтов основания и ЗП устанавливались термометрические скважины глубиной до 10 м от дневной поверхности. Общий вид экспериментального участка с установленным оборудованием представлен на рис.7.



Рисунок 5. Фильтрация воды на границе «основание-земполотно» (февраль-март)



Рисунок 6. Водоем вдоль южной откосной части земполотна (февраль-март)



Рисунок 7. Общий вид экспериментального участка с установленным геотехническим оборудованием

За первый год наблюдения после применения КТМ средняя температура в откосных частях основания ЗП повысилась до 0,3⁰С. Это объясняется тем, что в период внедрения КТМ происходит дополнительное тепловое воздействие от накопленной в траншеях воды и солнечной радиации. На третий год эксплуатации

после внедрения КТМ зафиксировано понижение средней температуры в откосной части основания ЗП на $0,5^{\circ}\text{C}$ и уменьшение глубины протаивания под южным откосом на 1 м с формированием в основании ЗП НВГММГ под углом ($\alpha_{t=3} = 56^{\circ}$).

Для проведения последующих численных экспериментов и калибровки параметров модели выполнялся теплотехнический расчет экспериментального участка (рис.8) в ПК QFrost с сопоставлением результатов расчета и эксперимента. Установлено, что расхождение расчетных результатов расположения границы ММГ в южной откосной части ЗП с экспериментальными данными составляет до 15 %.

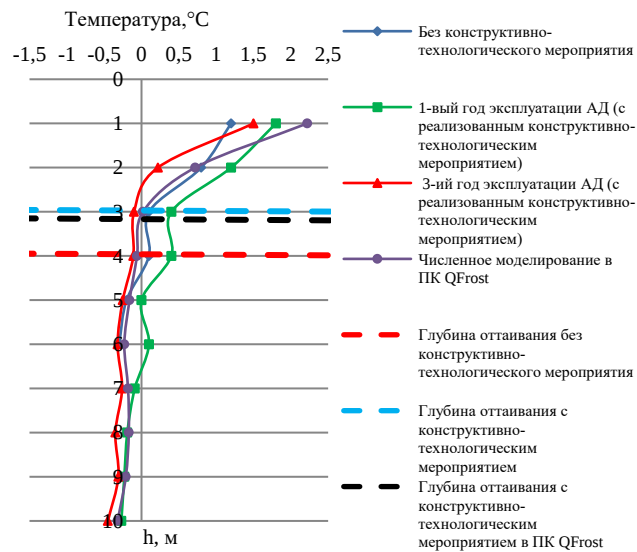


Рисунок 8. Результаты измерений температуры грунтов основания в южной откосной части ЗП

Численное моделирование НС грунтов геотехнической системы «основание-земполотно» выполнялось в ПК Midas GTS FEA с использованием упругой идеально-пластической модели грунта Мора-Кулона (рис.9, 10). Расхождение результатов моделирования в ПК Midas GTS FEA со значениями, полученными в эксперименте на конец третьего года наблюдений, составляли: по вертикальным перемещениям не более 20%, по вертикальным напряжениям не более 30%.

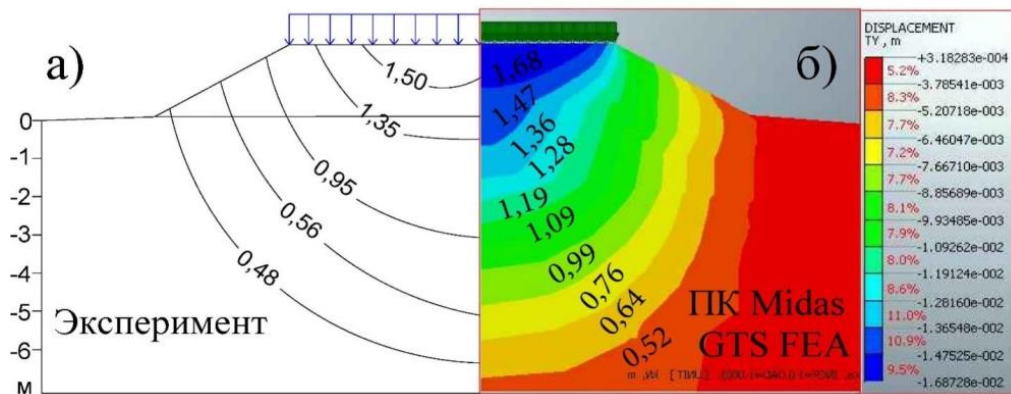


Рисунок 9. Экспериментальные и расчётные изолинии вертикальных перемещений на конец 3-го года наблюдений: а) экспериментальные (см); б) расчетные (см)

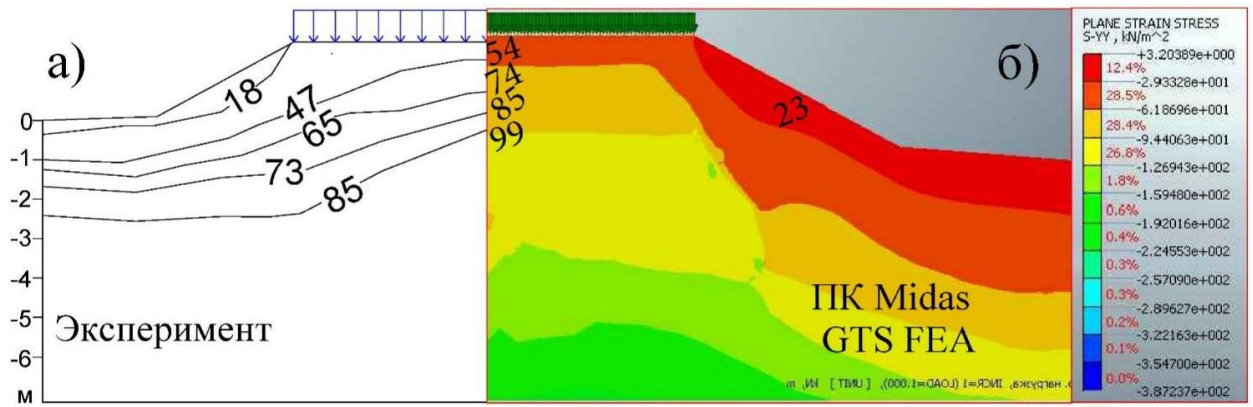


Рисунок 10. Экспериментальные и расчётные изобары вертикальных напряжений на конец 3-го года наблюдений: а) экспериментальные (кПа); б) расчётные (кПа)

