

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Макаров Алексей Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЛИТЕЛЬНО СТОЯЩИХ ВОД НА
ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Краев Алексей Николаевич



Тюмень – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
1.1. Проблемы строительства линейных сооружений на многолетнемерзлых грунтах.....	11
1.2. Методы и устройства управления температурным режимом в конструкциях линейных сооружений на многолетнемерзлых грунтах	18
1.3. Методы прогноза температурных процессов в конструкциях линейных сооружений на многолетнемерзлых грунтах	28
1.4. Выводы по главе 1.....	35
ГЛАВА 2. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЛИТЕЛЬНО СТОЯЩИХ ВОД ВДОЛЬ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА.....	36
2.1. Оценка инженерно-геокриологических характеристик грунтов основания участка автомобильной дороги с поверхностными длительно стоящими водами	36
2.2. Внедрение экспериментального конструктивно-технологического решения, по стабилизации температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания участка автомобильной дороги.....	46
2.3. Оборудование и результаты наблюдения за температурным режимом грунтов земляного полотна и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги	52
2.4 Выводы по главе 2.....	60

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ	62
3.1. Методика расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии поверхностных длительно стоящих вод	63
3.2. Сравнение результатов предлагаемой методики расчета с численным моделированием в программе QFrost.....	73
3.3. Верификация предлагаемой методики расчета с результатами мониторинга участка автомобильной дороги (п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90)	85
3.4 Выводы по главе 3.....	96
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЛИТЕЛЬНО СТОЯЩИХ ВОД НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ.....	98
4.1. Теоретическое обоснование геометрических параметров предложенного конструктивно-технологического решения.....	99
4.2. Лабораторное оборудование для проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях	105
4.3. Экспериментальное моделирование в лабораторных условиях температурного режима грунтов земляного полотна и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги	107
4.4. Выводы по главе 4.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	139

ПРИЛОЖЕНИЕ А	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ В	156

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Одним из важных факторов, влияющих на стабилизацию температурного режима грунтов *земляного полотна* (ЗП) и многолетнемерзлого основания *автомобильных дорог* (автодорог), является образование термокарстовых процессов вдоль дорог. *Многолетнемерзлые грунты* (ММГ) основания под теплоизолирующим влиянием ЗП автодороги подвержены консолидации. При оттаивании грунты основания сжимаются под ЗП автодороги, тем самым формируются подтопляемые пониженные места вдоль откосов. Вследствие подтопления придорожных полос и откосов дороги в тело ЗП проникает вода, вызывая криогенные процессы в конструкции ЗП и основания дороги. В большинстве случаев скопившаяся вода вдоль откосов дорог находится круглогодично в талом и мерзлом состоянии, что соответствует определению *поверхностных длительно стоящих вод* (ПДСВ). Влияние таких вод может быть разным в зависимости от климатических, инженерно-геологических условий участка дороги на ММГ. На таких участках следует выполнять индивидуальный анализ и подход при разработке *конструктивно-технологических решений* (КТР), направленных на стабилизацию температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания.

Степень разработанности темы исследования. Вопросом стабилизации температурного режима ЗП и основания автомобильных и железных дорог на ММГ занимались и занимаются: Цернант А.А., Золотарь И.А., Малышев А.А., Дубина М.М., Пассек В.В., Шуваев А.Н., Кондратьев В.Г., Каргаполов В.Д., Давыдов В.А., Михайлов Г.П., Жданова С.М., Дыдышко П.И., Панова М.В., Бедрин Е.А., Chi Zhang, Jing Sun и др.

Изучением теории теплопроводности и тепловых процессов занимались и занимаются: Кудрявцев В.А., Ершов Э.Д., Головкин М.Д., Лукьянов В.С., Лыков А.В., Хрусталева Л.Н., Кроник Я.А., Горелик Я.Б., Парамонов В.Н., Сахаров

И.И., Кудрявцев С.А., Бедрин Е.А., Анисимов О.А., Romanovsky V.E., Lunardini V.J. и др.

Объект исследования: грунты ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ.

Предмет исследования: температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ.

Цель исследования: разработать методику прогноза и КТР по стабилизации температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ.

Задачи диссертационного исследования:

1. Проанализировать и обобщить имеющийся отечественный и зарубежный опыт по стабилизации температурного режима ЗП и основания автодороги на ММГ.

2. Исследовать температурный режим натурной конструкции ЗП и основания автодороги на ММГ при влиянии ПДСВ.

3. Разработать КТР, направленное на стабилизацию температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги при влиянии ПДСВ с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии.

4. Разработать методику расчета для прогноза процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ вод, с учетом воздействия КТР.

5. Верифицировать результаты расчетов процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания по предложенной методике с результатами численного моделирования и экспериментальными данными натуральных наблюдений участка автодороги на ММГ при влиянии ПДСВ.

6. Экспериментально-теоретически обосновать геометрические параметры элементов предлагаемого КТР и оценить их влияние на

температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги при влиянии ПДСВ.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Теоретически и практически установлено влияние ПДСВ на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания.

2. Разработано КТР для сохранения грунтов основания ЗП в мерзлом состоянии при влиянии ПДСВ, с последующей температурной стабилизацией грунтов геотехнической системы «ЗП-основание».

3. Разработана методика расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ, с учетом воздействия КТР.

4. Экспериментально-теоретически обоснованы геометрические параметры КТР.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

– в разработке КТР по стабилизации температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии;

– в предложении методики расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ, позволяющей учитывать воздействие КТР;

– в экспериментальном обосновании эффективности разработанного КТР для сохранения грунтов основания ЗП в мерзлом состоянии при влиянии ПДСВ.

Результаты исследований внедрены на автомобильной дороге «Сургут-Салехард, участок Новый Уренгой – Надым I пусковой комплекс: п.Пангоды (км870) – п.Правохеттинский (км936)» Участок ПК594+00 – ПК594+90»; на экспериментальном участке автомобильной дороги «Устье-Кемпедяй» согласно письму ООО «ТИП-ИК-1» № 29/10-20 от 08.10.2020 г.

Методология и методы исследования:

- анализ существующих методов стабилизации температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания на основе отечественного и зарубежного опыта инженеров-геотехников;
- экспериментальные натурные исследования температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания участка автодороги на ММГ при влиянии ПДСВ;
- экспериментальные лабораторные исследования на маломасштабном стенде температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ, с внедрением разработанного КТР;
- численные и аналитические расчеты влияния ПДСВ на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания методом конечных разностей и аналитическим методом, представленным решением Стефана.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты натуральных экспериментальных исследований температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания участка автодороги п.Пангоды – п.Правохеттинский при влиянии ПДСВ;
- КТР, стабилизирующее температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии;
- методика расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ, позволяющая учитывать воздействие КТР;
- результаты верификации методики расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с численным моделированием и экспериментальными данными натуральных наблюдений участка автодороги п.Пангоды – п.Правохеттинский при влиянии ПДСВ;
- результаты экспериментальных лабораторных исследований на маломасштабном стенде температурного режима грунтов ЗП и

многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ, с учетом разработанного КТР.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

– соблюдением законов теплофизических процессов при составлении методики расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ;

– объемом данных экспериментальных натурных исследований при использовании поверенного контрольно-измерительного оборудования;

– сериями экспериментального моделирования в лабораторных условиях при использовании поверенного контрольно-измерительного оборудования;

– сравнением результатов расчета по предлагаемой методике с данными натурных экспериментов, лабораторных экспериментальных исследований, с численным моделированием в сертифицированной программе для ЭВМ и результатами исследований других авторов.

Апробация работы: положения работы были доложены на международных геотехнических и научно-практических конференциях ТюмГАСУ, ТИУ (г.Тюмень, 2015, 2017, 2018г.г.), СПбГАСУ (г.Санкт-Петербург, 2019, 2021г.г.) и симпозиуме в Южно-Сахалинске (2018г.); всероссийской научно-технической конференции «Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений» (г.Томск, 2021г.).

Личный вклад соискателя состоит в разработке КТР по стабилизации температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии; планировании и реализации экспериментальных натурных и лабораторных исследованиях, численных экспериментов; в разработке методики расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ, с учетом воздействия КТР; в обосновании экспериментально-теоретическим способом геометрических параметров КТР.

Публикации. По теме диссертационного исследования получен патент на изобретение и опубликовано 7 статей, 3 из них в журналах, соответствующих требованиям ВАК.

Объем и структура работы. Структура диссертационной работы представлена введением, четырьмя главами, заключением, списком литературы и приложениями. В объём работы входит 156 страниц напечатанного текста, 77 рисунков, 18 таблиц, 96 источников литературы.

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

ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Проблемы строительства линейных сооружений на многолетнемерзлых грунтах

Многолетнемерзлые, иногда называют вечномерзлые, грунты залегают на огромной территории земного шара, являются частью криолитозоны, для которой свойственна отрицательная температура и наличие или возможность существования подземных льдов. ММГ – грунт, находящийся в мерзлом состоянии постоянно в течение трех и более лет [42].

Большой вклад в развитие исследований ММГ внесли: Цытович Н.А., Сумгин М.И., Толстихин Н.И., Мельников В.П., Мельников П.И., Кондратьев К.А., Богданович Н.С., Львов А.В., Пархоменко С.Г., Mollard J.D. и Dishsaw H.E., Thompson S.F. и многие другие исследователи [19, 30, 65, 66, 67, 77, 88, 89, 95, 73].

Распределение многолетней мерзлоты зависит климатических факторов и может быть прерывистым и сплошным. В России прерывистое распределение многолетней мерзлоты характерно для южных районов, например, для Забайкалья, сплошное распределение – характерно для северных районов, например, для тундры Западной Сибири. В прерывистой зоне многолетняя мерзлота существует в сочетании с некоторыми участками и слоями незамерзших грунтов. Толщина многолетней мерзлоты колеблется от нескольких сантиметров на южной границе до нескольких сотен метров на границе сплошной зоны – от 60 до 100 м в Канаде и от 250 до 300 м в Сибири, на Таймыре – более 600 м. Между слоями многолетней мерзлоты могут встречаться незамерзшие слои или талики. Глубина залегания кровли многолетней мерзлоты находится в пределах от 0,5 до 20 м. Активный (сезонно-деятельный) слой, который замерзает зимой и оттаивает летом,

изменяется по толщине примерно от 0,5 до 4,5 м в зависимости от гидрологических, природно-климатических, геологических факторов [87].

ММГ занимают во всем мире порядка 24% территории планеты [3, 4]. В России многолетняя мерзлота распространена на 11 млн. км² (примерно 65% от площади страны), наиболее широко распространена в Западной, Восточной Сибири и в Забайкалье.

Мельников В.П., Брушков А.В., Дроздов Д.С. отмечают, что многолетняя криолитозона – малоизученная и низко освоенная местность, как следствие основного влияния суровых природно-климатических условий [67]. На сегодняшний день экономическое развитие этой местности напрямую связано с добычей полезных ископаемых и ведением хозяйства традиционным для местных жителей способами. России принадлежит практически половина Арктического побережья Северного Ледовитого океана [66]. Только на этой территории сосредоточено около 25% мировых ресурсов углеводородов [56]. На данный момент Арктика обеспечивает порядка 11% национального дохода РФ [76].

Особое место в стратегическом и топливно-энергетическом развитии РФ является Ямало-Ненецкий автономный округ, распространяясь на I₁ и I₃ дорожно-климатические подзоны. На рисунке 1.1 представлена карта дорожно-климатического районирования РФ согласно СП 288.1325800.2016 Дороги лесные. Правила проектирования и строительства (с Изменением N 1), красным цветом выделен Ямало-Ненецкий автономный округ.

С целью эффективной добычи арктических ресурсов полезных ископаемых следует модернизировать и развивать транспортную инфраструктуру в арктических регионах. Суровые природно-климатические условия, наличие ММГ и низкое развитие транспортной сети осложняют дальнейшие разработки газовых и нефтяных месторождений (см. рис. 1.2).



Рисунок 1.1 – Карта дорожно-климатического районирования РФ согласно СП 288.1325800.2016 Дороги лесные. Правила проектирования и строительства (с Изменением N 1)



Рисунок 1.2 – Проблемы разработки газовых и нефтяных месторождений Арктики

Помимо освоения месторождений углеводородов на Арктических территориях Западной Сибири и РФ в целом важной задачей на сегодняшний день является развитие портовой инфраструктуры северного морского пути, продолжение строительства северного широтного хода и строительства военных баз РФ для обеспечения противовоздушной обороны страны.

Формирование широкой транспортной доступности в Арктике при бесперебойном сообщении с общей дорожной сетью РФ в любой период года способствует значительному развитию военного, социального, природно-ресурсного и экономического потенциала региона.

Однако возникает ряд проблем при возведении и дальнейшей эксплуатации автомобильных дорог на ММГ. Особое внимание следует обратить на стабилизацию температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания.

Под стабилизацией температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания следует понимать цикличное повторение значений температуры каждой точки грунтов ЗП и основания, происходящее при повторяющемся периоде времени, иными словами наступление динамического равновесия температуры.

На стабилизацию температурного режима влияет потепление климата, в частности в арктических регионах. Как отмечают исследователи из Технического университета Дании Jørgensen A.S. и Ingeman-Nielsen T., начиная с 90-ых годов XX века в арктических регионах наблюдалось значительное повышение температуры воздуха. В свою очередь на границе амплитуды нулевых колебаний температура грунта постепенно стала увеличиваться. На сегодняшний день согласно наблюдениям исследователей потепление климата в Арктике сохраняет тенденцию [39, 56, 70, 80]. По данным Центра исследований климата Аляски (Alaska Climate Research Center) среднегодовая температура на Аляске с 1949 г. по 2012 г. увеличилась на 1,7°. Согласно результатам исследований Анисимова О.А. и др. [34] на севере Западной Сибири в период с конца 1970-ых до 2007 г. увеличение среднегодовой температуры воздуха составляет 0,03-0,07° в год, отмечается уменьшение зимнего периода года. Также Анисимов О.А. совместно с Nelson F.E. и Shiklomanov N.I., основываясь на данных геотермического мониторинга, прогнозируют рост деградации ММГ в арктических регионах последствием

климатического потепления [20]. Romanovsky V. и Osterkamp T. также отмечают увеличение деятельного слоя на территории Арктики [27].

Потепление климата также сопровождается увеличением осадков. При сопоставлении данных о высоте снежного покрова Западной Сибири за период 1991-2005 г.г. с периодом 1961-1990 г.г. можно наблюдать повышение снежного покрова на дневной поверхности до 60 мм [34]. Накопление снега наблюдается обычно на откосах насыпи, затрудняя отвод тепла из грунтового основания из-за утепляющего эффекта снежного покрова [16, 38]. Вследствие увеличения снеговых отложений вдоль откосов в период оттаивания возрастает объем выделяемой воды и ее застой, которую можно охарактеризовать как поверхностные длительно стоящие воды. При застое поверхностных вод вдоль откосов насыпей возможна фильтрация воды в тело и под подошву насыпи [5, 24, 31]. В процессе фильтрации воды происходит конвективный перенос тепла, способствуя деградации грунтов многолетнемерзлого основания. Грунты в областях распространения многолетней мерзлоты характеризуются большим содержанием (от 50% до 75%) пылеватых частиц. Водонасыщение данных грунтов способствует развитию криогенных (мерзлотных) процессов в теле ЗП и основания дорог таких, как пучение, пучинные просадки, термокарст, солифлюкция, морозобойное растрескивание, термоабразия, термоэрозия и др.

При потеплении климата возникает следующая проблема в виде образования термокарстовых процессов, влияющая на достижение динамического равновесия температуры дорог на ММГ. Кравцова В.И. в своей работе [58] приводит данные о распространении термокарстовых озер на территории России в виде карты (см. рис. 1.3.).

Проявление термокарстовых озер отчетливо наблюдается по всей территории Арктической зоны РФ, а также в южных областях распространения ММГ. Следует выделить территорию Западной Сибири, на которой от полуострова Ямал и Гыданский и до 60° широты образуется и развивается термокарст. Такое густое развитие термокарстовых озер Арктической зоны РФ,

а также ее заболоченность, лишний раз подчёркивает необходимость и ценность дополнительных предпроектных работ по обследованию строительных площадок на подтопленных территориях, мероприятий по контролю и повышению качества строительства и мониторинга эксплуатируемых объектов и прилегающих территорий.

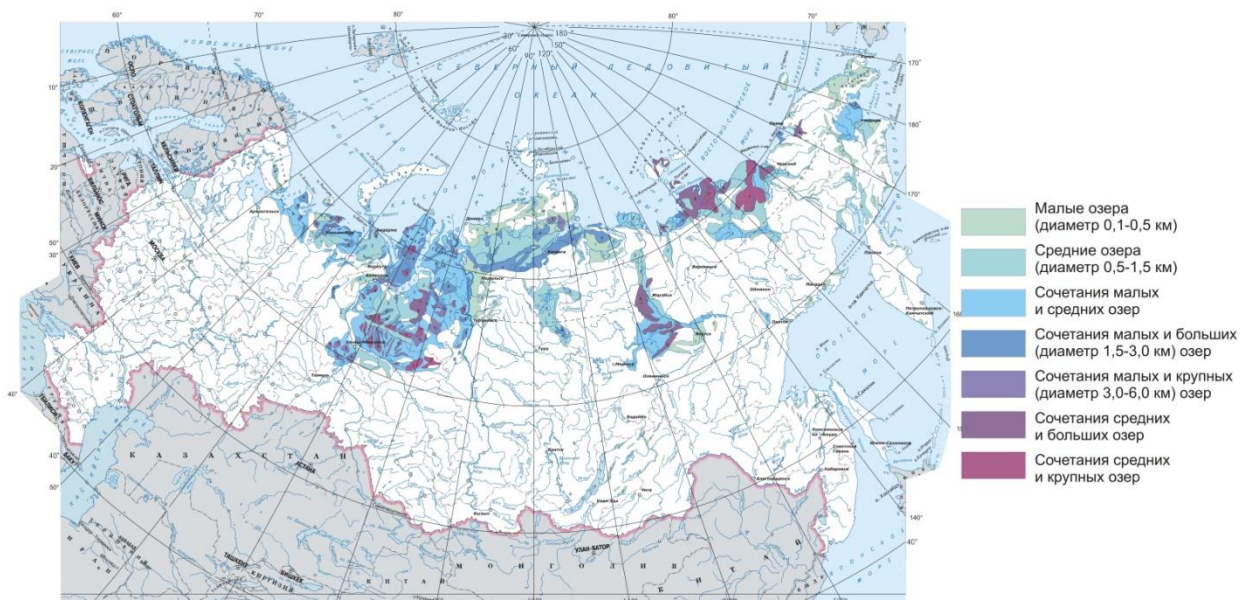


Рисунок 1.3 – Карта распространения термокарстовых озер на территории России

В статье Гукова А.Ю. и др. [46] приводятся данные по мониторингу 2002-2007 гг. грунтовой дороги в Северной Якутии: Тикси – Тикси-3 (длина 7 км). Грунтовая дорога была подвержена различным деформациям общей протяженностью 0,4 км. Возникающие деформации в виде просадок засыпались щебнем и выравнивались бульдозерами. Как отмечают авторы, одной из причин появления деформаций является избыточное увлажнение грунтов. Увлажнение происходит под действием болота длиной 30 м, расположенного в низине вдоль дороги. Как следствие появляется фильтрация через тело насыпи, разрушая ЗП дороги. Авторы заверяют, что стабилизировать данный процесс не получается уже 10 лет с момента окончания мониторинга.

В статье Губарькова А.А. и др. [45] говорится, что в 2013-2014 г. по результатам мониторинга на месторождении им. Р. Требса и им. А. Титова

(Ненецкий автономный округ, Заполярный район) выявлены криогенные процессы в естественных и в техногенных условиях. Авторами отмечено, что на месторождении им. Р. Требса в техногенных условиях преобладали эрозия и подтопление автомобильных дорог, расположенных близ кустовых площадок. Однако на центральном пункте сбора нефти был выполнен комплекс работ, направленный на гидроизоляцию и укрепление грунтов отсыпки, что резко уменьшило влияние криогенных процессов на отсыпанные грунты. На месторождении им. А. Титова наблюдались подтопление и подмыв откосов автомобильных дорог. Требовалась частичная замена грунтов ЗП из-за их тиксотропных свойств.

В статье Фага А.Н. и др. [90] отмечается, что в июне 2014 г. были проведены работы по определению мест перехода твердомерзлых грунтов к пластичномерзлым, а затем к участкам оттаивания. Работы проводились на участке дороги Салехард-Аксарка. Авторами было отмечено, что пластичномерзлые и оттаивающие грунты основания оседают под ЗП дороги, тем самым возникают заболоченные пониженные места вдоль откосов дороги. Вследствие заболачивания придорожных полос и откосов дороги в грунты ЗП просачивается вода, вызывая криогенные процессы.

Подтопление откосной части ЗП встречается и в южных районах распространения ММГ. Исаков В.А. и др. в статье [50] дают оценку состоянию железной дороги (ж/д) Улак-Эльга на участке 0 – 54 км. В 2006 г. дорога была подвержена различным деформациям общей протяженностью 17,5 км. В основном деформации были в виде просадки основной площадки насыпи, эрозии откосов насыпи. Одной из причин появления деформаций на участках дороги является подтопление подошвы откосов. Средняя глубина поверхностных вод вдоль откосной части насыпи составляла 0,6-1,0 м. Авторы утверждают, что на подтопляемых участках насыпи формировались гидрогенные талики. В 2008 г. были выполнены ремонтные работы по устранению деформаций. Весной 2010 г. по результатам мониторинга железная

дорога вновь была подвержена деформациям на отремонтированных участках. Было решено провести более детальный анализ состояния грунтов железной дороги и прилегающих участков.

Рассмотренные случаи показывают, что классические методы устранения деформаций дорог нельзя применять повсеместно. При назначении стабилизационных мероприятий для повышения надежности эксплуатации дорог необходимо знать причины и особенности работы основания и конструкции дороги на конкретном участке. Следует разрабатывать и (или) применять новые способы или конструктивно-технологические решения по температурной стабилизации грунтов ЗП и основания и устранению тех или иных локальных проявлений деформаций дорог в условиях распространения ММГ.

1.2. Методы и устройства управления температурным режимом в конструкциях линейных сооружений на многолетнемерзлых грунтах

В течение XX века приобретенный практический опыт строительства автомобильных и железных дорог в условиях мерзлоты способствовал созданию и развитию базы нормативно-технической документации, которую обновляют и дополняют новым материалом. На сегодняшний день нормативная база автодорожного строительства на ММГ в РФ ВСН 84-89, СП 313.1325800.2017, СП 78.13330.2012, ГОСТ 33149-2014, СП 34.13330.2012 предусматривает три принципа проектирования на многолетней мерзлоте:

первым принципом не предусмотрено оттаивание грунтов многолетнемерзлого основания под подошвой ЗП при эксплуатации автомобильной дороги;

второй принцип предусматривает возникновение допустимых деформаций при оттаивании грунтов многолетнемерзлого основания под подошвой ЗП на расчетную глубину;

третий принцип предусматривает оттаивание грунтов многолетнемерзлого основания под подошвой ЗП до начала строительства автомобильной дороги на глубину, при которой оттаявший грунтовый массив не воздействует на работу ЗП.

Потепление климата оказывает внимание к первому принципу проектирования, как наиболее значимому. Изменение климата сказывается на температурном состоянии грунтов многолетнемерзлого основания через изменение теплообмена систем грунт-воздух, грунт-вода. Теплообмен происходит несколькими способами: теплопроводностью, тепловым излучением и конвекцией. Для стабилизации температурного режима геотехнической системы «ЗП-основание», а также сохранения отрицательной температуры грунтов основания под подошвой ЗП в течение периода эксплуатации дороги, используются многочисленные способы и конструктивно-технологические решения, разработка и совершенствование которых продолжается по сей день.

Китайскими исследователями Niu Fujun, Xu Jian и др. из Института исследований окружающей среды и инженерных исследований в холодных и засушливых регионах (CAREERI) предложена классификация основных методов охлаждения грунта и сохранения мерзлоты в основании автомобильных и железных дорог:

1. Пассивные методы

1.1. Увеличение высоты насыпи

1.2. Устройство теплоизоляционных слоев в основании и теле ЗП дороги

2. Активные методы

2.1. Регулирование теплового излучения

2.2. Регулирование кондуктивного теплообмена

2.3. Регулирование конвективного теплообмена

2.4. Комбинированные методы регулирования теплообмена

В 1968 г. Кудрявцевым А.В. и Ершовым Э.Д. [59] впервые была разработана общая классификация, в которой отражались методы управления тепловыми режимами грунтовых массивов в условиях мерзлоты, однако Цернант А.А. в своей работе [94] представил следующую классификацию методов управления температурным режимом:

Тепловые экраны – устройства для регулирования внешнего теплообмена;

Тепловые амортизаторы – устройства для регулирования интенсивности (плотности) тепловых потоков в окрестности амортизатора;

Тепловые диоды – устройства для регулирования температурного режима грунтовых массивов путем изменения коэффициентов эффективной теплопроводности в соответствии с межсезонной изменчивостью условий внешнего теплообмена;

Тепловые трансформаторы – устройства для регулирования температуры грунтового массива за счет использования внешних источников энергии (вентиляторы, турбодетандеры, полупроводники, рассолы, жидкий азот, углекислота и т.п.)

Рассмотрим практический опыт применения вышеперечисленных методов при эксплуатации и возведении автодорог на ММГ в РФ и за рубежом. Стоит рассматривать также конструктивно-технологические решения для конструкций железных дорог на ММГ.

Одним из видов источника тепла летом является солнечная радиация, поглощение которой происходит поверхностями с низким альбедо. С целью регулирования теплового излучения применяют материалы с высоким альбедо для поверхностей капитального типа. Материалы с высоким альбедо-покрытием были использованы в ранних полевых испытаниях на асфальтированных поверхностях в конце 1950-х и начале 1960-х годов армией США на научно-исследовательской станции в Фэрбенксе (Аляска, США) и на авиабазе Туле (Гренландия, Дания) [2, 10, 25]. В 1985 г. такая же методика была применена Департаментом транспорта Аляски и исследовательскими группами

в Норвегии, Дании, Китае и Канаде [1, 32]. Во всех случаях наблюдалась стабилизация теплового режима и снижение температуры под асфальтированными поверхностями дороги, что приводило к уменьшению среднегодовой температуры поверхности примерно на 1 °С и повышению верхнего горизонта вечной мерзлоты от 0,5 до 1,0 м [1].

Согласно [15, 29] разрабатываются новые синтетические материалы с высоким альбедо на основе смол, адаптированные для территорий залегания ММГ. На испытательном полигоне автомобильной дороги Бивер-Крик (Колорадо, США) применение светлого битума в дорожной одежде оказало охлаждающий эффект (теплопоток в год составил минус 4000 кДж/м²) по сравнению с эталонным участком. Применение материалов с высоким альбедо может эффективно улучшить тепловой режим дорог с покрытием капитального типа [1, 17, 26].

Использование солнцезащитных навесов может существенно охладить откосы насыпи, препятствуя поступлению прямой солнечной радиации и теплых осадков (дождей и др.). Солнцезащитные навесы также противодействуют теплоизолирующему эффекту накопления снега на откосах насыпи. В зимнее время свободная циркуляция холодного воздуха под навесами позволяет охладить грунт на откосах насыпи дорог. Такое действие навесов делает их особенно эффективными для защиты откосов насыпей дорог на ММГ. Солнцезащитные навесы первоначально были разработаны и протестированы на дорогах Аляски [6]. Данные навесы использовались при эксплуатации Цинхай-Тибетской ж/д [9, 21], на аляскинской автомагистрали, проходящей через Канаду [18, 17]. В России данные навесы нашли применение на Амуро-Якутской, Байкало-Амурской железнодорожных магистралях, на подъездном пути Улак-Эльга (Забайкальская железная дорога) [51, 53, 55].

По данным натурных наблюдений температура на поверхности откосов насыпи дороги с использованием навесов на 3-5 °С ниже по сравнению с естественным откосом насыпи [51], однако значение разницы температур

может достигать и до 6 °С [6]. Как отмечают Feng WJ. и др. [9], на Цинхай-Тибетской ж/д разница температур достигла 8-15 °С.

В статье [18] приводится сравнение тепловых потоков, приходящихся на откосную часть насыпи аляскинской автомагистрали. При использовании солнцезащитных навесов теплоток на поверхности откоса уменьшился на 24000 кДж/м² в сравнении с естественным откосом.

Однако по данным полевых испытаний в районе Бейлухэ вдоль Цинхай-Тибетской железной дороги материал солнцезащитного навеса, использованный в экспериментах, был слишком легким и быстро изнашивающимся, чтобы оказать сопротивление порывам ветра и действию ультрафиолетовых лучей [8]. Безопасность применения и стоимость данных навесов ограничили их широкое использование в строительстве и эксплуатации железных дорог Китая на ММГ.

Устройство теплоизоляционных слоев является стандартным методом сохранения мерзлоты в основании при проектировании ЗП дороги на ММГ по первому принципу. Как правило, теплоизоляционный слой размещают под насыпью, тем самым прерывают кондуктивный теплообмен между насыпью и нижележащими грунтами. Теплоизоляционный слой может быть выполнен из пенопласта, торфа, пены и др. В ВСН 84-89 представлен ряд конструкций ЗП дорог на ММГ с устройством теплоизоляционных слоев в зависимости от типа местности и принятого принципа проектирования.

С целью сохранения грунтов основания в мерзлом виде, замораживания талых грунтов применяют сезонно-действующие охлаждающие устройства (СОУ). Такой способ позволит обеспечить устойчивость линейным сооружениям на ММГ при их эксплуатации. Сезонно-действующие охлаждающие устройства (СОУ) предназначены для охлаждения, замораживания и поддержания грунтов в мерзлом состоянии, что обеспечивает устойчивость конструкции линейных сооружений на ММГ. СОУ являются термосифонами, т.е. они состоят из трубы, разделенной на две секции –

испарителя и конденсатора. Внутри трубы находится хладагент, который может быть представлен в виде жидкости или газа (фреон, углекислый газ и др.). Секция испарителя помещается в толщу грунта, секция конденсатора располагается снаружи, над грунтом. В зимнее время при воздействии низких температур и ветра на секцию конденсатора изменяется давление в секции испарителя, где по всей его длине происходит испарение хладагента. Пары хладагента поднимаются в секцию конденсатора, где по мере их фазового превращения в конденсат высвобождается скрытая теплота. Процесс теплопередачи из толщи грунта в атмосферу продолжается в течение всего зимнего периода. В летнее время процесс конвективного теплообмена останавливается [36]. Такой механизм теплопередачи представляет собой теорию конвекции Рэля-Бенара.

На сегодняшний день, как в дорожном, так и в гражданском строительстве используются несколько типов конструкций сезонно-охлаждающих устройств (см. рис. 1.4).

Несмотря на высокую эффективность охлаждающих свойств термостабилизаторов их основным минусом остается стоимость для дорожного строительства. Например, стоимость термостабилизатора ТСГ-33,7-12000/3000-ХЛ1-Вп-без гильзы на 2018 г. составляла около 41000 рублей.

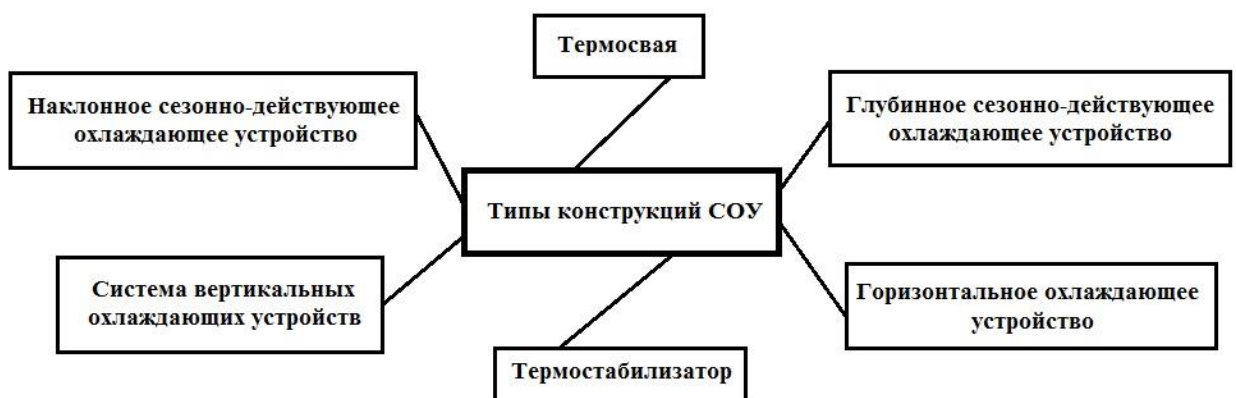


Рисунок 1.4 – Типы конструкций сезонно-охлаждающих устройств

Эффективным решением для регулирования конвективного теплообмена атмосферы с грунтом оснований насыпей и выемок автомобильных и железных

дорог на ММГ является каменная наброска. В качестве наброски используется природного камень определенной фракции. Каменную наброску используют на откосах дорожных сооружений или укладывают слоем в тело ЗП. Каменная наброска имеет пористость порядка 40% и низкую теплопроводность из-за неплотного контакта частиц наброски друг с другом.

В зимний период конвективный теплообмен в каменной наброске усиливается из-за разницы температур воздуха в порах верхней и нижней части наброски. Такая система становится неустойчивой из-за контраста плотности воздуха, поэтому холодный воздух опускается вниз, чтобы заменить его теплым воздухом, движущимся вверх. В результате вечная мерзлота, лежащая в основании насыпи, может быть охлаждена. Конвективный теплообмен может переносить тепло на поверхность со скоростью более чем на порядок выше кондуктивного теплообмена, что приводит к эффективному зимнему охлаждению [12, 13, 14]. Данный процесс конвективного теплообмена в пористых средах с твердым недеформируемым скелетом описан в работах С.W. Horton, F.T. Rogers в 1945-ом году и E.R. Lapwood в 1947-ом году.

В летний период температура воздуха в порах каменной наброски стабильна, температура воздуха в основании наброски ниже относительно ее верхней части. В этом случае теплообмен в рассматриваемом слое протекает, как теплопроводность. Каменная наброска представляет собой тепловой диод, поэтому в летнее время ограничено количество тепла, поглощаемого вечной мерзлотой в основании дорог в результате кондуктивного теплообмена.

Конструктивно-технологическое решение в виде каменной наброски может поддерживать основание ЗП дорожной конструкции на ММГ в мерзлом состоянии и обеспечивать термическую стабильность после многих лет эксплуатации.

Каменная наброска впервые была применена на БАМе [7, 52]. Минайловым Г.П. в течение долгих лет проводились натурные испытания каменных набросок с целью выявления основных закономерностей протекания

тепловых процессов. Также им разработаны различные конструктивно-технологические решения ЗП дорог с применением каменной наброски и методика прогнозирования их температурного режима [68]. К конструктивным решениям, разработанные Минайловым Г.П., относятся:

- каменная (скальная) наброска на откосах насыпей и выемок малой толщины – до 0,5 м;
- каменная (скальная) наброска на откосах насыпей и выемок толщиной – до 1,0 м и толщиной более 1,0 м;
- бермы из каменной (скальной) наброски;
- насыпи, тело которых состоит из скального грунта или фракционного камня;
- выемки, где местный грунт под балластной призмой на 2,5 - 3,0 м заменен фракционный камнем;
- специальные технические решения (водоотводные каналы, обсыпки конусов мостов, фильтрующие насыпи и др.) [68].

В течение 1990-х годов применение каменной наброски как в теле ЗП дороги, так и на его откосах получило дальнейшее развитие в Университете Аляски, Фэрбенкс, США. Зарубежные инженеры-строители и ученые называют ЗП с устройством каменной наброски – *air convection embankment*, что можно перевести как воздушная конвекционная насыпь. Для дальнейших натурных испытаний вблизи Фэрбенкса были построены полномасштабная эталонная насыпь и воздушная конвекционная насыпь. Результаты натурных наблюдений показали, что воздушная конвекционная насыпь оказывала охлаждение на грунтовое основание, уменьшена среднегодовая температура в основании на 4 °С по сравнению с эталонной насыпью [28].

Согласно Минайлову Г.П. [68] фракционный размер камней на откосе должен составлять примерно 20-30 см при толщине слоя наброски 80 см. В [11] отмечается средний диаметр камней под насыпью ЗП лучше всего принимать равным 10-30 см. В статье Zhang MY и др. [33] говорится, что при

строительстве воздушной конвекционной насыпи для более эффективного охлаждения стоит использовать камни размером 21-23 см.

Несмотря на свою эффективность применение каменной наброски пригодно для малоснежных районов. В зимнее время при интенсивных осадках поры в каменной наброске заполняются снегом. Дальнейшее накопление снега поверх наброски вызывает утепляющий эффект, в результате чего система перестает работать. Для дорог Арктической зоны РФ данное мероприятие применять нецелесообразно в виду большого снегонакопления на откосах.

Поперечные охлаждающие трубы (воздуховоды) – система отвода тепла из конструкции автомобильных и железных дорог на ММГ, является альтернативой каменной наброске. Поперечные охлаждающие трубы устраивают в теле насыпи дороги. В зимний период в системе поперечных охлаждающих труб циркулирует воздух, происходит конвективный теплообмен грунта насыпи и основания дороги с атмосферой. Данный процесс позволяет охладить грунт насыпи и поднять верхнюю границу ММГ основания. В летнее время с целью предотвращения циркуляции теплого воздуха необходимо закрывать отверстия труб. Система воздуховодов эффективна в малоснежных районах, а также в районах с сильными порывами ветра в зимнее время [7, 54].

Эффективность поперечных охлаждающих труб была проверена при строительстве железной дороги в период с 2002 по 2004 г. на испытательном полигоне в Бейлухе, Цинхай-Тибетское плато. В течение 2-ух лет осуществлялся мониторинг данной железной дороги. Во время мониторинга было зафиксировано: понижение температуры на 4,4 °С на глубине 2-ух метров; поднятие верхней границы ММГ основания к подошве ЗП. Значение температуры верхней границы ММГ на 29.09.2004 г. составило 0 °С, т.е. в период максимального оттаивания сезонно-деятельного слоя грунта основания, грунт основания оставался замерзшим [22, 23].