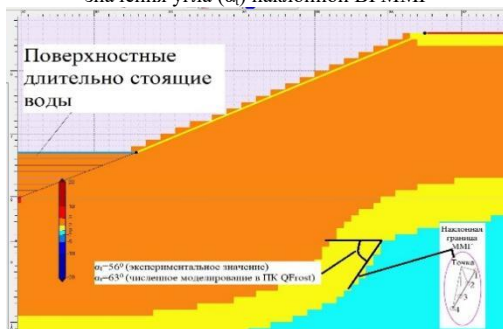
Прогноз устойчивости ММГ основания на натурном участке основывается на анализе НС в точках грунтового массива ($\sigma_z, \sigma_x, \tau_{xz}$), расположенных на НВГММГ. Экспериментальные значения напряжений в точках на НВГММГ в натуральных условиях определялись, исходя из расположения мессдоз. Значение *коэффициента устойчивости* (K_{st}) основания в точке грунтового массива оценивается по формуле, представленной в работе А.Н. Богомолова:

$$K_{st} = \frac{[0,5(\sigma_z - \sigma_x)\cos 2\alpha + 0,5(\sigma_x - \sigma_z) + \tau_{xz}\sin 2\alpha + \sigma_{CB}]\operatorname{tg}\varphi}{0,5(\sigma_x - \sigma_z)\sin 2\alpha + \tau_{xz}\cos 2\alpha}, \quad (2.1)$$

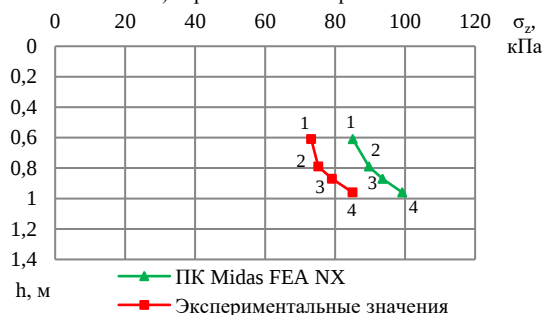
где $\sigma_z, \sigma_x, \tau_{xz}$ – напряжения в точке грунтового массива на НВГММГ, α – угол НВГММГ.

Отклонение результатов моделирования напряжённого состояния в точках на НВГММГ в ПК Midas GTS FEA со значениями, полученными в эксперименте (рис. 11), на конечный период мониторинга составляют 15-30%.

а) Сопоставление экспериментального и расчетного (ПК QFrost) значения угла (α_i) наклонной ВГММГ



б) вертикальные напряжения



в) горизонтальные напряжения



г) касательные напряжения

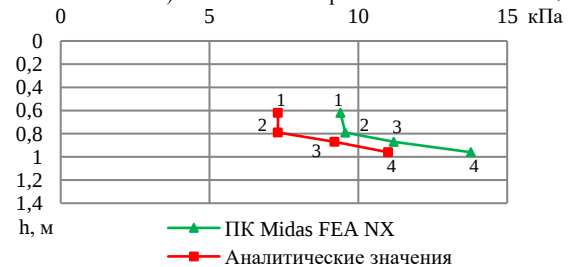


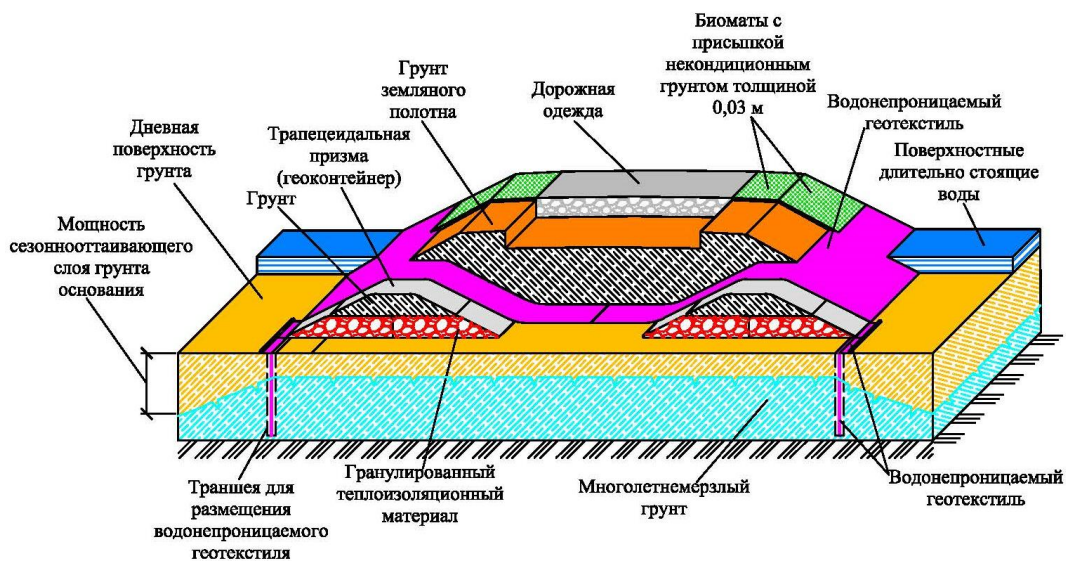
Рисунок 11. Результаты сопоставления экспериментальных данных с результатами аналитического расчета НС в точках грунтового массива на НВГММГ на конечный период мониторинга

Проведенный мониторинг и результаты численного моделирования натурального эксперимента с учетом срока эксплуатации АД ($t=12$ лет) свидетельствуют о том, что в период эксплуатации в основании сооружения формируется и изменяется во времени НВГММГ. На конец третьего года мониторинга угол НВГММГ составил $\alpha_{t=3\text{год}}=56^0_{(\text{экспер.знач.})}/63^0_{(\text{чис.знач.})}$, что обеспечивает среднее значение K_{st} основания в точках грунтового массива, равного $0,87_{(\text{аналит.знач.})}/1,01_{(\text{чис.знач.})}$, и указывает на необходимость проработки дополнительных мероприятий по обеспечению устойчивости основания.

В третьей главе представлено разработанное КТМ с частичной заменой грунта на теплоизоляционный материал в основании обертываемой призмы, расположенной в нижней части ЗП. Определены предельные геометрические размеры КТМ, влияющие на изменение ТР грунтов и угла НВГММГ основания.

С учетом результатов натурального эксперимента и выполненных расчетов разработано КТМ, основанное на устройстве водонепроницаемой геомембраны в нижней части ЗП, направленной на ограждения влияния теплового потока от фильтрации воды на границе «основание-земполотно» (рис. 12) и частичной замены грунта на теплоизоляционный материал (h_{tm}) в основании грунтовых призм, расположенных в подоткосной части ЗП, способствующий снижению теплового потока от неглубоких водоемов через откосную часть сооружения.

а)



б)

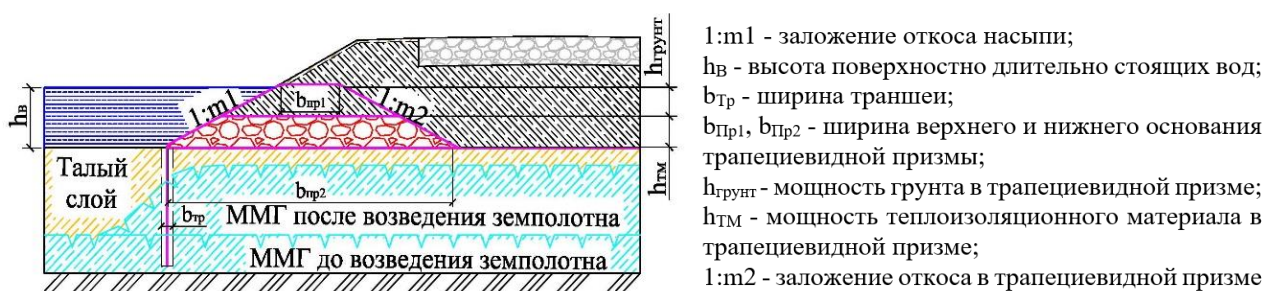


Рисунок 12. а) Общая схема КТМ; б) Поперечный профиль КТМ с варьируемыми геометрическими размерами

Для определения влияния геометрических размеров КТМ на ТР грунтов основания проведена серия численных экспериментов. В качестве критерия выбора приемлемых геометрических размеров назначена температура в характерных точках основания, влияющая на глубину протаивания и изменение угла НВГММГ относительно горизонтальной плоскости в основании сооружения на первый год внедрения КТМ в период максимального оттаивания.

Предельные размеры предлагаемого КТМ при численном моделировании с фиксированными параметрами $H_{зп}=2$ м; $h_b=1$ м; заложение откоса ЗП 1:1,5÷1:2; теплофизические свойства гранулированного теплоизоляционного материала - $\lambda=0,1$ Вт/(м °С), $C=576$ кДж/(м³ °С): заложение внешнего откоса призмы (1:м₁) принималось идентично проектному заложению откоса сооружения; заложения внутреннего откоса призмы (1:м₂) принимались равными: 1:1, 1:2, 1:3; ширина верхней ($b_{пр1}$) и нижней части ($b_{пр2}$) призмы варьировалась $b_{пр1}=0,5\div1,5$ м, шагом по 0,5 м, $b_{пр2}=3\div6$ м; мощность горизонтально расположенного теплоизоляционного материала в грунтовой призме ($h_{тм}$) варьировалась 0,1÷1 м с шагом 0,1 м; высота призмы ($h_{пр}$) принималась на 0,1 м выше уровня неглубоких водоемов, что обусловлено предотвращением инфильтрации воды в грунты ЗП за счет обертывания призмы водонепроницаемым геосинтетическим материалом. На рисунке 13 представлены результаты (численное моделирование) изменения геометрических размеров КТМ.

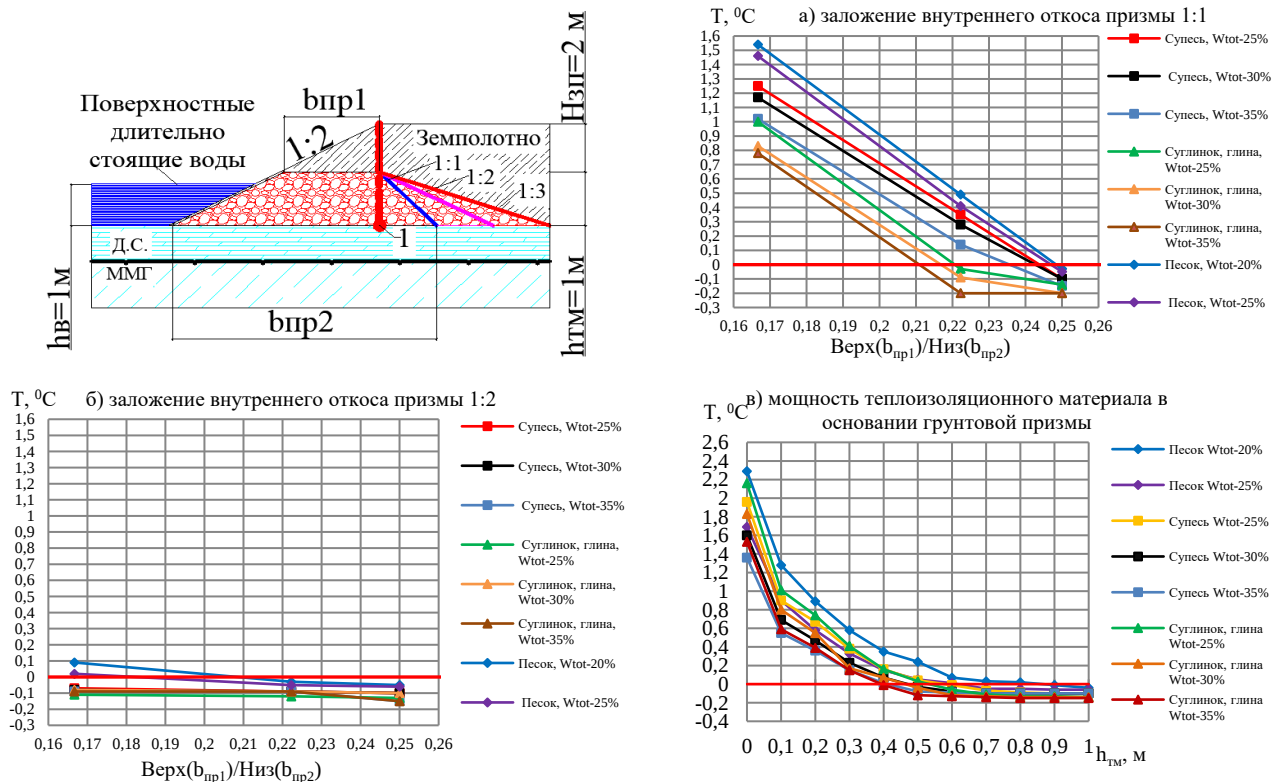


Рисунок 13. Изменение температуры и глубины протаивания в характерной точке 1 в зависимости от вида и влажности представительных грунтов основания и варьируемых геометрических размеров КТМ