Несмотря на высокую эффективность описанных методов обычно их применяют комплексно, что позволяет в короткие сроки осуществить

термодинамическую стабилизацию конструкций линейных сооружений. Например, с целью обеспечения устойчивости насыпей линейных сооружений на протаивающей мерзлоте Ждановой С.М. была разработана конструкция ЗП на вечномерзлом основании. В ЗП предлагается устроить следующие прослойки: теплоизоляционную с использованием пористого материала (удельный вес материала $<$ удельного веса воды); защитную с использованием крупнозернистого наполнителя; изоляционную и армирующую, выполненную из нетканого синтетического материала. Теплоизолирующий слой, помещенный в армирующее покрытие, уложен на глубину сезонно-деятельного слоя. Поверх армирующего покрытия располагается крупнозернистый защитный слой. Изолирующая прокладка выполняется пыленепроницаемой и размещается между защитным слоем и насыпью. Возникающая конвекция в крупнозернистом защитном слое позволит поддерживать грунт основания ЗП в мерзлом состоянии в период эксплуатации дороги. Эффективность данной конструкции подтверждена испытаниями на Ургальском узле Дальневосточной железной дороги [79].

Однако на территориях с вероятностным подтоплением ЗП и повышенным снегонакоплением (характерно для Арктической зоны РФ) вышеуказанная конструкция может оказаться малоэффективной или перестать работать. В летний период через поры крупнозернистого грунта защитного слоя возможна фильтрация воды. Под действием фильтрации конвекция в защитном слое увеличится, т.к. коэффициент теплопроводности воды примерно в 24 раза больше, чем у воздуха. В зимний период под теплоизолирующей прослойкой снега на откосах возможен застой незамерзшей воды в подошве откосной части ЗП.

Разработка эффективных и работоспособных конструктивно-технологических решений возможна при всестороннем изучении и выявлении причин температурной дестабилизации грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги. Разработка и внедрение эффективных

конструктивно-технологических решений должны сопровождаться экспериментальным и теоретическим обоснованием.

1.3. Методы прогноза температурных процессов в конструкциях линейных сооружений на многолетнемерзлых грунтах

Согласно нормативно-технической документации автодорожного строительства на ММГ (ВСН 84-89 [40], СП 313.1325800.2017 [85]) следует осуществлять инженерно-геокриологический прогноз при проектировании автомобильных дорог. Инженерно-геокриологический прогноз проводится для общей оценки возможного проявления криогенных процессов, их масштабов и интенсивности на отдельных участках проектируемых автомобильных дорог, а также расчеты ореолов оттаивания (промерзания) и величины деформаций осадки (пучения) в поперечном профиле дорожных конструкций [40].

В РСН 67-87 [82] представлен численный метод решения уравнения теплопроводности для нестационарного температурного режима грунтов с учетом фазовых переходов влаги грунта. Минусы такого прогноза составляет отсутствие в расчетах лучистого и конвективного теплообмена, а также миграции влаги в грунтах. Анализ нормативно-технической документации автодорожного строительства на ММГ указал на отсутствие методов полного инженерно-геокриологического прогноза, который бы позволил инженеру-проектировщику принять верное решение при назначении способов или конструктивно-технологических решений [37].

Согласно «Рекомендациям по производству опережающих исследований для строительства в районах распространения вечномёрзлых грунтов» [81] особое внимание должно уделяться температурному состоянию грунтов застраиваемой площадки, так как текущее температурное состояние влияет на прочностные характеристики рассматриваемых грунтов.

Кроме этого необходимо учитывать нарушение бытового состояния грунтов и спрогнозировать изменение их теплового режима посредством строительной, хозяйственной деятельности [81]. Предложено несколько методов геокриологического прогноза, представленные на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Методы геокриологического прогноза

На сегодняшний день математическое моделирование является одним из эффективных методов исследования и прогнозирования. Метод расчетов базируется на математическом моделировании. Математическое моделирование используют для количественной оценки рассматриваемых характеристик объекта наблюдений. С целью достижения точных результатов данный метод следует использовать в совокупности с общим геокриологическим методом, методами лабораторного и натурного моделирования. В результате формируются общие и частные количественные закономерности рассматриваемого геокриологического комплекса [81].

Для математического моделирования тепловых процессов используется уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (1.1)$$

где τ – время, сек; T – температура тела в рассматриваемой точке, °С;
 $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности, $\frac{M^2}{c}$; λ – коэффициент теплопроводности, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$; c – удельная теплоемкость, $\frac{Вт \cdot ч}{кг \cdot ^\circ C}$; ρ – плотность тела,

$\frac{\kappa\mathcal{Z}}{\text{м}^3}$; q_v – объемная плотность тепловыделения, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$; x, y, z – координаты в пространстве.

Аналитическое уравнение представляет собой решение Стефана для движущегося фронта промерзания-оттаивания. Такая постановка уравнения обычно используется при создании моделей теплопроводности. При малых диффузионных эффектах относительно скорости движения фронта промерзания и в случае нулевой начальной температуры грунта формулу Стефана можно представить в виде:

$$d_f = \sqrt{\frac{2\lambda_f (T_{bf} - T_{f,s})\tau_f}{L_0 \rho_f \frac{w_{tot}}{1 + w_{tot}}}}. \quad (1.2)$$

Аналогично выражается формула Стефана для определения глубины сезонного оттаивания:

$$d_{th} = \sqrt{\frac{2\lambda_{th} (T_{bf} - T_{th,s})\tau_{th}}{L_0 \rho_{th} \frac{w_{tot}}{1 + w_{tot}}}}. \quad (1.3)$$

где $d_{f,th}$ – глубина сезонного промерзания-оттаивания, м; $\lambda_{f,th}$ – коэффициент теплопроводности мерзлого, талого грунта, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$; T_{bf} – температура начала замерзания (оттаивания) грунта, $^\circ\text{C}$; $T_{f,th}$ – средняя зимняя, летняя температура дневной поверхности, $^\circ\text{C}$; $\tau_{f,th}$ – продолжительность зимнего, летнего периода, ч; L_0 – удельная теплота замерзания воды (таяния льда), $\frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}}$; $\rho_{f,th}$ – плотность мерзлого, талого грунта, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; w_{tot} – суммарная влажность мерзлого (талого) грунта, д.ед..

Недостаток формулы Стефана заключается в завышенном результате глубины промерзания (оттаивания). Кроме этого при расчете не учитывается теплоемкость грунта и влияние теплообмена на границе дневной поверхности и мерзлого (талого) грунта.

Точное аналитическое решение задачи Стефана было представлено Лыковым А.В. [64]:

$$T_{z,t} = T_s \cdot \left(1 - \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_f \cdot t}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_f}}\right)} \right), \quad (1.4)$$

Альтернативное решение для оценки максимальной годовой глубины оттаивания и среднегодовой температуры у основания активного слоя грунта с учетом годовой амплитуды температурных колебаний на дневной поверхности грунта дается Кудрявцевым В.А. [75]:

$$d_{th} = \frac{2(A_s - T_z) \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{th} \cdot P_{Sn} \cdot C_{th}}{\pi}} + \frac{(2A_z \cdot C_{th} \cdot Z_c + L \cdot Z_c) \cdot L \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot P_{Sn}}{\pi \cdot C_{th}}}}{2A_z \cdot C_{th} \cdot Z_c + L \cdot Z_c + (2A_z \cdot C_{th} + L) \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot P_{Sn}}{\pi \cdot C_{th}}}}}{2A_z \cdot C_{th} + L}, \quad (1.5)$$

$$\text{где } A_z = \frac{A_s - T_z}{\ln \left[\frac{A_s + L/2C_{th}}{T_z + L/2C_{th}} \right]} - \frac{L}{2C_{th}}, \quad Z_c = \frac{2(A_s - T_z) \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{th} \cdot P_{Sn} \cdot C_{th}}{\pi}}}{2A_z \cdot C_{th} + L}.$$

Среднегодовую температуру на подошве активного слоя можно найти как:

$$T_z = \frac{0,5T_s \cdot (\lambda_f + \lambda_{th}) + A_s \frac{\lambda_f + \lambda_{th}}{\pi} \cdot \left[\frac{T_s}{A_s} \cdot \arcsin \frac{T_s}{A_s} + \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{A_s^2}} \right]}{\lambda^*}, \quad (1.6)$$

$$\text{где } \lambda^* = \begin{cases} \lambda_f, & \text{если числитель} < 0 \\ \lambda_{th}, & \text{если числитель} > 0. \end{cases}$$

Помимо аналитических методов решения задач теплопроводности существуют аналоговые, графические, численные. На сегодняшний день численные методы широко распространены в математическом моделировании температурного режима грунтов многолетнемерзлых оснований и возведенных

на них сооружений. Численные методы достаточно гибкие, чтобы учитывать меняющиеся теплофизические свойства рассматриваемых объектов, их геометрию и граничные условия.

В 2016 г. Шуваевым А.Н. представлено в статье [96] очень подробное физико-математическое моделирование водно-теплого режима насыпей, возведенных из мерзлых грунтов. Предложенная модель позволит рационально использовать местный некондиционный грунт при дефиците строительного грунта в условиях распространения многолетней мерзлоты и повысить безопасность эксплуатации линейных сооружений.

Основным недостатком численных моделей является огромное количество расчетов при анализе зависимостей решения той или иной задачи от принятых в расчет параметров, граничных и начальных условий.

При численном решении задач теплопроводности часто используются метод элементарных балансов (метод академика А.П. Ваничева) и метод конечных элементов, основанный на конечно-разностном методе Эйлера [69].

Большинство численных моделей реализуются при одномерном моделировании распределения температуры в вертикальном профиле грунта с использованием конечно-дифференциального или конечно-элементного метода решения задачи Стефана. При этом можно выделить основные этапы разработки численной модели:

1. Определение границ моделируемого пространства и начального времени расчета;
2. Разбивка моделируемого пространства на конечные части (сетка узлов или элементов) и времени на конечные временные шаги;
3. Определение и принятие значений теплофизических свойств рассматриваемых грунтов моделируемого пространства;
4. Определение и принятие значения температуры или теплового потока как функции времени (для каждого временного шага) на верхней и нижней границе моделируемого пространства;

5. Определение и принятие значений температур для каждой конечной части (узла или элемента) моделируемого пространства в начальный момент времени;

6. Новый расчет распределения температуры в моделируемом пространстве для последующих временных шагов, начиная с первого, с учетом комбинирования теплофизических свойств рассматриваемых грунтов и граничных условий.

Численные методы стали занимать центральное место относительно других расчетных методов с момента появления электронно-вычислительных машин (ЭВМ), способных выполнять огромное количество расчетов за небольшое количество времени. На сегодняшний день для практических задач используются программные комплексы, в основе которых заложены численные методы.

Для прогноза температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги может быть использовано множество программных продуктов. Например, более чем 40 лет назад в Канаде фирмой «GEO-SLOPE» был разработан один из самых известных программных комплексов по решению геотехнических задач – GeoStudio, включающий в себя модуль «TEMP/W». «TEMP/W» используется для геотермального анализа и разработки геотехнических и прочих инженерных проектов, в том числе объектов, подверженных воздействию замораживания и оттаивания, а также для расчета скрытой теплоты, связанной с этими процессами.

В 1990-х годах на кафедре геокриологии МГУ под руководством Хрусталева Л.Н. разработана программа «WARM» для решения геокриологических задач. В программе используется метод конечных разностей, а именно двухслойная явная разностная схема с применением метода балансов и с энтальпийной формулировкой задачи, предложенная Хрусталевым Л.Н. [48, 93]. В 2013-ом году была разработана программа «QFrost» на основе программы «WARM» [83]. Отличительной особенностью

«QFrost» в сравнении с «WARM» является учёт содержания незамёрзшей воды в мёрзлых породах, а также задание граничных условий любой формы (наклонных, эллиптических и др.).

В начале 2000-х годов Шашкиным К.Г., Пармоновым В.Н., Сахаровым И.И., Кудрявцевым С.А. [60] был разработан программный модуль «Termoground», являющийся частью российской программы «FEM-models» и позволяющий прогнозировать и анализировать процессы промерзания-оттаивания, пучения грунтового массива. В работе Кудрявцева С.А. [61] продемонстрированы функциональные возможности программы «Termoground», также приведено сопоставление с рядом других программ (в том числе «TEMP/W»). В программах «TEMP/W» и «Termoground» заложен метод конечных элементов.

С осени 2018 г. представлен программный комплекс «Борей 3D». Программным комплексом предусмотрен расчет температурного поля грунтов многолетнемерзлого основания и возведенных на них сооружений при влиянии СОУ в трехмерном пространстве.

Несмотря на высокую точность численных методов, аналитические методы решения инженерных задач остаются востребованными до сих пор. Однако при решении нестационарных (неустановившихся) температурных режимов рассматриваемых тел аналитическое решение дифференциального уравнения теплопроводности возможно в основном в частных случаях или в задачах при определенных допущениях. Михеев и Михеева отмечают в своем труде [69], для технических целей в основном можно ограничиться каким-то одним направлением при рассмотрении какого-либо процесса. При таком допущении аналитические методы решения инженерных задач можно назвать быстрыми и простыми.

Актуальной инженерной задачей в области дорожного проектирования в условиях распространения ММГ является инженерно-геокриологический прогноз работы грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной

дороги на подтопляемых участках. На основании аналитических методов решения дифференциального уравнения теплопроводности с учетом принятых упрощений разрабатывают методики расчета температурного режима геотехнической системы «ЗП-основание». Разработка и внедрение в практику таких методик позволит инженеру-проектировщику оперативно выполнять оценку работоспособности принятого конструктивно-технологического решения.

1.4. Выводы по главе 1

1. Выполненный анализ нормативной литературы, трудов отечественных и зарубежных ученых, а также опыта строительства и эксплуатации автомобильных дорог в Арктической зоне указывает на нерешенные проблемы и задачи в обеспечении надежности эксплуатации линейных сооружений на подтопляемых территориях.

2. Предложено исследовать в натурных условиях температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии поверхностных длительно стоящих вод и предложить методику прогноза величины промерзания-оттаивания геотехнической системы «ЗП-основание» с последующей разработкой конструктивно-технологического решения позволяющего ограничить тепловое влияния поверхностных длительно стоящих вод через откосную часть ЗП с сохранением притока холода в зимний период через основную площадку ЗП в основание. На основании вышеизложенного обзора и анализа литературных источников определены цель и задачи диссертационного исследования.

ГЛАВА 2. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЛИТЕЛЬНО СТОЯЩИХ ВОД ВДОЛЬ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Строительство автомобильных дорог в условиях мерзлоты сложный и трудоёмкий технический процесс, зависящий от множества факторов как антропогенных, так и природных. Одной из целей данного процесса является стабилизация температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания дороги. Особое внимание стоит уделять дорогам, строительство которых планируется на участках с пониженным рельефом местности. Согласно проведенному литературному обзору в 1-ой главе диссертации эксплуатируемые дороги, расположенные на участках с пониженным рельефом местности, подвергались деформациям и разрушениям. Нарушение целостности дорог на участках с пониженным рельефом местности в большинстве случаев происходит под температурным влиянием поверхностных вод. При отсутствии стока поверхностные воды скапливаются вдоль откосов ЗП. Длительность застоя поверхностных вод может длиться от нескольких месяцев до нескольких лет в зависимости от климатических условий. В результате избыточного увлажнения грунтов деятельного слоя поверхностными водами данный тип местности можно отнести к 3-ему согласно классификации представленной в ГОСТ 33063-2014, СП 34.13330.2012, ОДН 218.046-01 [44, 72, 86].

2.1. Оценка инженерно-геокриологических характеристик грунтов основания участка автомобильной дороги с поверхностными длительно стоящими водами

Одним из примеров влияния *поверхностных длительно стоящих вод* (ПДСВ) на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания

дороги является участок автодороги «Строительство автомобильной дороги «Сургут – Салехард, участок Новый Уренгой – Надым 1 пусковой комплекс: п. Пангоды (км 870) – п. Правохеттинский (км 936). Участок ПК 593+00 – ПК 600+50». Автомобильная дорога «Сургут – Салехард, участок Новый Уренгой – Надым 1 пусковой комплекс: п. Пангоды (км 870) п. Правохеттинский (км 936)» располагается в Надымском районе Ямало-Ненецкого автономного округа. Обследуемый участок ПК593+00 – ПК600+50 находится 6 км западнее п. Пангоды. На рисунке 2.1 показан ситуационный план расположения участка автомобильной дороги, на рисунке 2.2 – общий вид автомобильной дороги.



Рисунок 2.1 – Ситуационный план расположения рассматриваемого участка автомобильной дороги

Рассматриваемая дорога является одним из восемнадцати ключевых транспортных коридоров РФ, а также важной составляющей сети автодорог, развитие и поддержание работоспособности которой контролируется приказом Федеральной дорожной службой России от 20.05.1999 г. N 141.

Автомобильная дорога расположена в условиях пониженного рельефа местности. Окружающая территория представлена заболоченной местностью. Почвенно-растительный слой покрывает окружающую территорию мощностью

до 0,30 м. Наличие с южной (правой) стороны дороги подъездных путей, выполненных из песка с применением водоотводных канав, свидетельствует о нарушении рельефа хозяйственной деятельностью. Рассматриваемая автодорога расположена близ пойменной части р.Правая Хетта. Абсолютные отметки вдоль рассматриваемой дороги понижаются с востока на запад.



Рисунок 2.2 – Общий вид рассматриваемого участка автомобильной дороги

В период эксплуатации на дороге было установлено формирование циклических деформаций периодом 1 год, нарушающих безопасность дорожного движения. Проводимые ремонтные работы по устранению деформаций дороги были малоэффективными. Деформации были представлены в виде продольных и поперечных трещин и вертикальных перемещений

покрытия от первоначального проектного положения.

С целью изучения и обоснования развивающихся деформаций на указанной дороге были проведены обследования в период с 2011 г. по 2012 г. Параллельно с обследованием выполнялись инженерные изыскания и ремонтно-восстановительные работы покрытия дороги до проектных отметок. Обследованием дороги занимались ООО «Партнер Групп» совместно с автором диссертационной работы.

В рамках диссертационного исследования наибольший интерес вызывал участок автомобильной дороги «п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90». На рисунке 2.3 представлен план участка автомобильной дороги «п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90»

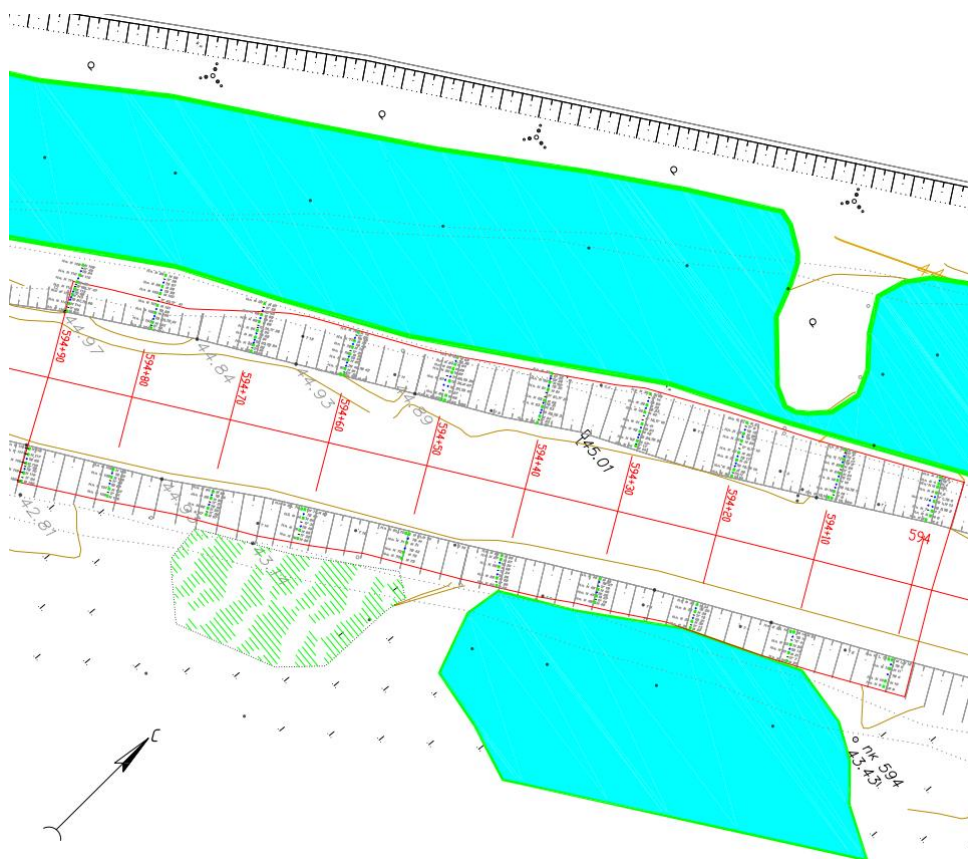


Рисунок 2.3 – План рассматриваемого участка автомобильной дороги

На данном участке наблюдалось подтопление откосов ЗП поверхностными водами с обеих сторон, южной и северной. Пребывание

поверхностных вод вдоль откосов ЗП стационарное и перманентное. Средняя глубина поверхностных вод составляла 1,20 м. На рисунке 2.4 представлен поврежденный рассматриваемый участок дороги с ПДСВ.

Ширина ЗП на представленном участке составляет 12,62-13,94 м, высота ЗП в среднем равна 2,00-2,10 м. ЗП отсыпано техногенным грунтом песком средним, малой степени водонасыщения, средней плотности. Ширина проезжей части (ПЧ) – 8,00 м, покрытие ПЧ – асфальтобетон по уплотнённому щебеночному основанию. Ширина обочин – 2,20-3,69 м, из которых 0,50 м устроены по типу покрытия проезжей части (асфальтобетон).



Рисунок 2.4 – Вид рассматриваемого участка автомобильной дороги п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90

На рассматриваемом участке автомобильной дороги на ПК 594+68 после ремонтно-восстановительных работ в покрытии наблюдалось развитие продольных трещин (см. рис. 2.5). Срок эксплуатации покрытия составлял 1 месяц на момент обследования. Появление деформаций на покрытии свидетельствует о дальнейшем их развитии, что впоследствии приведёт к повторному разрушению покрытия автомобильной дороги.

При обследовании ЗП рассматриваемого участка дороги были

установлено наличие деформаций, выраженных в виде вертикальных перемещений обочины. На рисунках 2.6-2.8 представлены вертикальные перемещения обочин ЗП.



Рисунок 2.5 – Развитие продольных трещин на ПК 564+68 после ремонтно-восстановительных работ

По результатам инженерно-геодезических изысканий на рассматриваемом участке дороги «г.Сургут-г.Салехард: п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90» разрушена правая (южная) часть покрытия. Максимальное отклонение от проектных отметок составляет 28 см. На ПК 594+26 – ПК 594+32 прослеживаются вертикальные перемещения левой и правой части покрытия автодороги при их среднем значении 20 см. Приращение вертикальных перемещений за 2010-2011 г. составило 30 мм.

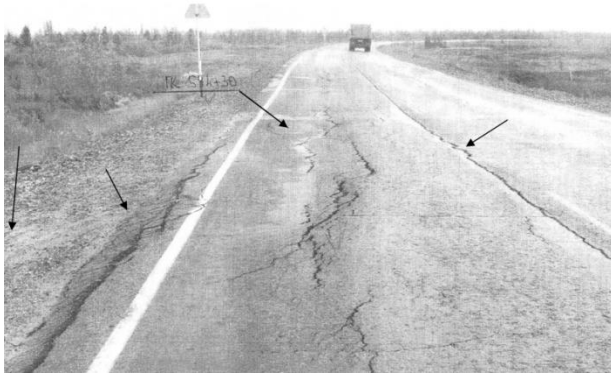


Рисунок 2.6 – Разрушенный участок дороги (ПК 594+30) с развитием продольных трещин длиной до 23 м и раскрытием их до 3 см. Развитие деформаций на обочине

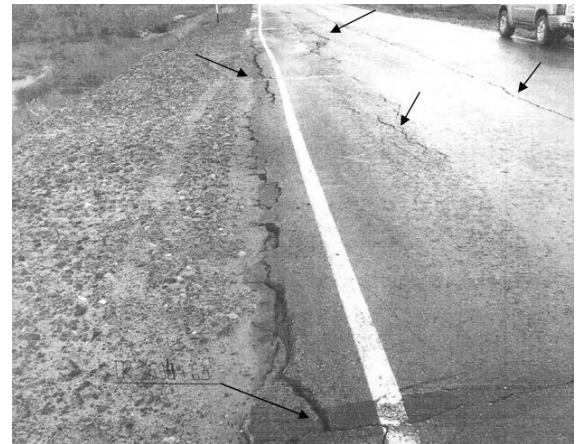


Рисунок 2.7 – Разрушенный участок дороги (ПК 594+30). Разрушение кромки покрытия



Рисунок 2.8 – Разрушенный участок дороги (ПК 594+30). Просадка покрытия, кромки и части обочины

При выявлении причин формирования циклических деформаций были выполнены инженерно-геологические изыскания на рассматриваемом участке дороги. По результатам инженерно-геологических изысканий основание ЗП сложено неравномерным залеганием разнородных грунтов. На рис. 2.9 представлена схема расположения скважин, на рис. 2.10 и 2.11 – инженерно-геологические разрезы вдоль южного и северного откосов ЗП соответственно.

В таблице 2.1 представлены значения теплофизических свойств грунтов.

Таблица 2.1

Значения теплофизических свойств грунтов

Показатель	ИГЭ-4. Песок средний, средней степени водонасыщения	ИГЭ-6. Песок мелкий насыщенный водой	ИГЭ-14. Торф влажный	ИГЭ-17. Торф пластично-мер- злый, льדיстый
λ_f , Вт/(м·°С)	2,26	3,04	1,04	1,40
λ_{th} , Вт/(м·°С)	1,94	2,49	0,58	0,95
C_f , кДж/(м ³ ·°С)	1776,60	2074,50	1257,10	2498,90
C_{th} , кДж/(м ³ ·°С)	2342,40	2991,40	1831,20	4046,40
L_v , МДж/м ³	91,12	147,67	92,46	249,24
ρ_d , кг/м ³	1600,00	1520,00	400,00	480,00
W_{tot} , д.ед.	0,17	0,29	0,16	1,55
T_{bf} , °С	-0,10	-0,10	-0,20	-0,35

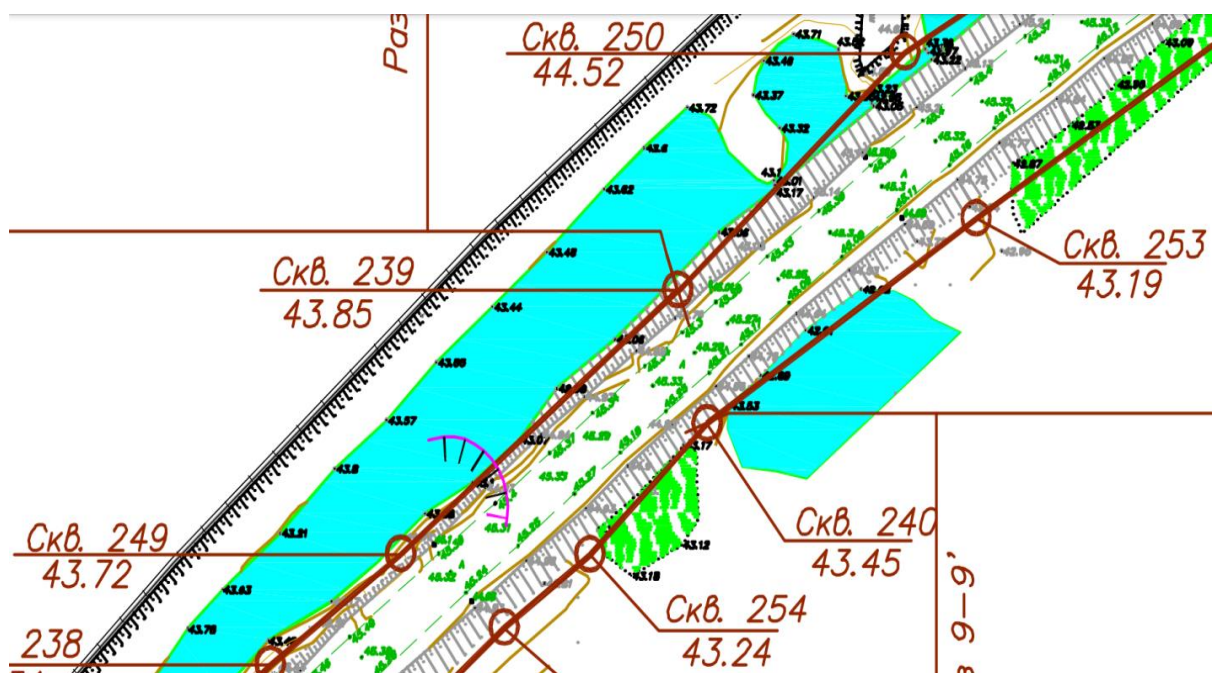


Рисунок 2.9 – Схема расположения скважин

Вдоль южного (правого) откоса в основании ЗП залегает песок средний (ИГЭ-4), средней степени водонасыщения средней плотности, мощностью от 0,30 до 4,20 м, ниже мощностью от 0,60 до 6,80 м залегает песок мелкий (ИГЭ-6), средней плотности, насыщенный водой.

Разрез по скважинам 249-250
Масштабы: верт. 1:100 гориз. 1:500

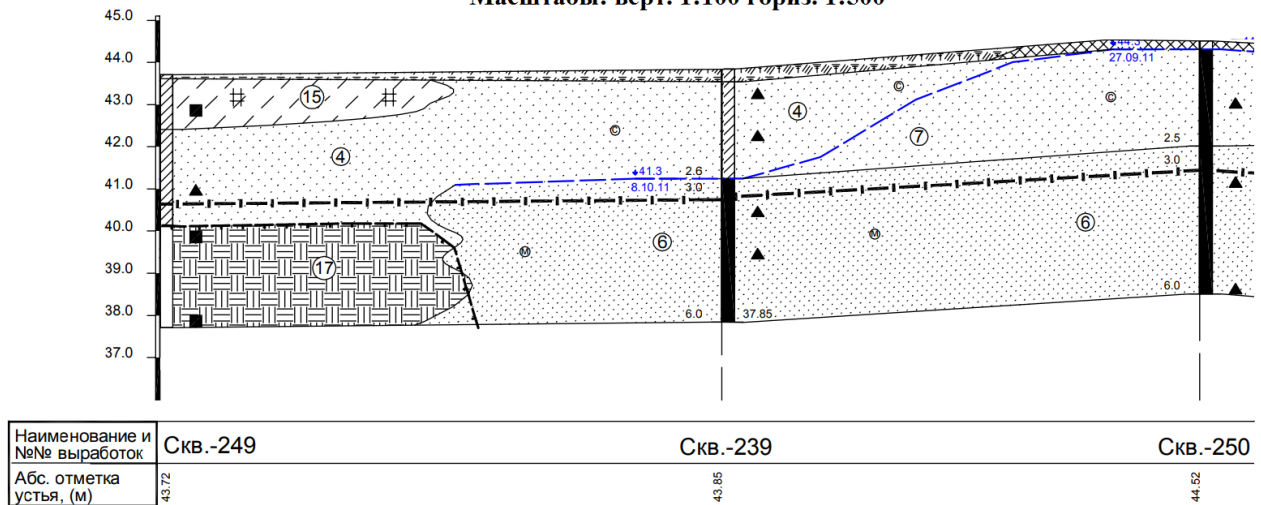


Рисунок 2.10 – Инженерно-геологический разрез вдоль южного (правого) откоса ЗП

Разрез по скважинам 254-253
Масштабы: верт. 1:100 гориз. 1:500

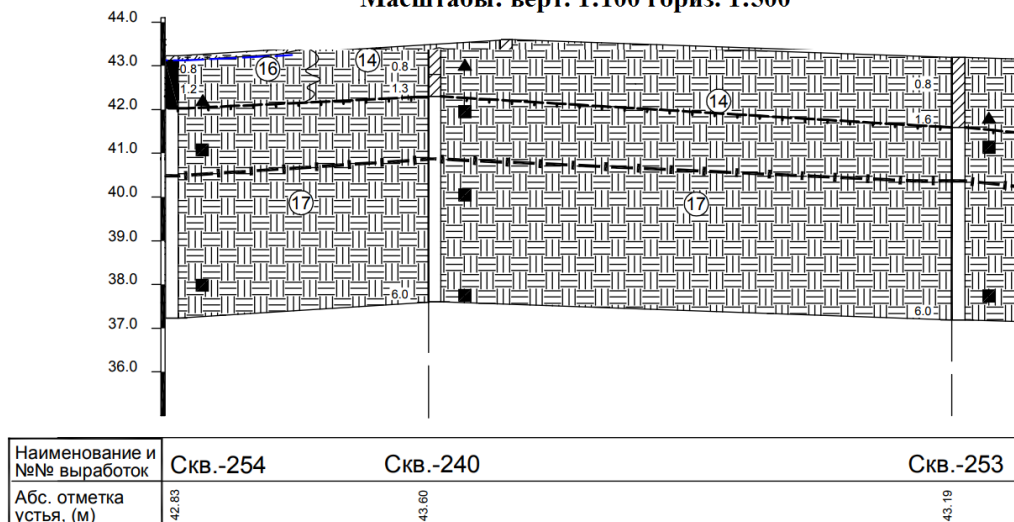


Рисунок 2.11 – Инженерно-геологический разрез вдоль северного (левого) откоса ЗП

Вдоль северного (левого) откоса – залегают торфы (ИГЭ-14 и ИГЭ-17) средней степени разложения. Мощности торфов (ИГЭ-14 и ИГЭ-17) составляют 1,30-1,60 м и 1,00-8,40 м соответственно. Торф (ИГЭ-14) влажный, торф (ИГЭ-17) льдистый и пластичномерзлый. Криотекстура торфа (ИГЭ-17) соответствует атакситовой. Мощность ММГ залегает в отметках 40,80-41,90 м.

Влияние на формирование ММГ можно объяснить дисперсностью пород.

Как описывают авторы работы [74] в районе реки Селемжи на участках, имеющих близкие физико-географическими условия, сложены разные грунты с отличной друг от друга температурой: суглинисто-пылевато-илистые отложения имеют отрицательную температуру минус 0,20-0,30 °С, а крупнопесчано-дресвянистые грунты имеют положительную температуру плюс 1,00-1,50 °С.

Авторы [74] также отмечают влияние торфа на температурный режим толщи основания. Торфяные грунты обладают высокой гигроскопичностью и слабой фильтрацией. Проникновение воды под толщу торфяных грунтов и боковое перемещение воды очень мало. Вследствие этого конвективным потоком в процессе теплообмена грунтов можно пренебречь. Также отмечено, что торфяные грунты в пределах криолитозоны всегда многолетнемерзлые. Охлаждающее влияние торфяных грунтов и заболоченных мест отмечается также в следующих трудах [71, 91].

Согласно представленному плану (см. рис. 2.3) условия поверхности стока неудовлетворительные. Вдоль южного откоса дороги наблюдаются термокарстовые озера. Вдоль северного откоса дороги помимо термокарстовых образований образовались заболоченные участки. Средняя глубина озер составляет 1,00-1,20 м.

Гидрографические условия района характеризуются преобладанием малых рек и озёр, что в сочетании с плоским рельефом с замкнутыми понижениями, эрозионными врезам и наличием многолетней мерзлоты обуславливает замедление поверхностных и подземных стоков и способствует заболачиванию территорий.

Длительно стоящие поверхностные воды вдоль откосов оказывают тепляющее воздействие, тем самым вызывая повреждения и деформации ЗП дороги (см. рис. 2.8).

В процессе инженерных изысканий рассматриваемого участка дороги под южным (правым) откосом ЗП была выявлена таликовая зона. Верхняя граница

ММГ под южным откосом ЗП располагалась на глубине 3-ех метров. Температура ММГ под южным откосом ЗП составляла минус 0,6 °С. Разрушение покрытия на рассматриваемом участке развивалось на правой полосе движения. Конструкция автомобильной дороги в поперечном направлении опиралась на неоднородное основание при наличии таликовой зоны с правой (южной) стороны в основании автомобильной дороги и залегании ММГ на 0,7 м от дневной поверхности с левой (северной) стороны. В результате возникают неравномерные осадки основания дороги с правой (южной) части со смещением конструкции ЗП в сторону откоса. При смещении конструкции ЗП на покрытии дороги образуются трещины.

Ввиду особенностей инженерно-геологического строения основания рассматриваемого участка автомобильной дороги были разработаны дополнительные мероприятия по усилению грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с сохранением существующей конструкции дорожной одежды и ЗП.

2.2. Внедрение экспериментального конструктивно-технологического решения, по стабилизации температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания участка автомобильной дороги

Зимой 2012 года с целью устранения деформаций без прекращения движения транспортного потока на автомобильной дороге «Сургут-Салехард: п. Пангоды (км 876+650) – п. Правохеттинский (км 877+400)», в частности рассматриваемом участке (*п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90*), были выполнены ремонтные работы и произведена её и модернизация ООО «Партнер Групп» совместно с автором диссертационной работы.

На основании серии численных экспериментов по прогнозу температурного режима грунтов многолетнемерзлого основания и конструкции автомобильной дороги при воздействии ПДСВ вдоль откосов ЗП была

сформирована гипотеза, основанная на идее ограничения теплового влияния ПДСВ через откосную часть ЗП с сохранением притока холода в зимний период через основную площадку ЗП в основание.

Автором диссертационной работы было разработано и внедрено *конструктивно-технологическое решение* (КТР) по усилению откосной части грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания рассматриваемого участка дороги, с сохранением существующей конструкции дорожной одежды и ЗП. (см. рис. 2.12).

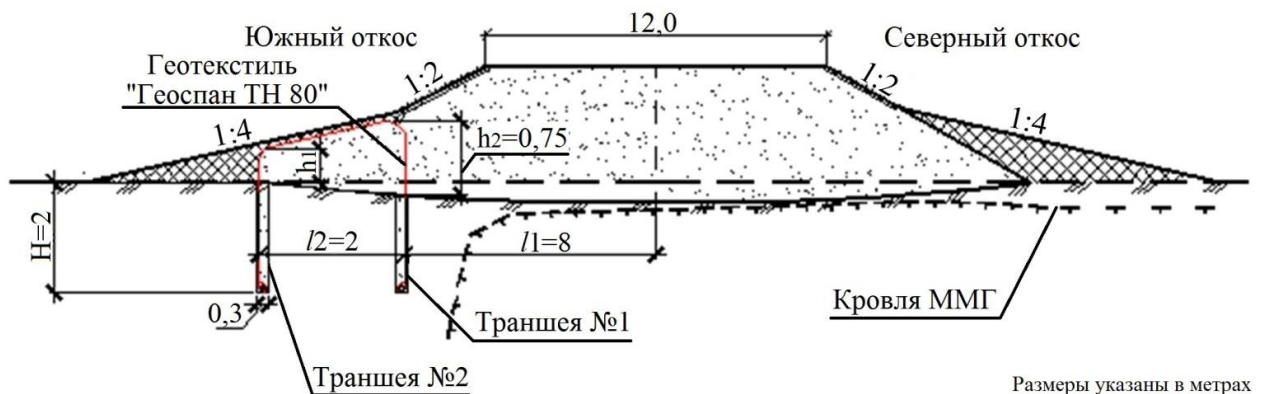


Рисунок 2.12 – Схема КТР конструкции ЗП на рассматриваемом участке дороги

На рассматриваемом участке было выполнено вертикальное армирование южной откосной части ЗП и основания (на рис. 2.9. левая часть), где находилась таликовая зона. Для предотвращения развития деформаций в сторону откоса формировалась грунтовая призма трапецеидального сечения, обтянутая геотекстилем. В основании ЗП геотекстиль закреплялся полиэтиленовой трубой (см. рис. 2.13). Заложение откоса призмы соответствовало заложению откоса ЗП.