По результатам численного моделирования (рис.13 а, б) установлено, что при заложении внутреннего откоса призмы 1:1 максимальном соотношении и соотношении $b_{пр1}/b_{пр2}=0,22$ у глинистых

грунтов с $W_{\text{tot}}=25\div35\%$ формируется отрицательная температура в характерной точке, равная минус $0,02\div0,2^{\circ}\text{C}$, а при максимальном соотношении $b_{\text{пр1}}/b_{\text{пр2}}=0,25$ отрицательная температура в характерной точке составила минус $0,03\div0,2^{\circ}\text{C}$ для всех видов грунта. В случае заложения внутреннего откоса призмы 1:2 отрицательная температура в характерной точке составляет минус $0,03\div0,15^{\circ}\text{C}$, кроме песчаных грунтов с $W_{\text{tot}}=20\div25\%$ и минимальным соотношении $b_{\text{пр1}}/b_{\text{пр2}}=0,166$, формируется положительная температура в характерной точке плюс $0,09\div0,02^{\circ}\text{C}$. В условиях заложения внутреннего откоса призмы 1:3 для всех представительных грунтов отрицательная температура в характерной точке составила минус $0,03\div0,14^{\circ}\text{C}$. Однако заложение внутреннего откоса призмы 1:3 приводит к перерасходу теплоизолятора на 20% с незначительным снижением температуры по сравнению с вариантом заложения откоса призмы 1:2 для песчаных грунтов, на $\Delta T=0,07\div0,12^{\circ}\text{C}$. Из результатов моделирования следует, что заложение внутреннего откоса призмы рационально принимать 1:2. Для обеспечения отрицательной температуры с глубиной протаивания, равной нулю, в первый год эксплуатации в характерной точке 1 достаточно использовать призму из теплоизоляционного материала высотой $h_{\text{TM}}=0,9$ м (рис.13 в). Увеличение высоты теплоизоляционного материала $h_{\text{TM}}=0,6\div1$ м приводит к понижению температуры в характерной точке 1 в среднем на минус $0,03^{\circ}\text{C}$, и уменьшению глубины протаивания на $h_{\text{dth}(t)}=0,4$ м в сравнении с высотой теплоизоляционного материала $h_{\text{TM}}=0,5$ м. В рамках оптимизации КТМ высота теплоизоляционного материала для всех представительных грунтов предложено принимать наиболее выгодный вариант $h_{\text{TM}}=0,5$ м.

На основании численного моделирования подтверждена эффективность КТМ и выявлено, что условная стабилизация глубины протаивания наступает с 10-го года эксплуатации при высоте $h_{\text{TM}}=0,1$ м и с 7-го года эксплуатации при мощности $h_{\text{TM}}=0,5$ м, что напрямую указывает на период снижения угла НВГММГ до постоянного значения (рис.14 б)

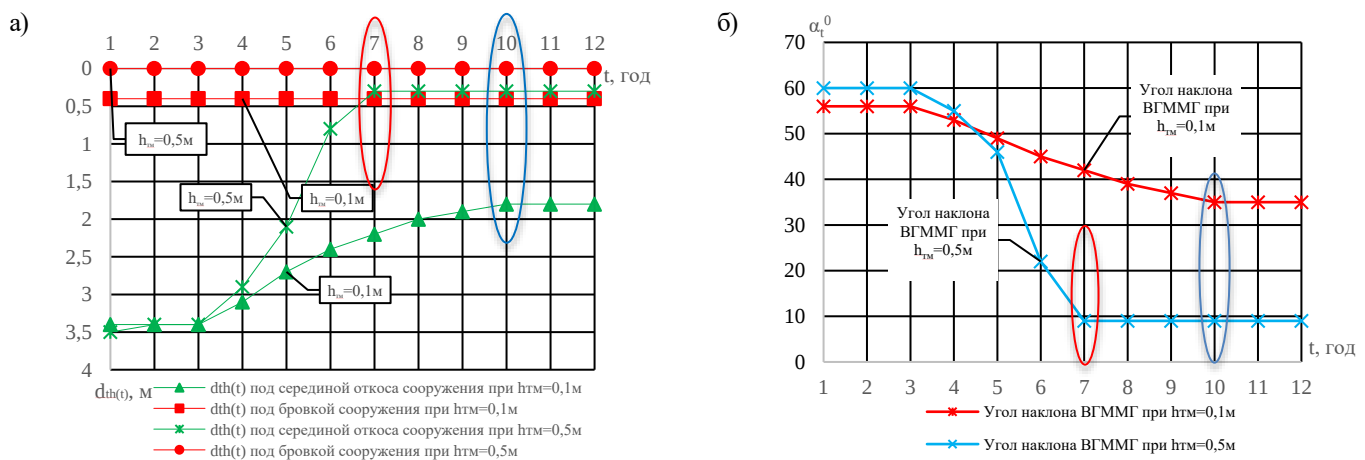


Рисунок 14. Изменение глубины протаивания (а) угла НВГММГ (б)

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований ТР и угла НВГММГ геотехнической системы «основание-земполотно» на маломасштабных моделях с

моделированием неглубоких водоемов и описание методики расчета изменения устойчивости основания АД во времени.

Первая серия экспериментальных исследований являлась постановочной – выполнялось моделирование многолетнемерзлого основания и ЗП без воздействия неглубоких водоемов и снежного покрова - «закрытая система», позволяющее получить картину ТР и НС геотехнической системы «основание-земполотно». Во второй серии экспериментальных исследований моделировались неглубокие водоемы вдоль откосов сооружения и снежный покров. Отличие третьей серии экспериментальных исследований от второй заключалось в устройстве предложенного КТМ. Эксперименты проводились в одинаковых условиях, что позволило исключить воздействие случайных факторов на результаты. Было проведено не менее шести экспериментов, что дало возможность получить качественную картину изменений ТР и НС грунтового основания модели ЗП.

Геометрические размеры натурного объекта и маломасштабной модели приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Геометрические размеры натурного объекта и лабораторной модели

№ п/п	Показатели	Натурный размер, м (М 1:1)	Модельный размер, м (М 1:30)
1	Ширина ЗП, м	12	0,4
2	Заложение откосов	1:1,5	1:1,5
3	Протяжённость, м	36	1,2
4	Ширина ПЧ, м	7	0,23
5	Высота ЗП, м	2	0,067
6	Глубина водоема, м	1	0,033

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен лоток с геометрическими размерами 1200x1000x450 мм (рис.15).

а)



б)



Рисунок 15. Экспериментальная модель: а) в летний период; б) в зимний период

Экспериментальный лоток помещался в морозильную камеру с моделируемыми климатическими условиями, приближенными к натурному экспериментальному участку (см. главу 2). Температурные условия приняты по данным метеостанции г. Надым как средние значения по многолетним наблюдениям положительных и отрицательных температур натурного объекта: $T_{f,m} = -14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{th,m} = +10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для данного объекта расчетный период отрицательных температур в масштабе 1:1 равен 5032,80 ч, расчетный период положительных температур в масштабе 1:1 –

3727,20 ч. В результате учета временного масштаба 1:900 продолжительность холодного периода для эксперимента в лабораторных условиях составила 5,59 ч, величина теплого периода – 4,14 ч. Температура водоема принималась равной от +2,00 до +4,00 °С. При моделировании снежного покрова ($\rho=340 - 420 \text{ кг/м}^3$) на откосной части использовалось органическое стекло, толщиной 0,9 мм, что соответствует эквиваленту по термическому сопротивлению среднему значению снежного покрова в полевых условиях 0,62 м. На придорожной полосе толщина органического стекла составляла 11 мм, что соответствует 0,62 м снежного покрова и 0,6 м толщины льда промёрзших неглубоких водоемов в натурных условиях.

Основание маломасштабной модели ЗП устраивалось в лотке из суглинка нарушенной структуры, который уплотнялся послойно, толщина каждого слоя составляла 50 мм. После заполнения экспериментального лотка отбирались пробы грунта для определения физико-механических характеристик: $J_L=0,9$; $S_r=0,95$; $W=29,5$; $\gamma=18,6 \text{ кН/м}^3$; $C=0,021 \text{ МПа}$; $E=4,3 \text{ МПа}$; $\varphi=13^\circ$. По мере устройства грунтового основания устанавливались датчики для измерения общих вертикальных давлений – мессдозы, для измерения вертикальных перемещений – грунтовые марки и датчики температуры – термодатчики. Общая высота моделируемого основания составляла 330 мм, что соответствует 10 метрам в масштабе 1:1.

Далее выполнялась температурная стабилизация грунта основания путем циклического промерзания-оттаивания. Критерием стабилизации грунтового основания принято формирование деятельного слоя мощностью $h=2 \text{ м}$ в масштабе 1:1 и $h=67 \text{ мм}$ для маломасштабной модели. После предварительной температурной стабилизации основания возводилось ЗП из охлажденного однородного суглинка с температурой 0°С, влажность которого составляла 14%. Высота ЗП составляла $h=67 \text{ мм}$, что соответствует натурной величине 2 м.

Фильтрационную прослойку на границе «основание-земполотно» моделировали слоем торфа. Подвижную нагрузку на ЗП моделировали при помощи гидравлического домкрата. Моделирование КТМ выполнялось следующим образом: для исключения попадания неглубоких водоемов в геотехническую систему «основание-земполотно» в основании разрабатывались продольные траншеи шириной не менее 60 см в масштабе 1:1, что соответствует 2 см на исследуемой маломасштабной модели и глубиной ниже деятельного слоя. Затем в разработанную траншею вертикально размещали водонепроницаемый геотекстиль «Теплонит 600». После размещения водонепроницаемого геотекстиля в траншею производилась обратная засыпка траншеи выработанным грунтом с последующим послойным уплотнением. Свободные края водонепроницаемого геотекстиля раскатывались в поперечном направлении от оси ЗП. В откосной части сооружения устраивались призмы из теплоизоляционного материала «ДиатомИК». Свободными краями водонепроницаемого геотекстиля обертывались поверхности призм с максимальным натяжением и минимальной шириной нахлеста для натурального объекта 30 см, и 1 см для исследуемой маломасштабной модели.

Результаты первой серии экспериментальных исследований рассматривались с целью верификации полученных данных по ТР и НС как обобщенное понятие для проведения дальнейших исследований в открытой системе с выдерживанием силового подобия и оценки влияния факторов открытой системы.

По результатам второй и третьей серии экспериментальных исследований на маломасштабных моделях в открытой системе на конец 1-го и 12-го цикла максимального оттаивания составлены термограммы изменения ТР грунтов геотехнической системы «основание-земполотно» и геометрического положения наклонной границы ММГ в основании ЗП (см. рис. 16).