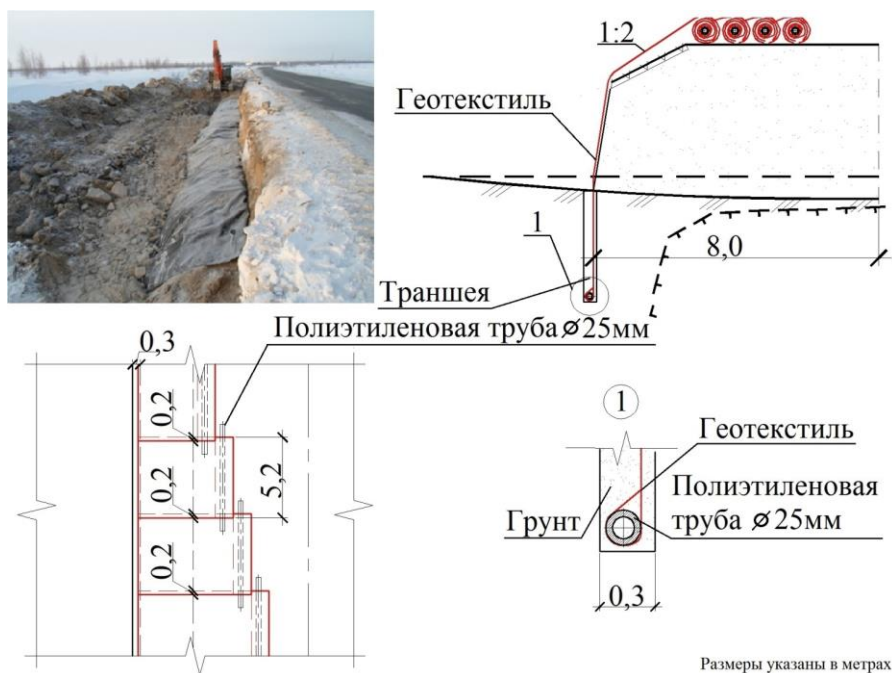


Рисунок 2.13 – Схема и фото установки геотекстиля в траншею на рассматриваемом участке

Характеристики используемого армирующего материала «Геоспан ТН 80» соответствуют требованиям ОДМ 218.2.046-2014.

При выполнении армирования основания и конструкции ЗП на ММГ с таликовой зоной рекомендуется выполнять следующие указания:

1. Работы по укреплению основания и конструкции ЗП производятся в зимний период.

2. Траншея №1 расположенная у оси дороги устраивается после разборки существующего откоса. Траншея устраивается максимально близко к кромке разобранного откоса.

3. Предварительно на концах полотна, с размерами 5,20 м, изготавливается петля диаметром 60 мм. Способ изготовления петли - термоспаивание.

4. В петле устанавливаются трубы, выполненные из полиэтилена, диаметром $\varnothing 25$ мм, длиной $L=6$ м.

5. Геотестиль с трубой устанавливается в траншею. Вторая сторона

геотекстиля с трубой размещается на обочине. Полотна в траншею устанавливаются внахлест, величиной не менее 200 мм. Затем производится засыпка траншеи бульдозером.

6. Формирование грунтового валика выполняется механизированным способом, путем перемещения грунта бульдозером с последующим уплотнением и планировкой.

7. Траншея №2 устраивается у подошвы насыпи, в которую устанавливают противоположную сторону геотекстиля с трубой.

8. После установки геотекстиля с трубой в траншее №2 производится засыпка траншеи бульдозером.

Инженерно-геологический разрез поперек ЗП (ПК 964+65) на рассматриваемом участке представлен на рисунке 2.14.

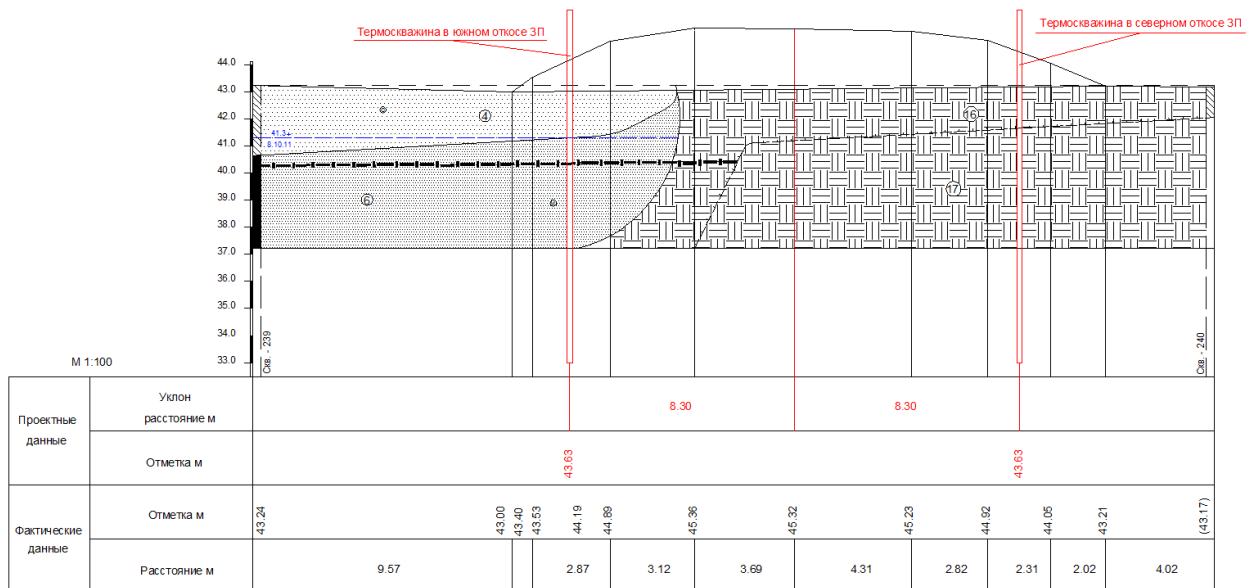


Рисунок 2.14 – Инженерно-геологический разрез поперек земляного полотна на рассматриваемом участке дороги

В феврале-марте 2013 г. при выполнении земляных работ по реализации предложенного КТР в откосной части ЗП была зафиксирована и измерена скорость фильтрации воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» (см. рис. 2.15). Формирование уплотненного слоя торфа на границе

«ЗП-основание» обусловлено возведением ЗП по технологии «от себя». Причиной появления фильтрации воды через уплотненный слой торфа под подошвой ЗП является не замерзающие в зимний (холодный) период ПДСВ вдоль откосной части ЗП. Разница температур воды в начале и конце пути фильтрации воды составила 1,8-2,4°C, расход воды составил 0,005 м³/ч.



Рисунок 2.15 – Фильтрация воды через слой уплотненного торфа на границе ЗП-основание (февраль-март 2013 г.)

В этот же период при выполнении земляных работ по разборке откосной части ЗП была зафиксирована толща талого торфа в основании автомобильной дороги (см. рис. 2.16). В технологической траншее под влиянием фильтрации через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» был отмечен и измерен объем скопившейся воды (см. рис. 2.17).



Рисунок 2.16 – Толща талого торфа в основании автомобильной дороги
(февраль-март 2013 г.)



Рисунок 2.17 – Скопление (застой) воды в технологической траншее

2.3. Оборудование и результаты наблюдения за температурным режимом грунтов земляного полотна и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги

По окончании работ с целью накопления данных о температурном режиме грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с учетом внедренного КТР на рассматриваемом участке автодороги был произведен мониторинг в течение 3 лет 1 раз в год. Проводился группой экспертов ООО «НПО «ТюмГАСУ» совместно с автором диссертационной работы. Накопленные данные по температурному режиму грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания использовались при дальнейшей разработке методики расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания.

Для измерения вертикальных перемещений грунтов ЗП и основания были изготовлены винтовые марки, заглубляемые в рассматриваемые грунты. На рисунке 2.18 показана фотография винтовой марки, на рисунке 2.19 чертеж марки с установленными размерами для её изготовления.



Рисунок 2.18 – Фотография глубинной винтовой марки

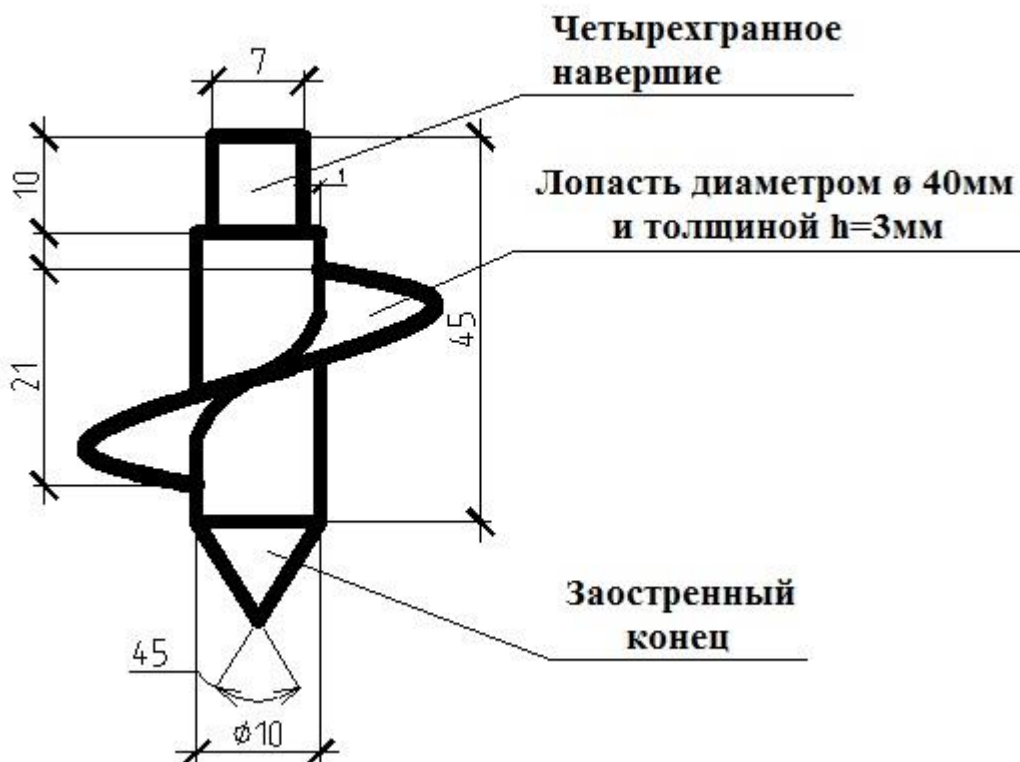


Рисунок 2.19 – Чертеж глубинной винтовой марки

К навершию винтовой марки крепились стальная струна $\varnothing 0,3$ мм, продеваемая сквозь направляющую трубу с торцевым ключом на конце, изготовленного из металлической трубы $\varnothing 19$ мм, при использовании которого марка завинчивалась в ранее пробуренную лидерную скважину $\varnothing 0,250$ мм с заделом 0,5 м до проектной глубины.

Перемещения марок по вертикали фиксировались прогибомерами с индикатором часового типа ИЧ-1 с ценой деления 0,01 мм. Для вертикального расположения стальной струны прогибомер устанавливался над проектным положением марки. Для исключения проскальзывания стальная струна наматывалась двойным оборотом на шкив прогибомера. Свободный конец стальной струны крепился к грузику весом, равному природному давлению на глубине залегания винтовой марки.

Для сохранения точности измерений и защиты контрольно-измерительной аппаратуры от негативных природно-климатических факторов

$l=14$ м. Термоскважины располагались на расстоянии 8,30 м от продольной оси дороги.

На рассматриваемом участке термоскважины расположены на ПК 594+65 (см. рис. 2.8). На рис. 2.22 и 2.23 представлены графики распределения температур грунтов по глубине. Данные замеров температур грунтов брались на первую декаду октября 2011 г. (без внедрения КТР), 2014 г. (через один год после внедрения КТР), 2016 г. (через три года после внедрения КТР). Выбранная дата замеров температур грунтов соответствует периоду максимального оттаивания грунтового массива основания.

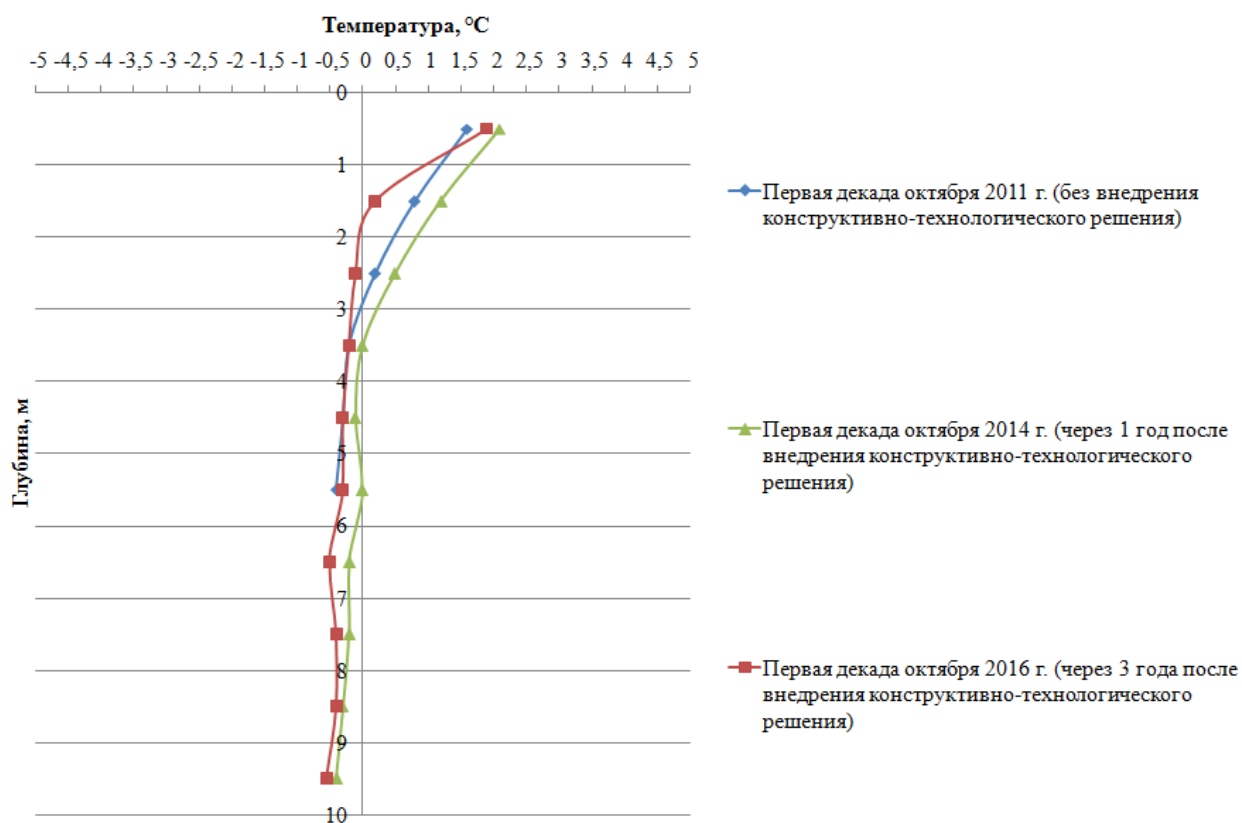


Рисунок 2.22 – График распределения температуры грунтов по глубине в термоскважине, расположенной в южном откосе ЗП

Согласно данным мониторинга под южным откосом ЗП:

– на 2014 г. по сравнению с 2011 г. зафиксировано повышение температуры грунтов по всей глубине термоскважины в диапазоне значений 0,4-0,9 °C;

– на 2016 г. грунты основания оттаяли до глубины 2 м относительно середины дневной поверхности откоса, что меньше на 1 м глубины оттаивания грунтов в 2011 г.

Под северным откосом ЗП:

– на 2014 г. по сравнению с 2011 г. зафиксировано незначительное повышение температуры грунтов по всей глубине термоскважины в диапазоне значений 0,2-0,4 °С;

– на 2016 г. по сравнению с 2011 г. по всей глубине термоскважины зафиксировано промерзание грунтов в диапазоне значений 0,5-1,0 °С.

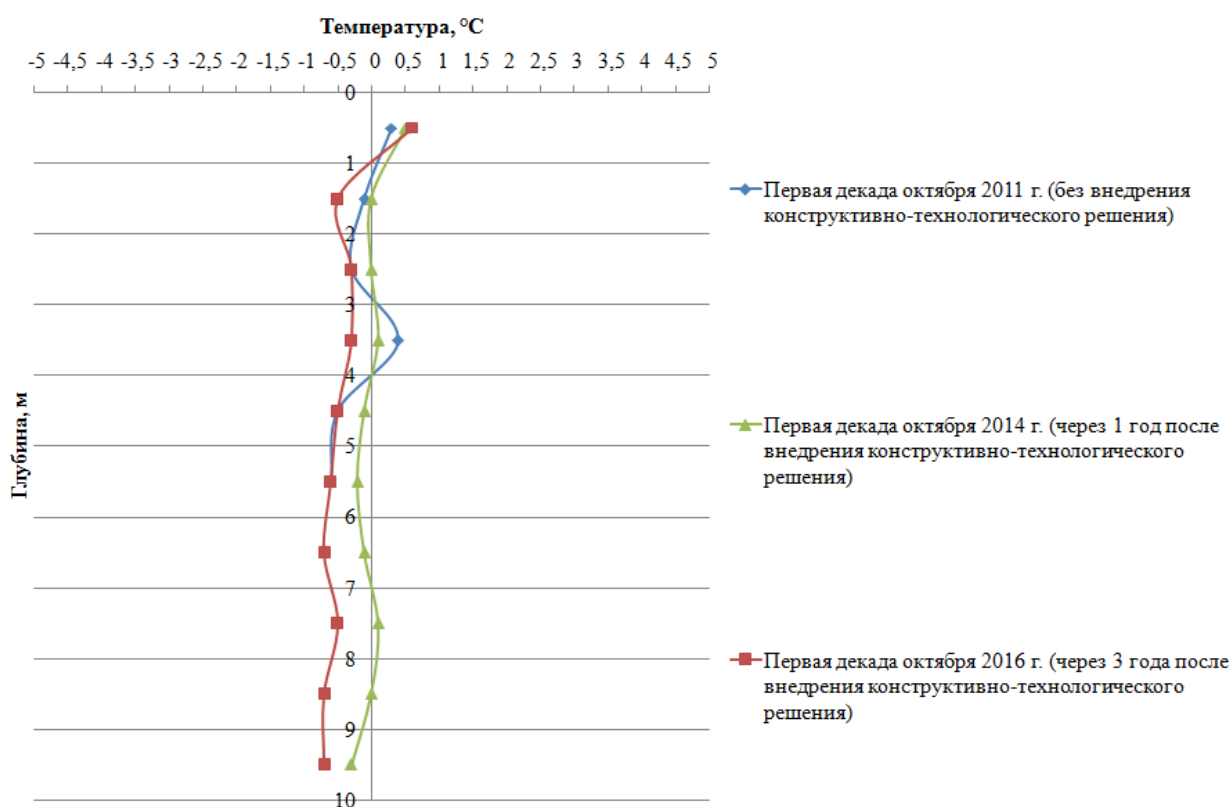


Рисунок 2.23 – График распределения температуры грунтов по глубине в термоскважине, расположенной в северном откосе ЗП

Повышение температуры грунтов в южной (правой) откосной части ЗП через один год после внедрения КТР (на 2014 г.) связано с дополнительным поступлением теплоты от солнечной радиации в толщу грунтов откосной части ЗП и основания при устройстве КТР в начале весеннего периода (март 2013 г.).

С целью установления колебания уровня ПДСВ вдоль откосов автомобильной дороги использовалась тарированная металлическая мачта. Мачта выполнена из металлической трубы, надежно установленной в трех метрах от берега водоема. Уровень воды замерялся каждые 15 дней. Общий вид мачты представлен на рис. 2.24. На рис. 2.25 представлен график изменения уровня воды в водоеме в период паводка.



Рисунок 2.24 – Общий вид мачты

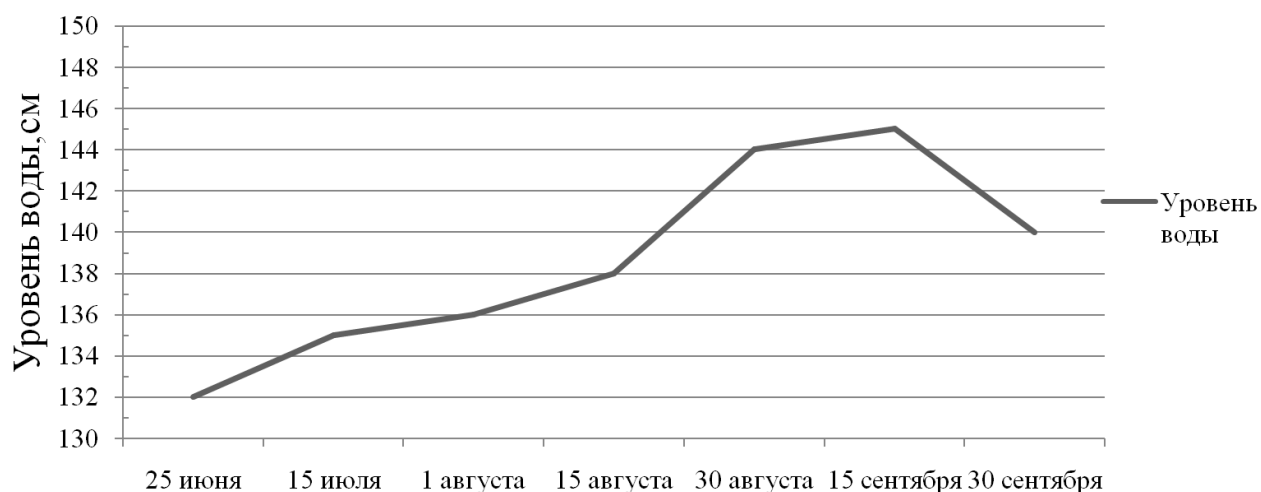


Рисунок 2.25 – График изменения уровня воды в водоеме в период паводка (летний период)

Также процесс мониторинга рассматриваемого участка дороги сопровождался визуальным исследованием состояния покрытия дороги с

фотофиксацией деформаций. Вероятными причинами возникновения деформаций на участке могут быть теми же, что и в случае повышения температуры грунтов основания дороги.





Рисунок 2.26 – Фотофиксация деформаций на рассматриваемом участке
(июнь 2016 г.)

С целью исследования возникших деформаций и (или) выявления новых вероятностных причин обратимся к работе П.И. Дыдышко [47]. В большинстве своих работах П.И. Дыдышко рассматривает работу ЗП и основания железной дороги (ж/д) на ММГ. П.И. Дыдышко объясняет, что ЗП работает как

«горячий» штамп по отношению к мерзлым грунтам в основании и может влиять на границу ММГ при нарушенном температурном режиме. При отепляющем воздействии ЗП на основание в дальнейшем может появиться таликовая зона между подошвой ЗП и кровлей ММГ.

Также П.И. Дыдышко пишет, что деградация ММГ происходит при обводнении поверхности. Обводнение может возникнуть в процессе нарушения поверхности основания, помимо воздействия ЗП сюда можно отнести: бермы, водоотводные канавы с предварительной засыпкой дренирующими грунтами. П.И. Дыдышко рекомендует на участках со сложными мерзлотно-грунтовыми условиями грунты сохранять в мерзлом состоянии. При устранении деформаций ЗП с установлением их причин грунт основания следует заморозить под подошвой откосов ЗП.

2.4 Выводы по главе 2

1. Основной причиной развития деформаций конструкции автомобильной дороги является влияние ПДСВ и фильтрация воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» при воздействии незамерзающих ПДСВ вдоль откосов, которое сопровождается растеплением грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания.

2. Внедренное КТР позволило снизить глубину оттаивания грунтов многолетнемерзлого основания в южной подоткосной части, тем самым снизить развитие циклических деформаций ЗП и основания автомобильной дороги. Согласно данным мониторинга под южным откосом ЗП на 2016 г. грунты основания оттаяли до глубины 2 м под серединой дневной поверхности откоса, что меньше на 1 м глубины оттаивания грунтов в 2011 г. Под северным откосом ЗП за период 2011-2016 гг. по всей глубине термоскважины зафиксировано понижение температуры грунтов в диапазоне значений 0,5-1,0 °С.

3. С учетом выявленного дополнительного теплового источника воздействия на грунты ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги предложено разработать КТР, направленное на температурную стабилизацию грунтов геотехнической системы «ЗП-основание». В качестве армирующего материала предложено использовать водонепроницаемый геосинтетический материал, что позволит сформировать противодиффузионный экран в толще грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания. Для ограничения теплового влияния ПДСВ через откосную часть ЗП предложено использовать тепловой экран, сформированный гранулированным теплоизоляционным материалом.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

При проектировании автомобильных дорог в условиях распространения ММГ на подтопляемых участках необходимо выполнять оценку температурного режима геотехнической системы «ЗП-основание» на предмет необходимости разработки дополнительных стабилизационных мероприятий температурного режима. Для этого следует разработать методику расчета нестационарного температурного режима автомобильных дорог в условиях распространения ММГ на подтопляемых участках, которая должна учесть основные факторы и причины, влияющие на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания. В частности при выполнении расчета необходимо дополнительно учесть тепловые источники, вызванные застоем *поверхностных длительно стоящих вод* (ПДСВ). Предложенная методика должна позволить инженеру-проектировщику разработать решения и способы, стабилизирующие температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания дороги, а также назначить параметры *конструктивно-технологического решения* (КТР).

Для рассматриваемого участка дороги, основной причиной деградации ММГ в основании дороги является тепловой источник в виде фильтрации воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание». Фильтрация протекает в деформируемом слое торфа при возведении ЗП по технологии «от себя» (см. рис. 3.1). Также следует отметить отепляющее влияние ПДСВ вдоль откосов ЗП высотой более 1,00 м.



Рисунок 3.1 – Фильтрация воды через конструкцию ЗП (12 марта 2013 г.)

3.1. Методика расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии поверхностных длительно стоящих вод

В диссертационной работе предложена методика расчета по определению глубины промерзания-оттаивания многолетнемерзлого основания при квазистационарном потоке тепла за счёт фильтрации воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» и при влиянии ПДСВ вдоль откосов ЗП. В основу методики положен аналитический метод, представленный формулой Стефана, основываясь на решении В.Г. Гольдмана (1951) и на теоретическом представлении теплового взаимодействия насыпи с многолетнемерзлыми основаниями [35]. В.Г. Гольдманом было получено решение применительно к случаю фильтрационно-дренажного оттаивания мерзлых грунтов. Им была определена зависимость глубины многолетнего оттаивания ММГ в основании талой плотины.

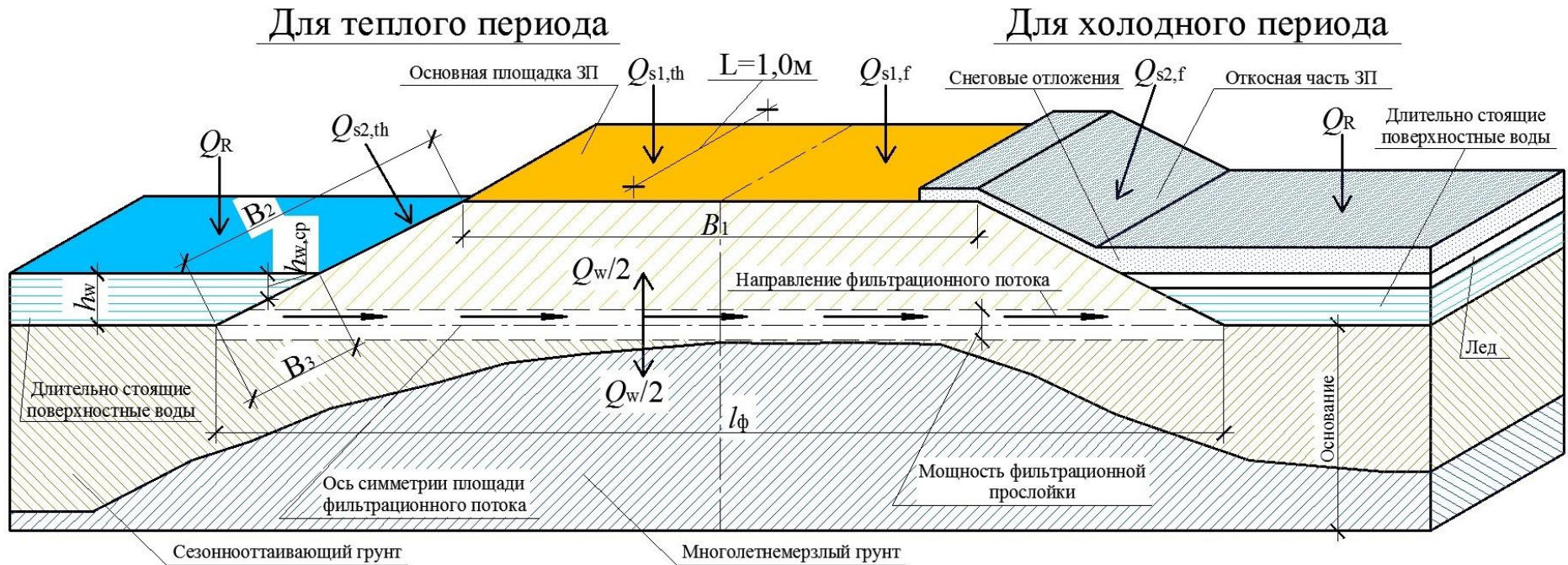
На первом этапе предлагаемой методики для рассматриваемого участка автомобильной дороги были составлены уравнения радиационного баланса в период теплого (летнего) и холодного (зимнего) времени. При разных условиях теплопередачи на гранях конструкции ЗП было предложено отдельно представить уравнения радиационного баланса в случае теплопередачи через

основную площадку и откосную часть ЗП. К разности условий следует отнести наличие на откосной части и отсутствие на основной площадке ЗП: отложения снега в зимний период и скопление длительно стоящих вод в летний период. Согласно В.А. Кудрявцеву (Кудрявцев и др., 1974 г.) следует также учесть экспозицию откоса ЗП. В зависимости от экспозиции откоса количество тепла, поступающее из атмосферы через откосную часть ЗП, будет различным. На рисунке 3.2. показана схема для предлагаемой методики расчета по определению глубины оттаивания и промерзания основания автомобильной дороги на ММГ при квазистационарном потоке тепла за счёт фильтрации воды через тело ЗП при влиянии ПДСВ вдоль откосов ЗП.

Для теплого периода года уравнение радиационного баланса для основной площадки ЗП записывается как:

$$Q_{s1,th} + \frac{Q_{w,th}}{2} = Q_{\phi 1,f}, \quad (3.1)$$

где $Q_{s1,th}$ – количество тепла, поступающее из атмосферы через основную площадку ЗП в грунт основания и ЗП дороги, Вт·ч; $Q_{w,th}$ – количество тепла, передаваемое при фильтрации воды через тело ЗП дороги за теплый (летний) период, Вт·ч; $Q_{\phi 1,f}$ – количество тепла, поглощаемое промерзшим грунтом основания и ЗП дороги при передачи тепла через основную площадку ЗП при условии квазистационарного фильтрационного потока, Вт·ч.



$Q_{s1,th}$ – количество тепла, поступающее из атмосферы через основную площадку ЗП в грунт основания и ЗП дороги, Вт·ч; Q_w – количество тепла, передаваемое при фильтрации воды через тело ЗП дороги (на границе ЗП – основание), Вт·ч; B_1 – ширина основной площадки ЗП, м; L – элементарная длина автомобильной дороги, равная 1 м; $Q_{s2,th}$ – количество тепла, поступающее из атмосферы через откосную часть ЗП в грунт основания и ЗП дороги, Вт·ч; Q_R – количество тепла, поступающее из атмосферы в длительно стоящие поверхностные воды, Вт·ч; B_2 – длина откосной части ЗП, м; B_3 – размер участка влияния длительно стоящих вод на откос ЗП, м; $h_{w,cp} = h_w/2$ – толщина слоя поверхностных длительно стоящих вод вдоль откосов ЗП, м

Рисунок 3.2 – Схема для предлагаемой методики расчета по определению глубины оттаивания и промерзания основания автомобильной дороги на ММГ при квазистационарном потоке тепла за счёт фильтрации воды через тело ЗП при влиянии ПДСВ вдоль откосов ЗП

Количество тепла, поступающее из атмосферы через основную площадку ЗП в грунт основания и ЗП дороги находим из:

$$Q_{s1,th} = d_{th1} \cdot L_v \cdot B_1 \cdot L, \quad (3.2)$$

где d_{th1} – глубина оттаивания грунта ЗП и основания дороги при передаче тепла через основную площадку, м; B_1 – ширина основной площадки ЗП, м; L – элементарная длина автомобильной дороги, равная 1 п.м; L_v – удельная теплота грунта при его промерзании-оттаивании, Вт·ч/м³.

Для определения глубины оттаивания d_{th1} использовалась формула Стефана (формула 2.3). Задачу оттаивания под серединой основной площадки ЗП можно рассматривать в качестве линейной, т.к. ширина основной площадки на практике превышает глубину сезонного оттаивания [35]. То же обоснование можно принять для определения глубины оттаивания грунта в откосной части ЗП и промерзания грунта под основной площадкой и откосной частью ЗП.

$$d_{th1} = \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th} \cdot (T_{th1} - T_{bf}) \cdot t_{th}}{L_v}}, \quad (3.3)$$

где $\mu = 1 + 0,033 \cdot T_0$ – эмпирическая поправка, которая учитывает отток тепла в подстилающий слой сезонного оттаивания ММГ [119] (T_0 – температура ММГ, °С); λ_{th} – коэффициент теплопроводности талого грунта, Вт/м·°С; T_{th1} – средняя летняя температура на поверхности основной площадки ЗП, °С; T_{bf} – температура начала замерзания-оттаивания грунта, °С, t_{th} – продолжительность теплого (летнего) периода, ч.

Прослойка в виде какого-либо теплоизоляционного материала, интегрированного в тело ЗП или уложенного на дневную поверхность ЗП, видоизменяет формулу Стефана. Наличие таких прослоек следует привести к эквивалентному слою рассматриваемого грунта и отразить в формуле в следующем виде:

$$\frac{\lambda_{th} \cdot (T_{th} - T_{bf})}{d_{th1} + R_{th} \cdot \lambda_{th}} \cdot dt_{th} = L_v \cdot dd_{th1}, \quad (3.4)$$

$$\frac{\lambda_{th} \cdot (T_{th} - T_{bf})}{L_v} \cdot dt_{th} = (d_{th1} + R_{th} \cdot \lambda_{th}) \cdot dd_{th1} \quad (3.5)$$

$$\frac{\lambda_{th} \cdot (T_{th} - T_{bf}) \cdot t_{th}}{L_v} = \frac{d_{th1}^2}{2} + R_{th} \cdot \lambda_{th} \cdot d_{th1} \quad (3.6)$$

$$\frac{2\lambda_{th} \cdot (T_{th} - T_{bf}) \cdot t_{th}}{L_v} = d_{th1}^2 + 2d_{th1} \cdot R_{th} \cdot \lambda_{th} + (R_{th} \cdot \lambda_{th})^2 - (R_{th} \cdot \lambda_{th})^2 \quad (3.7)$$

$$\sqrt{\frac{2\lambda_{th} \cdot (T_{th} - T_{bf}) \cdot t_{th}}{L_v} + (R_{th} \cdot \lambda_{th})^2} = (d_{th1} + R_{th} \cdot \lambda_{th}) \quad (3.8)$$

$$d_{th1} = \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th} \cdot (T_{th} - T_{bf}) \cdot t_{th}}{L_v} + (\lambda_{th} \cdot R_{th})^2} - \lambda_{th} \cdot R_{th}, \quad (3.9)$$

где R_{th} – среднелетнее термическое сопротивление теплообмену на поверхности основной площадки и (или) откосов ЗП, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, определяется как:

$$R_{th} = \frac{1}{\alpha_{th}} + R_{np}, \quad (3.10)$$

где R_{np} – термическое сопротивление теплоизоляционной прослойки, расположенной на поверхности основной площадки и (или) откосах ЗП или в теле ЗП, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$; α_{th} – коэффициент теплообмена на поверхности основной площадки и (или) откосов ЗП в теплый (летний) период, $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{°C}$.

Для определения средней летней температуры поверхности грунта T_{th} и коэффициента теплообмена α_{th} использовалась методика, изложенная в [92].

Удельная теплота грунта при его промерзании-оттаивании L_v определялась как:

$$L_v = L_0 \cdot \rho_{th,f} \cdot \frac{w_{tot}}{1 + w_{tot}}, \quad (3.11)$$

где L_0 – удельная теплота замерзания воды или таяния льда, $93 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{кг}$; $\rho_{th,f}$ – плотность талого или мерзлого грунта соответственно, $\text{кг} / \text{м}^3$; w_{tot} – суммарная влажность талого или мерзлого грунта, д.ед.

В предлагаемой методике фильтрационный поток представлен в виде

внутреннего источника (стока) теплоты. Исходя из того, что коэффициент уплотнения грунта ЗП варьируется от 0,95 до 0,98, то грунт ЗП можно принять условно не фильтрующим. Фильтрационный поток протекает под подошвой ЗП в уплотненном слое почвенно-растительного грунта, сохраняемого при первом принципе проектирования автомобильных дорог в условиях залегания ММГ. В предлагаемой методике принято, что: относительно площади фильтрационного потока через тело ЗП в среднем сечении процесс передачи тепла будет протекать симметрично, одинаково затрачивая количество тепла на передачу вышележащим слоям грунта ЗП и нижележащим слоям грунта основания автомобильной дороги. Поэтому в уравнении 2.1 радиационного баланса предлагаемой методики принята $\frac{1}{2}$ часть от количества тепла, передаваемого при фильтрации воды через тело ЗП Q_w в грунт основания автомобильной дороги. Количество тепла, передаваемого при фильтрации воды через тело ЗП за теплый (летний) период, определяется как:

$$Q_{w,th} = q_w \cdot C_w \cdot (T_{w,1} - T_{w,2}) \cdot t_{th}, \quad (3.12)$$

где q_w – расход воды через тело ЗП, м³/ч; C_w – теплоемкость воды, Вт·ч/(м³·°С); $T_{w,1}$ и $T_{w,2}$ – температура воды в начале и конце пути фильтрации соответственно, °С.