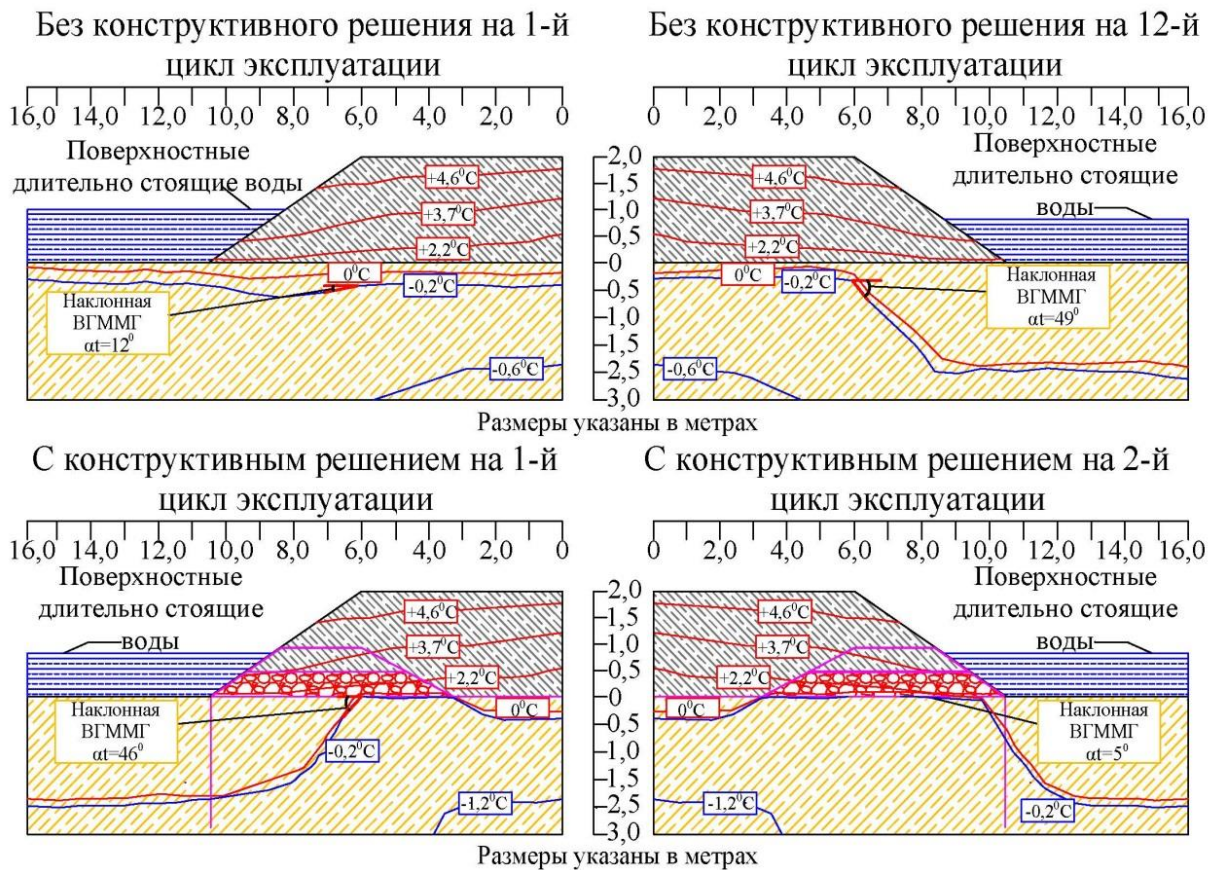
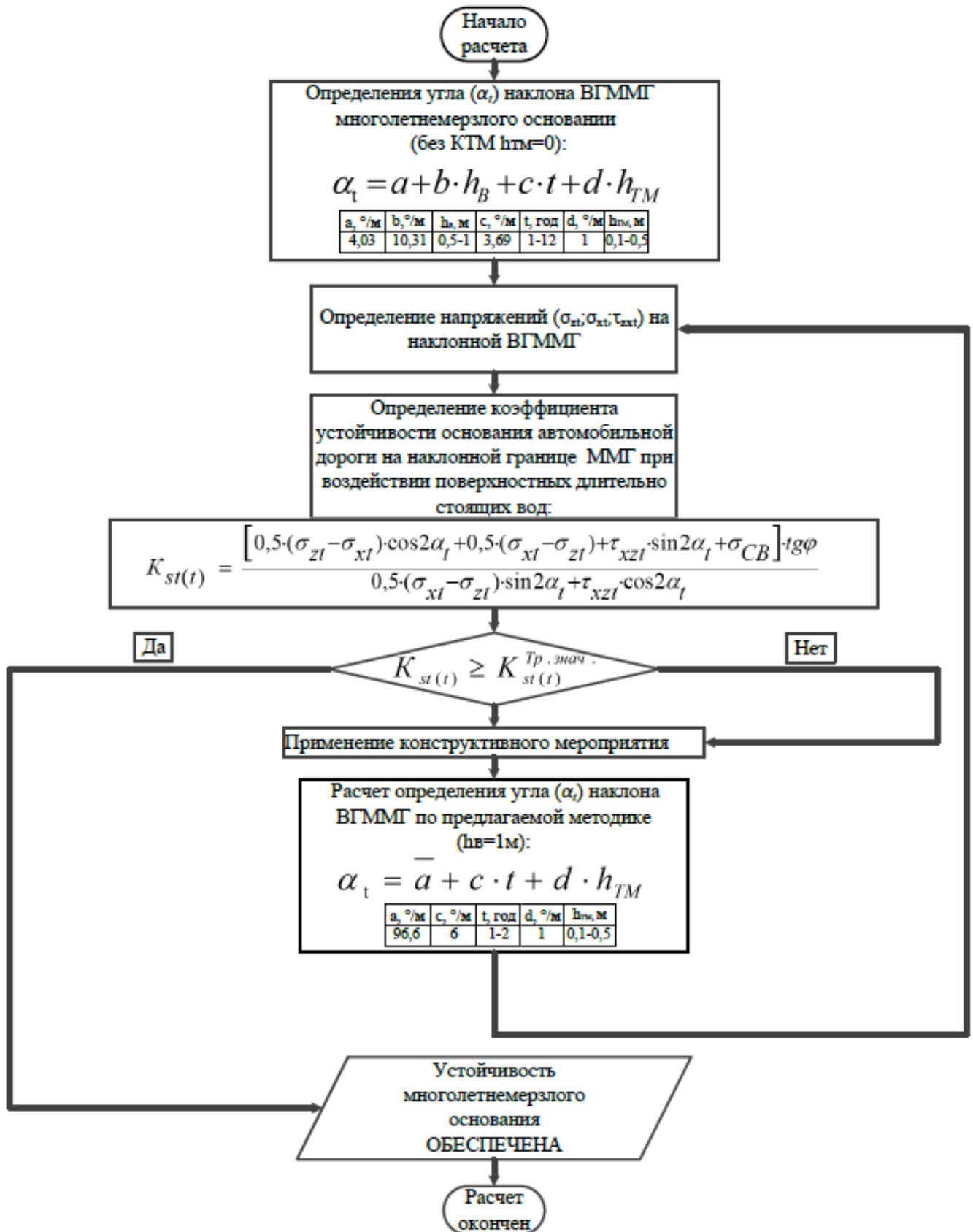


Рисунок.16. Результаты экспериментальных исследований ТР многолетнемерзлых грунтов основания ЗП

Экспериментально установлено, что в период максимального оттаивания (12 цикл) в основании откосной части сооружения без КТМ формируется НВГММГ под углом $\alpha_{t=12 \text{ цикл}} = 49^\circ$. Предложенное КТМ со второго цикла после внедрения способствует уменьшению угла НВГММГ на $\Delta\alpha_{t=2 \text{ года}} = 44^\circ$ за счет изменения ТР, влияющего на глубину оттаивания (в точках 1, 2) и формирования НВГММГ основания.

Для прогноза изменения во времени устойчивости основания АД на НВГММГ путем аппроксимаций результатов численных решений разработана методика расчета. Алгоритм методики расчета изменения $K_{st(t)}$ основания АД при воздействии неглубоких водоемов с учетом влияния геометрических параметров КТМ представлен на рисунке 17.



*Аппроксимационные зависимости предложены для усредненных теплофизических характеристик грунтов.

Рисунок 17. Блок-схема

На рисунке 18 представлено сопоставление предложенной методики с аналитическим расчетом и численным моделированием.

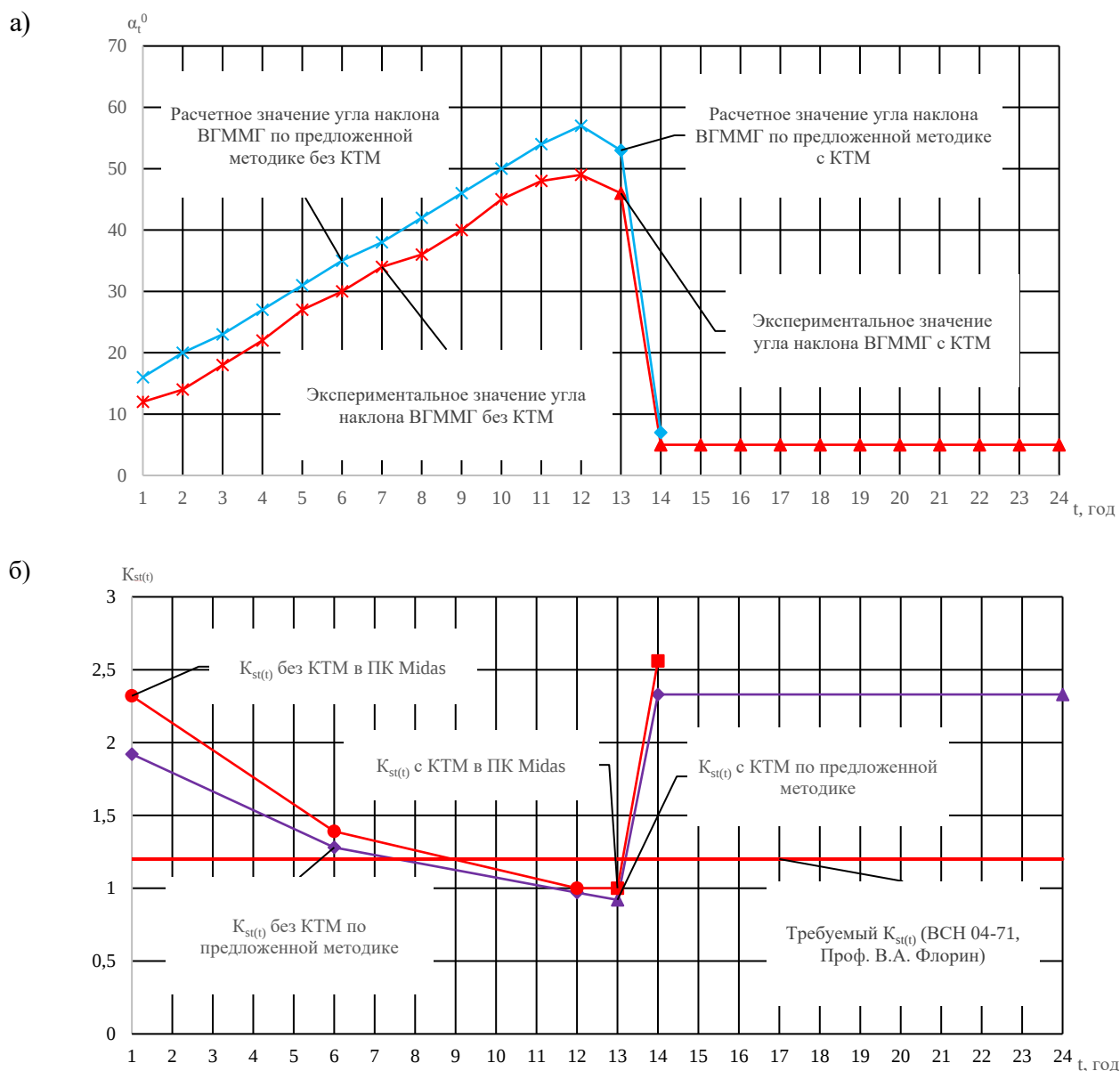


Рисунок 18. Сопоставление результатов изменения: а) угла НВГММГ основания б) $K_{st(t)}$ многолетнемерзлого основания

Установлено, что определение угла НВГММГ по предложенной методике удовлетворительно согласуется с результатами экспериментальных исследований и позволяет оценить изменение угла НВГММГ с максимальной погрешностью до 20 % без КТМ и с ним. На первый год эксплуатации без КТМ $K_{st(t)}$ на 37 % превышает требуемое значение. При дальнейшей эксплуатации происходит снижение (уменьшение) $K_{st(t)}$ по сравнению с нормативным значением. Реализация КТМ позволяет со второго года эксплуатации повысить $K_{st(t)}$ на 48 % за счет уменьшения угла НВГММГ основания. Предложенная методика расчета изменения $K_{st(t)}$ основания на НВГММГ удовлетворительно согласуется с результатами численного моделирования (до 15 %) в ПК Midas GTS FEA.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлена основная причина потери устойчивости линейных сооружений на многолетнемерзлых грунтах при воздействии неглубоких водоемов вдоль откосных частей сооружения, заключающаяся в нарушении ТР в откосной части основания и формировании НВГММГ за счет разных величин оттаивания под основной площадкой и откосом ЗП. Выполнен анализ зарубежного и отечественного опыта имеющихся способов повышения устойчивости основания АД. В результате проведенного анализа литературных источников сформированы цель и задачи исследования.