Количество тепла, поглощаемое промерзшим грунтом основания и ЗП автомобильной дороги при условии квазистационарного фильтрационного потока определяется как:

$$Q_{\phi,f} = L_v \cdot l_{\phi} \cdot z \cdot L, \quad (3.13)$$

где l_{ϕ} – длина пути фильтрации, м; z – глубина оттаявшего грунта ЗП и основания относительно дневной поверхности ЗП, м.

Для теплого периода года уравнение радиационного баланса для откосной части ЗП записывается как:

$$Q_{s2,th} + \frac{Q_{w,th}}{2} - Q_{R,th} = Q_{\Phi 2,f}, \quad (3.14)$$

где $Q_{s2,th}$ – количество тепла, поступающее из атмосферы через откосную часть ЗП в грунт основания и ЗП дороги, Вт·ч; $Q_{R,th}$ – количество тепла, поступающее из атмосферы в ПДСВ за теплый (летний) период, Вт·ч; $Q_{\Phi 2,f}$ – количество тепла, поглощаемое промерзшим грунтом основания и ЗП дороги при передачи тепла через откосную часть ЗП, Вт·ч.

Количество тепла, поступающее из атмосферы через откосную часть ЗП в грунт основания и ЗП дороги находим из:

$$Q_{s2,th} = d_{th2} \cdot L_v \cdot B_2 \cdot L, \quad (3.15)$$

где d_{th2} – глубина оттаивания грунта ЗП и основания дороги при передаче тепла через откосную часть, м; L_v – удельная теплота грунта при его промерзании-оттаивании, Вт·ч/м³; B_2 – длина откосной части ЗП, м; L – элементарная длина автомобильной дороги, равная 1 п.м.

ПДСВ вдоль откосов ЗП за теплый (летний) период принимают часть теплоты поступающей из атмосферы в грунт ЗП. В таком случае ПДСВ можно рассматривать как теплоизолирующую прослойку. Тогда $Q_{R,th}$ можно выразить следующим образом:

$$Q_{R,th} = (d_{th2} - d_{th3}) \cdot L_v \cdot B_3 \cdot L, \quad (3.16)$$

где d_{th3} – глубина оттаивания грунта ЗП и основания дороги под слоем ПДСВ вдоль откосов, м; L_v – удельная теплота грунта при его промерзании-оттаивании, Вт·ч/м³; B_3 – размер участка влияния ПДСВ на откос ЗП на конец теплого (летнего) периода, м; L – элементарная длина, равная 1 п.м.

Глубина оттаивания грунта ЗП при передаче тепла через откосную часть d_{th2} рассчитывается по формуле 3.3 с использованием средней летней температуры на поверхности откосной части ЗП (T_{th2} , °С).

Глубина оттаивания грунта ЗП и основания дороги под слоем ПДСВ вдоль откосов d_{th3} рассчитывается по формуле 3.9. Термическое сопротивление

воды следует принимать из отношения средней толщины длительно стоящих вод $h_{w,cr}$ вдоль откосов к их коэффициенту теплопроводности λ_w .

В работе Горелика Я.Б. [41] рассмотрена и предложена новая методика, прогнозирующая влияние неглубокого водоема на изменение температуры донных отложений. Автором было показано, что неглубокие водоёмы могут носить как охлаждающий, так и отепляющий эффект, зависящий от глубины водоема и конвективного перемешивания в нём. Если конвективное перемешивание в водоеме отсутствует, то коэффициент теплопроводности воды следует принимать равным $\lambda_w=0,5$ Вт/м·°С. Отсутствие конвективного перемешивания или его значительное уменьшение возможно, если водоем, например, заболочен или зарос густой растительностью. Если конвективное перемешивание в водоеме присутствует, то коэффициент теплопроводности воды стремится к бесконечности. В работе [41] установлено, что образованный под водоемом талик не промерзает:

- при наличии конвективного перемешивания водоема глубиной более 0,45 м;
- при отсутствии конвективного перемешивания водоема глубиной более 0,90 м.

При отсутствии или невыполнении вышеописанных условий водоем будет оказывать охлаждающий эффект на нижележащие слои грунта.

Для холодного периода года при передаче тепла через основную площадку ЗП уравнение радиационного баланса представлено как:

$$Q_{sl,f} + \frac{Q_{w,f}}{2} = Q_{\phi 1,th}, \quad (3.17)$$

где $Q_{sl,f}$ – количество тепла, поглощаемое атмосферой из грунта основания и ЗП через основную площадку, Вт·ч; $Q_{\phi 1,th}$ – количество тепла, отдаваемое грунтом основания и ЗП в атмосферу через основную площадку, Вт·ч; $Q_{w,f}$ – количество тепла, передаваемое при фильтрации воды через тело ЗП дороги за холодный (зимний) период, Вт·ч.

Количество тепла, передаваемого при фильтрации воды через тело ЗП за холодный (зимний) период, определяется аналогично выражению 3.12, продолжительность теплого (летнего) периода t_{th} заменяется на продолжительность холодного (зимнего) периода t_f .

Количество тепла, поглощаемое атмосферой из грунта основания и ЗП через основную площадку $Q_{sl,f}$ определяется как:

$$Q_{sl,f} = d_{f1} \cdot L_v \cdot B_1 \cdot L, \quad (3.18)$$

где d_{f1} – глубина промерзания грунта ЗП и основания дороги при передаче тепла через основную площадку, м.

Для определения глубины промерзания грунта d_f использовалась формула Стефана, основываясь на ранее изложенном допущении линейности задачи о промерзании грунта:

$$d_{f1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot (T_{f1} - T_{bf}) \cdot t_f}{L_v} + (\lambda_f \cdot R_f)^2} - \lambda_f \cdot R_f, \quad (3.19)$$

где λ_f – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/м·°С; t_f – продолжительность холодного (зимнего) периода, ч; T_{f1} – средняя зимняя температура поверхности грунта основной площадки, °С; t_f – продолжительность холодного (зимнего) периода, ч; R_f – среднезимнее термическое сопротивление теплообмену на поверхности основной площадки или откосов ЗП, м²·°С/Вт, которое определяется как:

$$R_f = \frac{1}{\alpha_f} + R_{np} + R_d, \quad (3.20)$$

где α_f – коэффициент теплообмена на поверхности основной площадки и (или) откосов ЗП в холодный (зимний) период, Вт/м²·°С; R_d – термическое сопротивление снега, м²·°С/Вт; R_{np} – термическое сопротивление теплоизоляционной прослойки, которая расположена на поверхности откосов и (или) основной площадки ЗП, или в теле ЗП, м²·°С/Вт.

Средняя зимняя температура поверхности грунта T_f принимается равной

средней зимней температуре воздуха, т.к. можно пренебречь радиацией в виду ее малого значения [81].

Для холодного периода года при передаче тепла через откосную часть ЗП уравнение радиационного баланса представлено как:

$$Q_{s2,f} + \frac{Q_{w,f}}{2} + Q_{R,f} = Q_{\phi2,th}, \quad (3.21)$$

где $Q_{s2,f}$ – количество тепла, поглощаемое атмосферой из грунта основания и ЗП через откосную часть, Вт·ч; $Q_{\phi2,th}$ – количество тепла, отдаваемое грунтом основания и ЗП в атмосферу через откосную часть, Вт·ч; $Q_{R,f}$ – количество тепла, поступающее из грунта в длительно стоящие поверхностные воды и слой льда за холодный (зимний) период, Вт·ч.

Влияние образованного слоя льда в процессе промерзания ПДСВ вдоль откосов следует учитывать в рассматриваемой методике расчета как дополнительную теплоизолирующую прослойку.

Количество тепла, поглощаемое атмосферой из грунта основания и ЗП через откосную часть $Q_{s2,f}$ определяется как:

$$Q_{s2,f} = d_{f,2} \cdot L_v \cdot B_2 \cdot L, \quad (3.22)$$

где $d_{f,2}$ – глубина промерзания грунта ЗП и основания дороги при передаче тепла через откосную часть ЗП, м; рассчитывается аналогично выражению 3.19 с использованием средней зимней температуры на поверхности откосной части ЗП (T_{f2} , °С).

Согласно работе Горелика Я.Б. [41] промерзание толщи ПДСВ за холодный (зимний) период возможно не полностью. Не промерзшая толща воды в этом случае будет являться теплоизолирующей прослойкой, препятствующей промерзанию нижележащего грунта. Глубину непромерзшей толщи поверхностных вод на конец холодного (зимнего) периода возможно определить по теории Горелика Я.Б. [41].

Зная величину глубины непромерзшей толщи ПДСВ на конец холодного

(зимнего) периода можно определить количество тепла, поступающее из грунта в ПДСВ и ледяную прослойку за холодный (зимний) период аналогично выражению 3.16:

$$Q_{R,f} = (d_{f2} - d_{f3}) \cdot L_v \cdot B_4 \cdot L, \quad (3.23)$$

где d_{f3} – глубина промерзания грунта ЗП и основания дороги под слоем ПДСВ вдоль откосов, м; L_v – удельная теплота грунта при его промерзании-оттаивании, Вт·ч/м³; B_4 – размер участка влияния ПДСВ и льда на откос ЗП на конец холодного (зимнего) периода, м; L – элементарная длина, равная 1 п.м.

3.2. Сравнение результатов предлагаемой методики расчета с численным моделированием в программе QFrost

На следующем этапе рассматривались характерные особенности сложения грунтов в основании рассматриваемого участка дороги п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90, и на участках со схожими инженерно-геологическими условиями.

На рассматриваемом участке и на участках со схожими инженерно-геологическими условиями грунты основания представлены водонасыщенными и незасоленными (см. табл. 2.1, глава 2). Как правило, влажность таких грунтов превышает оптимальное значение. На основании этого допущения и предлагаемой методики расчета при равных температурных условиях был составлен график влияния фильтрующей прослойки толщиной 0,1 м и площадью поперечного сечения 0,1 м²/п.м на оттаивание-промерзание незасоленных песков, супесей, суглинков и глин разной плотности и влажности выше оптимальной (см. рис. 3.3). С целью учесть всевозможное многообразие водонасыщенных незасоленных песков, супесей, суглинков и глин в основании дороги было принято использовать теплофизические и физические характеристики указанных грунтов согласно [84]. Теплофизические и

физические характеристики грунтов согласно [84] представлены в таблицах 3.2-3.4.

Температурные условия брались по результатам замеров при выполнении инженерно-гидрометеорологических изысканий на объекте: «Строительство автомобильной дороги г. Сургут – г. Салехард, участок г. Новый Уренгой – г. Надым. 1 пусковой комплекс: п. Пангоды (км 870) – п. Правохеттинский (км 936). Корректировка». Среднемесячная температура воздуха представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Среднемесячная температура воздуха

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Температура воздуха, °С	-24,5	-24,0	-16,8	-8,8	-1,0	8,8
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Температура воздуха, °С	15,5	11,4	5,6	-5,4	-16,1	-21,9

Таблица 3.2

Теплофизические и физические характеристики водонасыщенных незасоленных песков

Характеристика грунта	1	2	3	4	5	6
λ_f , Вт/(м·°С)	2,09	2,48	2,50	2,92	2,75	3,05
λ_{th} , Вт/(м·°С)	1,57	1,91	2,15	2,50	2,26	2,67
C_f , кДж/(м ³ ·°С)	1643,38	1791,73	1878,15	2047,69	1922,19	2112,92
C_{th} , кДж/(м ³ ·°С)	2226,00	2520,00	2544,00	2880,00	2484,00	2862,00
L_v , МДж/м ³	78,12	93,74	89,28	107,14	78,61	100,44
ρ_d , кг/м ³	1400,00	1400,00	1600,00	1600,00	1800,00	1800,00
W_{tot} , д.ед.	0,20	0,25	0,20	0,25	0,15	0,20
T_{bf} , °С	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10

Таблица 3.3

Теплофизические и физические характеристики водонасыщенных незасоленных супесей

Характеристика грунта	1	2	3	4	5	6
λ_f , Вт/(м·°С)	1,84	1,98	2,00	1,78	2,00	2,05
λ_{th} , Вт/(м·°С)	1,57	1,74	1,80	1,62	1,80	1,86

C_f , кДж/(м ³ ·°С)	1931,59	2079,91	2228,23	2038,03	2207,53	2292,78
C_{th} , кДж/(м ³ ·°С)	2660,00	2954,00	3248,00	2704,00	3040,00	3042,00
L_v , МДж/м ³	93,74	108,17	121,52	89,28	107,14	100,44
ρ_d , кг/м ³	1400,00	1400,00	1400,00	1600,00	1600,00	1800,00
W_{tot} , д.ед.	0,25	0,30	0,35	0,20	0,25	0,20
T_{bf} , °С	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15

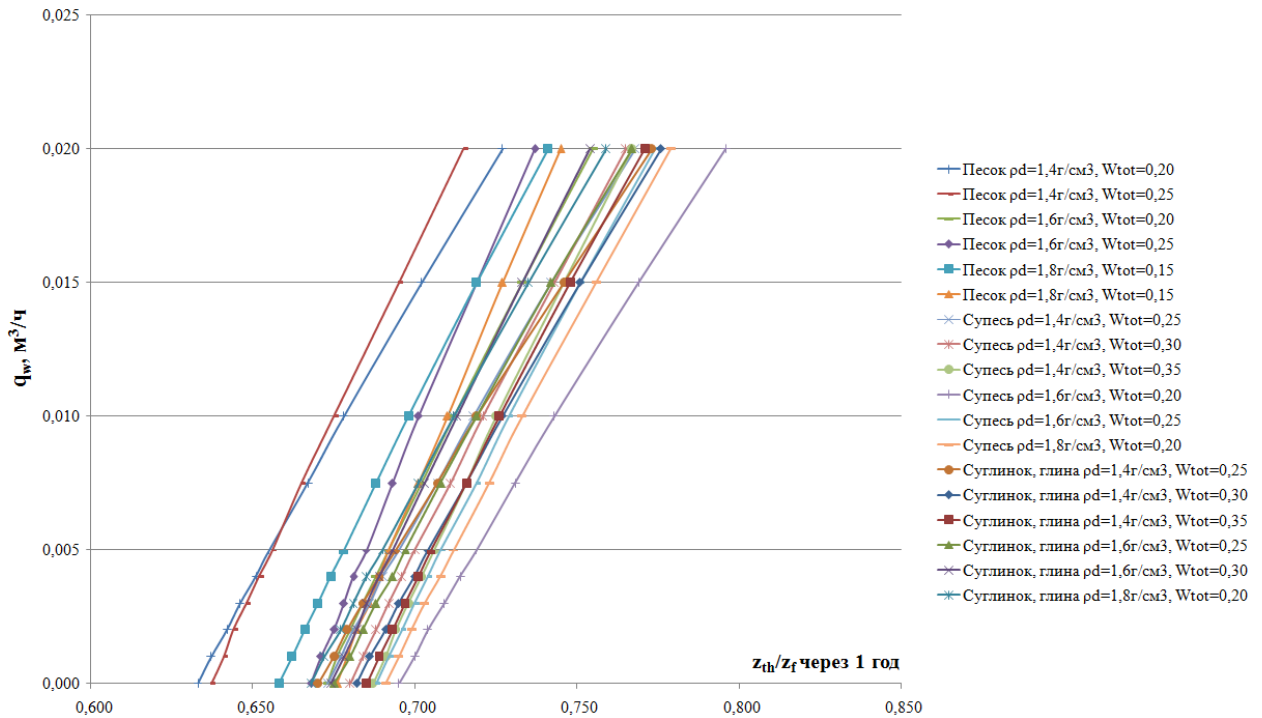
Таблица 3.4

Теплофизические и физические характеристики водонасыщенных
незасоленных суглинков и глин

Характеристика грунта	1	2	3	4	5	6
λ_f , Вт/(м·°С)	1,58	1,65	1,76	1,75	1,94	1,86
λ_{th} , Вт/(м·°С)	1,33	1,45	1,57	1,51	1,68	1,57
C_f , кДж/(м ³ ·°С)	2071,45	2219,74	2368,04	2367,38	2219,74	2472,64
C_{th} , кДж/(м ³ ·°С)	2800,00	3094,00	3388,00	3200,00	3094,00	3222,00
L_v , МДж/м ³	93,74	108,17	121,52	107,14	123,62	100,44
ρ_d , кг/м ³	1400,00	1400,00	1400,00	1600,00	1600,00	1800,00
W_{tot} , д.ед.	0,25	0,30	0,35	0,25	0,30	0,20
T_{bf} , °С	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20

С целью отразить общий характер влияния фильтрующей прослойки на глубину промерзания-оттаивания грунтов было предложено представить глубины оттаивания z_{th} и промерзания z_f этих грунтов в виде отношения z_{th}/z_f . Согласно представленному графику (рис. 3.3) значения отношений глубин оттаивания z_{th} и промерзания z_f рассматриваемых грунтов имеют высокую взаимную сходимость. Основываясь на данном заключении, было предложено привести теплофизические и физические характеристики рассматриваемых грунтов к общим средним значениям. Усреднение теплофизических и физических характеристик рассматриваемых грунтов позволяет повысить эффективность дальнейшего анализа влияния фильтрационной прослойки в теле ЗП на грунты основания автомобильной дороги в условиях многолетней мерзлоты. При использовании средних значений максимальная погрешность результатов расчета глубины оттаивания z_{th} и промерзания z_f составляет 5,4%.

Средние значения теплофизические и физические характеристики рассмотренных грунтов представлены в таблице 3.5.



q_w – расход воды при ее фильтрации через прослойку грунта толщиной 0,1 м и площадью поперечного сечения 0,1 м², м³/ч; z_{th} , z_f – глубина оттаивания и промерзания грунта соответственно, м

Рисунок 3.3 – Влияние фильтрующей прослойки площадью сечения 0,1 м²/п.м на оттаивание-промерзание водонасыщенных незасоленных песков, супесей, суглинков и глин

Таблица 3.5

Средние значения теплофизических и физических характеристик водонасыщенных незасоленных песков, супесей, суглинков и глин

λ_f , Вт/(м·°С)	λ_{th} , Вт/(м·°С)	C_f , кДж/(м ³ ·°С)	C_{th} , кДж/(м ³ ·°С)	L_v , МДж/м ³	ρ_d , кг/м ³	W_{tot} , д.ед.	T_{bf} , °С
2,11	1,81	1990,66	2800,01	104,16	1555,56	0,25	-0,15

Верификацию предлагаемой методики расчета было предложено провести в два этапа. На первом этапе было предложено провести сравнения результатов расчета предлагаемой методики и численного моделирования по определению глубины промерзания-оттаивания многолетнемерзлого основания при квазистационарном потоке тепла за счёт фильтрации воды через слой

уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» и при влиянии поверхностных длительно стоящих вод вдоль откосов ЗП.

Для выполнения численного моделирования теплового режима грунтов многолетнемерзлого основания использовалась программа QFrost, разработанная Песоцким Д.Г. на основе численной модели Хрусталева Л.Н. [48, 83, 93].

В качестве примера в программе моделировалось ЗП IV технической категории автомобильной дороги с шириной поверху $B_{ЗП}=10$ м, заложение откосов принято 1:3. Высота ЗП назначалась исходя из первого принципа проектирования дорог [40], при котором не допускается оттаивание грунтов основания в процессе эксплуатации дороги. Согласно [40] использовалось следующее условие:

$$h = h_K, \quad (3.24)$$

где h – высота насыпи, м; h_K – глубина сезонного оттаивания конструкции, включающей ЗП и дорожную одежду (д.о.), м.

В рассматриваемом примере не предусматривалось моделирование д.о. Глубина сезонного оттаивания конструкции h_K была рассчитана по формуле Стефана (уравнение 3.3) и составила 2,4 м. Соответственно высота ЗП была принята $H_{ЗП}=2,4$ м.

Основание было представлено в виде массива шириной $B_{осн}=40$ м и глубиной $H_{осн}=100$ м. Моделируемый грунт ЗП и основания дороги был принят однородным. Физические и теплофизические характеристики принятого грунта показаны в таблице 3.5. Значения теплофизических свойств моделируемого грунта ЗП и основания дороги соответствуют значениям теплофизических свойств грунтов, залегающих на рассмотренном участке автомобильной дороги *п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90.*

При моделировании граничных условий использовались температурные

данные из таблицы 3.1. В таблицах 3.6 и 3.7 представлены граничные условия для основной площадки и откосной части ЗП соответственно.

Таблица 3.6

Граничные условия для основной площадки ЗП

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Температура воздуха, °С	-24,50	-24,00	-16,80	-8,80	-1,00	14,72
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Температура воздуха, °С	22,41	17,56	7,09	-5,40	-16,10	-21,90

Таблица 3.7

Граничные условия для откосной части ЗП

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Температура воздуха, °С	-24,50	-24,00	-16,80	-8,80	-1,00	15,70
α , Вт/(м ² ·°С)	0,55	0,38	0,36	0,38	0,97	10,49
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Температура воздуха, °С	23,63	18,82	7,46	-5,40	-16,10	-21,90
α , Вт/(м ² ·°С)	9,53	8,57	9,77	2,05	0,76	0,50

При расчёте средней температуры дневной поверхности откоса для каждого теплого месяца экспозиция откоса принималась южной. Положение снега принято равномерно распределенным по откосной части. Высота снега принималась исходя из следующего выражения [41]:

$$H_{отк} = H_0 \left(1 + \frac{S_{осн}}{2S_{отк}} \right), \quad (3.25)$$

где $H_{отк}$ – высота снежного покрова на откосной части ЗП, м; H_0 – высота снежного покрова в естественных условиях, м; $S_{осн}$ – ширина основной площадки ЗП, м; $S_{отк}$ – длина откосной части ЗП, м.

Высота снежного покрова в естественных условиях принята согласно инженерно-гидрометеорологическим изысканиям на рассматриваемом объекте. Высота снежного покрова в естественных условиях представлена в таблице 3.8.

Таблица 3.8

Высота снежного покрова в естественных условиях

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Высота снежного покрова, м	0,55	0,64	0,69	0,67	0,26	-
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Высота снежного покрова, м	-	-	-	0,09	0,27	0,45

На откосной части ЗП и придорожных полосах было рассмотрено несколько вариантов возможных ситуационных явлений. В целях верификации было предложено 5 вариантов моделирования граничных условий на откосной части ЗП и придорожных полосах:

- отсутствие ПДСВ;
- моделирование ПДСВ глубиной $H_b=0,5$ м с конвективным перемешиванием;
- моделирование ПДСВ глубиной $H_b=0,5$ м без конвективного перемешивания;
- моделирование ПДСВ глубиной $H_b=1$ м с конвективным перемешиванием;
- моделирование ПДСВ глубиной $H_b=1$ м без конвективного перемешивания.

Моделируемые ПДСВ были представлены неглубокими незасоленными стационарными водоемами. Теплофизические характеристики ПДСВ приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9

Теплофизические характеристики ПДСВ

λ_f , Вт/(м·°С)	λ_{th} , Вт/(м·°С)	C_f , кДж/(м ³ ·°С)	C_{th} , кДж/(м ³ ·°С)	L_v , МДж/м ³	T_{bf} , °С
2,00	0,50	1930,00	4180,00	334,00	0,00

Результаты верификации предлагаемой методики с численным моделированием в программе QFrost показаны на рисунках 3.4-3.6.

Изменение глубины промерзания-оттаивания грунта под основной площадкой ЗП при воздействии фильтрационной прослойки остаётся постоянным при рассмотрении 5 предложенных вариантов. Отсутствие теплоизоляционных прослоек (снега) на поверхности основной площадки ЗП способствует поднятию кровли ММГ в основании дороги к подошве ЗП.

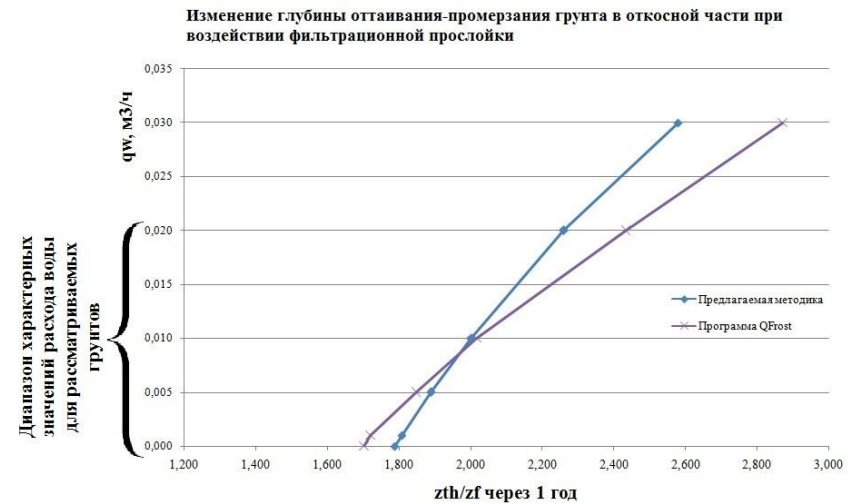
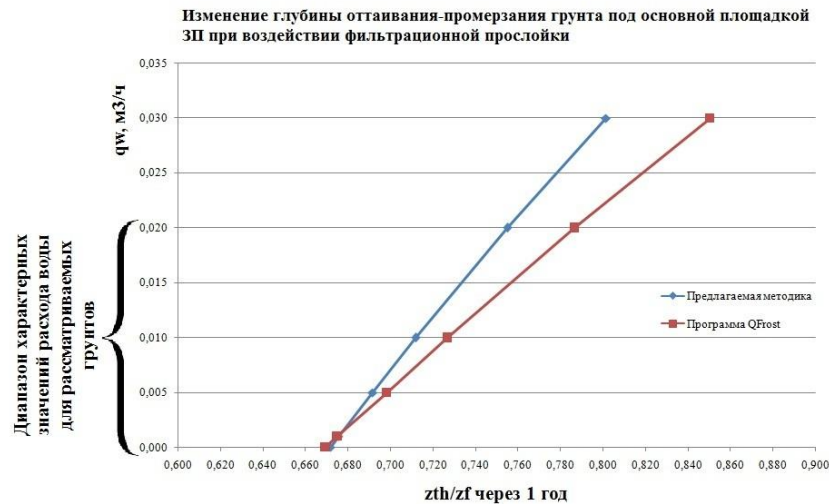
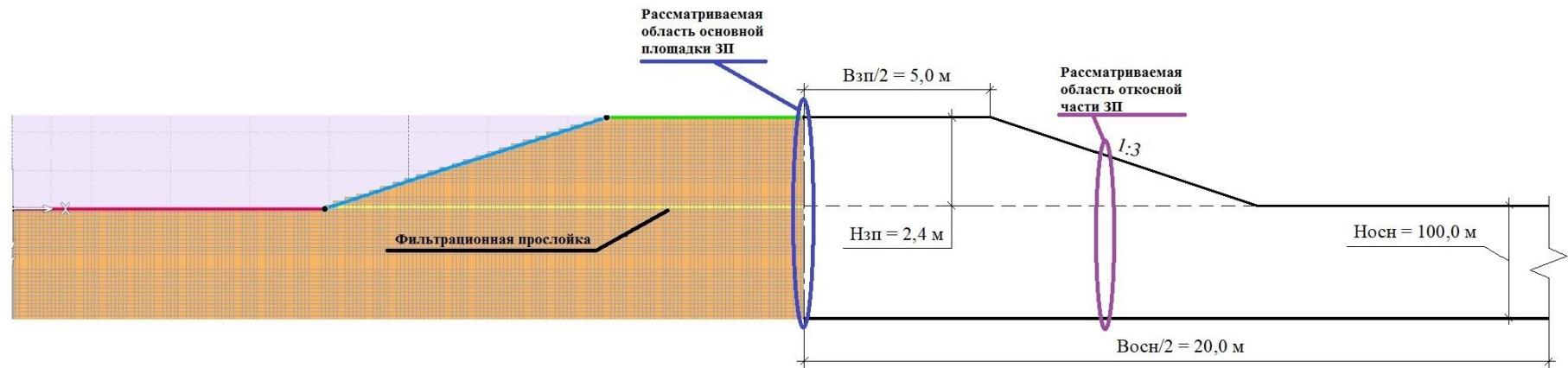


Рисунок 3.4 – Изменение глубины промерзания-оттаивания z_{th}/z_f грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при квазистационарном потоке тепла за счёт фильтрации воды Q_w через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» без учёта длительно стоящих вод H_w

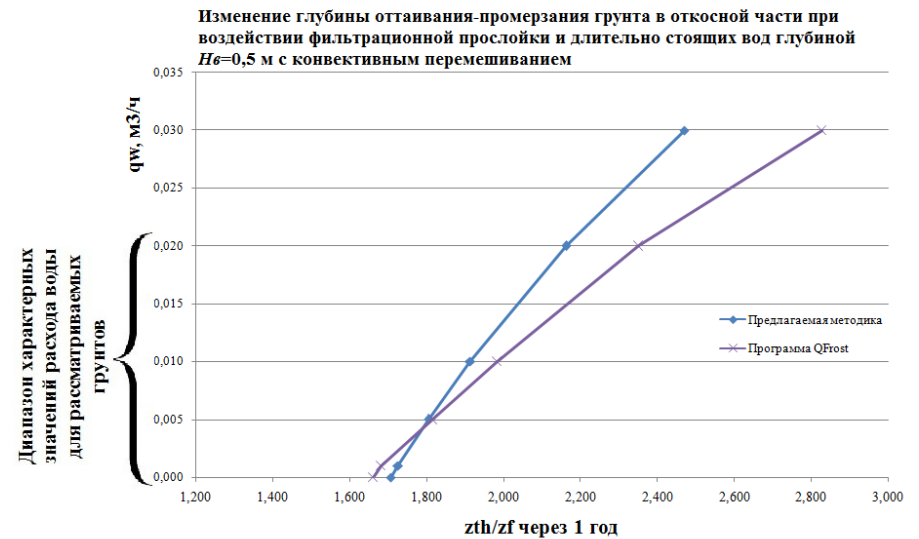
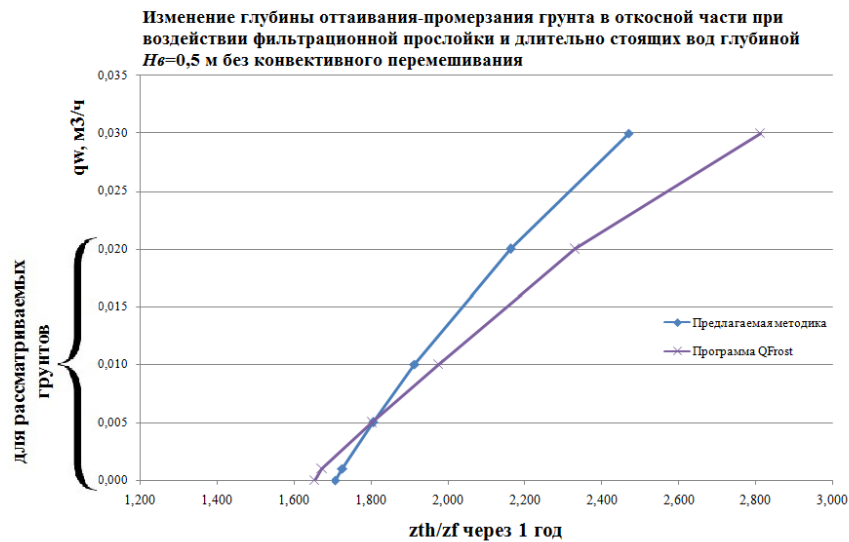
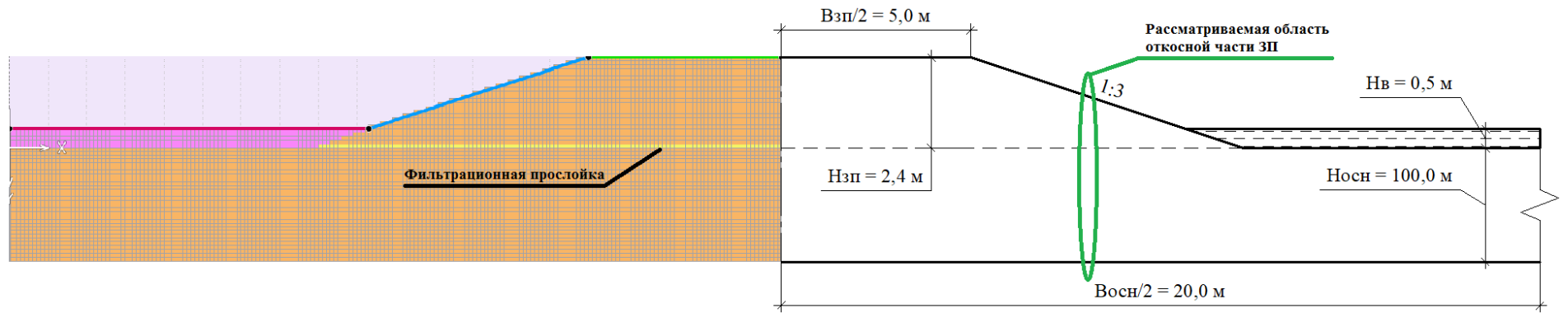


Рисунок 3.5 – Изменение глубины промерзания-оттаивания z_{th}/z_f грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при квазистационарном потоке тепла за счёт фильтрации воды Q_w через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» при влиянии длительно стоящих вод глубиной $H_b=0,5$ м без и с конвективным перемешиванием

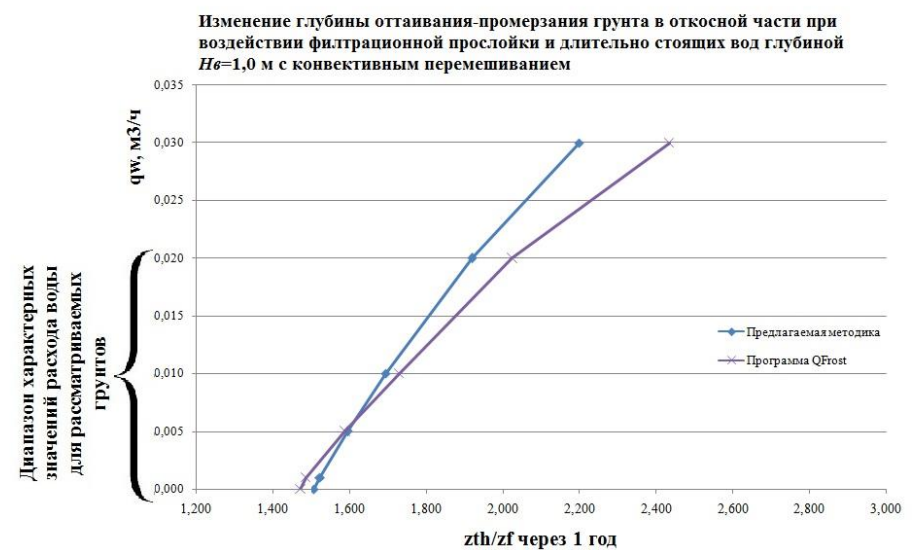
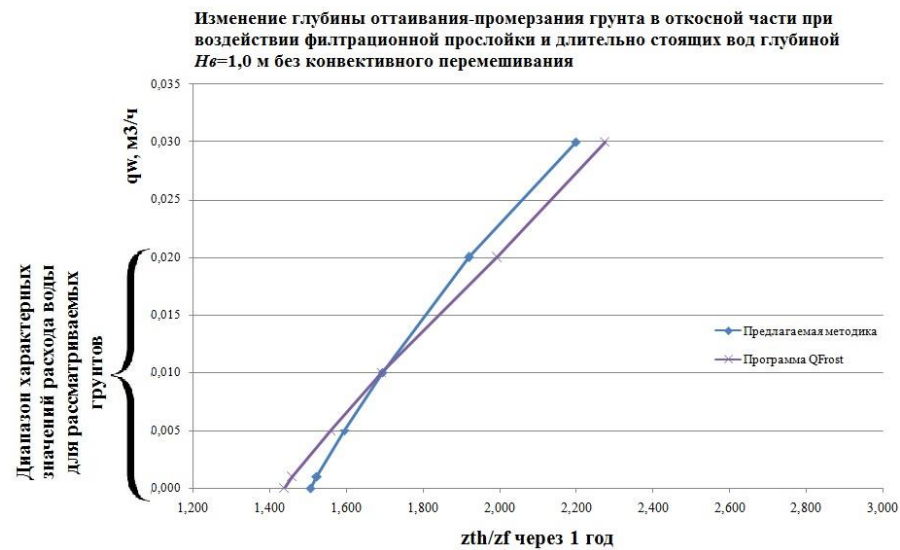
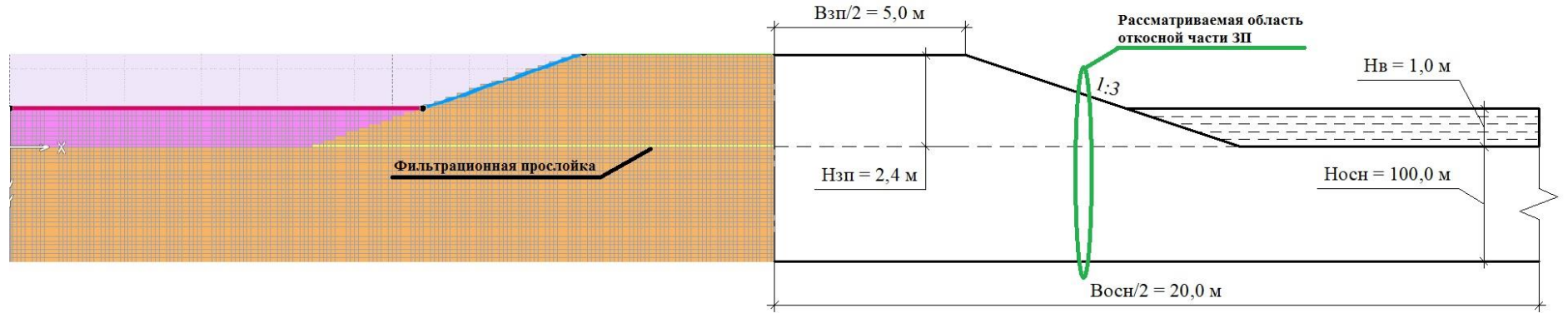


Рисунок 3.6 – Изменение глубины промерзания-оттаивания z_{th}/z_f грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при квазистационарном потоке тепла за счёт фильтрации воды Q_w через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» при влиянии длительно стоящих вод глубиной $H_v=1,0$ м без и с конвективным перемешиванием

Сопоставляя результаты расчета предлагаемой методики и численного моделирования, сформулированы следующие выводы:

1. Выполненные вычисления глубины промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при квазистационарном потоке тепла за счёт фильтрации воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» при влиянии ПДСВ по предлагаемой методике показали высокую сходимость с результатами численного моделирования, выполненного в программе QFrost.

2. Максимальная погрешность результатов вычисления по предлагаемой методике относительно численного моделирования в диапазоне характерных значений расхода воды через рассматриваемые (в толще) грунты составила 7,42%.

Предлагаемой методикой расчета возможно определить значения глубины промерзания-оттаивания грунта в откосной части ЗП при воздействии фильтрационной прослойки и ПДСВ в первый год эксплуатации автодороги. Для выполнения прогноза величин промерзания-оттаивания грунта на период эксплуатации автодороги предложено задаться критериями оценки температурной стабилизации грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги на расчетный период. Критерием оценки температурной стабилизации ЗП и основания автодороги предложено принять отношение глубины оттаивания к глубине промерзания. Если в середине подоткосной части ЗП выполняется условие $\frac{z_{th}}{z_f} \leq 1$, то процесс деградации ММГ отсутствует,

конструктивно-технологическое решение не требуется. В противном случае

$\frac{z_{th}}{z_f} > 1$, – процесс деградации ММГ присутствует необходимо разработать и

внедрить дополнительные стабилизационные мероприятия.

3.3. Верификация предлагаемой методики расчета с результатами мониторинга участка автомобильной дороги (п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90)

На втором этапе верификации было предложено сравнение данных мониторинга рассматриваемого ранее в диссертации участка автомобильной дороги (п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90) с результатами расчёта предлагаемой методики и численного моделирования указанного участка дороги.

Первоначально было проведено сравнение предлагаемой методики и численного моделирования участка автомобильной дороги (п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90) в программе QFrost на первый год эксплуатации.

В программе QFrost был замоделирован инженерно-геологический разрез поперек ЗП на участке п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК594+65 (см. рис. 3.7). Во второй главе диссертации на рисунке 2.8 представлен инженерно-геологический разрез поперек ЗП на участке п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК594+65. В таблице 3.10 показаны значения теплофизических свойств грунтов и строительных материалов представленных на рисунке 3.7. Теплофизические характеристики ПДСВ представлены в таблице 3.9. В таблице 3.11 представлены геометрические характеристики моделируемой автомобильной дороги. Геометрические характеристики ЗП и основания дороги принимались согласно инженерно-геологическому разрезу поперек ЗП на рассматриваемом участке дороги (см. рис. 2.8) Граничные условия для моделируемого разреза представлены в таблицах 3.12.



1 – асфальтобетон; 2 – щебень; 3 – грунт ЗП; 4 – песок средний, средней степени водонасыщения; 5 – песок мелкий насыщенный водой; 6 – торф влажный; 7 – торф пластичномерзлый, льдистый; 8 - поверхностные длительно стоящие воды без конвективного перемешивания

Рисунок 3.7 – Моделируемый в программе QFrost инженерно-геологический разрез поперек ЗП на участке п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК594+65

Таблица 3.10

Значения теплофизических свойств грунтов и строительных материалов

Показатель	Асфальтобетон	Щебень	Грунт ЗП (песок)	Песок средний, средней степени водонасыщения	Песок мелкий насыщенный водой	Торф влажный	Торф пластичномерзлый, льдистый
λ_f , Вт/(м·°С)	1,40	1,86	1,352	2,26	3,04	1,04	1,40
λ_{th} , Вт/(м·°С)	1,40	1,86	1,194	1,94	2,49	0,58	0,95
C_f , кДж/(м ³ ·°С)	2000,00	2000,00	1428,50	1776,60	2074,50	1257,10	2498,90
C_{th} , кДж/(м ³ ·°С)	2000,00	2000,00	1660,00	2342,40	2991,40	1831,20	4046,40
L_v , МДж/м ³	0,00	30,15	37,29	91,12	147,67	92,46	249,24
ρ_d , кг/м ³	2300,00	1500,00	1590,00	1600,00	1520,00	400,00	480,00
W_{tot} , д.ед.	0,02	0,06	0,07	0,17	0,29	0,16	1,55
T_{bf} , °С	0,00	-0,05	-0,10	-0,10	-0,10	-0,20	-0,35

Таблица 3.11

Геометрические характеристики моделируемой автомобильной дороги

Характеристика	Размер
$B_{ЗП}$ – ширина ЗП	10,00м
$H_{Нас}$ – высота насыпи	2,00м
$B_{Пч}$ – ширина проезжей части	8,00м
$B_{Об}$ – ширина обочины	1,00м
Заложение южного (правого) откоса	1:2,50
Заложение северного (левого) откоса	1:3,10

Граничные условия для поверхностей моделируемого разреза

Граничные условия для проезжей части						
Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Температура воздуха, °С	-24,50	-24,00	-16,80	-8,80	-1,00	17,44
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Температура воздуха, °С	26,35	21,54	10,24	-5,40	-16,10	-21,90
Граничные условия для обочин						
Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Температура воздуха, °С	-24,50	-24,00	-16,80	-8,80	-1,00	15,22
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Температура воздуха, °С	23,91	18,84	7,87	-5,40	-16,10	-21,90
Граничные условия для придорожных полос						
Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Температура воздуха, °С	-24,50	-24,00	-16,80	-8,80	-1,00	8,80
α , Вт/(м ² ·°С)	0,73	0,65	0,62	0,64	1,64	10,49
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Температура воздуха, °С	15,50	11,40	5,60	-5,40	-16,10	-21,90
α , Вт/(м ² ·°С)	9,53	8,57	9,77	3,47	1,29	0,85
Граничные условия для южного (правого) откоса ЗП						
Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Температура воздуха, °С	-24,50	-24,00	-16,80	-8,80	-1,00	15,70
α , Вт/(м ² ·°С)	0,36	0,32	0,30	0,31	0,80	10,49
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Температура воздуха, °С	23,63	18,82	7,46	-5,40	-16,10	-21,90
α , Вт/(м ² ·°С)	9,53	8,57	9,77	1,70	0,63	0,42
Граничные условия для северного (левого) откоса ЗП						
Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Температура воздуха, °С	-24,50	-24,00	-16,80	-8,80	-1,00	13,13
α , Вт/(м ² ·°С)	0,36	0,32	0,30	0,31	0,80	10,49
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Температура воздуха, °С	20,95	16,12	6,85	-5,40	-16,10	-21,90
α , Вт/(м ² ·°С)	9,53	8,57	9,77	1,70	0,63	0,42

На нижней границе рассматриваемого инженерно-геологического разреза моделировались граничные условия первого рода. Температура грунта на

нижней границе принималась равной $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. На боковых поверхностях рассматриваемого инженерно-геологического разреза моделировались граничные условия второго рода. На боковых поверхностях был задан нулевой тепловой поток.

Согласно данным натуральных наблюдений расход воды через тело ЗП составил $q_w=0,005\text{ м}^3/\text{ч}$, разница температур воды в начале и конце пути фильтрации – $\Delta T=2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тогда, пользуясь данными натуральных наблюдений, по формуле 3.12 возможно установить количество тепла выделяемого фильтрационной прослойкой, которое составило $11,61\text{ Вт}/\text{м}^3$.

Ширина северного (левого) и южного (правого) водоемов принимались равными $10,0\text{ м}$ поверху, глубина их составила $1,0\text{ м}$. Граничные условия для поверхности водоёма принимались идентично граничным условиям для придорожных полос. Однако, согласно статье Горелика Я.Б. [41], с момента начала теплого периода необходимо рассчитать количество времени для оттаивания водоема прежде, чем рассчитывать глубины протаивания донных отложений. Количество времени для оттаивания водоема $t_{th,w}$, ч определяется из следующего уравнения:

$$t_{th,w} = \frac{H_B \cdot L_w}{\alpha_{th} \cdot T_{th}}, \quad (3.26)$$

где L_w – объёмная теплота фазового перехода «лед-вода», $93000\text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$; H_B – глубина водоема, м; α_{th} – коэффициент теплообмена за тёплый (летний) период, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$; T_{th} – средняя летняя температура, $^{\circ}\text{C}$.

При использовании предлагаемой методики расчёта рассматривался многослойный массив грунта под южным (правым) откосом ЗП как наихудший по данным термометрического мониторинга. Под южным откосом ЗП наблюдалось оттаивание грунта глубиной до 3-ех метров на окончание теплого (летнего) периода согласно изысканиям рассматриваемого участка дороги (п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+900).

Для расчета глубины промерзания-оттаивания многослойного массива грунта использовалась методика, изложенная в работе Хрусталева Л.Н. [92]. При расчете также использовалось допущение о линейной зависимости промерзания-оттаивания от времени:

$$a_i = \frac{d_{th,f}(i)}{t_{th,f}}, \quad (3.27)$$

где a_i – коэффициент пропорциональности между глубиной промерзания-оттаивания в i -ом слое грунта, м/ч; $d_{th,f}(i)$ – глубина сезонного оттаивания или промерзания грунта i -ого слоя при его неограниченной мощности, м; $t_{th,f}$ – время теплого (летнего) или холодного (зимнего) периода, ч.

Время, затраченное на оттаивание или промерзание первого слоя грунта, будет составлять:

$$t_1 = \frac{h_1}{a_1} = h_1 \cdot \frac{t_{th,f}(1)}{d_{th,f}(1)}, \quad (3.28)$$

Время, затраченное на оттаивание или промерзание второго слоя грунта, будет составлять:

$$t_2 = \frac{h_2}{a_2} = h_2 \cdot \frac{t_{th,f}(2)}{d_{th,f}(2)}, \quad (3.29)$$

Время, оставшееся от теплого (летнего) или холодного (зимнего) периода на оттаивание или промерзание третьего слоя, определяется как разность:

$$t_3 = t_{th,f} - t_1 - t_2, \quad (3.30)$$

Тогда глубина оттаивания или промерзания трехслойного массива грунта будет равна:

$$d_{th,f} = h_1 + h_2 + a_3 \cdot t_3 = d_{th,f}(3) + h_1 \cdot \left(1 - \frac{d_{th,f}(3)}{d_{th,f}(1)}\right) + h_2 \cdot \left(1 - \frac{d_{th,f}(3)}{d_{th,f}(1)}\right), \quad (3.30)$$

В случае n слоев формула записывается следующим образом:

$$d_{th,f} = d_{th,f}(n) + \sum_{i=1}^{n-1} h_i \cdot \left(1 - \frac{d_{th,f}(n)}{d_{th,f}(i)}\right), \quad (3.31)$$

Пользуясь вышеописанной методикой расчета многослойного массива грунта и предлагаемой методикой расчета, определим глубины оттаивания и промерзания грунтов в южной (правой) откосной части ЗП при заданном инженерно-геологическом разрезе.

Для расчета глубины оттаивания грунтового массива в южной (правой) откосной части ЗП применим формулы 3.14-3.16.

Тогда

$$Q_{s2,th} = (h_{th1}L_{v1} + h_{th2}L_{v2}) \cdot B_2 \cdot L = (1,00 \cdot 10358,42 + 1,48 \cdot 25311,31) \cdot 1,00 \cdot 5,00 = \\ = 239095,79 \text{ Вт} \cdot \text{ч},$$

где h_{th} – оттаявшие слои грунта, м.

Индексы 1 и 2 обозначают характеристики и параметры грунта ЗП и грунта основания (песок средний, средней степени водонасыщения) соответственно.

Время для оттаивания грунта ЗП:

$$t_1 = h_{th1} \cdot \frac{t_{th}}{d_{th1}} = h_{th1} \cdot \frac{t_{th}}{\mu \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th1} \cdot (T_{th} - T_{bf1}) \cdot t_{th}}{L_{v1}}}}} = 1,00 \cdot \frac{2928,00}{3,36} = 871,69 \text{ ч}.$$

Время для оттаивания грунта основания (песок средний, средней степени водонасыщения):

$$t_2 = h_{th2} \cdot \frac{t_{th}}{d_{th2}} = h_{th2} \cdot \frac{t_{th}}{\mu \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th2} \cdot (T_{th} - T_{bf2}) \cdot t_{th}}{L_{v2}}}}} = 2,1 \cdot \frac{2928,00}{2,72} = 2261,42 \text{ ч}.$$

Так как $t_{th} < t_1 + t_2$, следовательно, оттаивание грунта на конец теплого (летнего) периода придется в слой рассматриваемого грунта основания.

Тогда:

$$h_{th2} = \mu \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th2} \cdot (T_{th} - T_{bf2}) \cdot t_{th}}{L_{v2}} + \left(\lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th1}}{\lambda_{th1}} \right)^2} - \lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th1}}{\lambda_{th1}} = 1,48 \text{ м}.$$

Глубина оттаивания многослойного массива грунта в рассматриваемой откосной части ЗП без учета влияния ПДСВ и фильтрационной прослойки составила $d_{th}=2,48$ м.

Количества тепла, передаваемого при фильтрации воды через тело ЗП Q_w в грунт основания автомобильной дороги в теплый (летний) период, рассчитаем как:

$$Q_{w,th} = q_w \cdot C_w \cdot (T_{w,1} - T_{w,2}) \cdot t_{th} = 33994,08 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Далее рассчитаем количество тепла, поступающее из атмосферы в длительно стоящие поверхностные воды, Q_R :

$$Q_{R,th} = \left[d_{th} - \mu \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th2} \cdot (T_{th} - T_{bf2}) \cdot t_{th}}{L_{v2}} + \left(\lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th3}}{\lambda_{th1}} + \lambda_{th2} \cdot \frac{h_{w,cp}}{\lambda_w} \right)^2} - \left(\lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th3}}{\lambda_{th1}} + \lambda_{th2} \cdot \frac{h_{w,cp}}{\lambda_w} \right) \right] \cdot L_{v2} \times \\ \times B_3 \cdot L = (2,48 - 1,52) \cdot 25311,31 \cdot 2,70 \cdot 1,00 = 65606,92 \text{ Вт} \cdot \text{ч},$$

где h_{th3} – слой грунта ЗП, расположенный под средней глубиной ПДСВ $h_{w,cp}$ вдоль рассматриваемого откоса при расчете за теплый (летний) период, $h_{th3}=0,5$ м.

Рассчитаем глубину оттаивания грунтового массива в южной (правой) откосной части ЗП с учетом влияния ПДСВ и фильтрационной прослойки:

$$Q_{s2,th} + \frac{Q_{w,th}}{2} - Q_R = Q_{\phi 2,f} = 239095,79 + \frac{33994,08}{2} - 60747,14 = 195345,69 \text{ Вт} \cdot \text{ч},$$

$$z_{th} = \frac{Q_{\phi 2,f}}{\left(\frac{h_{th1} L_{v1} + h_{th2} L_{v2}}{h_{th1} + h_{th2}} \right) \cdot l_{\phi}} = \frac{195345,69}{19281,92 \cdot 5,00} = 2,03 \text{ м}.$$

Аналогично находим глубину промерзания грунтового массива в южной (правой) откосной части ЗП, пользуясь формулами 3.21-3.22.

Тогда

$$Q_{s2,f} = (h_{f1} L_{v1} + h_{f2} L_{v2}) \cdot B_2 \cdot L = (1,00 \cdot 10358,42 + 1,31 \cdot 25311,31) \cdot 1,00 \cdot 5,00 = 217581,18 \text{ Вт} \cdot \text{ч},$$

где h_f – промерзшие слои грунта, м.

$$h_{f2} = \sqrt{\left(\lambda_{f2} \cdot \left(\frac{h_{f1}}{\lambda_{th1}} + R_d\right)\right)^2 - \frac{2 \cdot \lambda_{f2} \cdot (T_f - T_{bf2}) \cdot t_f}{L_{v2}} - \left(\lambda_{f2} \cdot \left(\frac{h_{f1}}{\lambda_{th1}} + R_d\right)\right)} = 1,31 \text{ м}$$

Количества тепла, передаваемого при фильтрации воды через тело ЗП Q_w в грунт основания автомобильной дороги в холодный (зимний) период, рассчитаем как:

$$Q_{w,f} = q_w \cdot C_w \cdot (T_{w,1} - T_{w,2}) \cdot t_f = 67709,52 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Рассчитаем глубину промерзания грунтового массива в южной (правой) откосной части ЗП с учетом влияния фильтрационной прослойки:

$$Q_{s2,f} + \frac{Q_{w,f}}{2} + Q_{R,f} = Q_{\phi 2,th} = 217581,18 - \frac{67709,52}{2} - 29007,40 = 154719,02 \text{ Вт} \cdot \text{ч},$$

$$z_{th} = \frac{Q_{\phi 2,th}}{\left(\frac{h_{f1} L_{v1} + h_{f2} L_{v2}}{h_{f1} + h_{f2}}\right) \cdot l_{\phi}} = \frac{154719,02}{18838,20 \cdot 5,00} = 1,64 \text{ м}.$$

На рассматриваемом участке дороги была замерена толщина непромерзших ПДСВ на конец холодного (зимнего) периода, которая составила 0,15 м. Следовательно, толщина льда составила 0,85 м.

На рисунке 3.8 представлены результаты численного моделирования в программе QFrost и предлагаемой методики расчета глубины промерзания-оттаивания грунтового массива южного (правого) откоса ЗП дороги на участке п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК594+65 на первый год эксплуатации.

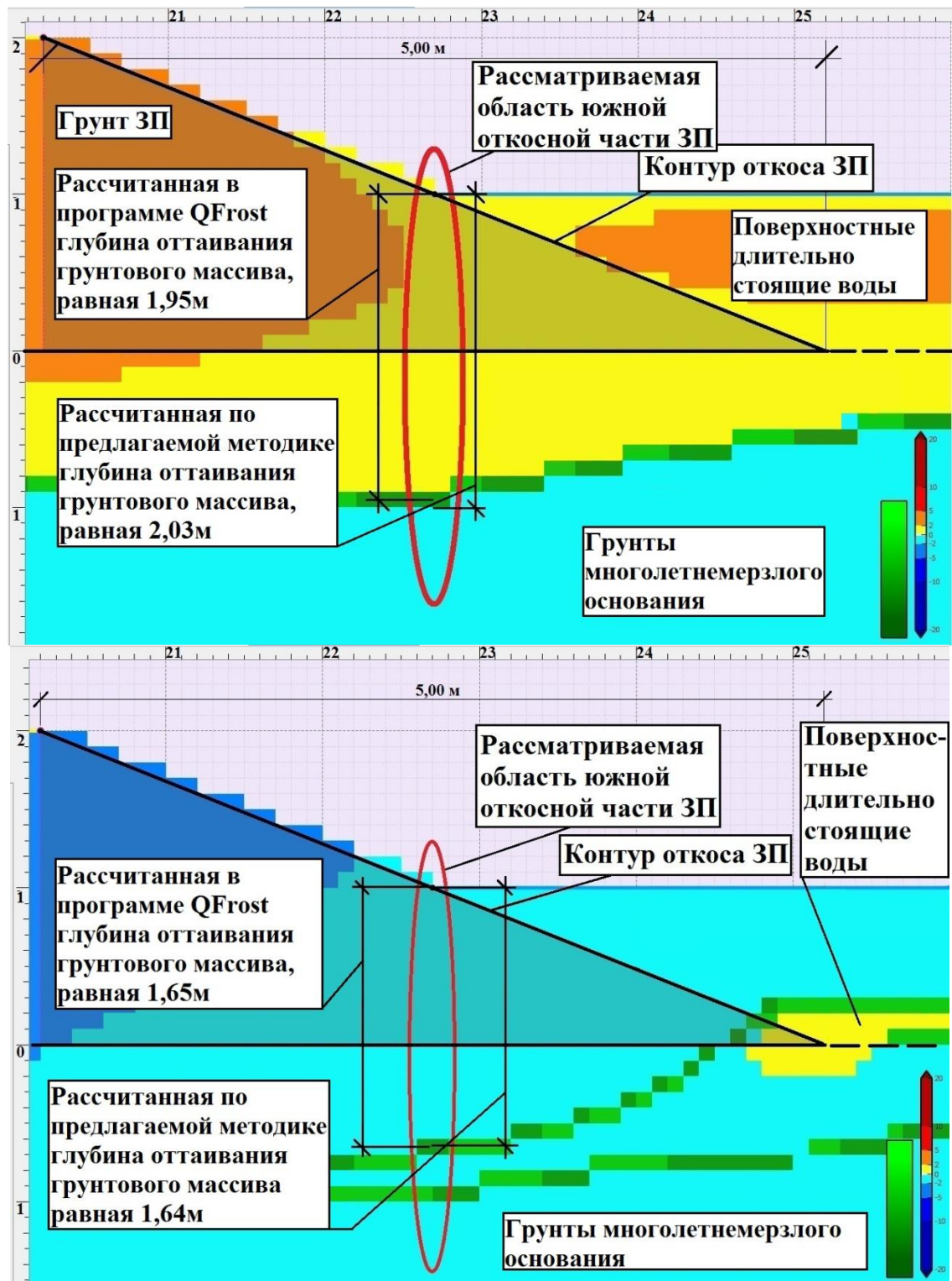


Рисунок 3.8 – Результаты численного моделирования в программе QFrost и предлагаемой методики расчета глубины промерзания-оттаивания грунтового массива южного (правого) откоса ЗП дороги на участке п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК594+65 на первый год эксплуатации

Сопоставляя результаты расчета предлагаемой методики и численного моделирования, сформулированы следующие выводы:

1. Выполненные вычисления глубины промерзания-оттаивания рассмотренного выше грунтового массива по предлагаемой методике показали высокую сходимость с результатами численного моделирования, выполненного в программе QFrost.

2. Погрешность результатов вычисления глубины оттаивания грунтового массива по предлагаемой методике относительно численного моделирования составила 4,10 %.

3. Погрешность результатов вычисления глубины промерзания грунтового массива по предлагаемой методике относительно численного моделирования составила 0,61%.

4. Критерий оценки назначения конструктивно-технологических решений с целью устранения деградации ММГ под откосной частью ЗП на период эксплуатации дороги по предлагаемой методике составил $\frac{z_{th,метод}}{z_{f,метод}} = \frac{2,03}{1,64} = 1,24 > 1$;

при численном моделировании – $\frac{z_{th,числ}}{z_{f,числ}} = \frac{1,95}{1,65} = 1,18 > 1$. Следовательно, требуется

применение стабилизационных мероприятий для предотвращения дальнейшего оттаивания многолетнемерзлого грунтового массива в откосной части ЗП.

Следующим шагом второго этапа верификации было предложено в программе QFrost на период 20 лет рассчитать температуры грунтов инженерно-геологического разреза поперек ЗП на участке п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК594+65 (см. рис. 3.7) и сравнить с данными замеров температуры массива грунтов в южной (правой) откосной части ЗП.

Данные замеров температур грунтов брались на первую декаду октября 2011 г. до проведения ремонтных работ (см. главу 2). Расчет на период 20 лет соответствовал сроку эксплуатации натурального экспериментального участка

автомобильной дороги и позволил сопоставить принятые критерии оценки температурной стабилизации ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги. На рисунке 3.9 представлено сопоставление результатов численного моделирования в программе QFrost и данных замера температуры массива грунтов в южной (правой) откосной части ЗП рассматриваемого участка дороги.

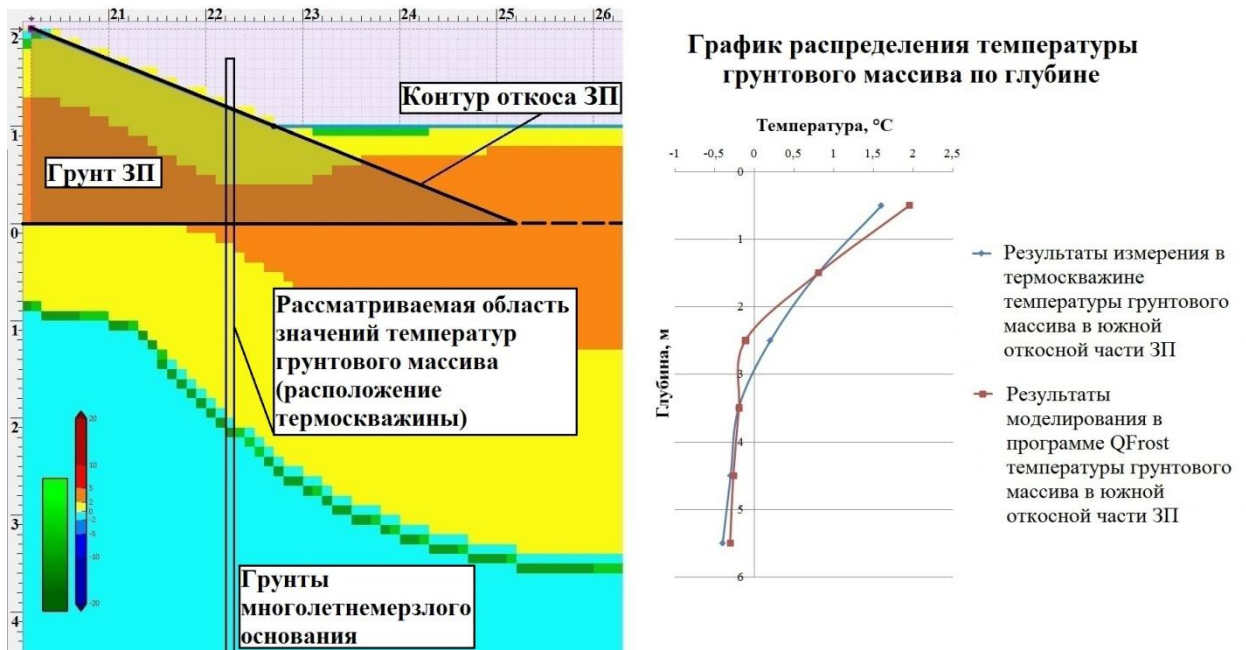


Рисунок 3.9 – Сопоставление результатов численного моделирования в программе QFrost и данных замера температуры массива грунтов в южной (правой) откосной части ЗП рассматриваемого участка дороги

На основании вышеприведенных данных сделаны следующие выводы:

1. Выполненные в программе QFrost вычисления температуры грунтов ЗП и основания рассматриваемого участка дороги показали высокую сходимость с данными замеров температуры массива грунтов в южной (правой) части ЗП.

Погрешность значения глубины оттаивания грунтового массива под серединой откосной части ЗП по результатам численного моделирования относительно экспериментально-лабораторных данных составила

2. Погрешность полученного значения глубины оттаивания грунтового массива под серединой южной (правой) откосной части ЗП относительно натуральных замеров составила 18,4%.

3. Критерий оценки назначения конструктивно-технологических решений с целью устранения деградации ММГ под откосной частью ЗП на период эксплуатации дороги, равный $\frac{z_{th, метод}}{z_{f, метод}} = \frac{2,02}{1,39} = 1,45 > 1$, корректно описал необходимость внедрения конструктивно-технологического решения в южной (правой) части ЗП рассматриваемого участка дороги.

3.4 Выводы по главе 3

1. Разработана методика расчета для прогноза процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ. Разработанной методикой определяются глубины промерзания-оттаивания многолетнемерзлого основания автомобильной дороги при квазистационарном потоке тепла с учетом фильтрации воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» и при влиянии ПДСВ вдоль откосов, с учетом влияния конструктивно-технологического решения.

2. Результаты расчета значений глубины промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при воздействии фильтрационной прослойки через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» по предлагаемой методике показали высокую сходимость с результатами численного моделирования, выполненного в программе QFrost, и данными мониторинга рассматриваемого участка дороги (п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90).

На первом этапе верификации максимальная погрешность результатов вычисления по предлагаемой методике относительно численного моделирования в диапазоне характерных значений расхода воды через

рассматриваемые (в толще) грунты составила 7,42 %.

На втором этапе верификации максимальная погрешность результатов вычисления по предлагаемой методике относительно численного моделирования рассматриваемого участка дороги (*п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90*) составила 4,74 %.

3. На основе разработанной методики предложены критерии оценки температурной стабилизации грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги. Полученные при расчете критерии оценки температурной стабилизации грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги корректно описывают процесс промерзания-оттаивания грунтов ЗП и основания на участке *п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК594+65*. Согласно натурным наблюдениям и результатам расчета по предлагаемой методике на данном участке требуется разработка и внедрение дополнительных стабилизационных мероприятий для предотвращения дальнейшего оттаивания грунтов основания в откосной части ЗП.

**ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЛИТЕЛЬНО
СТОЯЩИХ ВОД НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ С
ПРИМЕНЕНИЕМ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
РЕШЕНИЯ**

Для участков автомобильных дорог с вероятностным подтоплением вдоль откосов ЗП предложено конструктивно-технологическое решение (КТР) по устройству автомобильных дорог на ММГ, возведенных по первому принципу проектирования. В рассматриваемом конструктивно-технологическом решении предлагается расположить в подоткосной части насыпи в водонепроницаемых геоконтейнерах и в основании автомобильной дороги *гранулированный теплоизоляционный материал* (ГТМ) выше прогнозируемого уровня *поверхностных длительно стоящих вод* (ПДСВ). Предлагается разместить полуобойму из водонепроницаемого геосинтетического материала в теле насыпи и в основании автомобильной дороги для гидроизоляции ГТМ. С целью снижения влияния ПДСВ на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания в основании автомобильной дороги выполняются работы по устройству продольных траншей с дальнейшим вертикальным размещением в них водонепроницаемого геосинтетического материала и ГТМ. Предлагаемая схема КТР представлена на рисунке 4.1.

С целью определения геометрических параметров КТР были проведены теоретические исследования, представленные серией численных экспериментов.

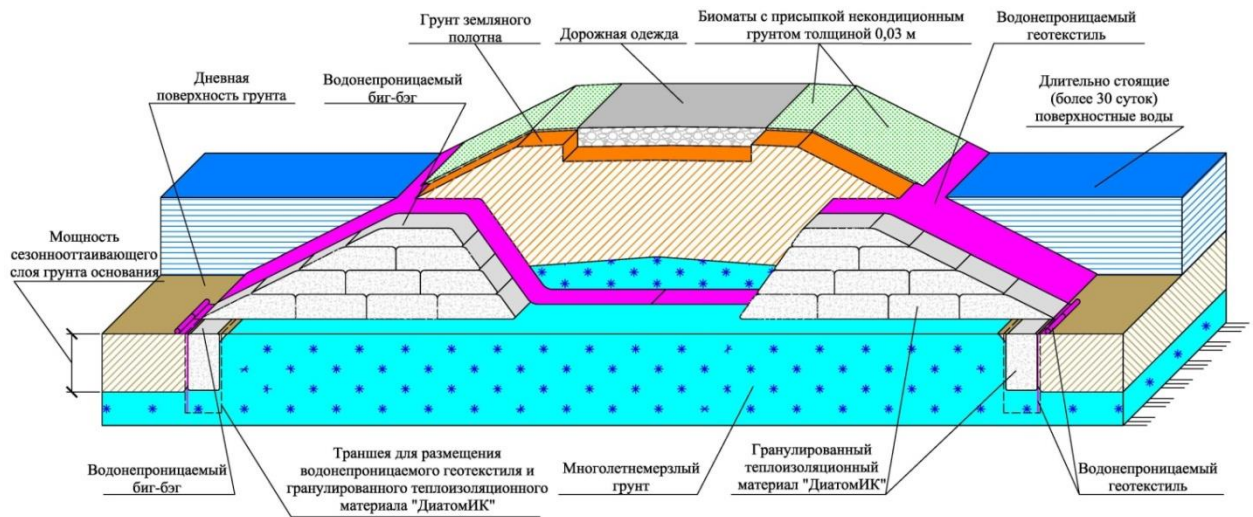
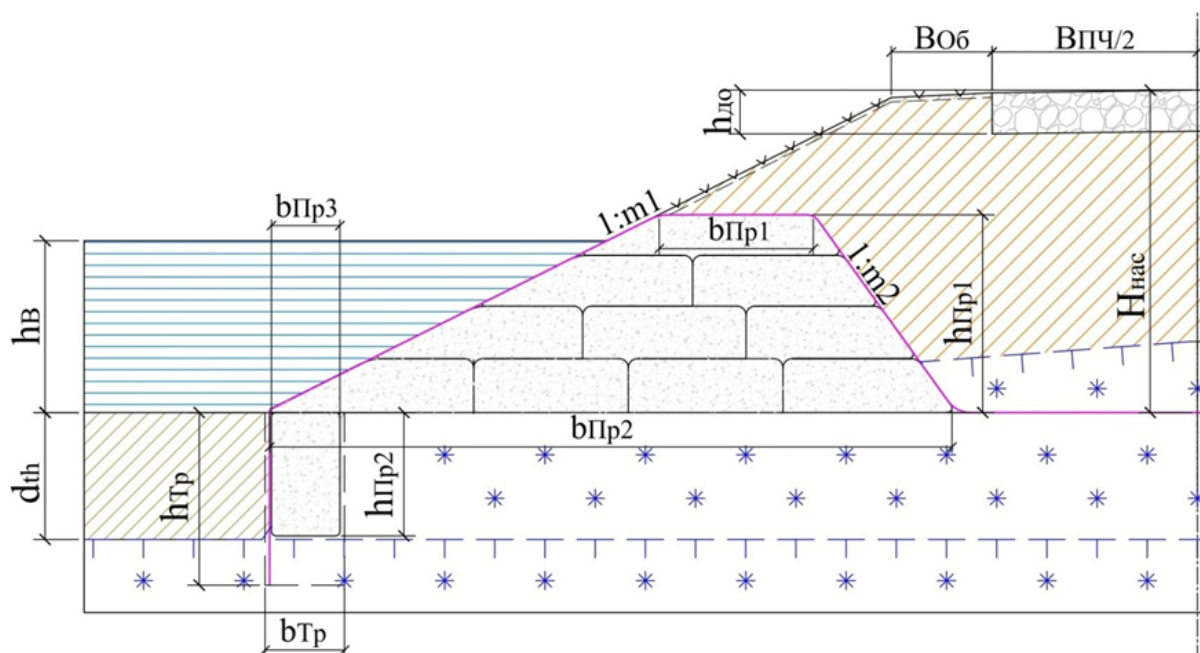


Рисунок 4.1 – Схема КТР конструкции автодороги на ММГ с подогреваемыми откосами вдоль ЗП

4.1. Теоретическое обоснование геометрических параметров предложенного конструктивно-технологического решения

На основании серии численных экспериментов были обоснованы геометрические параметры предлагаемого КТР. На рисунке 4.2 представлены геометрические параметры предлагаемого КТР. Серии численного моделирования температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги проводились в три этапа:

1. Моделирование грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с высотой насыпи $H_{\text{нас}}=1,00$ м; высотой слоя ПДСВ $h_{\text{в}}=0,50$ м.
2. Моделирование грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с высотой насыпи $H_{\text{нас}}=1,50$ м; высотой слоя ПДСВ $h_{\text{в}}=0,75$ м.
3. Моделирование грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с высотой насыпи $H_{\text{нас}}=2,00$ м; высотой слоя ПДСВ $h_{\text{в}}=1,00$ м.



$B_{пч}$ – ширина проезжей части; $B_{об}$ – ширина обочины; $b_{пр1}$, $b_{пр2}$ – ширина верхнего и нижнего основания теплоизоляционной призмы в теле насыпи соответственно; $b_{пр3}$ – ширина теплоизоляционной призмы в основании; $b_{тр}$ – ширина траншеи; $H_{нас}$ – высота насыпи; $h_{пр1}$ – высота теплоизоляционной призмы в теле насыпи; $h_{пр2}$ – высота теплоизоляционной призмы в основании; $h_{до}$ – толщина дорожной одежды; $h_{в}$ – высота длительно стоящих (более 30 суток) поверхностных вод; $h_{тр}$ – глубина траншеи; $d_{ит}$ – мощность сезоннооттаивающего слоя грунта основания; $1:m_1$ – заложение откоса насыпи; $1:m_2$ – заложение откоса теплоизоляционной призмы в теле насыпи

Рисунок 4.2. – Геометрические параметры предлагаемого КТР

В качестве вариативных геометрических параметров рассматривались: $B_{пч}$; $B_{об}$; $b_{пр1}$; $b_{пр2}$; $b_{пр3}$; $h_{пр1}$; $1:m_1$; $1:m_2$. Границы вариативных параметров принимались для $B_{пч}=7,00\div 6,00$ м; $B_{об}=5,00\div 4,00$; $b_{пр1}=0,50\div 2,00$ м; $b_{пр2}=2,30\div 7,50$ м; $b_{пр3}=0,20\div 0,60$ м; $h_{пр1}=0,60\div 1,10$ м; $1:m_1=1:2\div 1:3$; $1:m_2=1:1\div 1:3$.

На каждом этапе обоснования геометрических параметров предлагаемого КТР грунтовое основание было представлено грунтами, сложенными под южным откосом рассматриваемого участка дороги п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК594+65. Теплофизические характеристики грунтов ЗП и основания, щебня и асфальтобетона для каждого этапа эксперимента были приняты согласно таблице 3.10. Теплофизические характеристики ПДСВ принимались согласно таблице 3.9. В качестве примера на рисунке 4.3. представлен принятый для первого этапа моделируемый в

программе QFrost инженерно-геологический разрез поперек ЗП без КТР.

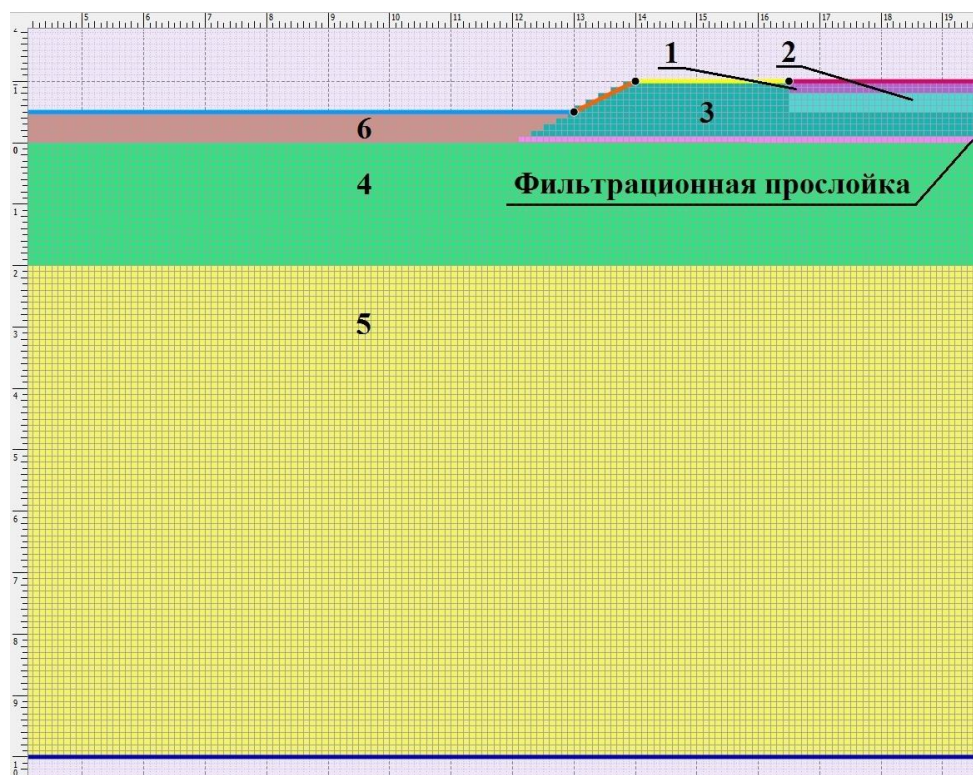
Граничные условия для проезжей части, обочин, придорожных полос принимались согласно таблицам 3.12. Граничные условия для откосной части ЗП с высотой насыпи $H_{\text{нас}}=1,00; 1,50; 2,00$ м представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Граничные условия для откосной части ЗП с высотой насыпи $H_{\text{нас}}=1,00; 1,50; 2,00$ м

Температура воздуха для случаев с высотой насыпи $H_{\text{нас}}=1,00; 1,50; 2,00$ м						
Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Температура воздуха, °С	-24,50	-24,00	-16,80	-8,80	-1,00	15,70
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Температура воздуха, °С	23,63	18,82	7,46	-5,40	-16,10	-21,90
Коэффициент теплоотдачи α для откосной части ЗП с высотой насыпи $H_{\text{нас}}=1,00$ м						
Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
α , Вт/(м ² ·°С)	0,46	0,52	0,45	0,45	0,88	10,49
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
α , Вт/(м ² ·°С)	9,53	8,57	9,77	1,70	0,63	0,58
Коэффициент теплоотдачи α для откосной части ЗП с высотой насыпи $H_{\text{нас}}=1,50$ м						
Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
α , Вт/(м ² ·°С)	0,42	0,40	0,36	0,37	0,84	10,49
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
α , Вт/(м ² ·°С)	9,53	8,57	9,77	1,70	0,63	0,45
Коэффициент теплоотдачи α для откосной части ЗП с высотой насыпи $H_{\text{нас}}=2,00$ м						
Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
α , Вт/(м ² ·°С)	0,36	0,32	0,30	0,31	0,80	10,49
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
α , Вт/(м ² ·°С)	9,53	8,57	9,77	1,70	0,63	0,42

Для каждого этапа на нижней границе принятого инженерно-геологического разреза моделировались граничные условия первого рода. Температура грунта на нижней границе принималась равной $-0,6$ °С. На боковых поверхностях принятого инженерно-геологического разреза моделировались граничные условия второго рода. На боковых поверхностях был задан нулевой тепловой поток.



1 – асфальтобетон; 2 – щебень; 3 – грунт ЗП; 4 – песок средний, средней степени водонасыщения; 5 – песок мелкий насыщенный водой; 6 – поверхностные длительно стоящие воды без конвективного перемешивания

Рисунок 4.3 – Моделируемый в программе QFrost инженерно-геологический разрез поперек ЗП без КТР для первого этапа

Количество тепла выделяемого фильтрационной прослойкой принималось $11,61 \text{ Вт/м}^3$ согласно натурным наблюдениям рассматриваемого участка дороги. При моделировании конструктивно технологического решения моделировался ГТМ с теплофизическими характеристиками $\lambda=0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, $C=575,0 \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{°C)}$.

С целью оценки влияния на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при назначении геометрических параметров КТР была выбрана характерная точка в геотехнической системе «ЗП-основание» автомобильной дороги. По результатам численных экспериментов характерной точкой отражающей температурный режим многолетнемерзлого основания является точка, расположенная в основании насыпи под бровкой ЗП, которая отражает температурный режим верхней границы ММГ. На каждом этапе численного моделирования фиксировалась температура в характерной

точке.

На рисунке 4.4 представлены графики изменения параметров $b_{\text{Пр1}}$ и $b_{\text{Пр2}}$ в зависимости от температуры грунта в характерной точке измерения для 1-ого года эксплуатации автодороги на конец теплого периода при высотах насыпей $H_{\text{нас}}=1,00; 1,50; 2,00$ м и заложении внутреннего откоса теплоизоляционной призмы 1:1; 1:2; 1:3.

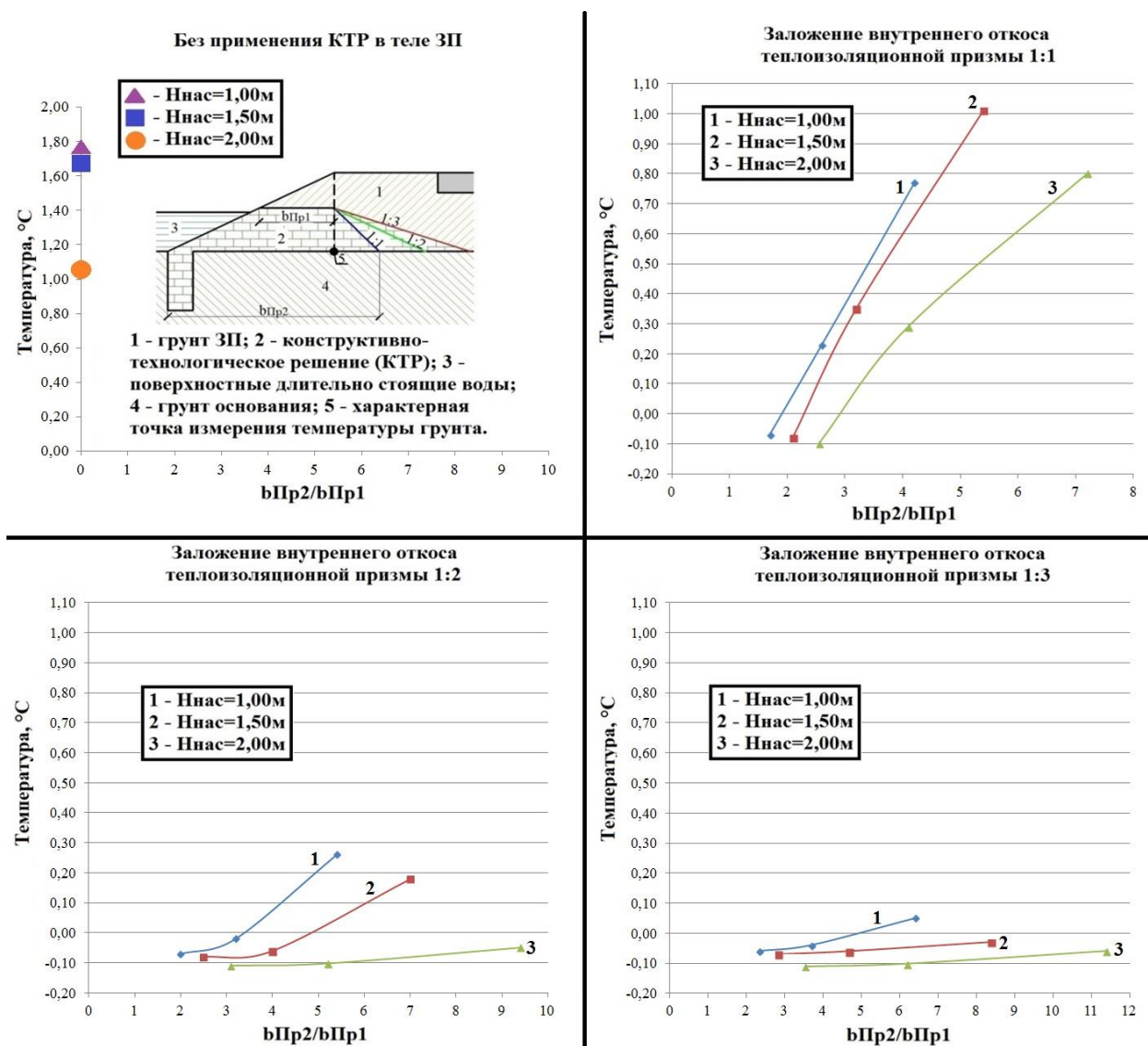


Рисунок 4.4 – Изменение параметров $b_{\text{Пр1}}$ и $b_{\text{Пр2}}$ в зависимости от температуры грунта в характерной точке измерения для 1-ого года эксплуатации автодороги на конец теплого периода при высотах насыпей $H_{\text{нас}}=1,00; 1,50; 2,00$ м и заложении внутреннего откоса теплоизоляционной призмы 1:1; 1:2; 1:3

По результатам численных экспериментов установлено:

1. Снеговые отложения и ПДСВ способствуют повышению температуры грунтов многолетнемерзлого основания под всей шириной откосной части ЗП. Проезжая часть и обочины очищаются от снежных отложений, что способствует понижению температуры грунтов многолетнемерзлого основания, следовательно, изменение ширины проезжей части и обочин не влияют на назначение геометрических параметров КТР.

2. Минимальная ширина траншеи позволяющая исключить влияние ПДСВ на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания составляет не менее 0,20 м при использовании ГТМ с теплофизическими характеристиками $\lambda=0,1$ Вт/(м·°С), $C=576,0$ кДж/(м³·°С). При реализации КТР ширину траншеи следует принимать минимальной ширине ковша экскаватора.

3. Заложение внешних откосов теплоизоляционной призмы в теле насыпи соответствует заложению откосов ЗП, что обусловлено снижением трудозатрат при возведении КТР.

4. Для исключения проникновения фильтрационного и теплового потока в многолетнемерзлое основание ЗП минимальная глубина траншеи принимается равной глубине сезоннооттаивающего слоя грунта основания, для обеспечения заземления водонепроницаемого геосинтетического материала в верхней кровле многолетнемерзлого основания.

5. Высота теплоизоляционной призмы в теле насыпи назначается выше уровня ПДСВ вдоль откосов ЗП на 0,10 м.

6. Заложение внутренних откосов теплоизоляционной призмы в теле насыпи 1:2 в сравнении с заложением 1:1 приводит к снижению расхода теплоизоляционного материала на 18÷22% при сохранении отрицательного значения температуры в характерной точке в течение первого года эксплуатации автомобильной дороги. Заложение внутренних откосов теплоизоляционной призмы в теле насыпи 1:3 в сравнении с заложением 1:2 приводит к увеличению расхода строительных материалов при максимальном снижении температуры в характерной точке на 0,20 °С. Заложение внутренних

откосов теплоизоляционной призмы в теле насыпи следует принимать равным 1:2.

Для подтверждения найденных зависимостей в лабораторных условиях на маломасштабных моделях были проведены эксперименты по изучению температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с учётом и без влияния ПДСВ. При проведении экспериментальных исследований на маломасштабных моделях учитывался геометрический и временной масштабный фактор. Согласно условию 4.1 для выполнения маломасштабных экспериментов был принят геометрический масштаб M_{Γ} 1:30, временной масштаб $M_{\text{В}}$ 1:900 соответственно к размерам и времени моделируемого натурального объекта.

$$\frac{1}{M_{\Gamma}^2} = \frac{1}{M_{\text{В}}} \quad (4.1)$$

4.2. Лабораторное оборудование для проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях

Маломасштабная модель (стенд), в которой проводились эксперименты по изучению температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с учётом и без влияния ПДСВ, помещалась в холодильное промышленное оборудование – сплит-система POLAIR (см. рис. 4.5). Диапазон задаваемых температур внутри холодильного оборудования варьируется от -18°C до $+10^{\circ}\text{C}$ при условии, что температура и влажность окружающей среды находятся соответственно в диапазонах от $+10^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$ и от 40% до 80%.

С целью отслеживания изменения температурного режима воздуха и грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с учётом и без влияния ПДСВ на маломасштабном экспериментальном стенде применялся многоканальный температурный измеритель ИТ-2-48 (см. рис. 4.6), способный измерять также теплопроводность материалов. Последняя цифра в маркировке температурного измерителя ИТ-2-48 обозначает какое наибольшее количество каналов может

быть использовано для измерений. К измерителю подключались термопары типа L, изготовленные из сплавов хромеля и копеля (см. рис. 4.7). Измеряемый температурный диапазон используемых термопар варьируется от -40°C до $+600^{\circ}\text{C}$. Точность измерения термопар составляет $0,01^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 4.5 – Сплит-система POLAIR



Рисунок 4.6 – Многоканальный измеритель температуры и теплопроводности ИТ-2-48

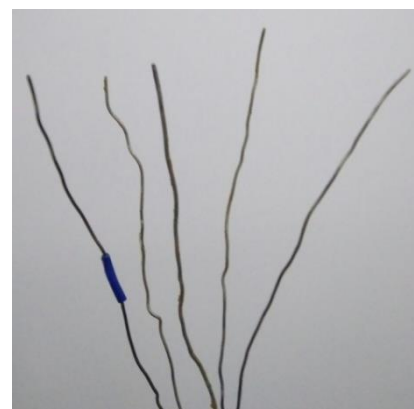


Рисунок 4.7 – Термопары

Для передачи данных с термоэлектрических преобразователей на многоканальный измеритель теплопроводности ИТ-2-48 использовался контролер, представленный на рисунке 4.8. Измеритель теплопроводности подключался к персональному компьютеру, на который каждые 60 секунд в

автоматическом режиме передавались данные температуры грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания.



Рисунок 4.8 – Контролер для передачи данных с термоэлектрических преобразователей на многоканальный измеритель теплопроводности ИТ-2-48

Для соблюдения заданной влажности грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания применялся ГОСТ 5180-2015 [43] с применением сушильного шкафа ШС-0, 25-20, изготовленного научно-производственным предприятием «Теплоприбор» (см. рис. 4.9). Диапазон задаваемых температур внутри сушильного шкафа варьируется от $+50^{\circ}\text{C}$ до $+250^{\circ}\text{C}$, по методике определения влажности грунтов по ГОСТ 5180-2015 принимается $+105^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 4.9 – Сушильный шкаф ШС-0, 25-20

4.3. Экспериментальное моделирование в лабораторных условиях температурного режима грунтов земляного полотна и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги

В лаборатории мерзловедения «Строительство на вечной мерзлоте»

Тюменского индустриального университета на маломасштабных моделях (стендах) проводились в три этапа серии экспериментов температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги:

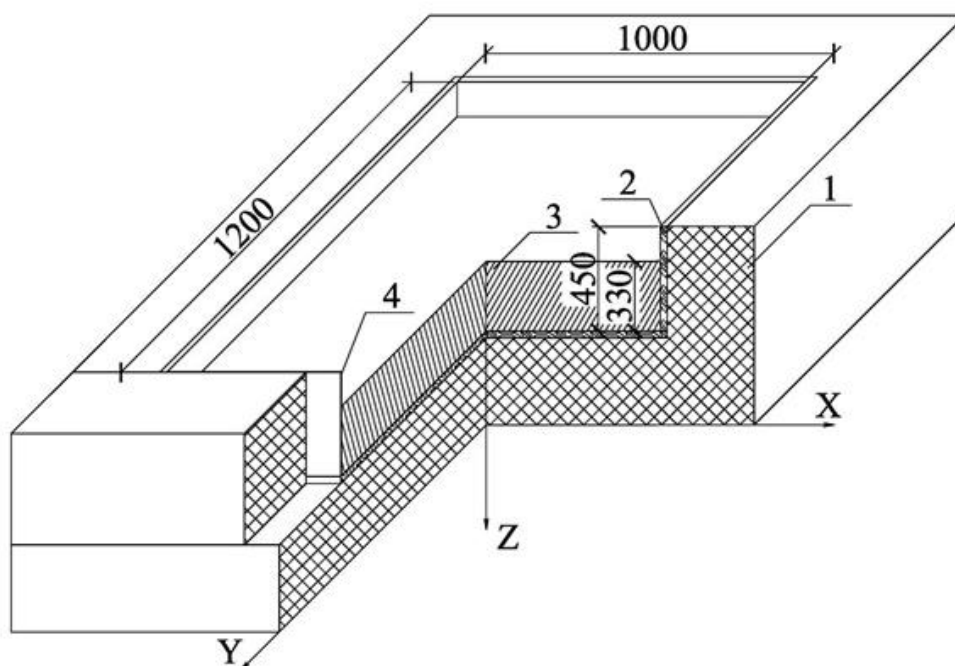
1. Моделирование грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания без подтока воды и имитации снеговых отложений (в закрытой системе);

2. Моделирование грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с подтопляемыми откосами вдоль ЗП и имитацией снеговых отложений;

3. Моделирование грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с подтопляемыми откосами вдоль ЗП, имитацией снеговых отложений и предложенным конструктивно-технологическим решением.

Схема маломасштабной модели представлена рисунке 4.10. На рисунке 4.11 и 4.12 приведен общий вид маломасштабной модели в разные периоды проведения экспериментальных исследований.

Маломасштабная модель выполнена как закрытая система в виде лотка. Высота модели составила 450мм, ширина и длина – соответственно 1000мм и 1200мм. Стенки и дно модели выполнены из древесины толщиной 25мм. Для отслеживания температурных изменений грунтового массива, помещенного в модель, в торцевой стенке было дополнительно устроено органическое стекло. Толщина оргстекла составила 3мм. С целью исключить теплопотери через боковые стенки и дно был оклеен утеплитель пенополистирол ППС-10 под дном и внешнему периметру модели. Толщина утеплителя составляла 250мм, теплопроводность – $\lambda = 0,037 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. Для гидроизоляции по всей площади внутреннего пространства лотка была уложена гидроизоляция в два слоя полиэтиленовой пленкой.



1 – утеплитель ППС-10 толщиной 250мм; 2 – деревянный каркас стенда толщиной 25мм; 3 – однородный грунт основания автомобильной дороги; 4 – органическое стекло толщиной 3мм

Рисунок 4.10 – Схема маломасштабной модели для проведения экспериментов по изучению температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с учётом и без влияния ПДСВ

С целью установления температурного динамического равновесия моделируемого климата и грунта основания для каждого этапа экспериментальных исследований первоначально проводилось в закрытой системе попеременное промерзание-оттаивание грунтового основания. Для моделирования грунтового основания в маломасштабную модель был уложен суглинок нарушенной структуры мощностью 330мм.

На каждом этапе эксперимента первоначально моделировалось промерзание-оттаивание грунта основания автомобильной дороги в закрытой системе с целью калибровки начальных условий моделируемого климата и формирования деятельного слоя грунта основания. Основание было представлено суглинком, структура которого была нарушена. Основание устраивалось мощностью 330мм в модели послойно с уплотнением и дальнейшей консолидацией грунта.

В качестве основания использовался суглинок нарушенной структуры. Суглинок послойно с уплотнением укладывался в лоток мощностью 330 мм. В таблице 4.2 приведены теплофизические и физические характеристики суглинка для трех этапов моделирования.



Рисунок 4.11 – Общий вид маломасштабной модели до проведения экспериментов

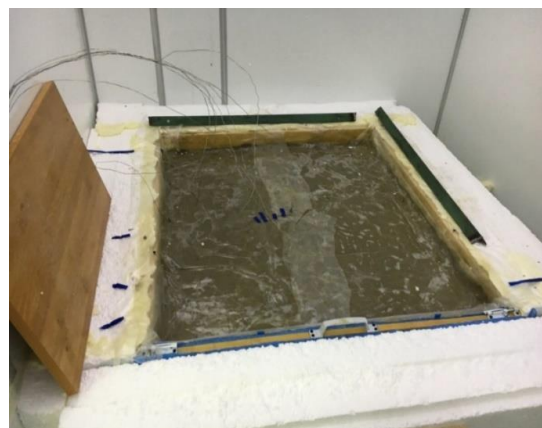


Рисунок 4.12 – Общий вид маломасштабной модели во время проведения эксперимента (моделирование многолетнемерзлого основания)

Таблица 4.2

Физические и теплофизические характеристики грунта моделируемого основания на разных этапах

Наименование	Значение для трех этапов моделирования
Средняя плотность сухого грунта ρ_d , кг/м ³	1508,00
Суммарная влажность мерзлого грунта W_{tot} , д.е.	0,30
Теплопроводность грунта в мерзлом состоянии λ_f , Вт/(м*°С)	1,65
Теплопроводность грунта в талом состоянии λ_{th} , Вт/(м*°С)	1,45
Объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии C_f , кДж/(м ³ *°С)	2805,60
Объемная теплоемкость грунта в талом состоянии C_{th} , кДж/(м ³ *°С)	3332,70
Теплота таяния (замерзания) грунта L_v , МДж/м ³	116,510
Температура начала замерзания грунта T_{bf} , °С	-0,20

Для моделирования температурных условий использовались такие же данные, что и при сравнении результатов предлагаемой методики расчета с численным моделированием в программе QFrost (см. табл. 3.1). В таблице 4.3 дополнительно продублирована среднемесячная температура воздуха, моделируемая в экспериментах.

Среднемесячная температура воздуха

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Температура воздуха, °С	-24,5	-24,0	-16,8	-8,8	-1,0	8,8
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Температура воздуха, °С	15,5	11,4	5,6	-5,4	-16,1	-21,9

При моделировании температурных условий на каждом этапе эксперимента был осуществлен переход от нестационарного температурного режима к квазистационарному с принятием в расчете средних по многолетним данным температуры воздуха за период отрицательных и положительных температур: соответственно $T_{f,m} = -14,8$ °С и $T_{th,m} = +10,0$ °С (при учете радиационной составляющей).

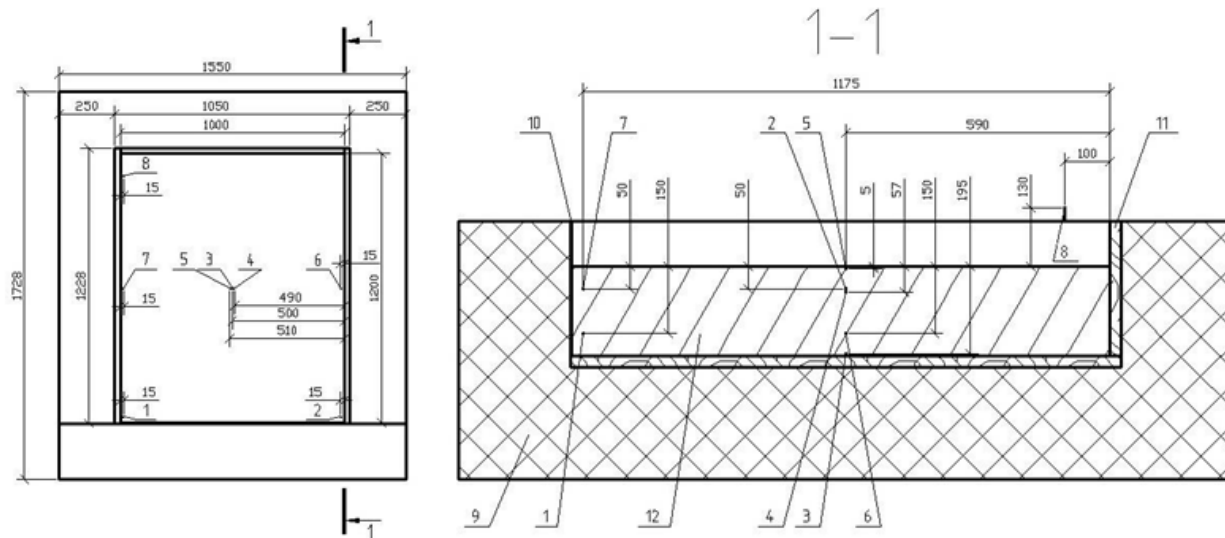
На каждом этапе эксперимента моделировался теплый и холодный период работы объекта. Согласно ВСН 84-89 расчетный период отрицательных температур при геометрическом масштабе 1:1 равен 5032,80 ч, расчетный период положительных температур при геометрическом масштабе 1:1 – 3727,20 ч. Геометрический масштаб исследуемого объекта на экспериментальном стенде принят $M_T 1:30$, в результате, величина холодного периода для каждого этапа эксперимента в лабораторных условиях составила 5,59 ч, величина теплого периода – 4,14 ч.

Первоначально маломасштабная модель помещалась в морозильную камеру с поддерживаемой температурой $T = 0$ °С для стабилизации температуры по всему объему грунта. После стабилизации температуры по всему объему грунта в морозильной камере были заданы циклы попеременного промерзания и оттаивания маломасштабной модели основания соответственно при температуре $T_{f,m} = -14,8$ °С и $T_{th,m} = +10,0$ °С.

По предварительным расчетам и проведенным испытаниям было установлено, что для формирования циклического повторения значения мощности деятельного слоя грунта было принято 10 периодов попеременного

промерзания и оттаивания маломасштабной модели основания.

Для изучения температурного состояния суглинистого основания по всей толще грунта выполнялась установка термопар (см. рис. 4.13).



1-8 – номера термоэлектрических преобразователей; 9 – утеплитель ППС-10;
10 – органическое стекло; 11 – деревянный каркас стенда; 12 – однородный грунт
основания автомобильной дороги

Рисунок 4.13 – Схема расстановки термопар в грунте основания
экспериментальной маломасштабной модели

При температурной стабилизации грунтового основания на маломасштабном стенде моделировалось оттаивание-промерзание ЗП автомобильной дороги на каждом этапе экспериментального моделирования. Физические и теплофизические характеристики грунта моделируемого ЗП на разных этапах приведены в таблице 4.4. Геометрические характеристики ЗП в масштабе $M_{Г}$ 1:1 и $M_{В}$ 1:30 приведены в таблице 4.5.

На всех этапах экспериментальных исследований устройство ЗП производилось в цикл промерзания при замерзании деятельного слоя грунта основания автомобильной дороги. Последовательность работ при возведении моделируемого ЗП автомобильной дороги для первого и второго этапа эксперимента показана на рисунках с 4.14 по 4.19.

Таблица 4.4

Физические и теплофизические характеристики грунта моделируемого ЗП на разных этапах

Наименование	Значение для трех этапов моделирования
Средняя плотность сухого грунта ρ_d , кг/м ³	1508,00
Суммарная влажность мерзлого грунта W_{tot} , д.е.	0,14
Теплопроводность грунта в мерзлом состоянии λ_f , Вт/(м*°С)	1,07
Теплопроводность грунта в талом состоянии λ_{th} , Вт/(м*°С)	0,95
Объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии C_f , кДж/(м ³ *°С)	1879,85
Объемная теплоемкость грунта в талом состоянии C_{th} , кДж/(м ³ *°С)	2319,30
Теплота таяния (замерзания) грунта L_v , МДж/м ³	62,00
Температура начала замерзания грунта T_{bf} , °С	-0,20

Таблица 4.5

Геометрические характеристики земляного полотна в масштабе МГ 1:1 и МГ 1:30

Наименование	Натурный размер, МГ 1:1	Модельный размер, МГ 1:30
Ширина земляного полотна, м	12	0,400
Высота земляного полотна, м	2	0,066
Заложение откосов	1:1,5	1:1,5



Рисунок 4.14 – Устройство опалубки для соблюдения геометрических пропорций ЗП автомобильной дороги



Рисунок 4.15 – Отсыпка грунта



Рисунок 4.16 – Уплотнение грунта ЗП автомобильной дороги



Рисунок 4.17 – Профилирование откосов ЗП автомобильной дороги



Рисунок 4.18 – Профилирование откосов ЗП автомобильной дороги



Рисунок 4.19 – Маломасштабный стенд моделируемых грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания для первого этапа эксперимента. Закрытая система, без учета поверхностных вод и снежного покрова

На втором этапе моделировались ПДСВ; снежный покров на откосах ЗП и придорожных полосах; фильтрационная прослойка под подошвой ЗП. Высота слоя ПДСВ от уровня дневной поверхности составил 3,33 см, что соответствовало 1,00 м толщи длительно стоящих вод в натуре. Моделирование ПДСВ осуществлялось без конвективного перемешивания. Согласно исследованиям авторов статьи [41] при тепловом воздействии поверхностных вод (водоема) на нижележащие грунты необходимо придерживаться следующих условий:

– с момента начала теплого периода необходимо рассчитать количество

времени для оттаивания водоема прежде, чем рассчитывать глубины протаивания донных отложений;

– образованный под водоемом талик не промерзает при отсутствии конвективного перемешивания водоема глубиной более 0,90 м.

Время моделирования ПДСВ на принятую глубину (3,33 см) в теплый (летний) период составляло 3,10 ч. Подток воды осуществлялся спустя 1,04 ч с момента начала теплого периода. Температура воды при подтоке варьировалась от +2,00 до +4,00 °С, что соответствовало условиям природы.

При моделировании ПДСВ необходимо учесть глубину их промерзания на конец холодного (зимнего) периода. Непромерзшая толща воды в этом случае будет являться теплоизолирующей прослойкой, препятствующей промерзанию нижележащего грунта. Глубину промерзания ПДСВ на конец холодного (зимнего) периода возможно определить по теории Горелика Я.Б. [41]. Согласно предварительным расчетам по методу Горелика Я.Б. (2020 г.) было установлено, что моделируемые ПДСВ должны промерзнуть на конец холодного (зимнего) периода на 2,0 см, что соответствовало 0,6 м в масштабе М 1:1. Было предложено на конец теплого (летнего) периода откачивать часть (2,0 см) воды и сразу же накладывать поверх органическое стекло, имитирующее снежный покров и лёд. Толщина органического стекла, укладываемого на откосы ЗП, составила 9 мм, что соответствовало 0,62 м снежного покрова в масштабе М 1:1. Толщина оргстекла, располагаемого поверх водоема, составила 11 мм, что соответствовало 0,62 м снежного покрова и 0,6 м промерзшей воды (льда).

Моделирование снежных отложений на откосах ЗП и поверх ПДСВ (с учетом моделируемой прослойки льда) начиналось при достижении температуры воздуха в холодильном оборудовании 0 °С с дальнейшим понижением температуры воздуха (холодный период). Окончание моделирования снежных отложений на откосах ЗП и поверх ПДСВ происходило в момент достижения температуры воздуха в холодильном

оборудовании $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ с дальнейшим повышением температуры воздуха (теплый период). Период моделирования льда поверх водоема заканчивался перед подтоком воды (спустя 1,04 ч с момента начала теплого периода). Согласно предварительным расчетам лед поверх водоема полностью оттаивает по прошествии 1,04 ч с момента начала теплого периода, что соответствует 39 дням в масштабе $M\ 1:1$. Время моделирования ПДСВ в теплый (летний) период составляло 3,10 ч. Подток воды осуществлялся спустя 1,04 ч с момента начала теплого периода. Температура воды при подтоке варьировалась от $+2,00$ до $+4,00\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствовало условиям натурных измерений.

При проведении натурального эксперимента было выявлено, что под подошвой ЗП располагается уплотненный слой торфа, через который формируется фильтрационный поток воды. Для моделирования теплового влияния фильтрации воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» при возведении ЗП по технологии «от себя» был замоделирован уплотненный слой торфа. Торфяной слой устраивался на поверхности стабилизированного основания, с коэффициентом фильтрации $k_f=1,20\text{ м/сут}$ и толщиной 0,67 см, что соответствовало 20 см в натурную величину.

На основной площадке ЗП был приложен груз, имитирующий нагрузку от движения автомобильного транспорта. С целью исключить тепловое влияние от приложенного груза на грунт ЗП и основания на поверхность ЗП устраивалось перфорированное оргстекло с прикрученными вдоль него деревянными рейками. Маломасштабный стенд моделируемых грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания в период оттаивания и промерзания для второго этапа представлен на рисунке 4.20 и 4.21 соответственно.

На третьем этапе моделировалось предложенное КТР с условиями моделирования ПДСВ; снежного покрова на откосах ЗП и придорожных полосах; фильтрационной прослойки идентичных для второго этапа эксперимента. В качестве теплоизоляционного материала применялся ГТМ «ДиатомИК» с теплофизическими характеристиками $\lambda=0,1\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$,

$C=575,0 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$. ГТМ «ДиатомИК» является пористым окатанным материалом в виде гравия разных фракций, размер гранул варьируется от 2мм до 5мм. Имеет малый вес и пористую структуру, о чем свидетельствует насыпная плотность в $450 \text{ кг}/\text{м}^3$. Водопоглощение ГТМ «ДиатомИК» не превышает 4% по всему объему.



Рисунок 4.20 – Маломасштабный стенд моделируемых грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания в период оттаивания для второго этапа эксперимента. Открытая система, при воздействии поверхностных вод и влиянии снежного покрова

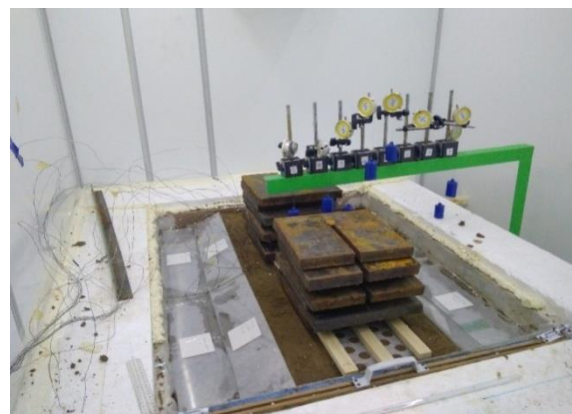


Рисунок 4.21 – Маломасштабный стенд моделируемых грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания в период промерзания для второго этапа эксперимента. Открытая система, при воздействии поверхностных вод и влиянии снежного покрова

Геоконтейнеры были выполнены из гидроизоляционного геотекстиля «Теплонит 600», продублированного полиэтиленовой пленкой. Характеристики гидроизоляционного полотна «Теплонит 600» соответствуют требованиям ОДМ 218.2.046-2014.

Последовательность работ при возведении моделируемого ЗП автомобильной дороги для третьего этапа эксперимента (с предложенным КТР) показана на рисунках с 4.22 по 4.29.



Рисунок 4.22 – Устройство продольных траншей в основании автомобильной дороги



Рисунок 4.23 – Вертикальное размещение водонепроницаемого геосинтетического материала в продольных траншеях



Рисунок 4.24 – Вертикальное размещение ГТМ в продольных траншеях



Рисунок 4.25 – Размещение под откосной частью насыпи ЗП ГТМ в водонепроницаемых геоконтейнерах



Рисунок 4.26 – Устройство опалубки и отсыпка грунта при возведении насыпи ЗП автомобильной дороги



Рисунок 4.27 – Профилирование откосов ЗП автомобильной дороги



Рисунок 4.28 – Маломасштабный стенд моделируемых грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания в период оттаивания для третьего этапа эксперимента

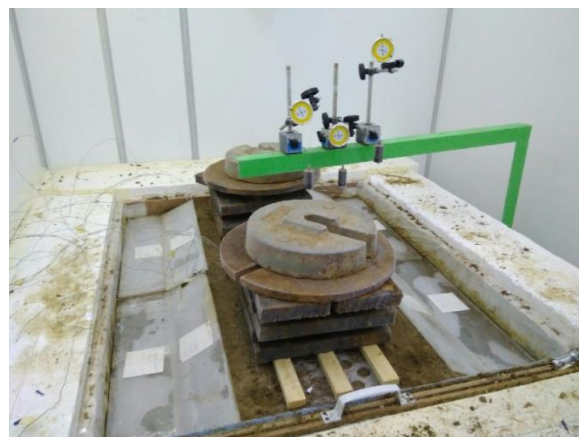
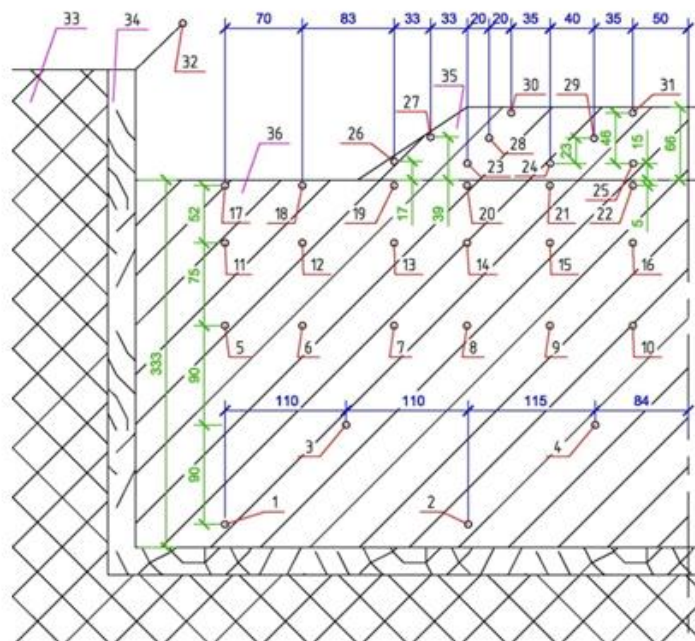


Рисунок 4.29 – Маломасштабный стенд моделируемых грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания в период промерзания для третьего этапа эксперимента

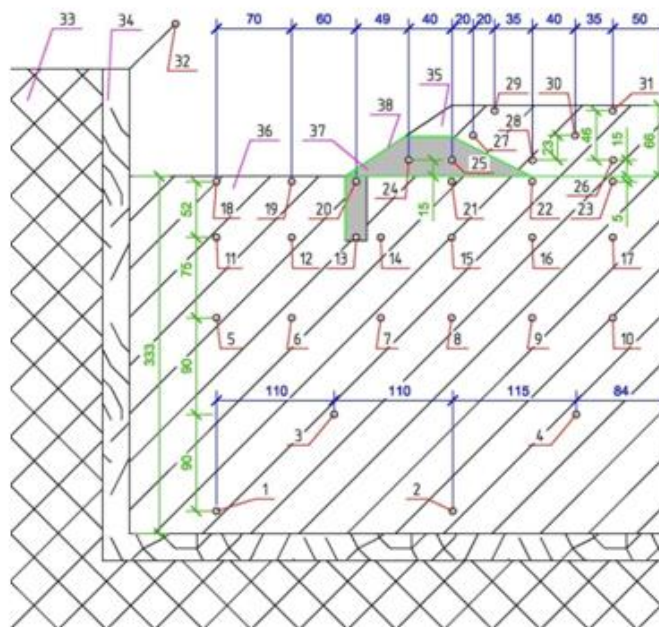
По предварительным расчетам и проведенным испытаниям было установлено, что для формирования циклического повторения температуры грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги в одних и тех же точках рассматриваемого пространства достаточно принять 10 периодов попеременного промерзания и оттаивания маломасштабной модели.

Схема расстановки термодатчиков в конструкции ЗП и основания дороги в маломасштабной модели для первого и второго этапов лабораторного моделирования представлена на рисунке 4.30, для третьего этапа – на рисунке 4.31.



1-32 – номера термопар; 33 – утеплитель ППС-10; 34 – деревянный каркас стенда; 35 – однородный грунт 3П автомобильной дороги; 36 – однородный грунт основания автомобильной дороги

Рисунок 4.30 – Схема по размещению термопар в маломасштабной модели для 1-го и 2-го этапов моделирования



1-32 – номера термопар; 33 – утеплитель ППС-10; 34 – деревянный каркас стенда; 35 – однородный грунт 3П автомобильной дороги; 36 – однородный грунт основания автомобильной дороги; 37 – ГТМ «ДиатомИК»; 38 – водонепроницаемый геотекстиль «Теплонит 600»

Рисунок 4.31 – Схема по размещению термопар в маломасштабной модели для 3-го этапа моделирования

По результатам лабораторного моделирования температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги для каждого этапа эксперимента составлены термограммы, представленные на рисунке 4.32.

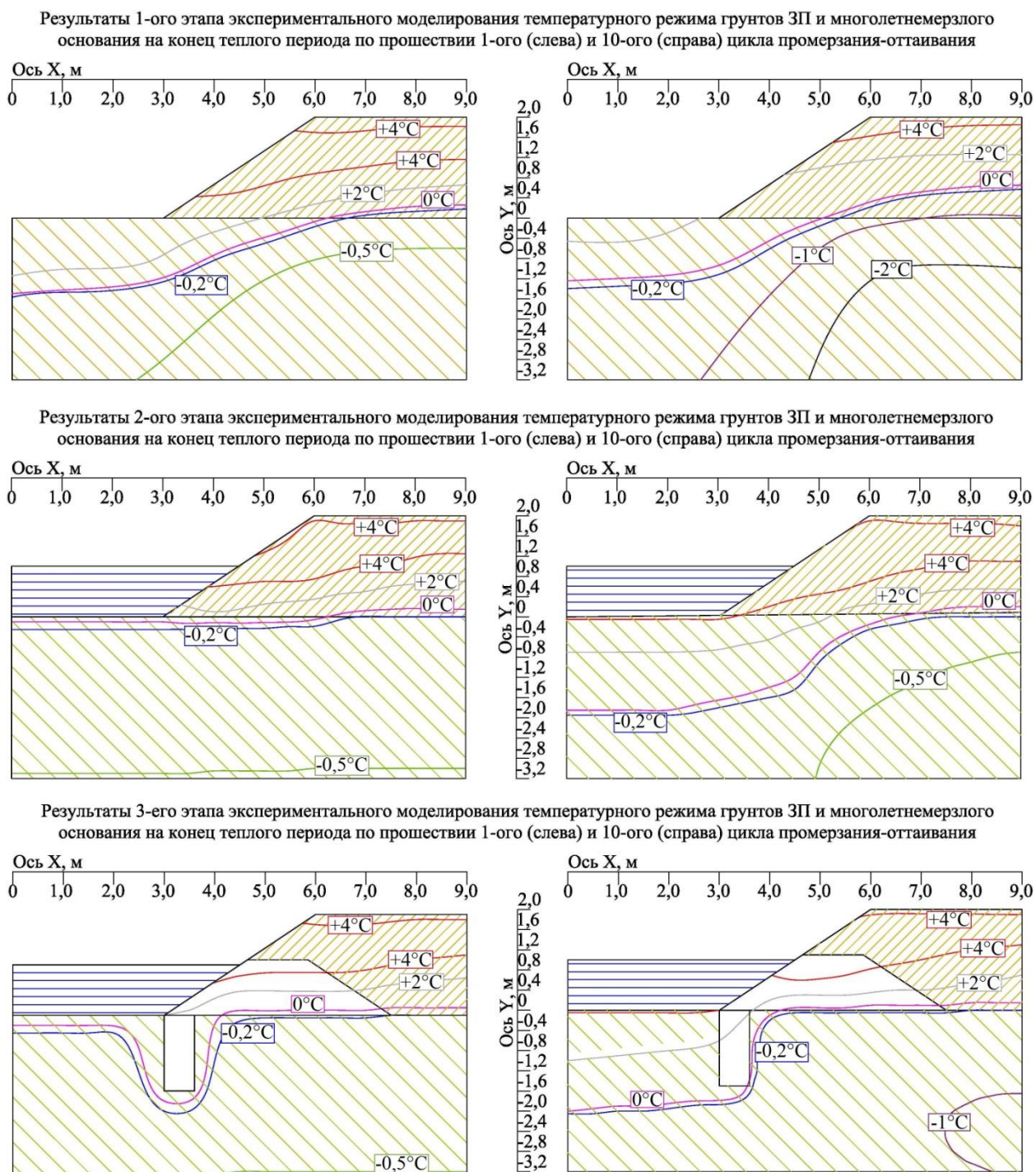
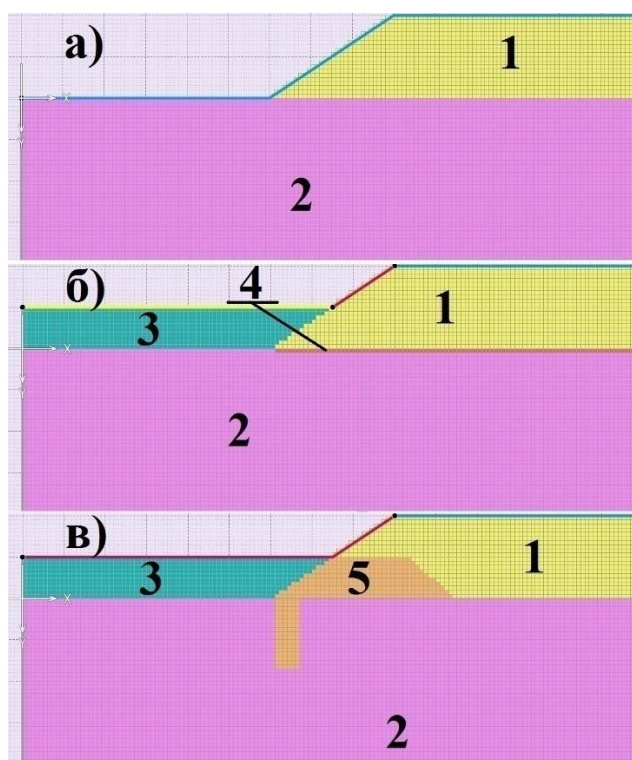


Рисунок 4.32 – Термограммы изменения температуры грунтов ЗП и основания для каждого этапа моделирования на окончание периода оттаивания по прошествии 1 и 10 циклов промерзания-оттаивания

С целью верификации результатов экспериментальных исследований было выполнено моделирование идентичных грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги в программе QFrost и по предложенной методике расчета, изложенной в главе 3. Моделирование было выполнено в масштабе М 1:1 для каждого этапа эксперимента.

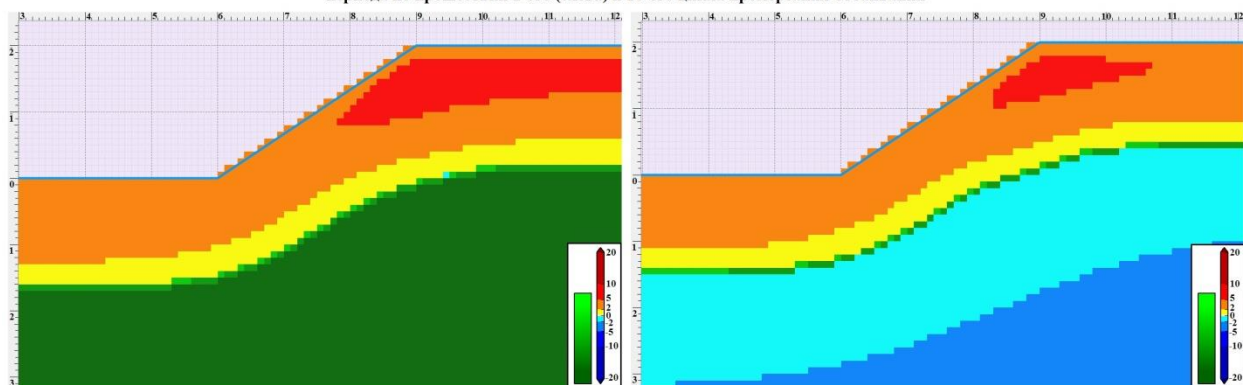
Первоначально выполнялось численное моделирование в течение 10 циклов промерзания-оттаивания идентично этапам лабораторных исследований. Фиксация температурного поля в теле ЗП и основания выполнялась на окончание теплого периода 1-ого и 10-ого цикла. В программе QFrost были замоделированы поперечные разрезы ЗП и основания дорог каждого этапа эксперимента (см. рис. 4.33). Результаты численного моделирования представлено на рисунке 4.34.



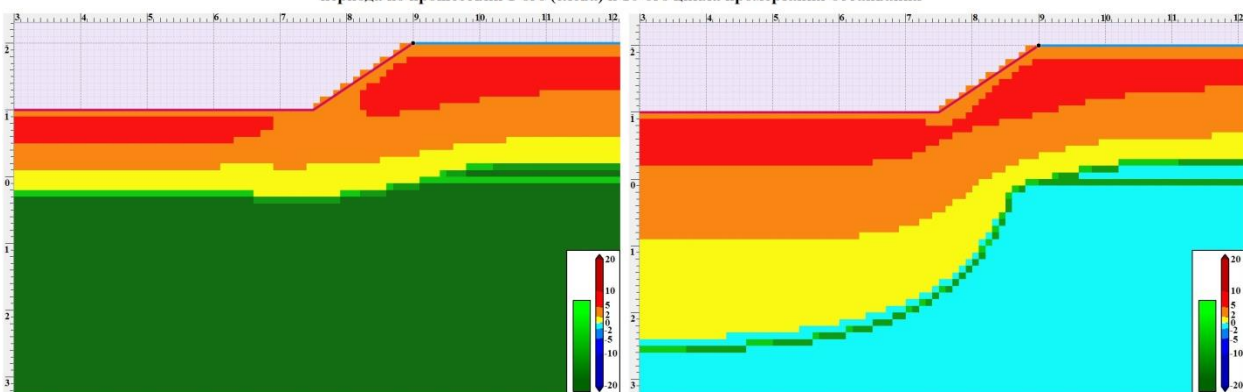
а) моделирование ЗП и основания дороги 1-го этапа эксперимента; б) моделирование ЗП и основания дороги 2-го этапа эксперимента; в) моделирование ЗП и основания дороги 3-го этапа эксперимента; 1 – грунт ЗП; 2 – грунт основания; 3 – поверхностные длительно стоящие воды; 4 – фильтрационная прослойка на границе ЗП-основание; 5 – ГТМ «ДиатомИК»

Рисунок 4.33 – Моделируемые в программе QFrost поперечные разрезы ЗП и основания дорог каждого этапа эксперимент

Результаты 1-ого этапа численного моделирования температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания на конец теплого периода по прошествии 1-ого (слева) и 10-ого цикла промерзания-оттаивания



Результаты 2-ого этапа численного моделирования температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания на конец теплого периода по прошествии 1-ого (слева) и 10-ого цикла промерзания-оттаивания



Результаты 3-его этапа численного моделирования температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания на конец теплого периода по прошествии 1-ого (слева) и 10-ого цикла промерзания-оттаивания

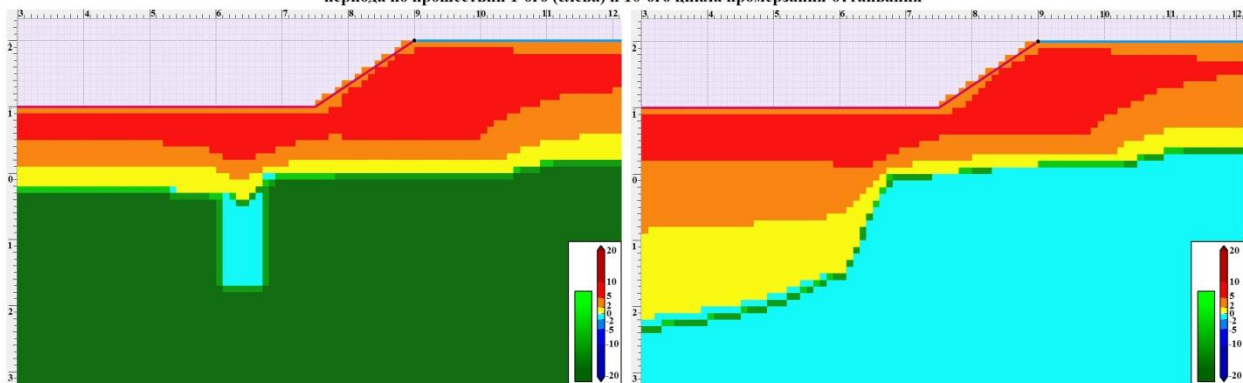


Рисунок 4.34 – Результаты численного моделирования температуры грунтов ЗП и основания экспериментальной модели для каждого этапа моделирования на окончание периода оттаивания по прошествии 1 и 10 циклов промерзания-оттаивания

На основании вышеприведенных данных можно сделать следующие выводы:

1. Выполненные в программе QFrost вычисления температуры грунтов ЗП и основания дороги, замоделированной на экспериментальном стенде, показали высокую сходимость с данными замеров температуры грунта ЗП и основания дороги в экспериментальном стенде.

2. Погрешность значения глубины оттаивания грунтового массива под серединой откосной части ЗП по результатам численного моделирования относительно экспериментально-лабораторных данных составила:

- на 1-ом этапе для 1-ого цикла – 6,15%, для 10-ого цикла – 10,29%;
- на 2-ом этапе для 1-ого цикла – 13,44%, для 10-ого цикла – 5,98%;
- на 3-ем этапе для 1-ого цикла – 6,18%, для 10-ого цикла – 4,76%.

На следующем этапе предлагаемой методикой расчета были определены глубины промерзания и оттаивания грунтов в откосной части ЗП.

На первом этапе экспериментального моделирования в лабораторных условиях температурно-влажностного режима конструкции ЗП и основания автомобильной дороги на ММГ не были учтены: снеговые отложения на откосах; поверхностные длительно стоящие воды вдоль откосов; фильтрующая прослойка на границе ЗП – основание. Описанную ситуацию можно считать частным случаем при нахождении глубины промерзания-оттаивания грунта. Тогда глубину оттаивания и промерзания грунтов в откосной части ЗП возможно определить по формуле 3.9 и 3.19 соответственно при использовании методики расчета многослойного массива грунта (см. главу 3).

$$h_{th2} = \mu \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th2} \cdot (T_{th} - T_{bf2}) \cdot t_{th}}{L_{v2}} + \left(\lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th1}}{\lambda_{th1}} \right)^2} - \lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th1}}{\lambda_{th1}} = 0,89 \text{ м},$$

где h_{th} – оттаявшие слои грунта, м.

Индексы 1 и 2 обозначают характеристики и параметры грунта ЗП и грунта основания соответственно.

Глубина оттаивания многослойного массива грунта в рассматриваемой откосной части ЗП без учета влияния поверхностных длительно стоящих вод и фильтрационной прослойки составила $d_{th}=1,89$ м.

$$h_{f2} = \sqrt{\left(\lambda_{f2} \cdot \left(\frac{h_{f1}}{\lambda_{th1}} + R_d \right) \right)^2 - \frac{2 \cdot \lambda_{f2} \cdot (T_f - T_{bf2}) \cdot t_f}{L_{v2}} - \left(\lambda_{f2} \cdot \left(\frac{h_{f1}}{\lambda_{th1}} + R_d \right) \right)} = 1,31 \text{ м},$$

где h_f – промерзшие слои грунта, м; R_{np} – термическое сопротивление снега, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$.

Глубина промерзания многослойного массива грунта в рассматриваемой откосной части ЗП без учета влияния снежных отложений, поверхностных длительно стоящих вод и фильтрационной прослойки составила $d_f=2,31$ м. На рисунке 4.35 (см. стр. 132) показаны результаты численного моделирования в программе QFrost и предлагаемой методики расчета глубины промерзания-оттаивания грунтового массива в откосной части ЗП дороги для первого этапа эксперимента в лабораторных условиях.

Сопоставляя результаты расчета предлагаемой методики и численного моделирования первого этапа эксперимента в лабораторных условиях, сформулированы следующие выводы:

1. Выполненные вычисления глубины промерзания-оттаивания рассмотренного выше грунтового массива по предлагаемой методике показали высокую сходимость с результатами численного моделирования, выполненного в программе QFrost.

2. Погрешность результатов вычисления глубины оттаивания грунтового массива по предлагаемой методике относительно численного моделирования составила 7,39 %.

3. Погрешность результатов вычисления глубины промерзания грунтового массива по предлагаемой методике относительно численного моделирования составила 7,23 %.

4. Критерий оценки назначения конструктивно-технологических решений с целью устранения деградации ММГ под откосной частью ЗП на период

эксплуатации дороги по предлагаемой методике составил

$$\frac{d_{th,метод}}{d_{f,метод}} = \frac{1,89}{2,31} = 0,82 \leq 1,00; \text{ причисленном моделировании} - \frac{d_{th,числ}}{d_{f,числ}} = \frac{1,76}{2,49} = 0,71 \leq 1,00.$$

Следовательно, не требуется применение конструктивно-технологического решения для предотвращения дальнейшего оттаивания грунтового массива в откосной части ЗП.

На втором этапе экспериментального моделирования в лабораторных условиях температурного режима конструкции ЗП и основания автомобильной дороги на ММГ были учтены: снеговые отложения на откосах; поверхностные длительно стоящие воды вдоль откосов; фильтрующая прослойка на границе ЗП – основание. Тогда глубину оттаивания грунтов в откосной части ЗП возможно определить по формулам 3.14-3.16 при использовании методики расчета многослойного массива грунта.

$$Q_{s2,th} = (h_{th1}L_{v1} + h_{th2}L_{v2}) \cdot B_2 \cdot L = (1,00 \cdot 17222,22 + 0,73 \cdot 32363,89) \cdot 1,00 \cdot 3,00 = 122543,58 \text{ Bm} \cdot \text{ч},$$

$$h_{th2} = \mu \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th2} \cdot (T_{th} - T_{bf2}) \cdot t_{th}}{L_{v2}} + \left(\lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th1}}{\lambda_{th1}} \right)^2} - \lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th1}}{\lambda_{th1}} = 0,73 \text{ м},$$

$$Q_{R,th} = \left[d_{th} - \mu \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th2} \cdot (T_{th} - T_{bf2}) \cdot t_{th}}{L_{v2}} + \left(\lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th3}}{\lambda_{th1}} + \lambda_{th2} \cdot \frac{h_{w,cp}}{\lambda_w} \right)^2} - \left(\lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th3}}{\lambda_{th1}} + \lambda_{th2} \cdot \frac{h_{w,cp}}{\lambda_w} \right) \right] \cdot L_{v2} \times \\ \times B_3 \cdot L = (1,73 - 1,05) \cdot 32363,89 \cdot 1,50 \cdot 1,00 = 33295,10 \text{ Bm} \cdot \text{ч},$$

где h_{th3} – слой грунта ЗП, расположенный под средней глубиной длительно стоящих поверхностных вод $h_{w,cp}$ вдоль рассматриваемого откоса при расчете за теплый (летний) период, $h_{th3}=0,5$ м.

$$Q_{w,th} = q_w \cdot C_w \cdot (T_{w,1} - T_{w,2}) \cdot t_{th} = 20898,00 \text{ Bm} \cdot \text{ч},$$

$$Q_{s2,th} + \frac{Q_w}{2} - Q_R = Q_{\phi 2,f} = 122543,58 + \frac{20898,00}{2} - 33295,10 = 99697,48 \text{ Bm} \cdot \text{ч},$$

$$z_{th} = \frac{Q_{\phi 2,f}}{\left(\frac{h_{th1}L_{v1} + h_{th2}L_{v2}}{h_{th1} + h_{th2}} \right) \cdot I_{\phi}} = \frac{99697,48}{23611,48 \cdot 3,00} = 1,41 \text{ м}.$$

Глубину промерзания грунтов в откосной части ЗП возможно определить по формулам 3.21-3.23 при использовании методики расчета многослойного массива грунта.

$$Q_{s2,f} = (h_{f1}L_{v1} + h_{f2}L_{v2}) \cdot B_2 \cdot L = (1,00 \cdot 17222,22 + 0,70 \cdot 32363,89) \cdot 1,00 \cdot 3,00 = 119825,02 \text{ Bm} \cdot \text{ч},$$

$$Q_R = [d_f - \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{f2} \cdot (T_f - T_{bf2}) \cdot t_f}{L_{v2}} + \left(\lambda_{f2} \cdot \frac{h_{f3}}{\lambda_{f1}} + \lambda_{f2} \cdot \frac{h_{w,cp}}{\lambda_w} + \lambda_{f2} \cdot R_d \right)^2} - (\lambda_{f2} \cdot \frac{h_{f4}}{\lambda_{th1}} + \lambda_{f2} \cdot \frac{h_{w,cp}}{\lambda_w} + \lambda_{f2} \cdot R_{np})] \cdot L_{v2} \cdot B_4 \cdot L = (1,73 - 1,22) \cdot 32363,89 \cdot 1,50 \cdot 1,00 = 23407,40 \text{ Bm} \cdot \text{ч},$$

h_{f3} – слой грунта ЗП, расположенный под средней глубиной длительно стоящих поверхностных вод и слоя льда $h_{w,cp}$ вдоль рассматриваемого откоса при расчете за холодный (зимний) период, $h_{f3}=0,5$ м.

$$Q_{w,f} = q_w \cdot C_w \cdot (T_{w,1} - T_{w,2}) \cdot t_f = 29257,20 \text{ Bm} \cdot \text{ч},$$

$$Q_{s2,f} + \frac{Q_{wf}}{2} + Q_{R,f} = Q_{\phi 2,th} = 119825,02 - \frac{29257,20}{2} - 23407,40 = 81789,01 \text{ Bm} \cdot \text{ч},$$

$$z_f = \frac{Q_{\phi 2,th}}{\left(\frac{h_{f1}L_{v1} + h_{f2}L_{v2}}{h_{f1} + h_{f2}} \right) \cdot I_{\phi}} = \frac{81789,01}{23473,38 \cdot 3,00} = 1,16 \text{ м}.$$

На рисунке 4.36 (см. стр. 133) показаны результаты численного моделирования в программе QFrost и предлагаемой методики расчета глубины промерзания-оттаивания грунтового массива в откосной части ЗП дороги для второго этапа эксперимента в лабораторных условиях.

Сопоставляя результаты расчета предлагаемой методики и численного моделирования второго этапа эксперимента в лабораторных условиях, сформулированы следующие выводы:

1. Выполненные вычисления глубины промерзания-оттаивания рассмотренного выше грунтового массива по предлагаемой методике показали высокую сходимость с результатами численного моделирования, выполненного в программе QFrost.

2. Погрешность результатов вычисления глубины оттаивания грунтового массива по предлагаемой методике относительно численного моделирования составила 6,82 %.

3. Погрешность результатов вычисления глубины промерзания грунтового массива по предлагаемой методике относительно численного моделирования составила 12,62 %.

4. Критерий оценки назначения конструктивно-технологических решений с целью устранения деградации ММГ под откосной частью ЗП на период эксплуатации дороги по предлагаемой методике составил

$$\frac{z_{th,метод}}{z_{f,метод}} = \frac{1,41}{1,16} = 1,22 > 1,00; \text{ причисленном моделировании} - \frac{z_{th,числ}}{z_{f,числ}} = \frac{1,32}{1,03} = 1,28 > 1,00.$$

Следовательно, требуется применение конструктивно-технологического решения для предотвращения дальнейшего оттаивания грунтового массива в откосной части ЗП.

На третьем этапе экспериментального моделирования в лабораторных условиях температурного режима конструкции ЗП и основания автомобильной дороги на ММГ были учтены: снеговые отложения на откосах; поверхностные длительно стоящие воды вдоль откосов; предложенное конструктивно-технологическое решение. При расчете было принято допущение, что предложенное конструктивно-технологическое решение блокирует влияние фильтрующей прослойки на границе ЗП – основание. Тогда глубину оттаивания грунта и ГТМ в откосной части ЗП возможно определить по формулам 3.14-3.16 при использовании методики расчета многослойного массива грунта.

$$Q_{s2,th} = (h_{th1}L_{v1} + h_{th2}L_{v2}) \cdot B_2 \cdot L = (1,00 \cdot 2069,44 + 0,097 \cdot 32363,89) \cdot 1,00 \cdot 3,00 = 14946,58 \text{ Bm} \cdot \text{ч},$$

$$h_{th2} = \mu \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th2} \cdot (T_{th} - T_{bf2}) \cdot t_{th}}{L_{v2}} + \left(\lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th1}}{\lambda_{th1}} \right)^2} - \lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th1}}{\lambda_{th1}} = 0,097 \text{ м},$$

$$Q_{R,th} = \left[d_{th} - \mu \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th2} \cdot (T_{th} - T_{bf2}) \cdot t_{th}}{L_{v2}} + \left(\lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th3}}{\lambda_{th1}} + \lambda_{th2} \cdot \frac{h_{w,cp}}{\lambda_w} \right)^2} - \left(\lambda_{th2} \cdot \frac{h_{th3}}{\lambda_{th1}} + \lambda_{th2} \cdot \frac{h_{w,cp}}{\lambda_w} \right) \right] \cdot L_{v2} \times \\ \times B_3 \cdot L = (1,097 - 0,599) \cdot 2069,44 \cdot 1,50 \cdot 1,00 = 1522,08 \text{Bm} \cdot \text{ч},$$

где h_{th3} – слой гранулированного теплоизоляционного материала, расположенного под средней глубиной длительно стоящих поверхностных вод $h_{w,cp}$ вдоль рассматриваемого откоса при расчете за теплый (летний) период, $h_{th3}=0,5$ м.

$$Q_{s2,th} - Q_R = Q_{\phi 2,f} = 14946,58 - 1522,08 = 13424,50 \text{Bm} \cdot \text{ч},$$

$$z_{th} = \frac{Q_{\phi 2,f}}{\left(\frac{h_{th1} L_{v1} + h_{th2} L_{v2}}{h_{th1} + h_{th2}} \right) \cdot l_{\phi}} = \frac{13424,50}{4570,82 \cdot 3,00} = 0,98 \text{м}.$$

Глубину промерзания грунта и ГТМ в откосной части ЗП возможно определить по формулам 3.21-3.23 при использовании методики расчета многослойного массива грунта.

$$Q_{s2,f} = (h_{f1} L_{v1} + h_{f2} L_{v2}) \cdot B_2 \cdot L = (1,00 \cdot 2069,44 + 0,22 \cdot 32363,89) \cdot 1,00 \cdot 3,00 = \\ = 27254,19 \text{Bm} \cdot \text{ч},$$

$$Q_R = [d_f - \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{f2} \cdot (T_f - T_{bf2}) \cdot t_f}{L_{v2}} + \left(\lambda_{f2} \cdot \frac{h_{f3}}{\lambda_{f1}} + \lambda_{f2} \cdot \frac{h_{w,cp}}{\lambda_w} + \lambda_{f2} \cdot R_{np} \right)^2} - (\lambda_{f2} \cdot \frac{h_{f3}}{\lambda_{f1}} + \lambda_{f2} \cdot \frac{h_{w,cp}}{\lambda_w} + \\ \lambda_{f2} \cdot R_{np})] \cdot L_{v2} \cdot B_4 \cdot L = (1,22 - 0,84) \cdot 2069,44 \cdot 1,50 \cdot 1,00 = 1176,23 \text{Bm} \cdot \text{ч},$$

где R_{np} – термическое сопротивление теплоизоляционной прослойки, расположенной на поверхности и (или) откосах ЗП или в теле ЗП, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$; h_{f3} – слой ГТМ, расположенный под средней глубиной длительно стоящих поверхностных вод и слоя льда $h_{w,cp}$ вдоль рассматриваемого откоса при расчете за холодный (зимний) период, $h_{f3}=0,5$ м.

$$Q_{s2,f} + Q_{R,f} = Q_{\phi 2,th} = 27254,19 - 1176,23 = 26077,95 \text{Bm} \cdot \text{ч},$$

$$z_f = \frac{Q_{\phi 2,th}}{\left(\frac{h_{f1} L_{v1} + h_{f2} L_{v2}}{h_{f1} + h_{f2}} \right) \cdot l_{\phi}} = \frac{26077,95}{7466,31 \cdot 3,00} = 1,16 \text{м}.$$

На рисунке 4.37 (см. стр. 134) показаны результаты численного моделирования в программе QFrost и предлагаемой методики расчета глубины промерзания-оттаивания грунтового массива и ГТМ в откосной части ЗП дороги для третьего этапа эксперимента в лабораторных условиях.

Сопоставляя результаты расчета предлагаемой методики и численного моделирования второго этапа эксперимента в лабораторных условиях, сформулированы следующие выводы:

1. Выполненные вычисления глубины промерзания-оттаивания рассмотренного выше грунтового массива и ГТМ по предлагаемой методике показали высокую сходимость с результатами численного моделирования, выполненного в программе QFrost.

2. Погрешность результатов вычисления глубины оттаивания грунтового массива по предлагаемой методике относительно численного моделирования составила 7,14 %.

3. Погрешность результатов вычисления глубины промерзания грунтового массива по предлагаемой методике относительно численного моделирования составила 10,48 %.

4. Критерий оценки назначения конструктивно-технологических решений с целью устранения деградации ММГ под откосной частью ЗП на период эксплуатации дороги по предлагаемой методике составил

$$\frac{z_{th, метод}}{z_{f, метод}} = \frac{0,98}{1,16} = 0,84 \leq 1,00; \text{ причисленном моделировании} - \frac{z_{th, числ}}{z_{f, числ}} = \frac{1,05}{1,05} = 1,00 \leq 1,00.$$

Следовательно, внедренное конструктивно-технологическое решение предотвращает дальнейшее оттаивание грунтового массива в откосной части ЗП.

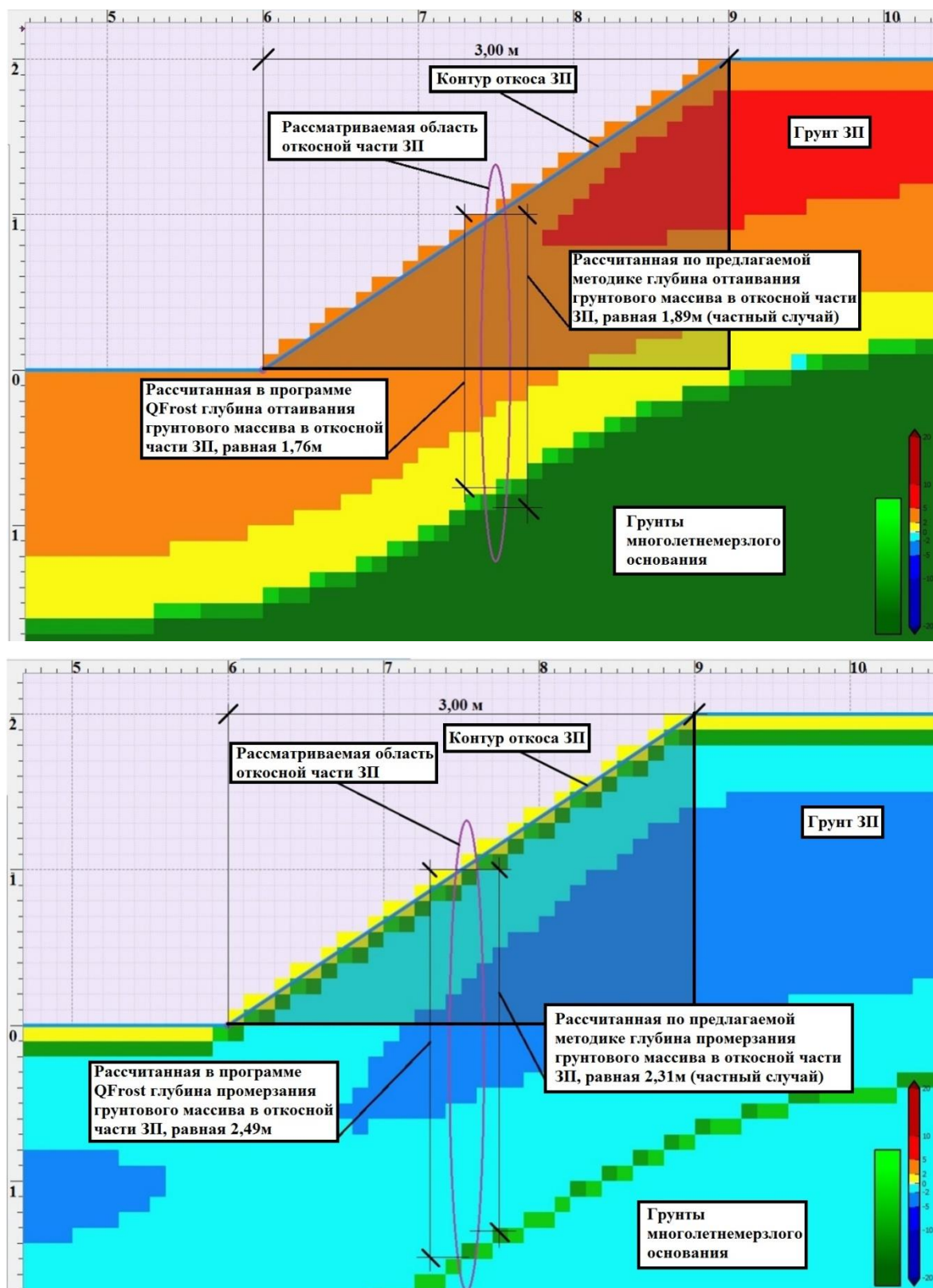


Рисунок 4.35 – Результаты численного моделирования в программе QFrost и предлагаемой методики расчета глубины промерзания-оттаивания грунтового массива в откосной части ЗП дороги для первого этапа эксперимента в лабораторных условиях

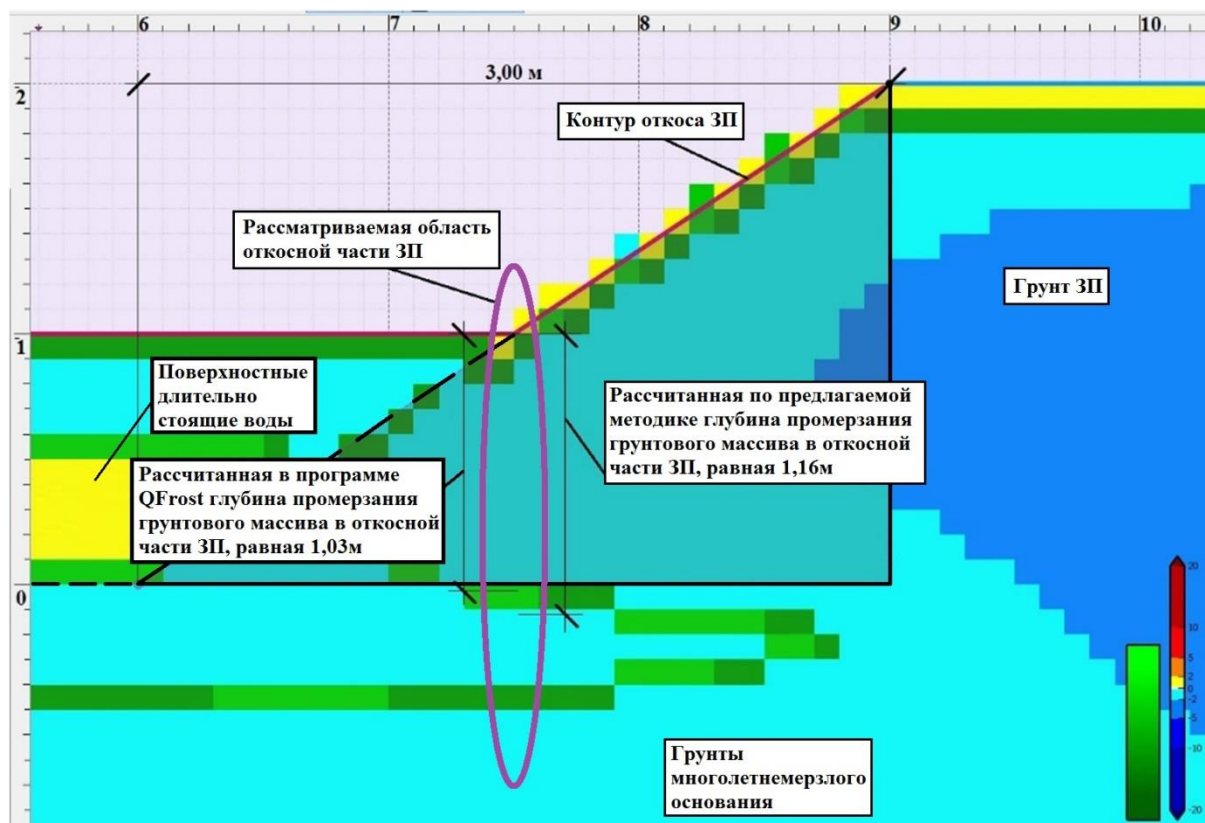
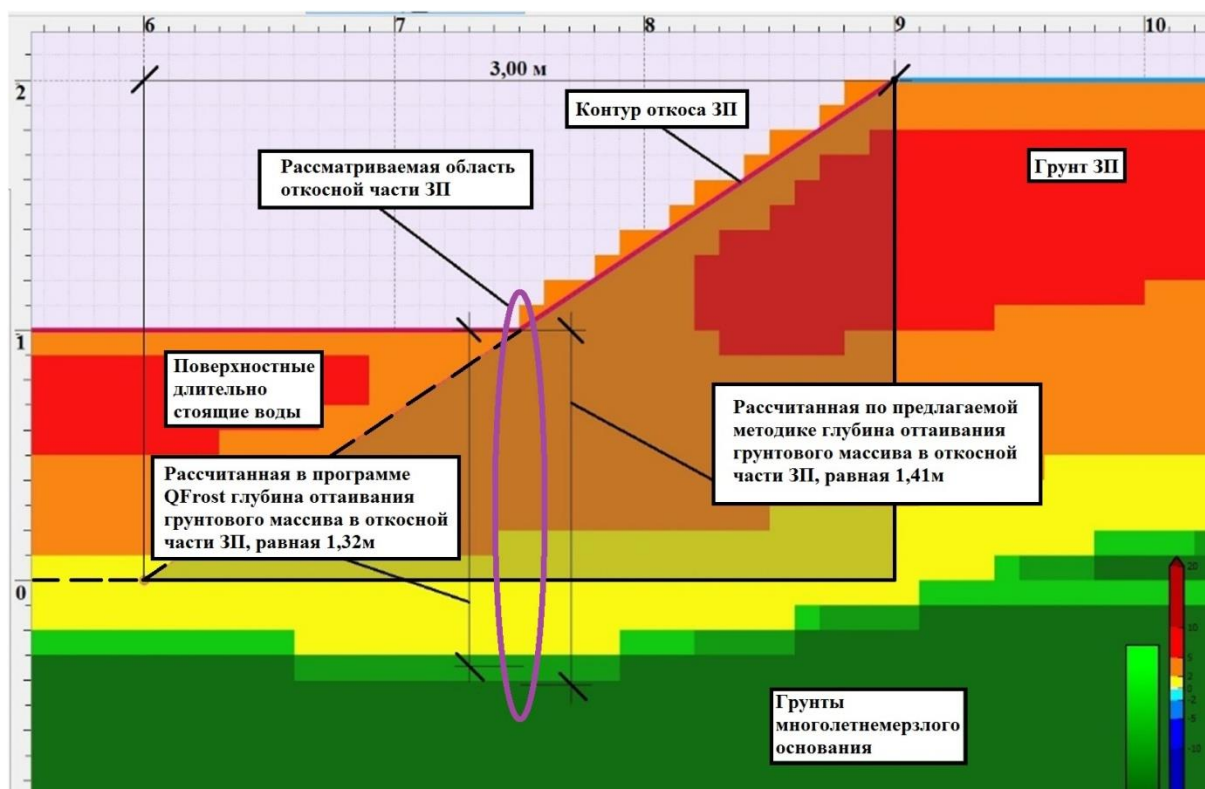


Рисунок 4.36 – Результаты численного моделирования в программе QFrost и предлагаемой методики расчета глубины промерзания-оттаивания грунтового массива в откосной части ЗП дороги для второго этапа эксперимента в лабораторных условиях

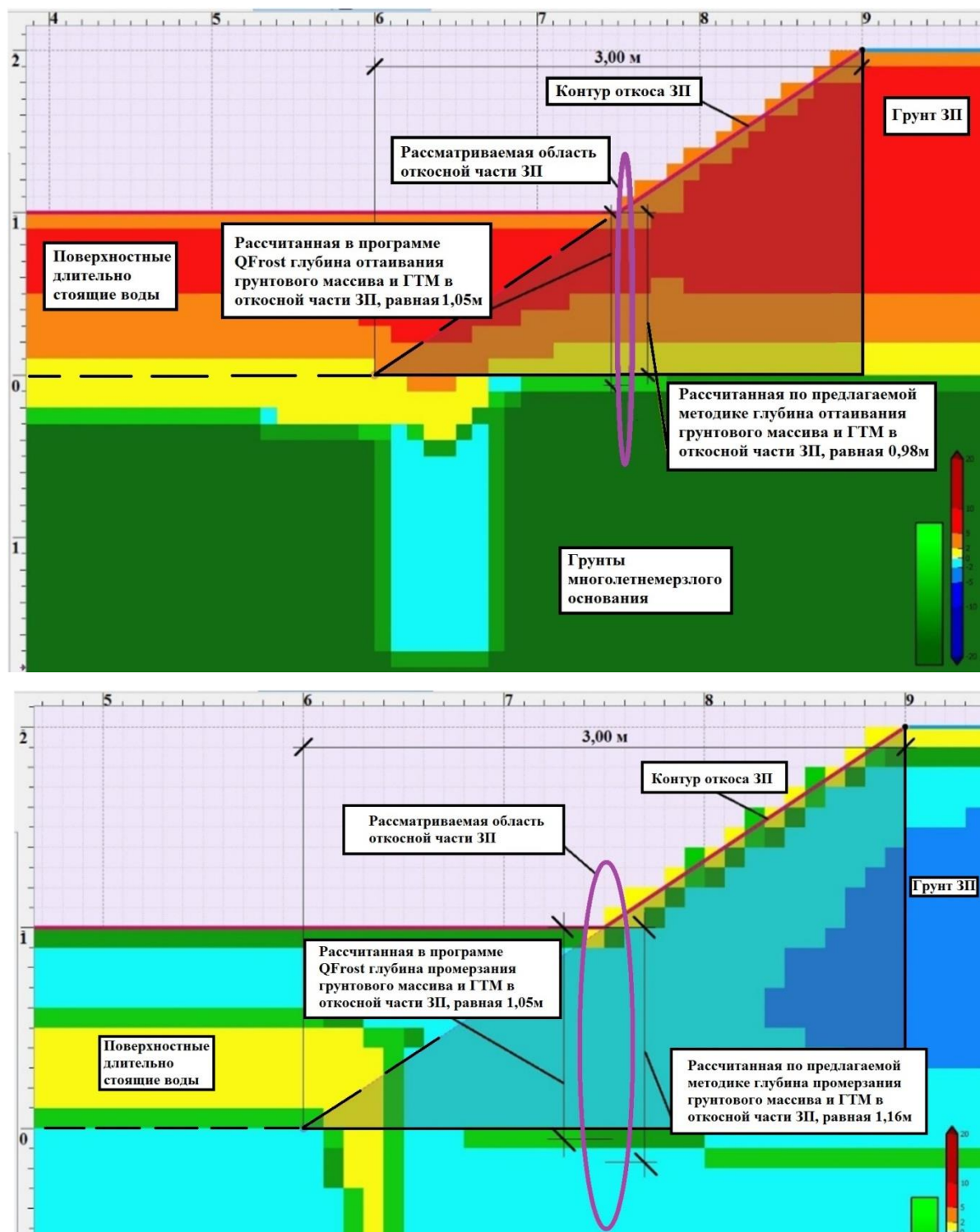


Рисунок 4.37 – Результаты численного моделирования в программе QFrost и предлагаемой методики расчета глубины промерзания-оттаивания грунтового массива и ГТМ в откосной части ЗП дороги для третьего этапа эксперимента в лабораторных условиях

4.4. Выводы по главе 4

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. При экспериментальном моделировании в закрытой системе конструкции ЗП и основания автомобильной дороги на ММГ (первый этап) наблюдалась высокая скорость промерзания откосной части ЗП и основания придорожной полосы. Высокая скорость промерзания откосов ЗП и придорожной полосы не согласуется с результатами натурных наблюдений на рассматриваемом участке автомобильной дороги (п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90). Промерзание и оттаивание грунтового массива под основной площадкой ЗП согласуется с натурными наблюдениями рассматриваемого участка дороги в связи с отсутствием снежных отложений на основной площадке ЗП как в натурном, так и лабораторном эксперименте.

2. На втором этапе экспериментального моделирования температурного режима конструкции ЗП и основания автомобильной дороги на ММГ наблюдается высокая сходимость с результатами натурального наблюдения рассматриваемого участка дороги и методики расчета температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги на обводненных участках. В лабораторном эксперименте глубина оттаивания грунтового массива в откосной части ЗП превышает глубину промерзания в 1,50 раза; по предлагаемой методике расчета глубина оттаивания грунтового массива в откосной части ЗП превышает глубину промерзания в 1,24 раза, что указывает на необходимость разработки и внедрения дополнительных стабилизационных мероприятий.

3. При сопоставлении результатов второго и третьего этапа экспериментального моделирования температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги зафиксировано, что

применение конструктивно-технологического решения способствует поднятию кровли ММГ к подошве насыпи в середине ее подоткосной части на конец теплого (летнего) периода на 4,67 см, что соответствует 1,40 м в масштабе М 1:1. Температура грунта насыпи в середине ее подоткосной части на конец теплого (летнего) периода на границе ЗП и многолетнемерзлого основания снизилась на 2,50 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены актуальные проблемы развития транспортной инфраструктуры в зоне Арктики. Выполнен анализ зарубежного и отечественного опыта по стабилизации температурного режима ЗП и основания автомобильной дороги на ММГ. Рассмотрены методы прогноза температурных процессов и способы управления температурным режимом в грунтах конструкций линейных сооружений на ММГ. В результате проведенного анализа была сформирована гипотеза диссертационного исследования.

2. Выполнено исследование температурного режима грунтов ЗП и основания участка автомобильной дороги «п. Пангоды (км 877+210) – п. Правохеттинский (км 877+300), ПК 594+00 – ПК 594+90» на ММГ при влиянии поверхностных длительно стоящих вод. Установлено, что при непрерывном воздействии поверхностных длительно стоящих вод вдоль откосов ЗП формируется фильтрационная прослойка на границе «ЗП-основание». Фильтрационная прослойка в совокупности с поверхностными длительно стоящими водами способствует понижению кровли ММГ в основании ЗП.

3. Разработано конструктивно-технологическое решение, стабилизирующее температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги при влиянии поверхностных длительно стоящих вод. Предложенное конструктивно-технологическое решение ограничивает тепловое воздействие поверхностных длительно стоящих вод и прерывает фильтрационный и тепловой поток на границе «ЗП-основание». Внедрение конструктивно-технологического решения приводит к поднятию кровли ММГ до 1,40 м и снижению температуры основания ЗП до 2,5 °С на 10-ый цикл попеременного промерзания-оттаивания. Техническую новизну предложенного решения подтверждает полученный патент на изобретение №2732774.

4. Разработана методика расчета для прогноза процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии поверхностных длительно стоящих вод. Разработанной методикой определяются глубины промерзания-оттаивания многолетнемерзлого основания автомобильной дороги при квазистационарном потоке тепла с учетом фильтрации воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» и при влиянии поверхностных длительно стоящих вод вдоль откосов, с учетом влияния конструктивно-технологического решения. На основании разработанной методикой предложены критерии оценки температурной стабилизации грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания для принятия решения о необходимости разработки и внедрения стабилизационных мероприятий.

5. Проведена верификация разработанной методики расчета с результатами численного моделирования и данными мониторинга природных участков автомобильных дорог. Погрешность полученного значения глубины промерзания-оттаивания грунтового массива предлагаемой методикой относительно численного моделирования составила в пределах 10%; численным моделированием относительно природных замеров – 18,4%. Отношение глубины оттаивания к глубине промерзания по предлагаемой методике расчета на 1 год составило $\frac{z_{th,метод}}{z_{f,метод}} = 1,21 \div 1,32 > 1$, отношение глубины оттаивания к глубине промерзания на природных участках на 20 лет составило $\frac{z_{th,натура}}{z_{f,натура}} = 1,52 \div 1,68 > 1$, что подтверждается циклическим проявлением дефектов на покрытии и обочинах экспериментального участка дороги в период ее эксплуатации, и указывает на необходимость назначения дополнительных мероприятий по температурной стабилизации.

6. Экспериментально-теоретически обоснованы основные геометрические параметры предлагаемого конструктивно-технологического решения. Выявлена зависимость изменения геометрических параметров конструктивно-

технологического решения на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования: исследование и разработка метода прогноза температурного режима и напряженно-деформированного состояния грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги при использовании первого и второго принципа проектирования автомобильных дорог.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beaulac I, Doré G, Shur Y, Allard M. 2004. Permafrost thawing impacts on road and airfields: problem assessment and review of possible solutions. In Proceedings of the Cold Regions Engineering & Construction Conference, Edmonton, Alberta, Canada, Smith DW, Lenzion C, Seago DC (eds). University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada: Construction Research Institute of Canada: Ottawa, Ontario, Canada; 760–780.
2. Berg R.L, Aitken G.W. 1973. Some passive methods for controlling geocryological conditions in roadway embankment on degraded permafrost. In Permafrost: The North American Contribution to the Second International Conference, 13-28 July, Yakutsk, USSR. Sanger FJ, Hyde PJ (eds). National Academy of Sciences: Washington, DC; 581–586
3. Black P.F., Permafrost. A. Review. Bull. Geol. Society of America. Vol. 65, No. 9, 1954.
4. Brown J., Ferrians O.J., Heginbottom J.A., and Melnikov E.S., 1997. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions, Circum-Pacific Map Series.
5. De Grandpré I, Fortier D, Stephani E. 2012. Degradation of permafrost beneath a road embankment enhanced by heat advected in groundwater. Canadian Journal of Earth Sciences 49: 953–962. DOI:10.1139/E2012-018
6. Esch D. 1988. Embankment case histories on permafrost. In Embankment Design and Construction in Cold Regions: an ASCE Monograph, Johnson EG (ed). American Society of Civil Engineers: New York, New York, USA; 127–159.
7. Esch, D. C., 1996. Road and airfield design for permafrost conditions. Roads and Airfields in Cold Regions, Technical Council on Cold Regions Engineering Monograph, pp. 121-149.

8. Feng Wenjie, Ma Wei, Zhang Luxin and Wu Zhijian. 2003. Application of awning to roadway engineering in permafrost regions. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 25(5): 567-570.
9. Feng WJ, Ma W, Li DQ, Zhang L. 2006. Application investigation of awning to roadway engineering on the Qinghai-Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technology* 45: 51–58. DOI:10.1016/j.coldregions.2006.01.004
10. Fulwider CW, Aitken GW. 1962. Effects on surface color on thaw penetration beneath an asphalt surface in the Arctic. In *Proceedings of the International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, 20-24 August, University of Michigan: Ann Arbor, Michigan, USA; 605–610.
11. Goering DJ. 2001. ACE and Thermosyphon Design Features – Loftus Road Extension Project: Design Analysis Summary and Instrumentation. Report No. INE/TRE 02.02, FHWA-AK-RD-02-1, Federal Highway Administration, Washington, DC.
12. Goering DJ. 2003. Thermal response of air convection embankments to ambient temperature fluctuations. In *Proceedings of the 8th International Permafrost Conference*, 21-25 July, Zurich, Switzerland, Phillips M, Springman SM, Arenson LU (eds). A.A. Balkema: Lisse; 291–296.
13. Goering, D. J. and Kumar, P., 1996. Winter-time convection in open-graded embankments. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 24, pp. 57-74.
14. Goering, D. J., 1996. Air convection embankments for roadway construction in permafrost zones. *8th International Conference on Cold Regions Engineering*, Fairbanks, Alaska, pp. 1-12.
15. Iwama M, Yoshinaka T, Omoto S, Nemoto N. 2012. Applicability of Solar Heat-blocking Pavement Technology to Permafrost Regions. In *Cold Regions 2012: Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment*, 19-22 August, Quebec City, Quebec, Canada, Morse B, Doré G (eds). American Society of Civil Engineers: Reston, Virginia, USA; 62–71 DOI: 10.1061/9780784412473.007.

16. Lanouette F, Doré G, Fortier D. 2015. Influence of snow cover on the ground thermal regime along an embankment on permafrost: in situ measurements. In *GéoQuébec 2015 Proceedings of the 68th Canadian Geotechnical Conference and the 7th Canadian Permafrost Conference*, 20–23 September, Québec City, Québec, Canada[digital release]. Canadian Geotechnical Society <http://www.cgs.ca>.

17. Malenfant-Lepage J, Doré G, Fortier D, Murchison P. 2012. Thermal performance of the permafrost protection techniques at Beaver Creek Experimental Road Site, Yukon, Canada. In *Extended Abstracts of the 10th International Conference on Permafrost*, 25-29 June, Salekhard, Russia. The Northern Publisher: Salekhard, Russia; 261–266.

18. Malenfant-Lepage J, Doré G, Fortier D. 2012. Thermal effectiveness of the mitigation techniques tested at Beaver Creek Experimental Road Site based on a heat balance analysis (Yukon, Canada). In *Cold Regions 2012: Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment*, 19-22 August, Quebec City, Quebec, Canada, Morse B, Doré G (eds). American Society of Civil Engineers: Reston, Virginia, USA; 42–51 DOI: 10.1061/ 9780784412473.005.

19. Mollard J.D., Dishsaw H.E., Airphoto interpretation applied to highway engineering in Western Canada. *Roads and Engineering Construction*. No. 11, 1958, 76-94.

20. Nelson, F.E., O.A. Anisimov, and N.I. Shiklomanov. Subsidence risk from thawing permafrost. – *Nature*, 2001, № 410, pp. 889-890.

21. Niu FJ, Ge JJ, Feng WJ, Liu H. 2010. Engineering effects of sunshine-shield roadbed of the Qinghai-Tibet Railway in permafrost region. *Journal of Glaciology and Geocryology* 32: 325–334 in Chinese.

22. Niu Fujun, Cheng Guodong, Xia Huimin and Ma Lifeng, 2006. Field experiment study on effects of duct-ventilated railway embankment on protecting the underlying permafrost. *Cold Regions Science and Technology*, 45(3): 178-192.

23. Niu Fujun, Yu Qihao and Cheng Guodong, 2004. Ground temperature controlling effects of duct-ventilated railway embankment in permafrost regions. *Science in China, Ser. D*, 47(Supp.): 152-160.

24. Périer L, Doré G, Burn CR. 2015. Influence of water temperature and flow on thermal regime around culverts built on permafrost. In *GéoQuébec 2015 Proceedings of the 68th Canadian Geotechnical Conference and the 7th Canadian Permafrost Conference*, 20–23 September, Québec City, Québec, Canada digital release. Canadian Geotechnical Society <http://www.cgs.ca>.

25. Reckard MK. 1985. White Paint for Highway Thaw Settlement Control. Report for the Alaska Department of Transportation and Public Facilities (ADOTPF) of Fairbanks, Alaska, USA, FHWA-AK-RD-85-16.

26. Richard C, Doré G, Lemieux C, Bilodeau JP, Haure-Touzé J. 2015. Albedo of Pavement Surfacing Materials: in-situ measurements. In *Proceedings of the 16th Cold Regions Engineering Conference*, 19-22 July, Salt-Lake City, Utah, Guthrie WS (ed). American Society of Civil Engineers: Reston, Virginia, USA; 181–192 DOI: 10.1016/9780784479315.017.

27. Romanovsky V. & Osterkamp T. 2001. Permafrost: changes and impacts. In R. Paepe & V. Melnikov (Ed.) *Permafrost response on economic development, environmental security and natural Resources*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, pp. 297-315.

28. Saboundjian, S., Goering, D. J., 2003. Air Convection Embankment for Roadways – Field Experimental Study in Alaska. *Transportation Research Record*, Issue 1821, pp. 20-28.

29. Strynadka T, Croteau J-M, Doré G, Jarvis J. 2015. Performance review of the light coloured pavement of the 2009 Front Street Project in Dawson City Yukon. In *Proceedings of the 60th Annual Conference and Annual General Meeting of Canadian Technical Asphalt Association*, 15-18 November, Ottawa, Ontario, Canada, Goodman S (ed). Canadian Technical Asphalt Association: Victoria, BC, Canada; 433–450.

30. Thompson S.F., Construction in Permafrost. Western Construction. No. 10, 1953, 58-65.

31. Veuille S, Fortier D, Verpaelst M, Grandmont K, Charbonneau S. 2015. Heat advection in the active layer of permafrost: Physical modelling to quantify the impact of subsurface flow on soil thawing. In GéoQuébec 2015 Proceedings of the 68th Canadian Geotechnical Conference and the 7th Canadian Permafrost Conference, 20–23 September, Québec City, Québec, Adaptation of Transportation Infrastructure on Degrading Permafrost 363 Copyright © 2016 John Wiley & Sons, Ltd. Permafrost and Periglac. Process., 27: 352–364 (2016) Canadadigital release. Canadian Geotechnical Society <http://www.cgs.ca>.

32. Wen Z, Sheng Y, Ma W. 2009. Experimental study on protection of cutting slope in permafrost region. Journal of Railway Engineering Society 130: 1–5 in Chinese.

33. Zhang MY, Lai YM, Gao ZH, Li DQ. 2006. Experimental investigation on influence of grain-diameter on cooling effect of crushed rock revetment with permeable boundary. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 28: 1986–1990 in Chinese.

34. Анисимов, О. А. Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть 21 века / О. А. Анисимов, В. А. Лобанов, С. А. Ренева // – Метеорология и гидрология – 2007. – № 10. – С. 20–30.

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

36. Ашпиз, Е. С. Проектирование земляного полотна железных дорог в зоне многолетнемерзлых грунтов / Е. С. Ашпиз // Наука и транспорт. Транспортное строительство. – 2012. – №4. – С. 18–21.

37. Бедрин, Е. А. Обеспечение термической устойчивости основания земляного полотна автомобильных дорог : 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.

38. Бедрин, Е. А. Определение направлений по обеспечению устойчивости земляного полотна дорог в зоне вечной мерзлоты / Е. А. Бедрин // Вестник СибАДИ. – 2011. – №20.

39. Бешенцев, В. А. Изменение климата как фактор воздействия на криолитозону севера Западной Сибири / В. А. Бешенцев // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Труды международной конференции / под ред. В. П. Мельникова и Д. С. Дроздова. – Тюмень : Изд-во Эпоха. – 2015. – С. 24–26.

40. ВСН 84-89. Изыскание, проектирование и строительства автомобильных дорог в условиях вечной мерзлоты / Минтрансстрой: Введ. 30.03.1989. Взамен ВСН 84-75. – М. : Союздорнии, 1990. – 271 с.

41. Горелик, Я. Б. Влияние поверхностного обводнения на температурный режим мерзлых грунтов / Я. Б. Горелик, И. В. Земеров // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2020. – Том 6. № 1 (21) – С. 10–40. – DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40

42. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. – Введ. 2013-01-01. – М. : Стандартиформ, 2013.

43. ГОСТ 5180-2015. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Введ. 2016-01-04. – М. : Стандартиформ, 2016.

44. ГОСТ 33149–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Правила проектирования автомобильных дорог в сложных условиях. – Введ. 2015-01-12. – М. : Стандартиформ, 2015.

45. Губарьков, А. А. Геокриологические условия месторождений им. Р.Требса, им. А.Титова (побережье Баренцева моря и Большеземельская тундра) / А. А. Губарьков, Ю. А. Дворников, А. А. Ишков, А. В. Хомутов, А. С. Якимов, Е. В. Еланцев // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Труды международной конференции / под ред. В. П. Мельникова и Д. С. Дроздова. – Тюмень : Изд-во Эпоха – 2015. – С. 84–88.

46. Гуков, А. Ю. Опыт инженерно-геокриологического мониторинга грунтовых дорог в северной Якутии. современные инженерные решения и технологии строительства на вечномёрзлых грунтах / А. Ю. Гуков, О. Н. Стручкова, А. Н. Вишневский., М. Е. Иолич, П. Д. Фукалов. // Международная конференция. Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения – Тюмень. – 2008. – С. 79–80.

47. Дыдышко, П. И. Деформации земляного полотна железнодорожного пути и их устранение в условиях вечной мерзлоты / П. И. Дыдышко // Криосфера Земли. – 2017. – Т. XXI, №4. – С. 43–57.

48. Ершов, Э. Д. Общая геокриология: Учебник / Э. Д. Ершов – М.: МГУ, 2002. – 682 с.

49. Исаков, В. А. Температурный режим в основаниях дорог в вечной мерзлоте / В. А. Исаков // Вестник Московского университета. Серия 5. География. –2015. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/temperaturnyy-rezhim-v-osnovaniyah-dorog-v-vechnoy-merzlote> (дата обращения: 09.02.2022).

50. Исаков, В.А. Результаты обследования грунтов основания железной дороги Улак – Эльга на участке 0 – 54 км / В. А. Исаков, М. С. Наумов, Ф. С. Телков // Материалы Международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной XX-летию создания ООО НПО «Фундаментстройаркос» – Тюмень : Отпечатано в типографии "Сити-Пресс" – 2011. – 456 с.

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

52. Кондратьев, В. Г. Опыт строительства и проблемы стабильности земляного полотна Цинхай-Тибетской железной дороги на участках вечной мерзлоты / В. Г. Кондратьев // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2009. – №6 (25). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-stroitelstva-i-problemy-stabilnosti-zemlyanogo-polotna-tsinhay-tibetskoy-zheleznoy-dorogi-na-uchastkah-vechnoy-merzloty> (дата обращения: 2.03.2022).

53. Кондратьев, В. Г. Охлаждение массива многолетнемерзлых грунтов в основании дорог путем регулирования потоков холода и тепла / В. Г. Кондратьев // Грунтоведение. – СПб. : Изд-во «Центр генетического грунтоведения». – 2013. – № 1 – С. 34–47.

54. Кондратьев, В. Г. Стабилизация земляного полотна на вечномерзлых грунтах / В. Г. Кондратьев – Чита : Забтранс, 2011. – 176 с.

55. Кондратьев, В. Г., Королев А. А., Карлинский М. И., Позин В. А., Розанов А. С. Железнодорожный путь на сильнольдистых вечномерзлых грунтах. Патент на изобретение № 1740555, 1992.

56. Кононович, И. А. Национальные интересы России в арктических морях / И. А. Кононович // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. – 2008. – №70.

57. Костиненко, Г. И. Строительство на вечной мерзлоте за рубежом (Аляска, Канада, Гренландия) / Г. И. Костиненко. – М. : Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1969. – 63с.

58. Кравцова, В. И. Распространение термокарстовых озер в России в пределах зоны современной мерзлоты / В. И. Кравцова// Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2009. – №3. – URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/rasprostranenie-termokarstovyh-ozер-v-rossii-v-predelah-zony-sovremennoy-merzloty> (дата обращения: 09.02.2022).

59. Кудрявцев, В. А. Классификационная схема приемов по направленному изменению мерзлотных условий / В. А. Кудрявцев, Э. Д. Ершов // Мерзлотные исследования. Вып. IX. – М. : Изд-во Моск. ун-та – 1969. – С. 155-157.

60. Кудрявцев, С. А. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечноэлементные расчеты) / С. А. Кудрявцев, И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов. – СПб. : Группа компаний «Геореконструкция», 2014. – 248 с.

61. Кудрявцев, С. А. Расчеты процесса промерзания и оттаивания по программе «Termoground» / С. А. Кудрявцев // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2004 г. – №4. – С. 83–97.

62. Кудрявцев, С. А. Численное моделирование при реконструкции и ремонте линейных сооружений на буронабивных свайных фундаментах в сезоннопромерзающих грунтах Дальнего Востока / С. А. Кудрявцев, И. В. Шестаков, А. А. Петерс // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2016. – № 2. – С. 65–74.

63. Кудрявцев, С. А., Кажарский А.В. Численное моделирование процесса промерзания и оттаивания вечномерзлого основания конструкций железнодорожного земляного полотна / С. А. Кудрявцев, А. В. Кажарский // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10558> (дата обращения: 09.02.2022)..

64. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 336 с.

65. Львов, А. В. Поиски и испытания водоисточников водоснабжения на Западной части Амурской железной дороги, в условиях "вечной мерзлоты": летний и зимний режим рек, грунтовых вод и условие питания глубоких водоносных толщ в районах сплошного распространения "вечной" мерзлоты

почвы / А. В. Львов. – Иркутск : Типо-лит. П.И.Макушина и В.М.Посохина, 1916. – 881 с.

66. Мельников, В. П. Климатические и криогенные факторы обустройства северных территорий / В. П. Мельников, Д. С. Дроздов, Г. В. Малкова // Геология и разведка. – 2009. – Т. XV, №6. – С. 75–82.

67. Мельников, В. П. Современные проблемы геокриологии / В. П. Мельников, А. В. Брушков, Д. С. Дроздов // Материалы Пятой конференции геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14-17 июня 2016 г. Т. 1. Пленарные доклады. Часть 1. Инженерная геокриология. Часть 2. Линейные сооружения в криолитозоне. Часть 3. Сезонно-действующие и охлаждающие системы в криолитозоне. Часть 4. Геофизические исследования в криолитозоне при строительстве. – М. : Университетская книга. – 2016. – С. 5–25.

68. Минайлов, Г. П. Способы понижения температуры вечномерзлых грунтов на железных и автомобильных дорогах путем применения каменной наброски: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.11 – Москва, 2003. – 37 с.

69. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 2-е изд., стер. – Москва : Энергия, 1977. – 343 с.

70. Облогов, Г. Е. Межгодовая изменчивость климатических характеристик, определяющих динамику мерзлых толщ на полуострове Ямал / Г. Е. Облогов, Ю. В. Коростелев, П. Т. Орехов, Г. В. Малкова, А. А. Васильев // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Труды международной конференции / под ред. В. П. Мельникова и Д. С. Дроздова. – Тюмень : Изд-во Эпоха. – 2015. – С. 265–268.

71. Общее мерзлотоведение / В. А. Кудрявцев, В. Н. Достовалов, Н. Н. Романовский [и др.]. – М. : Изд-во МГУ, 1978 – 464 с.

72. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. - Введ. 2016-01-04. – М.: Информавтодор, 2001.

73. Основы геокриологии (мерзлотоведения) : в 2 ч. / П. Ф. Швецов, А. А. Мейсте, Н. И. Салтыков [и др.]. – М. : Изд-во АН СССР, 1959. – Ч. I. – 460 с.; – Ч. II. – 367 с.

74. Основы геокриологии: учебное пособие / А. Д. Маслов, Г. Г. Осадчая, Н. В. Тумель, Н. А. Шполянская. – Ухта : Институт управления, информации и бизнеса, 2005. – 176 с.

75. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях : учеб. пособие для геол. специальностей вузов / В. А. Кудрявцев, Л. С. Гарагуля, К. А. Кондратьева, В. Г. Меламед ; под ред. В. А. Кудрявцева. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1974. – 431 с.

76. Остапенко, В. Арктический вектор развития России / В. Остапенко // Морской сборник. – 2012. – № 6. – С.32.

77. Пархоменко, С. Г. Мерзлотоведение как учение о криофильных горных породах / С. Г. Пархоменко // Труды комитета по изучению вечной мерзлоты АН СССР. – М. : Л. : Изд-во АН СССР. – 1938. – Т. VI. – С. 177–194.

78. Пат. 2153038 РФ, Е 01 С 3/0. Способ предохранения вечномерзлых грунтов от многолетнего протаивания / В. Д. Каргополов (Россия). – № 97109995/03; Заявлено 30.05.1997; Опубл. 20.07.2000, Бюл. № 20.

79. Пат. 2160336 РФ, Е 01 С 3/0. Земляное полотно на вечномерзлом основании / С. М. Жданова (Россия). – № 99104110/03; Заявлено 01.03.1999; Опубл. 10.12.2000, Бюл. № 34.

80. Пономарева, О. Е. Реакция криогенных ландшафтов северной тайги Западной Сибири на изменение климата / О. Е. Пономарева, А. Г. Гравис, Е. В. Устинова, Т. А. Бляхарчук, Н. Г. Москаленко, Н. М. Бердников // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Труды международной конференции / под ред. В. П. Мельникова и Д. С. Дроздова. – Тюмень : Изд-во Эпоха. – 2015. – С. 300–303.

81. Рекомендации по производству опережающих исследований для строительства в районах распространения вечномерзлых грунтов / ПНИИИС. – М. : Стройиздат, 1986. – 88с.

82. РСН 67-87 Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза измерений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами / Госстрой России. М. : ГУП ЦПП, 1988. - 100 с.

83. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016614404 Российская Федерация. QFrost / Песоцкий Д. Г.; заявитель и правообладатель Песоцкий Д. Г. – № 2016611710; заявл. 02.03.2016; опубл. 20.05.2016. – 1 с.

84. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. – Введ. 2013-01-01. – М. : Минрегион России, – 2012.

85. СП 313.1325800.2017. Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства. – Введ. 06-15-2018. – М. , 2018.

86. 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".

87. Спиридонов, А.М. Технология железнодорожного строительства: Учебник для специалистов / А.М. Спиридонов, А.М. Призмазов – Москва :УМЦ ЖДТ, 2014. - 592 с. – ISBN 978-5-89035-610-9

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

89. Толстихин, Н. И. Криосфера и криопэги / Н. И. Толстихин // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1982. – № 3. – С. 115–117.

90. Фага, А. Н. Перспективы развития современных геофизических исследований ЯНАО: многоцелевая инженерно-геофизическая лаборатория / А. Н. Фага, А. Н. Зайцев, А. А. Гидеон // Арктика, Субарктика: мозаичность,

контрастность, вариативность криосферы: Труды международной конференции / под ред. В. П. Мельникова и Д. С. Дроздова. – Тюмень : Изд-во Эпоха. – 2015. – С. 387–390.

91. Фельдман, Г. М. Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов / Г. М. Фельдман. – Новосибирск : Наука, 1977. – 102 с.

92. Хрусталеv, Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне: Учебник. М. / Л.Н. Хрусталеv. – Москва : Издво Моск. унта, 2005 – 544 с.

93. Хрусталеv, Л. Н. Численный метод решения задачи промерзания – оттаивания грунта / Л. Н. Хрусталеv, Л. Н. Черкасова // Изв. Сибирского отд. А.Н. СССР, серия техн. наук. – 1966. – Т. 6, № 2. – С. 12–24.

94. Цернант, А. А. Сооружение земляного полотна в криолитозоне: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.23.13, 05.22.06 – Москва, 1998. – 97 с.

95. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов : учебн. пособие / Н. А. Цытович. – М. : Высшая школа, 1973. – 448 с.

96. Шуваев, А. Н. Физико-математическое моделирование грунтовых насыпей из мерзлых грунтов / А. Н. Шуваев // Вестник ТГАСУ. – 2016. – №5 (58) – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-matematicheskoe-modelirovanie-gruntovyh-nasypey-iz-merzlyh-gruntov> (дата обращения: 01.03.2022).

ПРИЛОЖЕНИЕ А**СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ**
научно-исследовательских работ в строительство

Результаты исследований аспиранта ФГБОУ ВПО ТюмГАСУ А.С. Макарова выполненные под научным руководителем канд. техн. наук, доцента Ал.Н. Краева внедрены при выполнении работ по строительству автомобильной дороги «Сургут-Салехард, участок Новый Уренгой – Надым 1 пусковой комплекс: п. Пангоды (км 870) – п. Правохеттинский (км 936)». Участок ПК 594+00 – ПК 594+90. Тип поперечного профиля 3А. Техническим результатом мероприятий по стабилизации основания и насыпи земляного полотна является то, что в южной откосной части земляного полотна сформирован грунтовой валик из минерального непучинистого сыпучемерзлого грунта, окаймленный армирующим геосинтетическим материалом, размещенным в основании подоткосной южной части автомобильной дороги, образующий полуобойму с закреплением нижних краев в толще грунта с использованием горизонтальных анкерных полиэтиленовых труб вставленных в петлю, образованную нижним краем армирующего геосинтетического материала при его термоспаивании.

Проектное решение реализовано на ПК 594+00 – ПК 594+90 согласно актов выполненных работ и акта ввода в эксплуатацию автомобильной дороги в 2013 г.

Последующий мониторинг по состоянию на 01.10.2015 г. обследования асфальтобетонного покрытия и земляного полотна свидетельствует о существенном снижении деформаций и дефектов.

Генеральный директор
ООО «Дорстройтехнология»



Е.И. Хожай

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Общество с ограниченной ответственностью
«Тюменское инновационное предприятие Института криосферы - 1»
ООО «ТИП-ИК-1»

626022, Российская Федерация, Тюменская область,
Нижнетавдинский район, с. Нижняя Тавда, ул. Дорожная,
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

№ 29/10-20 от 08.10.2020 г.

Генеральному директору ООО ПКБ
«Теплостройпроект»
Толстяковой Л.В.

Генеральному директору ГКУ
«Управление автомобильных дорог
РС(Я)»
Филиппову С.В.

*Обустройство экспериментальных участков,
расположенных на дороге Устье - Камнедей*

Цель строительства экспериментального участка дороги:

- Изучение влияния на морозное пучение дорожной одежды при применении теплоизоляционного материала Пеноцеолит и выработка рекомендаций для проектирования и строительства автомобильных дорог в районах с ММГ .

Обустройство эксперимента:

1. Количество экспериментальных площадок для мониторинга, 3шт. По пикетам: №1 ПК 10+50, №2 ПК 16+00, №3 ПК 19+40
 2. Экспериментальные площадки №1 и №3 состоят из 2х примыкающих участков: площадка с уложенным теплоизоляционным материалом (Приложение 3) и контрольная площадка без теплоизоляционного материала, длина участков 30 метров.
 3. Площадка №2 состоит из 4х примыкающих участков: участок с уложенным теплоизоляционным материалом и покрытием ГПС (Приложение 3), участок с
-

уложенным теплоизоляционным слоем и покрытием асфальтобетоном (Приложение 3), участок с уложенным теплоизоляционным материалом и покрытием ГПС (Приложение 4), участок контрольный без теплоизоляционного материала, длина участков 30 метров

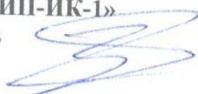
4. Для ведения мониторинга использовать приборы для определения температуры грунта, которые необходимо уложить по схеме (приложение №5)
5. Блок измерительных приборов укладывается в герметичный антивандальный контейнер
6. Для закладки температурных датчиков (термокос) на контрольном участке прокапывается траншея на глубину вскрытия экспериментального участка бурятся скважины согласно схеме закладки и укладывается паук разветвление с датчиками. После укладки проверяется работа датчиков
7. Необходимо проведения геодезических изысканий для большей информации проведения эксперимента. Рекомендуется проведение геодезического изыскания по всей длине экспериментального участка. На площадках где измеряется температурный режим, изыскание проводить в зафиксированных точках желательно на линии закладки температурных датчиков.
8. Закладка температурных датчиков (термокос) производится после вскрытия дорожного полотна перед укладкой слоев. Бурение скважин под термопары с отбором проб через каждые 50 см (пробы фиксируются к месту отбора по глубине в герметичные пакеты).
9. При обустройстве экспериментальных площадок производится фотофиксация этапов обустройства.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

1. Перечень исполнителей
2. Заключение: толщина слоя утеплителя
3. Схема укладки слоев
4. Схема для обводненного участка
5. Схема расположения датчиков

С уважением,

Директор ООО «ТИП-ИК-1»
к.т.н Н.Л. Русаков



Приложение 1

К письму № 29/10-20 от 08.10.2020 г.

1. Иванов Константин Сергеевич, к.т.н., старший научный сотрудник ИКЗ СО РАН
 2. Галлямов Денис Расимович, н.с. ООО «ТИП-ИК-1»
 3. Краев Алексей Николаевич, к.т.н., Заведующий центральной научно-исследовательской лабораторией "Строительство на вечной мерзлоте", профессор кафедры "Строительные конструкции" ФГБОУ ВО "ТИУ"
 4. Макаров Алексей Сергеевич. Ассистент-стажёр кафедры «АТСиДМ», строительного института, тюменского индустриального университета.
 5. Шанхоев Зураб Шабазгиреевич. Ассистент кафедры «АТСиДМ», строительного института, тюменского индустриального университета.
-

ПРИЛОЖЕНИЕ В

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2732774

Автомобильная дорога на многолетнемерзлых грунтах

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский индустриальный университет" (ТИУ) (RU)*

Авторы: *Краев Алексей Николаевич (RU), Краев Андрей Николаевич (RU), Шанхоев Зураб Шабазгиреевич (RU), Макаров Алексей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2019135385

Приоритет изобретения 05 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 22 сентября 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 05 ноября 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иллев Г.П. Иллев