2. Получены закономерности для изменения во времени угла наклонной ВГММГ, учитывающие глубину водоема и глубину оттаивающего слоя в виде линейных функций, коэффициенты которых зависят от высоты неглубоких водоемов, геометрических параметров ЗП и типа грунта. Проведены натурные экспериментальные исследования на участке АД с неглубоким водоемом вдоль южной откосной части сооружения с учетом известного КТМ. По результатам экспериментальных исследований установлено, что при воздействии неглубокого водоема в основании формируется НВГММГ под углом $\alpha_t=56^\circ$, что обеспечивает среднее значение $K_{st(t)}$ основания в точках грунтового массива, равного 0,87. При нормативном $K_{st(t)}=1,2$ полученный по результатам мониторинга $K_{st(t)}$ не обеспечивает устойчивость основания, что указывает на необходимость проработки дополнительных мероприятий по обеспечению устойчивости многолетнемерзлого основания.

3. Разработано КТМ, направленное на ограждение влияния теплового потока от фильтрации воды на границе «основание-земполотно» и снижение теплового потока от неглубоких водоемов через откосную часть сооружения. Отличием КТМ от известных мероприятий является частичная замена грунта на теплоизоляционный материал в основании обертываемой призмы, расположенной в нижней части ЗП и изменение во времени угла НВГММГ влияющего на устойчивость основания. Внедренное КТМ способствует со второго года эксплуатации уменьшению угла наклона ВГММГ на $\alpha_{t=2 \text{ года}}=44^\circ$ за счет поднятия кровли ММГ в характерных точка (под бровкой и в середине откоса сооружения) и смещению наклонной ВГММГ к подошве ЗП. Техническую новизну КТМ подтверждает полученный патент на изобретение №2732774.

4. Выполнено экспериментальное обоснование геометрических размеров КТМ, влияющих на изменение ТР и угла наклона ВГММГ в основании ЗП. Выявлена зависимость изменения ТР и угла наклона ВГММГ от геометрических размеров КТМ.

5. Предложена методика расчета изменения во времени устойчивости многолетнемерзлого основания АД, позволяющая оценить с максимальной погрешностью до 20% относительно экспериментальных значений изменение во времени угла НВГММГ и численным моделированием получить удовлетворительную сходимость (до 15%) по определению $K_{st(t)}$.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования:
 усовершенствовать методику расчета изменения во времени устойчивости основания АД на НВГММГ и проработать новые мероприятия, позволяющие повысить устойчивость грунтов основания АД с учетом рациональной толщины и схемы расположения теплоизоляционных слоев в теле земполотна.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в

Перечень рецензируемых научных изданий:

1. **Шанхоев, З. Ш.** Применение конструктивно-технологического мероприятия на подтопляемых участках автомобильной дороги в условиях вечной мерзлоты / **З. Ш. Шанхоев.** // Транспортные сооружения. — 2024. — Т.11. — № 4. — URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS424.pdf>. — DOI: 10.15862/05SATS424.

2. **Шанхоев, З.Ш.** Моделирование деформированного состояния земляного полотна автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах / А.Н. Краев, **З.Ш. Шанхоев.** // Транспортные сооружения. — 2019. — Т.6. — №1. — URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS119.pdf>. — DOI: 10.15862/05SATS119.

3. **Шанхоев, З.Ш.** Конструктивно-технологические решения по устройству автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах / А.С. Макаров, А.Н. Краев, **З.Ш. Шанхоев.** // Транспортные сооружения. — 2018. — №4. — URL: <https://t-s.today/PDF/17SATS418.pdf>. — DOI: 10.15862/17SATS418.

4. **Шанхоев, З.Ш.** Результаты экспериментального исследования и численного моделирования плоскопараллельного промораживания образца грунта в экспериментальном стенде / А.С. Макаров, А.Н. Краев, С.А. Твердохлеб, **З.Ш. Шанхоев.** // Транспортные сооружения. — 2017. — Т.4. — №4. — URL: <https://t-s.today/PDF/09TS417.pdf>. — DOI: 10.15862/09TS417.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др:

5. **Шанхоев, З.Ш.** Моделирование термомеханического взаимодействия элементов конструкции автомобильной дороги из мерзлых грунтов / А.Н. Краев, А.С. Макаров, Т.В. Мальцева, **З.Ш. Шанхоев.** // Криосфера Земли. — 2024. — Т. XXVIII. — № 3. — С. 52–62. — DOI: 10.15372/KZ20240305.

В других изданиях:

6. **Шанхоев, З. Ш.** Устойчивость многолетнемерзлого основания автомобильной дороги при воздействии поверхностных длительно стоящих вод / **З. Ш. Шанхоев.** // Современные методы проектирования, подземного строительства и реконструкции оснований и фундаментов (GFAC 2024) :

Национальная (всероссийская) научно-техническая конференция с международным участием, посвященная 90-летию кафедры геотехники (механики грунтов, оснований и фундаментов, инженерной геологии). 23–25 октября 2024 г. Санкт-Петербург, 2024. – С. 127.

7. **Шанхоев, З.Ш.** Анализ масштабного фактора при моделировании автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах / А.С. Макаров, **З.Ш. Шанхоев**, И.В. Земеров, Д.С. Скворцов. // Новые технологии – нефтегазовому региону: Международная научно-практическая конференция. 24-27 апр. 2017 г. – Тюмень, 2017. – С. 256-259.

8. **Шанхоев, З.Ш.** Системы мониторинга автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах в рамках реализации проекта «Умные дороги» / **З.Ш. Шанхоев**, А.С. Макаров, Т.В. Пермитина. // Новые технологии – нефтегазовому региону: Международная научно-практическая конференция. 24-27 апр. 2017 г. – Тюмень, 2017. – С. 335-337.

9. **Шанхоев, З.Ш.** Обзор известных методик расчета устойчивости откосов автомобильных дорог / **З.Ш. Шанхоев**, Д.А. Ястремский, А.Н. Краев. // Технологии XXI века: Проблемы и перспективы развития: Международная научно-практическая конференция. 10 дек. 2016. – Пермь, 2016 г. – С. 260-264.

10. **Шанхоев, З.Ш.** Анализ и принципы разрушения автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах / **З.Ш. Шанхоев**, Ал.Н. Краев. // Сборник XV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, соискателей и магистрантов ТюмГАСУ. 12 нояб. 2015 г. – Тюмень, 2015. – С. 206-213.

Патент:

11. Патент № 2732774 Российская Федерация, МПК E01C 3/06 (2006.01). Автомобильная дорога на многолетнемерзлых грунтах: № 2019135385: заявл. 05.11.2019, опубл. 22.09.2020 / Краев А. Н., Краев А. Н., **Шанхоев З. Ш.**, Макаров А. С.: заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет».