

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

На правах рукописи



Шанхоев Зураб Шабазгиреевич

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

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 – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	11
1.1 Анализ состояния вопроса	11
1.2. Способы повышения устойчивости основания автомобильной дороги на территории распространения многолетнемерзлых грунтов	21
1.3. Теоретические расчеты устойчивости автомобильной дороги на многолетнемерзлом основании.....	30
1.4. Выводы по первой главе.....	40
ГЛАВА 2. НАТУРНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА И УГЛА НАКЛОНА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ММГ В ОСНОВАНИИ ЗЕМПОЛОТНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕГЛУБОКИХ ВОДОЕМОВ	41
2.1. Факторы, влияющие на формирование наклонной верхней границы многолетнемерзлых грунтов основания	41
2.2. Натурные исследования температурного режима и напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлого основания автомобильной дороги при воздействии неглубокого водоема	54
2.3. Методика проведения натурных исследований с конструктивно-технологическим мероприятием на экспериментальном участке автомобильной дороги ПК597+20 – ПК597+45	60
2.4. Приборы и оборудование для проведения натурных экспериментальных исследований	63
2.5. Анализ результатов натурного эксперимента и сопоставление с численными и аналитическими решениями.....	68
2.6. Выводы по главе 2.....	79
ГЛАВА 3. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МЕРОПРИЯТИЕ, НАПРАВЛЕННОЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА И УГЛА НАКЛОНА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ	

ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕГЛУБОКИХ ВОДОЕМОВ.....	81
3.1. Разработка конструктивно-технологического мероприятия	82
3.2. Обоснование критериев выбора геометрических размеров конструктивно-технологического мероприятия	84
3.3. Результаты численного моделирования по обоснованию геометрических размеров конструктивно-технологического мероприятия	93
3.4. Выводы по третьей главе.....	100
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕГЛУБОКИХ ВОДОЕМОВ	102
4.1. Маломасштабная экспериментальная модель земполотна автомобильной дороги на основании с многолетнемерзлым грунтом	102
4.2. Приборы и оборудование для проведения маломасштабных экспериментальных исследований	105
4.3. Планирование эксперимента.....	112
4.4. Результаты экспериментального исследования в лабораторных условиях многолетнемерзлого основания автомобильной дороги при воздействии неглубоких водоемов	128
4.5. Разработка методики расчета изменения во времени устойчивости основания автомобильной дороги с многолетнемерзлыми грунтами при воздействии неглубоких водоемов.....	130
4.6. Выводы по четвертой главе	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ В	155

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Арктическая зона Российской Федерации является одним из экономически развивающихся регионов страны. Ее интенсивное освоение связано со стратегическим значением данной территории, т. к. здесь содержится большая часть полезных ископаемых. Для укрепления стратегического влияния и дальнейшего экономического роста региона необходимо развивать транспортную инфраструктуру.

Основной задачей при проектировании, строительстве автомобильных дорог (АД) на *многолетнемерзлых грунтах* (ММГ) является обеспечение надежности основания линейных сооружений на протяжении всего срока службы, от которой зависит безопасное и бесперебойное движение автотранспортных средств.

Низкие темпы строительства автомобильных дорог на многолетнемерзлом основании обусловлены суровыми климатическими условиями (период отрицательных температур длится до 10 месяцев в году).

В процессе эксплуатации автомобильных дорог на ММГ формируются участки, подверженные постоянному (более 30 суток) или периодическому (менее 30 суток) подтоплению, что приводит к образованию термокарстово-абразионных процессов с одной или с двух сторон в откосной части *земполотна* (ЗП) с развитием термокарстовых просадок, способствующих снижению эксплуатационной надежности сооружения.

В связи с повышением среднегодовых температур и увеличением осадков наблюдается рост обводненных участков линейных сооружений, прогноз появления которых на стадии проектирования затруднен. Скопление *поверхностных длительно стоящих вод* (далее по тексту – неглубокие водоемы) вдоль откосных частей *земполотна* приводит к дополнительному тепловому потоку за счет конвективного теплообмена, инфильтрации на границе «вода-откос» и фильтрации воды на границе «основание-земполотно». Данные факторы существенно влияют на изменение положения *верхней*

границы многолетнемерзлых грунтов (ВГММГ) и оказывают крайне негативное воздействие на устойчивость основания. Низкая эффективность водоотводных устройств и обводнение вдоль сооружения влияют на изменение температурного режима (ТР) и формирование в основании земполотна наклонной верхней границы многолетнемерзлого грунта (НВГММГ) относительно горизонтальной плоскости. В основании, выше границы прочного водонепроницаемого ММГ, формируется переувлажненная зона с низкими прочностными характеристиками грунта, которая является наиболее вероятной границей поверхности скольжения (НВГПС). Потеря устойчивости вдоль данной границы сопровождается развитием деформаций на дорожном покрытии в виде продольных и поперечных трещин. Таким образом, исследование и разработка подходов к расчету изменения устойчивости основания земполотна и проектированию конструктивно-технологических мероприятий (КТМ) при воздействии неглубоких водоемов являются актуальными задачами.

Степень разработанности темы исследования. Исследованием устойчивости многолетнемерзлого основания автомобильных и железных дорог занимались и занимаются: Б. Г. Аксенов, Е. С. Ашпиз, Б. В. Белоусов, Е. А. Бедрин, И. Г. Валынец, С. Е. Гречищев, Я. Б. Горелик, П. И. Дыдышко, В. А. Давыдов, И. Е. Евгеньев, Э. Д. Ершов, С. М. Жданова, И. А. Золотарь, В. А. Иванов, А. В. Кажарский, В. Д. Казарновский, И. С. Клейн, В. Г. Кондратьев, С. А. Кудрявцев, В. А. Кретов, Я. А. Кроник, С. Я. Луцкий, Ю. М. Львович, В. Н. Лонский, А. А. Малышев, Г. Д. Михайлов, А. А. Мельников, Н. А. Пузаков, В. В. Пассек, А. А. Цернант, Л. Н. Хрусталеv, А. Н. Шуваев, G. Cheng, J. Liu, A. Nurmikolu, T. Osterkamp, V. E. Romanovsky, B. Tai, Y. Tian, L. Zhang, и др.

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

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

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

Задачи диссертационного исследования:

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

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

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

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

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

Научная новизна работы состоит в следующем:

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

2. Предложено КТМ, обеспечивающее регулирование ТР, влияющего на формирование угла НВГММГ в основании ЗП, и способствующее повышению

устойчивости основания на обводненных участках вдоль откосов сооружения, а также препятствующее фильтрации воды на границе «основание-земполотно».

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

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

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

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

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

Методология и методы исследования:

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

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

Положения, выносимые на защиту:

- результаты полевых исследований изменения ТР и напряженного состояния многолетнемерзлого основания АД при воздействии неглубоких водоемов;
- КТМ, направленное на регулирование ТР и угла НВГММГ в основании ЗП, влияющее на устойчивость основания АД при воздействии неглубоких водоемов;
- результаты численных и маломасштабных экспериментов по установлению закономерностей влияния геометрических параметров КТМ на изменение ТР и повышение устойчивости основания АД при воздействии неглубоких водоемов;
- методика расчета изменения во времени устойчивости основания АД при воздействии неглубоких водоемов и подход к назначению параметров КТМ, обеспечивающего регулирование ТР и изменение угла НВГММГ в основании ЗП, с учетом выявленных закономерностей.

Достоверность результатов обеспечивается:

- выполнением натурных и лабораторных экспериментальных исследований с помощью современных известных и поверенных контрольно-измерительных комплексов;
- сопоставлением полученных экспериментальных и численных результатов с данными исследований известных авторов;
- сравнением полученных экспериментальных данных с результатами численных и аналитических решений.

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

Публикации. В рамках научного исследования опубликовано 11 научных работ, в том числе 1 патент на изобретение. 4 работы опубликованы

в рецензируемых научных изданиях. 1 работа в издании, входящем в международную базу цитирования Scopus.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. В объем работы входит 155 страниц напечатанного текста, 113 рисунков, 67 таблиц, 111 источников литературы.

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

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В главе представлен анализ трудов отечественных и зарубежных исследователей, а также опыт исследования автомобильных и железных дорог в условиях распространения ММГ и способы повышения устойчивости основания автомобильной дороги с применением КТМ.

1.1 Анализ состояния вопроса

Вечная мерзлота характеризуется двумя признаками: наличием в грунтовом массиве отрицательной температуры и прочностью замерзшего грунта, которая обеспечивается сцементирующим действием льда, связывающим частицы грунта. В работе [18] отмечается, что в условиях сухого климата при температуре ниже 0°C грунтовый массив находится не в мерзлом состоянии, то есть частицы грунта не сцементированы льдом.

В трудах А. А. Григорьева термин «вечная мерзлота» трактуется как слой литосферы, температура которой на протяжении годового цикла ниже плавления льда. В своих работах С. Г. Пархоменко рассматривает вечную мерзлоту как слой, который не оттаивает в течение всего года. Так как термин «вечная мерзлота» вызвал множество возражений, что привело к появлению альтернативных определений. Р. И. Аболин ввел понятие «постоянно мерзлый грунт». В свою очередь В. Б. Шостакович предложил называть такие грунты просто «мерзлота». Как полагают многие исследователи, наиболее удачным термином является предложенный Н. И. Толстихиным – «многолетняя мерзлота» [18].

В настоящее время к ММГ относят грунты, которые в условиях природного залегания находятся в мерзлом состоянии в течение трех лет и более [100]. ММГ образовались около 0,7 млн лет назад в результате

похолодания на Земле вследствие движения громадных ледяных масс на сушу из морей и океанов в процессе потепления и оттаивания.

Одним из первооткрывателей ММГ является путешественник, академик А. Ф. Миддендорф [18]. С 1843–1845 гг. он объехал огромные территории распространения мерзлых грунтов и сделал значительное количество термометрических наблюдений над мерзлыми грунтами.

Наиболее широко изучение ММГ началось в XX веке, связано оно было с обширным освоением северной части территории России, где грунты находятся в мерзлом состоянии. В период с 1927 по 1937 гг. М. И. Сумгиным была создана карта, отражающая границы распространения ММГ. Процесс возведения Забайкальского и Дальневосточного участков Транссибирской магистрали позволил советским исследователям детально изучить влияние природных факторов на инженерные сооружения [106]. Особый вклад по изучению ММГ внесли следующие авторы: П. И. Андрианов [9], Н. С. Богданов [16], С. С. Вялов [24], Б. Н. Городков [32], Ю. К. Зарецкий [25], А. В. Львов [65], К. Д. Морозов [69], С. Г. Пархоменко [82], М. И. Сумгин [55], Н. А. Цытович [106], А. Е. Федосов [101], Н. Е. Dishsaw [4], P. Kokkonen [2], Mollard J.D. [4], S. Taber [6], S. F. Thompson [5], A. M. Wintermeyer [7] и др.

Вечная мерзлота распространена примерно на 24 % территории всей планеты [1, 2]. В России многолетнемерзлые породы занимают 65 % от общей площади страны, что соответствует примерно 11 млн км² (см. рисунок 1.1). В центральных районах Сибири и Якутии мощность ММГ достигает 1500 м, в зоне сплошного распространения ММГ их мощность составляет от 100 до 800 м, а в зонах прерывистого и островного распространения – от 10 до 50 м [34, 55].

ММГ характеризуются не только вещественным составом, но имеют определенное строение, то есть размер, форму, а также пространственное взаиморасположение составных частей. ММГ различаются по трем основным текстурам: слитная (массивная), слоистая и ячеистая (сетчатая) (см. рисунок 1.2).



Рисунок 1.1. Карта распространения многолетнемерзлых пород в России

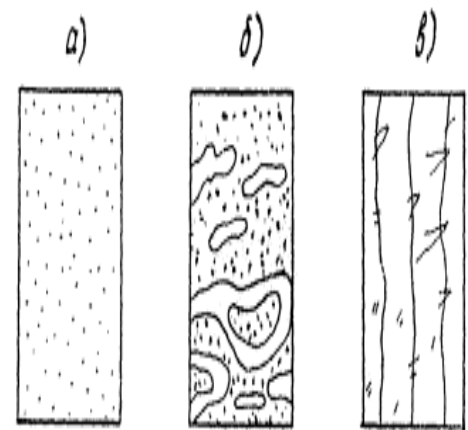


Рисунок 1.2. Основные виды текстуры ММП: а) слитная; б) слоистая; в) ячеистая

Слитная текстура ММП характеризуется отсутствием видимых невооруженным глазом ледяных тел, такие грунты, как правило, обладают высокими прочностными характеристиками и при оттаивании их прочностные свойства снижаются в меньшей степени. Слоистая текстура у ММП возникает при одностороннем медленном промерзании преимущественно глинистых грунтов, обладающих высокой влажностью. Слоистая текстура ММП обладает достаточно высокой прочностью, но при изменении температурно-криогенного режима их прочностные показатели резко падают [18].

Мощность ММП зависит от множества факторов: геологического строения, рельефа местности, мохового растительного слоя, водоемов и т. д.

ММП ежегодно подвержены циклическому промерзанию – оттаиванию, в результате чего формируется деятельный (активный) слой. В деятельном слое при промерзании – оттаивании происходят наиболее активные процессы, которые влияют на изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) и устойчивости основания под сооружением. Мощность деятельного слоя определяется по глубине наибольшего оттаивания на конец теплого периода (в конце лета или в начале осени). Как показывает практика, в

тенистой местности (лесном массиве) или на территориях с ненарушенной структурой мохового растительного покрова кровля ММГ находится выше, чем в открытой местности или с нарушенной структурой мохового растительного покрова. В зависимости от вида грунта, влажности изменяется и глубина деятельного слоя. К примеру, глубина оттаивания песчаного грунта больше, чем у глинистого, мощность деятельного слоя у сухого грунта больше, чем у влажного. Если местность холмистая, то склон, направленный на юг, будет иметь глубину оттаивания больше, чем тот, что направлен на север [18].

Деятельный слой подразделяют на сливающийся и несливающийся. Если деятельный слой промерзает до границы многолетнемерзлых грунтов, его называют сливающимся, если слой не доходит до границы ММГ, образуя таликовую зону (слой грунта с положительной температурой) между деятельным слоем и слоем ММГ, его называют несливающимся (см. рисунок 1.3) [99].

Таликовые зоны на ММГ можно разделить на временные и постоянные. Временные таликовые зоны могут формироваться в результате ранних зимних осадков, высота которых превышает среднегодовое значение, результатом формирования талика может быть теплая зима. Мощность таликовых зон варьируется в процессе промерзания грунта, так как таликовые зоны могут исчезнуть на определенном этапе в результате окончательного промерзания грунта, этим и обусловлен термин «временные таликовые зоны». Таликовые зоны считаются постоянными, если они существуют непрерывно более года [85].

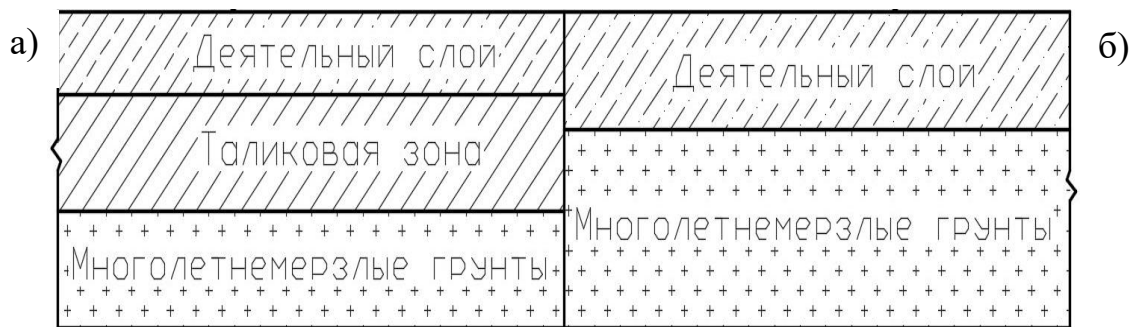


Рисунок 1.3. Схема расположения слоев грунта в основании на ММГ: а) несливающаяся, б) сливающаяся

При строительстве сооружений на ММГ необходимо учитывать такие криогенные процессы как: солифлюкция – процесс вязкого и вязкопластичного течения оттаявшего грунта по склону, термокарст – образование подземных пустот, связанных с оттаиванием льда или ММГ, морозное пучение – увеличение объема грунта при промерзании, морозобойное трещинообразование – сжатие верхних слоев грунта при отрицательных температурах и т. д.

По сравнению с зарубежными странами Арктическая часть РФ считается наиболее развитой, здесь проживает 5 % населения страны, в некоторых городах население составляет более 100 тыс. человек, хорошо развита городская, транспортная и промышленная инфраструктура. Также здесь расположена единственная в мире Билибинская атомная электростанция. Доходы страны от освоенной территории Арктической зоны составляют 11 %. На Арктическую зону приходится более 10 % запаса мировой нефтедобычи, более 20 % природного газа. СССР стал первой страной в мире, начавшей добычу газа и нефти в Арктической зоне на суше. Если рассматривать Арктическую зону РФ, то в этом регионе добывается более 90 % природного газа и более 70 % нефти [78, 30].

Арктическая зона считается слабоизученной [72], освоение данной территории затрудняется из-за сурового климата. Для дальнейшего развития региона необходимо развивать и модернизировать существующую транспортную инфраструктуру, которая нужна не только для освоения новых

месторождений полезных ископаемых, но и для укрепления обороноспособности России. В последнее время идет наращивание военного потенциала на территориях распространения ММГ. Для оперативного соединения групп немедленного реагирования или отражения военной агрессии необходимо обеспечить Арктическую зону автомобильными и железными дорогами, соответствующими нормативным требованиям.

Основным фактором, который влияет на агградацию ММГ, является отрицательная среднегодовая температура [55]. Уменьшение площади ММГ связано с потеплением климата. С повышением среднегодовой температуры в России наблюдается значительное увеличение зимних осадков и сокращение снежного периода. Увеличение снежного покрова приводит к дополнительному тепловому воздействию на ММГ. В работах А. И. Воейкова, М. И. Сумгина рассматривается влияние снежного покрова на изменение термического режима грунтов [18]. Многочисленные натурные наблюдения с 1970 года фиксируют практически повсеместное увеличение среднегодовой температуры верхнего слоя ММГ. На севере Европейской территории России она составила 1,2–2,8 °С, в Центральной Якутии 1,5° С, на севере Западной Сибири 1,0 °С, для Восточной Сибири температура ММГ повысилась на 1,3 °С [78].

Как отмечалось выше, изменение климата приводит к увеличению температуры ММГ, влияя на интенсивность проявления геокриологических процессов и тем самым снижая устойчивость основания линейных сооружений и сокращая срок их службы.

Одной из основных проблем, связанных с потеплением климата, является формирование термокарстовых озер (см. рисунок 1.4). Их рост фиксируется по всей Арктической зоне РФ. Необходимым условием образования термокарстового озера являются подземные льды. Из-за протаивания подземных льдов образуются подземные пустоты и просадочные формы рельефа местности. Образовавшиеся просадки обычно заполняются водой и тем самым формируют термокарстовое озеро [60]. Формирование

термокарстовых озер многими исследователями объясняется как результат изменения внешних термодинамических условий. Одним из основных факторов массового развития термокарста, как полагает Н. Н. Романовский, является увеличение среднегодовой температуры и повышение влажности многолетнемерзлых грунтов основания [86].

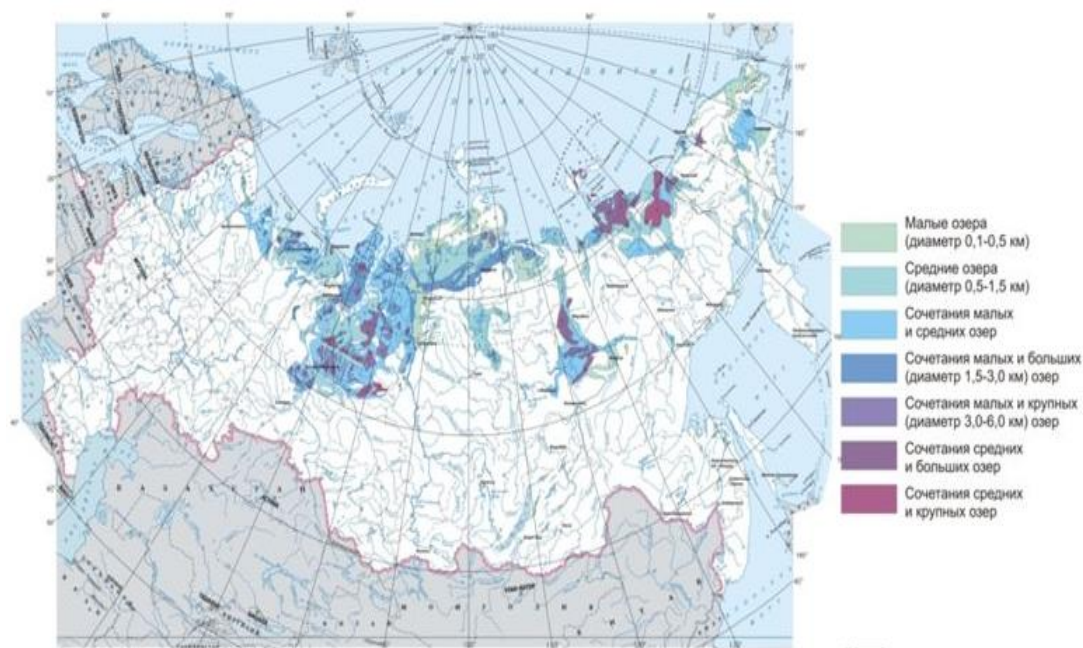


Рисунок 1.4. Карта распространения термокарстовых озер на территории России

Ю. Л. Шур на основании своих исследований и научных открытий других авторов выявил две основные причины формирования термокарстовых озер, которые приведены в таблице 1.1. [108, 109].

Таблица 1.1

Причины возникновения термокарста

Изменение теплового баланса	
Процессы	
Увеличение прихода тепла	Уменьшение термического сопротивления поверхности
Природные	
Потепление климата; усиление континентальности	Смена растительного покрова; минерализация органогенного горизонта

Техногенные	
Искусственные источники тепла	Минерализация органогенного горизонта; уничтожение почвенного покрова; удаление части почвенно-грунтового слоя
Изменение водного баланса	
Процессы	
Увеличение разности осадки (испарение)	Изменение условий дренирования
Природные	
Увеличение количества осадков; уменьшение испарения; увеличение снежного покрова	Неотектонические движения
Техногенные	
Увеличение количества осадков; уменьшение испарения; увеличение снежного покрова	Подпруживание поверхностного стока

Согласно исследованиям Г. Ф. Грависа, Е. М. Катасонова, Н. И. Мухина, причиной формирования термокарстовых процессов является скопление воды или образование водоемов на участках с подземным льдом [36, 87].

Э. Д. Ершов считает, что термокарст образовывается, когда происходит смена знака среднегодовой температуры ММГ или глубина сезонного оттаивания начинает превышать глубину залегания подземного льда, такой процесс возникает при изменении теплообмена на поверхности грунтов [47].

В основном термокарстовые озера могут вызывать неблагоприятные условия для эксплуатации автомобильных и железных дорог. Термокарстовые озера формируются вдоль откосных частей земполотна и способствуют избыточному увлажнению грунтов основания и верхнего строения, а также изменению температурного режима грунтов. Первым линейным сооружением, построенным на ММГ, была Забайкальская железная дорога в 1900 г. Так как в то время мерзлота была слабо изучена, железную дорогу проектировали согласно существующим нормам, что привело к увеличению стоимости проекта и повышению аварийности. При строительстве Амурской железной дороги в 1912–1916 гг. также не учли специфичность ММГ, которые подвержены систематическим деформациям в период

промерзания – оттаивания. После завершения строительства Амурской железной дороги геологом А. В. Львовым были описаны геокриологические процессы, которые могли стать причиной возникновения деформаций [18].

Многолетние наблюдения показали, что термодинамическое равновесие у геотехнической системы «многолетнемерзлое основание-земполотно» наступает через 20–25 лет после возведения земполотна [49].

А. В. Литовко, И. И. Сыромятников при проведении комплексных инженерно-геокриологических исследований автомобильной дороги «Умнас» выбрали два ключевых участка исходя из условия развития криогенных процессов и их воздействия на автомобильную дорогу. Согласно проведенным исследованиям, авторы пришли к выводу, что деформации автомобильной дороги связаны с неравномерным оттаиванием ММГ. Деградация ММГ связана с термокарстовым образованием вдоль откосной части автомобильной дороги [66].

Н. С. Александрова оценила изменение геокриологических условий при восстановлении железной дороги Салехард – Надым под влиянием техногенных факторов. Возникшие деформации сооружения автор связывает с вытаиванием высокольдистых грунтов основания. Также на аварийность сооружения влияли резкие просадки грунтов основания, просадки формируются из-за того, что водопропускные сооружения перестают функционировать и вода скапливается вдоль откосной части земполотна [15].

В нормативной документации скопление воды вдоль откосных частей земполотна классифицируется в зависимости от типа увлажнения верхнего слоя грунтов и продолжительности периода застоя [41]

Г. П. Минайлов, В. В. Гулецкий в своих работах описывают, что практически все деформации, возникшие в период эксплуатации БАМа, связаны с застоем или фильтрацией воды, скапливающейся вдоль откосных частей земполотна [71].

Согласно исследованиям С. Н. Юсупова, при скоплении воды вдоль откосных частей земполотна происходит резкое растепление грунтов основания, что способствует деградации ММГ [111].

Земполотно, находящееся в зоне периодического или постоянного подтопления, профессор Г. М. Шахунянц классифицирует как «земполотно в сложных ситуациях» [110]. Для таких участков необходимо разрабатывать индивидуальные проектные мероприятия.

В своих исследованиях В. А. Исаков связывает часть деформаций, возникших на участке железной дороги ст. Голиково – Валек, с изменением угла откосов земполотна. В свою очередь угол откосов земполотна изменяется в результате подтопления насыпи и абразии берегов термокарстовых озер вдоль откосных частей сооружения. Также автор отмечает, что водоемы вдоль откосных частей сооружения глубиной «первые десятки сантиметров» понижают кровлю ММГ основания вдвое больше, чем на соседних участках вне зоны подтопления [50].

Согласно действующим нормативным документам [26, 99], при проектировании автомобильных дорог в криолитозоне необходимо руководствоваться одним из принципов:

— первый принцип проектирования подразумевает поднятие ВГММГ не ниже подошвы земполотна и сохранение ВГММГ основания на требуемом уровне на протяжении всего срока службы линейного сооружения. В таком случае необходимо учитывать, что поднятие ВГММГ основания до уровня подошвы земполотна и выше происходит не под всей площадью основания земполотна, а в пределах основной площадки сооружения. Актуальным остается вопрос сохранения ВГММГ основания под откосными частями земполотна.

— второй принцип проектирования предусматривает оттаивание ММГ основания на расчетную глубину в процессе всего срока службы линейного сооружения в зависимости от типа покрытия.

— третий принцип проектирования реализуется при предварительном оттаивании ММГ основания и осушении дорожной полосы.

Анализируя труды многих авторов, можно сделать вывод, что причиной разрушения верхнего строения линейных объектов является деградация ММГ, что, в свою очередь, приводит к потере устойчивости основания. Исследование устойчивости основания автомобильной, железной дороги на ММГ является уже на протяжении долгих лет одним из основных направлений инженерного мерзлотоведения.

Дороги северной части Российской Федерации должны соответствовать нормативным требованиям и гарантировать безопасное и бесперебойное движение автотранспортных средств. Традиционные методы по обеспечению устойчивости основания автомобильной дороги на ММГ практически не справляются с поставленной задачей, так как интенсивность транспортных потоков возрастает, соответственно, увеличивается нагрузка на дорожную инфраструктуру.

Для достижения данной цели необходимо прорабатывать новые конструктивные мероприятия по увеличению устойчивости основания автомобильных дорог с ММГ. Накопленный многолетний опыт по совершенствованию транспортной инфраструктуры на территории распространения ММГ позволяет специалистам прорабатывать различные подходы, направленные на повышение эксплуатационных показателей линейного объекта. В литературном обзоре представлен анализ результатов научных исследований устойчивости основания с ММГ при строительстве автомобильных и железных дорог.

1.2. Способы повышения устойчивости основания автомобильной дороги на территории распространения многолетнемерзлых грунтов

Деформационные свойства оттаивающих грунтов исследовали многие отечественные и зарубежные авторы: С. С. Вялов, И. Н. Вотяков, М. Н.

Гольдштейн, Э. Д. Ершов, Ю. К. Зарецкий, В. Ф. Жуков, Я. А. Кроник, М. Ф. Киселев, П. И. Котов, Г. И. Лапкин, В. Д. Пономарев, Г. И. Пахомова, А. М. Пчелинцев, Г. В. Порхаев, Л. Т. Роман, В. П. Ушкалов, А. Е. Федосов, Г. М. Фельдман, Д. И. Федорович Л. Н. Хрусталева, В. З. Хилимонюк, Н. А. Цытович, М. Н. Царапов, Г. В. Шушерина, F. Crory, E. J. Chamberlain, K. D. Eigenbrod, R.C. Gupta, C. Harris, L. D. Keil, A. J. Luscher, N. R. Morgenstern, E.C. McRoberts, J. F. Nixon, N.M. Nilsen, C. G. Ryden, L.B. Smith, T.L. Speer, G.H. Watson и др.

В 1930 г. И. Н. Белокрылов положил начало изучению влияния земполотна на ММГ основания. В результате проведенных инженерно-геологических изысканий на участке Забайкальской железной дороги автором было установлено, что сформированное мерзлое ядро в северной откосной части земполотна послужило причиной смещения верхней части южного откоса земполотна по поверхности мерзлоты (см. рисунок 1.5) [17].

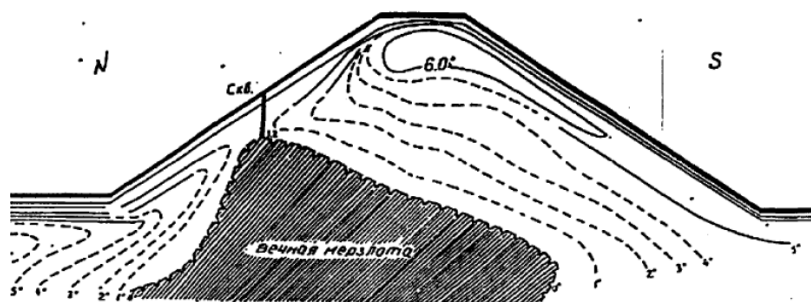


Рисунок 1.5. Поперечный профиль земполотна

В сложных климатических и инженерно-геологических условиях первостепенное значение при проектировании линейного сооружения придается устойчивости геотехнической системы «основание-земполотно». И. Е. Евгеньев и В. Д. Казарновский выделили три основные формы потери устойчивости земполотна на слабых грунтах основания (см. рисунок 1.6) [46].

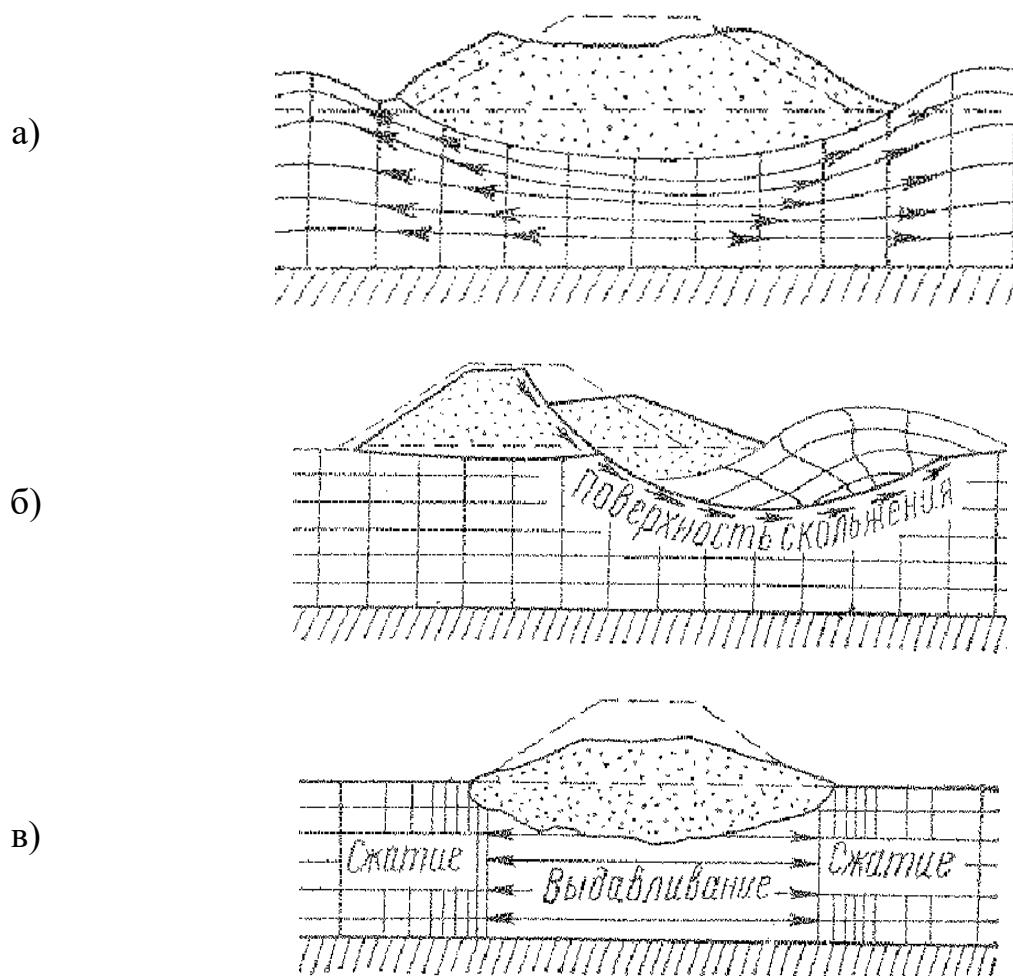


Рисунок 1.6. Основные формы потери устойчивости земполотна на слабых грунтах основания: а) выдавливание грунтового массива; б) выпирание по поверхности скольжения; в) выдавливание грунтового массива с боковым уплотнением

На стадии проектирования автомобильной дороги на многолетнемерзлом основании необходимо выполнить детальный анализ инженерно-геологических изысканий с определением следующих параметров: температурный режим грунтов; граница ММГ; физико-механические характеристики грунтов; вид грунта; мощность грунтового слоя; категория просадочности и др. Также необходимо определить возможную причину понижения кровли ММГ основания. По методике профессора Н. Н. Романовского [12] разработана классификация понижения кровли (деградации) ММГ основания по причинам растепления.

Основной причиной потери устойчивости многолетнемерзлого основания линейных сооружений является изменение НДС в период сезонного

оттаивания деятельного слоя. При оттаивании грунты многолетнемерзлого основания теряют устойчивость за счет понижения прочностных и деформационных характеристик. Виной всему – нарушение ТР грунтов многолетнемерзлого основания.

Одна из основных причин изменения ТР грунтов основания с многолетнемерзлыми грунтами – отсутствие водоотведения. Применение водопропускных труб в земполотне не всегда эффективно, так как при холмистом рельефе происходит скопление воды около сооружений, и данное решение теряет свою актуальность.

В монографии С. М. Ждановой и П. И. Дыдышко выделены две причины изменения ТР грунтов основания: скопление воды у тела земполотна; нарушение растительно-мохового покрова в основании земполотна и придорожной полосы [48].

Исследования, проведенные Г. П. Минайловым и В. В. Гулецким, свидетельствуют о том, что деформации земполотна на участке дороги БАМа связаны с растеплением ММГ основания. Основная причина оттаивания ММГ основания связана с застоем воды у нижней бровки сооружения и ее фильтрацией на границе «основание-земполотно». Для обеспечения устойчивости основания с ММГ исследователи рекомендуют выполнить мероприятия, способствующие водоотведению от сооружения [71].

В своих работах В. В. Пассек и Л. И. Невмержицкая рассматривают участок железной дороги Обская – Бованенково. Деформации на данном участке возникают из-за воздействия водоема на ТР многолетнемерзлого основания. Для стабилизации ТР данного участка авторами предлагается мероприятие для охлаждения грунтов основания на основной площадке [76, 79].

Согласно исследованиям С. Н. Юсупова, понижение кровли ММГ основания происходит из-за скопления воды вдоль откосной части земполотна. Скопление воды связано с нарушением естественного стока воды и приводит к растеплению грунтового основания [111].

Главной задачей при индивидуальном проектировании является сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии и предотвращение деградации мерзлых пород. Применение новых КТМ позволит существенно увеличить темпы строительства и снизить трудоемкость процесса возведения автомобильных дорог в сложных климатических и инженерно-геологических условиях. Однако не все КТМ оказываются эффективными в процессе эксплуатации автомобильной дороги. После реализации КТМ из-за понижения ВГММГ происходит потеря устойчивости основания [67], этим и объясняется большое количество разработанных мероприятий, направленных на повышение устойчивости многолетнемерзлого основания.

В Российской Федерации в сфере дорожного строительства в сложных климатических условиях для улучшения качества автомобильных дорог активно применяются теплоизоляционные материалы, в частности, экструдированные пенополистирольные плиты [12, 13, 20, 103]. Эффективность применения пенополистирольных плит в дорожном строительстве в условиях ММГ подтверждена А. А. Рувинским [89, 90, 91].

При строительстве насыпей в отечественной и зарубежной практике широко применяют геосинтетические армирующие материалы. Геосинтетический материал в зонах распространения ММГ в основном способствует: повышению устойчивости основания; ускорению стабилизации; уменьшению деформаций; повышению несущей способности; укреплению откосов и обочин земполотна.

Изучением армирования земполотна на многолетнемерзлом основании занимался профессор Джи Хан (США, г. Канзас). Продолжил изучать данное направление профессор Цзяньхун Фэнг (КНР, г. Цинхай) [9].

А. Ю. Бурукин, С. Я. Луцкий, К. Н. Хрипков [20] разработали КТМ при строительстве автомобильных дорог в таликовых зонах. Размещение в грунтовом основании свай в геотекстильной оболочке увеличивает прочностные и деформационные характеристики грунтов основания в таликовых зонах за счет уплотнения межсвайного пространства и

формирования геосвайного ростверка. Конструктивное мероприятие направлено на повышение устойчивости и увеличение несущей способности слабого основания, перераспределение нагрузки от транспорта и вышележащего строения на сваи через геосвайный ростверк.

С. А. Кудрявцевым, Т. Ю. Вальцевым, Е. Д. Гончаровым была разработана конструкция для укрепления оползневого массива грунта на многолетнемерзлом основании автомобильной дороги «Амур» с применением современных геосинтетических материалов. Предлагаемое мероприятие позволяет учитывать совместную работу удерживающей свайно-гравитационной конструкции и геокомпозитного ростверка из интегральной георешетки [57].

В работе В. В. Воронцова, А. Н. Краева, М. Е. Игошина расчетным методом обосновано и внедрено КТМ с применением геосинтетического материала для повышения устойчивости многолетнемерзлого основания существующей автомобильной дороги на территории ЯНАО. Суть мероприятия заключается в заземлении геосинтетического материала в толще ММГ основания и формировании в откосной части сооружения грунтовой полуобоймы, обернутой геосинтетическим материалом [22].

С. А. Кудрявцевым, А. В. Кажарским, В. Д. Цыганковым доказана эффективность использования врезных берм в грунты основания. Также авторы предлагают применять охлаждающие мероприятия в виде каменной наброски на откосы. Данный метод стабилизации был предложен при реконструкции участков второго пути Байкало-Амурской магистрали на многолетнемерзлом основании [59].

Авторами Н. А. Валиевым, В. Г. Кондратьевым были проведены эксперименты по стабилизации земполотна при помощи солнцесадкозащитных навесов на центральном участке Байкало-Амурской магистрали. По результатам экспериментов можно сделать вывод, что солнцесадкозащитные навесы могут стать простым и довольно дешевым противодеформационным решением на участках с распространением ММГ.

Под солнцезащитным навесом создаются условия для охлаждения грунтов конструкции автомобильной дороги и многолетнемерзлого основания. В случае отсутствия снежного покрова грунт земполотна промерзает на максимальную глубину, тем самым увеличивая прочностные качества линейного сооружения. В летний период солнцезащитный навес уменьшает прогрев земполотна и защищает сооружение от летних осадков, благодаря чему многолетнемерзлое основание остается в прежнем состоянии [23].

Согласно исследованиям профессора Джанкун Лю (КНР, г. Пекин), на стадии проектирования сооружений необходимо учитывать временную динамику трех ключевых параметров: ТР, внешней нагрузки, физико-механических характеристик грунтов в процессе промерзания оттаивания [3].

В исследованиях профессора Е. С. Ашпиза отмечается, что при проектировании сооружений на многолетнемерзлом основании необходимо проводить теплотехнический расчет на перспективу 50 лет. При прогнозе температурного режима необходимо учитывать теплообменные процессы грунтов с окружающей средой (потепление климата) [11].

Использование сезоннодействующих охлаждающих установок (СОУ) – наиболее часто встречающийся способ, направленный на понижение температурного режима грунтов многолетнемерзлого основания.

СОУ устанавливают в специальные скважины рядом с откосной частью автомобильной дороги или же непосредственно на саму откосную часть для создания мерзлого ядра. По принципу работы СОУ разделяют на конвективные (газовые, жидкостные и газожидкостные) и испарительные (двухфазные). По способу монтажа и конструктиву закладки различают горизонтальную систему (ГСТ), так называемую систему «ГЕТ», и вертикальную – «ВЕТ» [94]. Корпус у СОУ может быть прямолинейным и изогнутым, последний используют для стабилизации как откосной части, так и непосредственно всей конструкции автомобильной дороги.

В. В. Воронцов, А. Н. Краев, М. Е. Игошин предлагают для защиты многолетнемерзлого торфа с мигрирующими грунтовыми водами от оттаивания применять СОУ. Авторы считают, что их использование поднимет кровлю ММГ, уменьшит мощность легкодеформируемого слоя и повысит устойчивость многолетнемерзлого основания [29].

В работе Р. Г. Гамзаева, Я. А. Кроника представлена слабонаклонная термостабилизационная система ММГ основания, состоящая из комплекса отдельных термостабилизаторов, параметры и количество которых назначается в зависимости от теплотехнического расчета и геометрических размеров сооружения. Горизонтальная (слабонаклонная) термостабилизационная система может применяться в определенный сезон или круглогодично [37].

Для увеличения безремонтного срока эксплуатации линейного сооружения на многолетнемерзлом основании предлагается использовать теплоизоляционные материалы. Использование теплоизоляционных материалов позволяет повысить прочностные характеристики и устойчивость многолетнемерзлого основания за счет изменения ТР.

Согласно СП 313.1325800.2017, для теплоизоляции применяют полимерные материалы (пенопласты, пеноплэкс, легкие бетоны, металлургические шлаки и другие материалы).

В настоящее время широко применяют комбинированные КТМ. В работе П. И. Дыдышко и С. М. Ждановой подтверждена эффективность такого подхода. Авторами было предложено комбинированное мероприятие, направленное на стабилизацию многолетнемерзлого основания путем устройства СОУ и теплоизоляционного материала на участках Ноябрьск – Коротчаево и Тында – Беркакит [43].

Основываясь на результатах натурных наблюдений, П. И. Дыдышко утверждает, что при комбинированном методе стабилизации основания с ММГ необходимо расположить СОУ под слоем теплоизолятора, что позволит повысить теплоизоляцию под слоем пенопласта [42].

Авторами В. С. Евдокимовым, В. А. Максименко, В. К. Васильевым, А. В. Третьяковым было спроектировано и исследовано перспективное комбинированное устройство с дополнительными теплоотводящими элементами для заморозки грунта. По сравнению с обычными СОУ перспективное устройство имеет ряд плюсов, что, в свою очередь, отражается на повышении скорости заморозки грунта, снижении металлоемкости и энергозатратности; обеспечивает заморозку грунта на протяжении всего срока эксплуатации сооружения [45].

Комбинированные мероприятия по стабилизации грунтов основания и земполотна на участке автомобильной дороги «Амур» предложены В. Г. Кондратьевым, С. В. Кондратьевым [57]. Технический эффект от предложенного мероприятия достигается за счет снижения влияния солнечной радиации и предотвращения прогревания верхней площадки земполотна в летний период. Для сохранения грунтов основания и земполотна в мерзлом состоянии авторы рекомендуют:

- использовать в асфальтобетонном покрытии светлый щебень или произвести устройство конструкции дорожной одежды из светлого бетона, что позволит снизить прогрев грунтов основание – земполотно;
- исключить инфильтрацию воды в грунты основание – земполотно путем устройства геомембраны под дорожной одеждой;
- обеспечить циркуляцию холодного воздуха в нижней части земполотна путем устройства вентилируемых труб в поперечном направлении;
- устроить солнцезащитные навесы на откосных частях и придорожной полосе для предотвращения прогрева грунтов основания – земполотно, а также устранить теплоизоляцию от снежного покрова;
- максимально уменьшить ширину и высоту земполотна, чтобы снизить отепляющее воздействие на многолетнемерзлые грунты основания [57].

Литературный анализ показал, что существуют различные КТМ, способствующие повышению устойчивости многолетнемерзлого основания земполотна. Это достигается за счет сохранения ВГММГ путем размещения теплоизоляционного, геосинтетического и каменного материалов, металлических изделий, СОУ, системы воздушно-конвективного охлаждения, солнцезащитных навесов и т. д. Несмотря на большое количество исследований и предлагаемых решений, до сих пор остается не изучено воздействие застоя неглубоких водоемов вдоль откосных частей сооружения на ТР и изменения положения ВГММГ основания в период эксплуатации. В связи с чем вопрос разработки новых или усовершенствование существующих КТМ при проектировании или строительстве линейных сооружений на основании, сложенном ММГ, с учетом воздействия неглубоких водоемов вдоль откосов земполотна остается актуальным.

1.3. Теоретические расчеты устойчивости автомобильной дороги на многолетнемерзлом основании

При проектировании земполотна серьезное внимание уделяют устойчивости основания на территории распространения ММГ. Согласно нормативной документации [26, 99], необходимо осуществлять инженерно-геокриологический прогноз устойчивости грунтов основания с учетом опыта строительства и эксплуатации автомобильных дорог в этом районе. За последние 20 лет наблюдается тревожная тенденция, связанная с неуклонным ростом аварийных ситуаций в регионах с ММГ. Примерно 85 % всех аварийных ситуаций в условиях распространения ММГ возникают из-за потери устойчивости грунтов основания [62].

И. В. Нак полагает, что ММГ в основании дороги – главная угроза устойчивости сооружения [77].

В настоящее время около 75 % зданий и сооружений построены с расчетом на то, что состояние грунтов основания мерзлое (I принцип

проектирования) [12]. При проектировании земполотна автомобильной дороги по I принципу расчет устойчивости не производится [26].

При проектировании по II принципу устойчивость на многолетнемерзлом основании обеспечивается путем регулирования высоты конструкции земполотна автомобильной дороги с учетом, что ВГММГ фиксируется на требуемой глубине.

При расчете устойчивости конструкции земполотна автомобильной дороги на многолетнемерзлом основании, возводимой по II принципу проектирования, необходимо, чтобы максимальная прогнозируемая осадка на конечный период эксплуатации не превышала допустимого значения в зависимости от типа покрытия. Допустимая осадка при проектировании автомобильной дороги по II принципу представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Допустимая осадка конструкции автомобильной дороги с нестабильными слоями при проектировании по II принципу

Тип дорожной одежды и условия ее устройства	Допустимая суммарная осадка основания и нестабильных слоев насыпи в период эксплуатации, см, при толщине нестабильных слоев, м			
	0,5	1,0	1,5	2,0
Капитальные дорожные одежды со сборными железобетонными покрытиями, устраиваемые в одну стадию без технологического перерыва	2	4	6	10
Капитальные дорожные одежды с асфальтобетонными покрытиями, устраиваемые в один год с земполотном	4	8	12	20
Облегченные дорожные одежды	6	12	18	30
Переходные дорожные одежды	8	16	24	40
Примечание: при применении в конструкции насыпи армирующих прослоек допустимые осадки могут быть увеличены на 20 % при толщине стабильных слоев до 1,5 м и на 25 % при их толщине до 2,0 м.				

В методических рекомендациях ОДН 218.2.094-2018 устойчивость конструкции земполотна автомобильной дороги оценивается по ореолу границы оттаивания многолетнемерзлого основания. Для этого необходимо

выбрать характерные точки на границе «земполотно-основание» (ось земполотна, бровка, середина откоса, подошва) и в каждой характерной точке определить глубину оттаивания.

Глубина сезонного оттаивания конструкции земполотна на многолетнемерзлом основании, состоящая из нескольких слоев с резко отличающимися теплофизическими характеристиками, рассчитывается по формуле:

$$H_k = H_{\text{сп}} + h_1 \cdot \left(1 - \frac{H_{\text{сп}}}{H_{c1}}\right) + h_2 \cdot \left(1 - \frac{H_{\text{сп}}}{H_{c2}}\right) + \dots + h_n \cdot \left(1 - \frac{H_{\text{сп}}}{H_{c(n-1)}}\right), \quad (1.1)$$

где H_k – глубина оттаивания слоистого полупространства, м; $H_{\text{сп}}$ – глубина сезонного оттаивания деятельного слоя, м; $h_{1,2,\dots,n}$ – толщина конструктивного слоя (покрытие, основание, слои земполотна); $H_{c1}, H_{c2}, \dots, H_{\text{сп}}$ – глубина сезонного оттаивания соответствующих слоев дорожного покрытия, земполотна и деятельного слоя, м.

Глубина деятельного слоя многолетнемерзлого основания определяется по формуле:

$$H_{\text{сп}} = H_{\text{сп}}^{\text{норм}} \cdot K_w, \quad (1.2)$$

где $H_{\text{сп}}^{\text{норм}}$ – нормативная глубина сезонного оттаивания слоев, м; K_w – поправочный коэффициент на расчетную влажность материала дорожного покрытия, грунта слоев земполотна и основания.

Глубина сезонного оттаивания дорожного покрытия определяется по формуле:

$$H_{c1} = H_{c1}^{\text{норм}} \cdot K_w \cdot K_p, \quad (1.3)$$

где K_p – коэффициент, учитывающий интенсивность оттаивания материала дорожного покрытия.

Глубина сезонного оттаивания основания дорожного покрытия рассчитывается по формуле:

$$H_{c2} = H_{c2}^{\text{норм}} \cdot K_w, \quad (1.4)$$

$H_{c(n-1)}$ – глубина сезонного оттаивания нижнего слоя грунта земполотна определяется по формуле:

$$H_{c(n-1)} = H_{c(n-1)}^{\text{норм}} \cdot K_w, \quad (1.5)$$

Глубину оттаивания в характерных сечениях: ось земполотна, бровка, середина откоса, подошва, определяют по формуле:

$$H_{\text{от}} = \Psi \cdot \beta \cdot H_k, \quad (1.6)$$

где K_k – глубина оттаивания слоистого полупространства (формула 7.1); Ψ – коэффициент, учитывающий экспозицию откоса; β – коэффициент, учитывающий геометрию земполотна.

Значение β принимается равными: ось земполотна и участки, прилегающие к насыпи, – $\beta = 1$.

Для откосов и обочин β определяется по формуле:

$$\beta = \frac{\sin \gamma}{\sin(90 - \varphi)}, \quad (1.7)$$

где φ – угол заложения откоса, γ определяется по формуле:

$$\gamma = 90 + \varphi - \alpha, \quad (1.8)$$

Значение $\text{tg} \alpha$ в сечении по бровке земполотна определяется по выражению 1.9:

$$\text{tg} \alpha = \frac{B}{2b}, \quad (1.9)$$

Значение $\text{tg} \alpha$ в средней части откоса определяется по выражению 1.10:

$$\text{tg} \alpha = \frac{B+B_H}{2 \cdot (2b-H)}, \quad (1.10)$$

Значение b определяется по формуле 1.11:

$$b = \frac{(2 \cdot H \cdot \sqrt{1+m^2} + B)^2 + 4 \cdot H^2}{8 \cdot H}, \quad (1.11)$$

где H – высота насыпи, м; B – ширина насыпи поверху, м; B_H – ширина насыпи понизу, м; m – заложение откоса.

Согласно выражению 1.12 определяют расстояние от подошвы земполотна до ореола оттаивания многолетнемерзлого основания в характерных точках и строят графики глубины оттаивания в поперечном профиле земполотна:

$$h_{от} = H_{от} - H, \quad (1.12)$$

где величина $h_{от}$ – ожидаемая осадка основания, м.

При проектировании земполотна на многолетнемерзлом основании по I принципу устойчивость основания обеспечивается при выполнении условия в характерных точках (ось земполотна, бровка и середина откоса) $h_{от} \leq 0$.

Устойчивость земполотна по II принципу проектирования оценивается по разности осадок в характерных точках (бровка земполотна, средняя часть откоса). Разность в характерных точках не должна превышать 0,1 м.

При построении графика глубины оттаивания необходимо, чтобы ореол оттаивания имел выпуклую форму (см. рисунок 1.7).

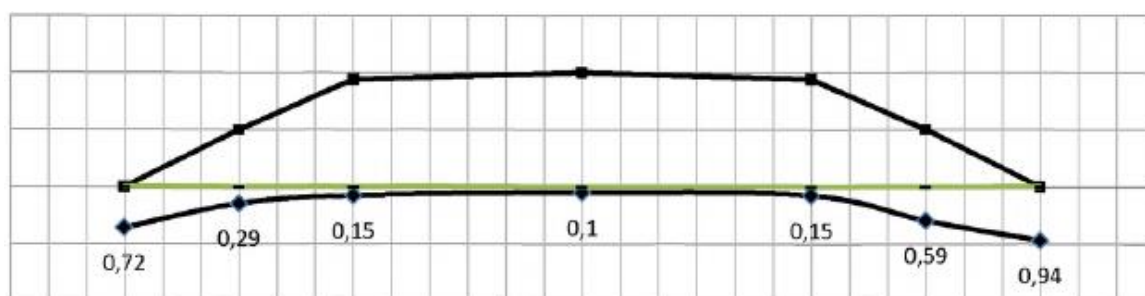


Рисунок 1.7. Ореол оттаивания многолетнемерзлого основания

Согласно ВСН 84-89, устойчивость автомобильной дороги обеспечивается высотой земполотна, при которой верхняя граница многолетнемерзлого основания будет сохраняться в критический по балансу тепла год не более одного раза в 11 лет на необходимой (требуемой, допустимой) глубине, и осадка земполотна при оттаивании грунтов многолетнемерзлого основания не должна превышать допустимых значений.

Высота земполотна по II принципу проектирования определяется по формуле:

$$H = H_K - \frac{H_K}{H_{д.с.}} \cdot \left(\frac{S_{доп}}{e} - S_c \right), \quad (1.13)$$

где $H_{д.с.}$ – мощность деятельного слоя, м; e – относительная осадка грунта основания после оттаивания под нагрузкой, доли единицы; S_c – строительная осадка, м.

Относительная осадка под нагрузкой определяется по номограмме, представленной на рисунках 1.8, 1.9.

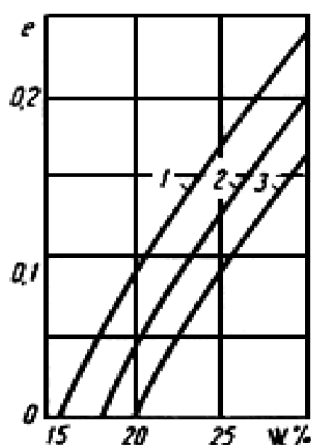


Рисунок 1.8. Относительная осадка песчаных грунтов при оттаивании под нагрузкой $0,75 \text{ кгс/см}^2$: 1 – песок крупный; 2 – песок средний; 3 – песок мелкий и пылеватый

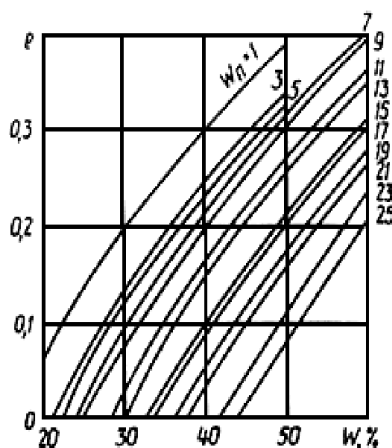


Рисунок 1.9. Относительная осадка глинистых грунтов при оттаивании под нагрузкой $0,75 \text{ кгс/см}^2$

В СП 313.1325800.2017 представлена блок-схема (см. рисунок 1.10) определения устойчивости земполотна на многолетнемерзлом основании.

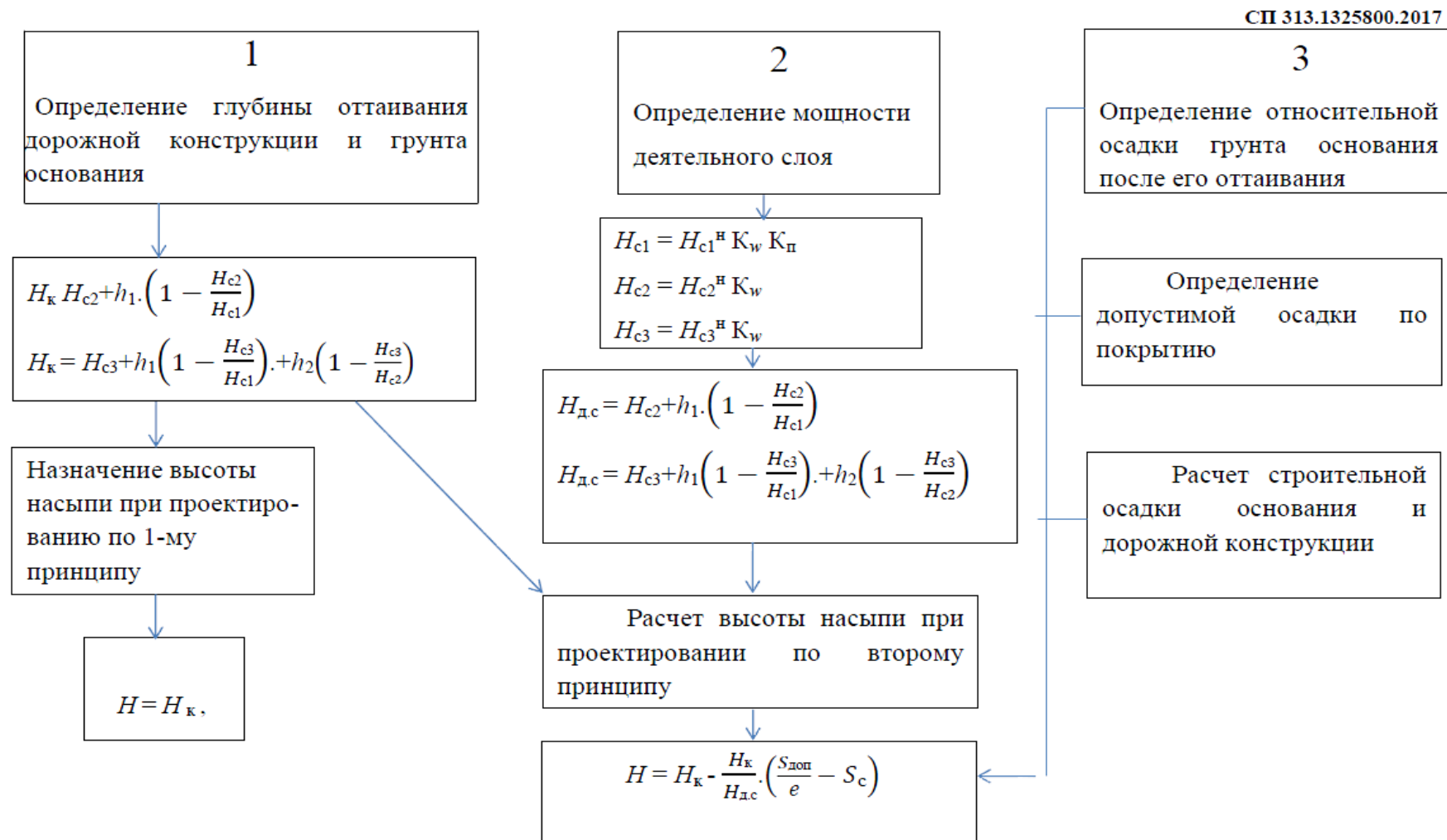


Рисунок 1.10. Блок-схема определения устойчивости земляного полотна на многолетнемерзлом основании

При расчете устойчивости в качестве временной транспортной нагрузки (см. рисунок 1.11) принимают нормативную нагрузку осуществляющих перевозки тяжеловесных грузов (НК). Нагрузку НК необходимо привести к эквивалентному слою грунта и расположить по всей ширине земполотна. Мощность эквивалентного слоя грунта $H_э$ вычисляют по формуле представленной в [38]:

$$H_э = \frac{4 \cdot 18K}{(D - 0,2) \cdot (c + 0,8) \cdot \gamma_{гр}}, \quad (1.14)$$

где $18K$ – нормативная нагрузка НК, кН; D – база нормативной нагрузки НК, м; c – колея нормативной нагрузки НК, м; $\gamma_{гр}$ – удельный вес грунта, кН/м³.

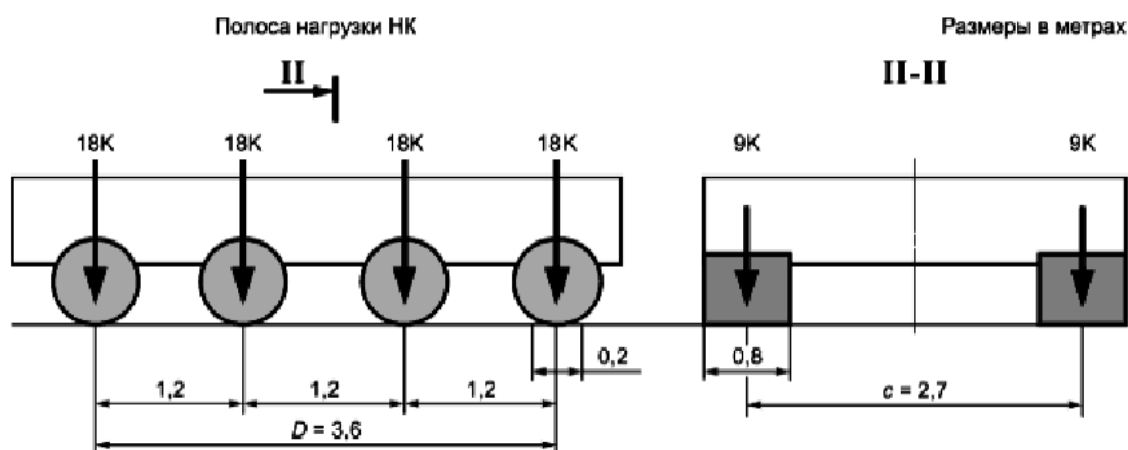


Рисунок 1.11. Схема нормативной нагрузки для расчета земполотна

В научных трудах Н. Н. Маслова представлено решение, направленное на определение коэффициента устойчивости основания. Данное решение широко применяют в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов основания [73]:

$$K_{уст}^{т.с.} = \frac{P_{кр}^{т.с.}}{P_э}, \quad (1.15)$$

где $P_{кр}^{т.с.}$ – критическая нагрузка, воспринимаемая талым слоем основания с ММГ, кН/м²; $P_э$ – эксплуатационная нагрузка, действующая на талый слой основания с ММГ, кН/м².

Согласно выражению 1.15, для стабильного функционирования линейного сооружения с ММГ в основании коэффициент устойчивости основания должен быть $K_{уст}^{т.с.} > 1$.

Критическую нагрузку на талый слой многолетнемерзлого основания можно определить по формуле профессора Н. П. Пузыревского [80]:

$$P_{кр}^{т.с.} = \frac{\pi(\gamma h + C_{т.с.} \cdot \operatorname{ctg} \varphi_{т.с.})}{\operatorname{ctg} \varphi_{т.с.} + \varphi_{т.с.} - \frac{\pi}{2}} + \gamma h_{т.с.}, \quad (1.16)$$

где $C_{т.с.}$ – сцепление талого слоя, кН/м²; $\varphi_{т.с.}$ – угол внутреннего трения талого слоя, град.; $\gamma_{т.с.}$ – удельный вес талого слоя, кН/м³; $h_{т.с.}$ – мощность талого слоя, м.

В работе профессора В. В. Виноградова представлена формула по определению нагрузки, действующей на основание линейного сооружения, [92]:

$$P_{э}^{т.с.} = P_{дп} + P_{тр} + P_{зп} + P_{т.с.}, \quad (1.17)$$

где $P_{дп.}$ – нагрузка от дорожного покрытия, кН/м²; $P_{тр}$ – транспортная нагрузка, кН/м²; $P_{зп}$ – нагрузка от веса насыпи, кН/м²; $P_{т.с.}$ – нагрузка от деятельного слоя, кН/м².

Нагрузку от земполотна рассчитывают по формуле [92]:

$$P_{зп} = \gamma_{зп} \cdot h_{зп}, \quad (1.18)$$

где $\gamma_{зп}$ – удельный вес земполотна; $h_{зп}$ – высота земполотна.

Нагрузку от талого слоя многолетнемерзлого основания рассчитывают по формуле [92]:

$$P_{зп} = \gamma_{т.с.} \cdot h_{т.с.}, \quad (1.19)$$

где $\gamma_{т.с.}$ – удельный вес талого слоя; $h_{т.с.}$ – мощность талого слоя.

В работе [105] расчет устойчивости конструкции земполотна с наличием талика в многолетнемерзлом основании выполнялся в соответствии с методом профессора Г. М. Шахунянца по формуле:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} f_i \cdot N_i + c_i \cdot l_i + T_{i-уд} \cdot \frac{\cos \varphi_i}{(\cos \alpha_i - \varphi_i)}}{\sum_{i=1}^{i=n} T_{i-сд} \cdot \frac{\cos \varphi_i}{(\cos \alpha_i - \varphi_i)}}, \quad (1.20)$$

где f_i – коэффициент внутреннего трения; φ_i – угол внутреннего трения грунта, град.; N_i – нормальная составляющая силы веса по блоку; $T_{i-уд}$ – тангенциальная удерживающая составляющая силы веса по блоку; $T_{i-сд}$ – тангенциальная сдвигающая составляющая силы веса по блоку; $c_i \cdot l_i$ – сила сцепления.

В настоящее время активно применяются программные комплексы, способные оперативно обрабатывать значительный объем информации. Для анализа температурного режима и НДС грунтов основания используется математическое моделирование, представляющее собой численные методы решения задач. Современные геотехнические программные комплексы (Termoground, Frost 3D, ANSYS, Plaxis 2D, QFrost, Midas GTS FEA и др.) хорошо справляются с поставленной задачей, позволяя максимально реалистично описать поведение геотехнической системы основание – земполотно и тем самым помогая проектировщику принять рациональное решение.

Основные плюсы численного моделирования: оценка НДС геотехнической системы «основание-земполотно»; выбор оптимальной конструкции исследуемого объекта; проведение многоразовых численных экспериментов с получением результатов в графическом виде и т. д.

Исходя из вышесказанного можно сделать следующий вывод. При прогнозе устойчивости геотехнической системы «основание-земполотно» не учитывается изменение угла наклона во времени ВГММГ основания, влияющей на устойчивость. Поэтому необходимо уделить особое внимание новым подходам, которые позволили бы учесть изменение угла НВГММГ основания во времени.

1.4. Выводы по первой главе

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. На стадии проектирования автомобильных и железных дорог в условиях распространения ММГ основания необходимо уделять особое внимание на изменение устойчивости геотехнической системы «основание-земполотно» в период эксплуатации.

2. В результате проведенного литературного анализа отечественных и зарубежных исследований а также нормативных источников можно сделать вывод о том, что существуют нерешенные вопросы по оценке изменения устойчивости автомобильных дорог с ММГ при воздействии неглубоких водоемов в период эксплуатации.

3. В рамках дальнейших исследований предложено выявить наиболее значимые факторы, влияющие на изменение угла НВГММГ в основании сооружения. Предложено в полевых условиях оценить изменение геометрического положения ВГММГ основания, влияющей на устойчивость основания автомобильной дороги, с учетом воздействия неглубоких водоемов, стоящих более 30 суток. Необходимо разработать методику расчета устойчивости основания автомобильной дороги с ММГ во времени с учетом воздействия неглубоких водоемов и предложить КТМ, основанное на использовании современных армирующих и теплоизолирующих материалов, способствующих формированию приемлемого угла НВГММГ основания в период эксплуатации при воздействии неглубоких водоемов.

ГЛАВА 2. НАТУРНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА И УГЛА НАКЛОНА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ММГ В ОСНОВАНИИ ЗЕМПОЛОТНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕГЛУБОКИХ ВОДОЕМОВ

При строительстве автомобильных дорог в пониженных местах формируются условия, влияющие на изменение положения ВГММГ в основании сооружения. Изменения геометрического положения ВГММГ могут протекать от нескольких лет до десятилетий. В свою очередь изменение положения ВГММГ в основании земполотна влияет на НДС грунтов основания и устойчивость. Прогноз изменения во времени и оценка факторов, влияющих на положение ВГММГ, а также исследования их в натуральных условиях являются важной задачей. Оценка факторов, влияющих на формирование НВГММГ в основании земполотна и воздействие неглубоких водоемов вдоль откосных частей сооружения на ТР и НДС основания с ММГ, выполняется путем проведения численных экспериментов с варьированием при моделировании параметров объекта исследования.

2.1. Факторы, влияющие на формирование наклонной верхней границы многолетнемерзлых грунтов основания

Для оценки изменения ТР, влияющего на формирование мощности талого слоя в основании сооружения и угла НВГММГ, выполнены теплотехнические расчеты с представительными грунтами с повышенной влажностью ($W_{\text{tot}} = 15, 20, 30, 35 \%$) на 12-летний период эксплуатации автомобильной дороги. Расчетный период времени обоснован нормативным межремонтным сроком согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 30.05.2017 № 658. Варьируемые параметры при численном моделировании: вид грунта (песок; супесь; суглинки; глина); влажность грунта (20; 25; 30; 35 %); глубина водоема ($h_b = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1 \text{ м}$). Высота земполотна принимается для всех представительных

грунтов с повышенной влажностью 2 м. При обследовании натурального участка автомобильной дороги на границе «основание-земполотно» был выявлен дополнительный тепловой источник в виде воды, проходящей через уплотненный слой торфа, который учитывался при моделировании. Формирование фильтрующей прослойки обусловлено технологической операцией при возведении земполотна методом «от себя» и скоплением неглубокого водоема вдоль откосной части сооружения. Коэффициент фильтрации K_f воды через прослойку торфа на границе «основание-земполотно» принимался по натурным измерениям равным $0,005 \text{ м}^3/\text{ч}$. Остальные базовые геометрические параметры сооружения назначались согласно нормативной документации.

Климатические и инженерно-гидрометеорологические условия при численном моделировании назначались на период обследования натурального участка по метеостанции г. Надым. Среднемесячная температура воздуха представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Среднемесячная температура окружающего воздуха

Месяц	I	II	III	IV	V	VI
Температура воздуха, °C	–24,5	–24,0	–16,8	–8,8	–1,0	8,8
Месяц	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, °C	15,5	11,4	5,6	–5,4	–16,1	–21,9

Теплофизические характеристики представительных грунтов (незасоленных) с повышенной влажностью основания земполотна принимались согласно [100]. Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов представлены в таблицах 2.2–2.20.

Таблица 2.2

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Суглинки и глины с влажностью 25 %					
$\rho_{d_f, d_{th}} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
λ_f , Вт/(м·°C)	λ_{th} , Вт/(м·°C)	C_f , кДж/(м ³ ·°C)	C_{th} , кДж/(м ³ ·°C)	L_V , МДж/м ³	T_{bf} , °C
1,58	1,33	2071,45	2800,00	93,74	–0,20

Таблица 2.3

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Суглинки и глины с влажностью 30 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°С)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°С)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°С)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°С)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °С
1,65	1,45	2219,74	3094,00	108,17	–0,20

Таблица 2.4

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Суглинки и глины с влажностью 35 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°С)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°С)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°С)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°С)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °С
1,76	1,57	2368,04	3388,00	121,52	–0,20

Таблица 2.5

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Суглинки и глины с влажностью 25 %					
$\rho_{df,dth} = 16,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°С)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°С)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°С)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°С)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °С
1,75	1,51	2367,38	3200,00	107,14	–0,20

Таблица 2.6

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Суглинки и глины с влажностью 30 %					
$\rho_{df,dth} = 16,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°С)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°С)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°С)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°С)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °С
1,94	1,68	2219,74	3094,00	123,62	–0,20

Таблица 2.7

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Суглинки и глины с влажностью 20 %					
$\rho_{df,dth} = 18,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°С)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°С)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°С)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°С)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °С
1,86	1,57	2472,64	3222,00	100,44	–0,20

Таблица 2.8

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 25 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
1,84	1,57	1931,59	2660,00	93,74	−0,15

Таблица 2.9

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 25 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
1,98	1,74	2079,91	2954,00	108,17	−0,15

Таблица 2.10

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 30 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
1,98	1,74	2079,91	2954,00	108,17	−0,15

Таблица 2.11

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 35 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,00	1,80	2228,23	3248,00	121,52	−0,15

Таблица 2.12

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 20 %					
$\rho_{df,dth} = 16,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
1,78	1,62	2038,03	2704,00	89,28	−0,15

Таблица 2.13

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 25 %					
$\rho_{d_f,d_{th}} = 16,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,00	1,80	2207,53	3040,00	107,14	−0,15

Таблица 2.14

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 20 %					
$\rho_{d_f,d_{th}} = 18,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,05	1,86	2292,78	3042,00	100,44	−0,15

Таблица 2.15

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Пески с влажностью 20 %					
$\rho_{d_f,d_{th}} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,09	1,57	1643,38	2226,00	78,12	−0,10

Таблица 2.16

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Пески с влажностью 25 %					
$\rho_{d_f,d_{th}} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,48	1,91	1791,73	2520,00	93,74	−0,10

Таблица 2.17

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Пески с влажностью 20 %					
$\rho_{d_f,d_{th}} = 16,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,50	2,15	1878,15	2544,00	89,28	−0,10

Таблица 2.18

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Пески с влажностью 20 %					
$\rho_{df,dth} = 16,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,92	2,50	2047,69	2880,00	107,14	–0,10

Таблица 2.19

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Пески с влажностью 15 %					
$\rho_{df,dth} = 18,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,75	2,26	1922,19	2484,00	78,61	–0,10

Таблица 2.20

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Пески с влажностью 20 %					
$\rho_{df,dth} = 18,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
3,05	2,67	2112,92	2862,00	100,44	–0,10

При выполнении численного моделирования в программном комплексе QFrost теплофизические характеристики неглубоких водоемов с конвективным перемешиванием воды в водоеме и без него назначались согласно исследованиям [33, 50, 70, 74].

Для оценки влияния ТР на ореол оттаивания ММГ на границе «основание-земполотно» были назначены характерные точки (см. рисунок 2.1). Влияние ТР оценивалось мощностью талого слоя, формируемого в основании земполотна в характерных точка (бровка – точка 1, середина откоса – точка 2) [103, 74].

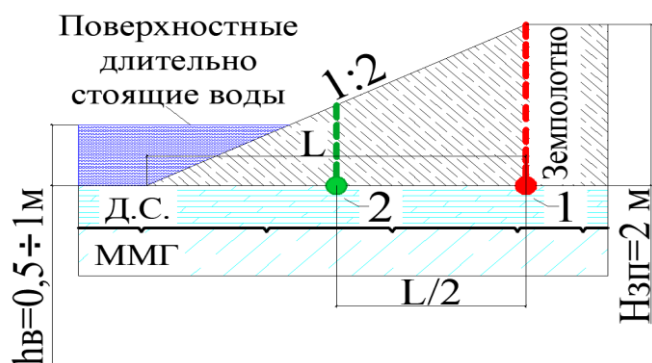


Рисунок 2.1. Схема расположения характерных точек в основании земполотна

В результате численного моделирования было установлено, что с увеличением глубины водоема ($h_b = 0,5; 1$ м) в период 12-летней эксплуатации земполотна в характерной точке 1 мощность талого слоя грунтов основания в первый год уменьшается на 0,1 м. Максимальные изменения мощности талого слоя грунтов основания зафиксированы в характерной точке 2. С увеличением глубины водоема ($h_b = 0,5$ до 1 м) средний прирост мощности талого слоя грунтов основания на 12-й год эксплуатации земполотна составил:

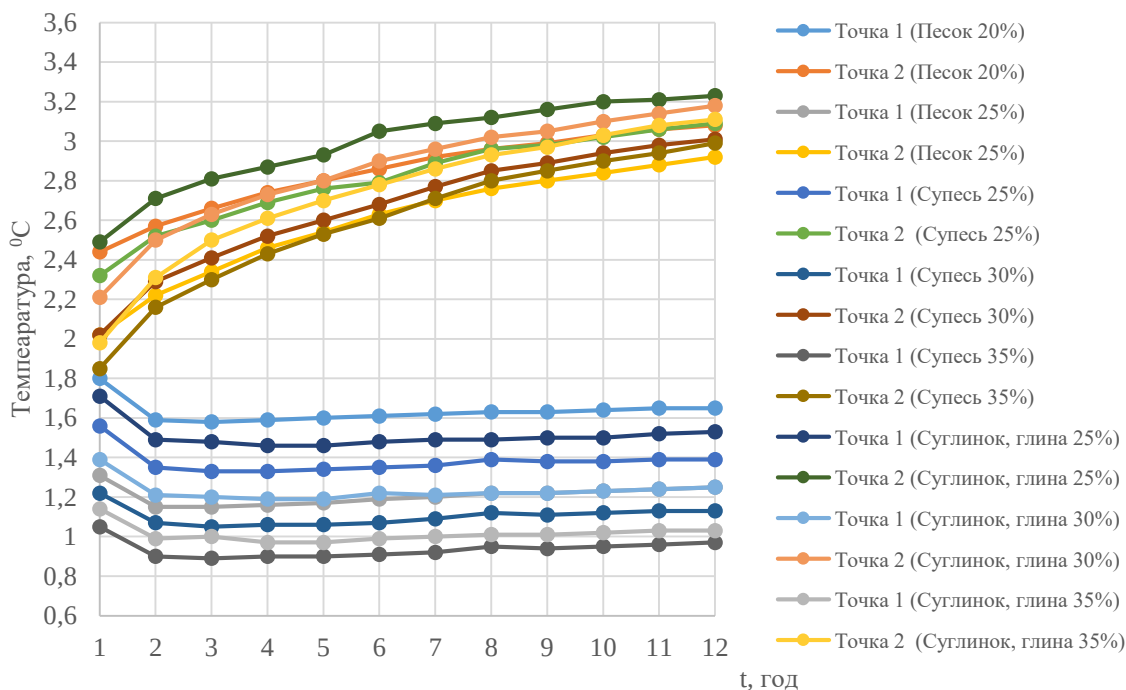
$$d_{\text{Точка 2}}^{\text{Точка 2}}(t)_{\text{при } h_b=0,5 \text{ м}} = 1,1 \text{ м}; d_{\text{Точка 2}}^{\text{Точка 2}}(t)_{\text{при } h_b=1 \text{ м}} = 1,6 \text{ м} \text{ (рис. 2.3, 2.5).}$$


Рисунок 2.2. Изменение температуры в характерных точках 1, 2 при глубине водоема $h_b = 0,5$ м

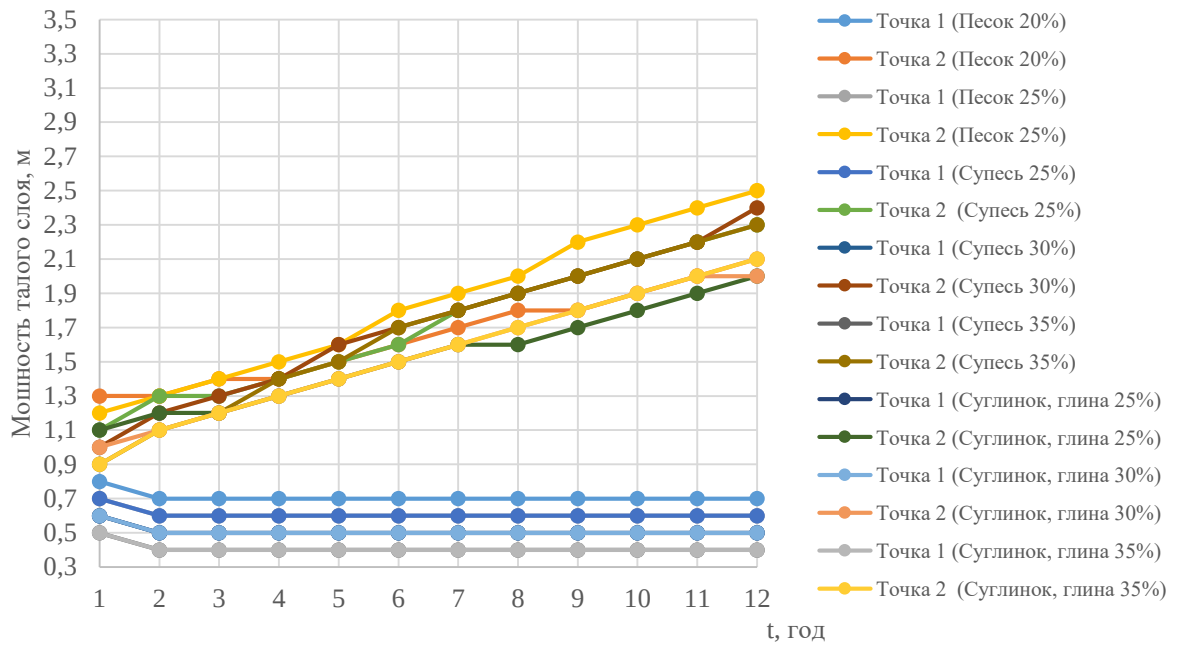


Рисунок 2.3. Изменение мощности талого слоя грунтов основания в характерных точках при глубине водоема $h_b = 0,5$ м

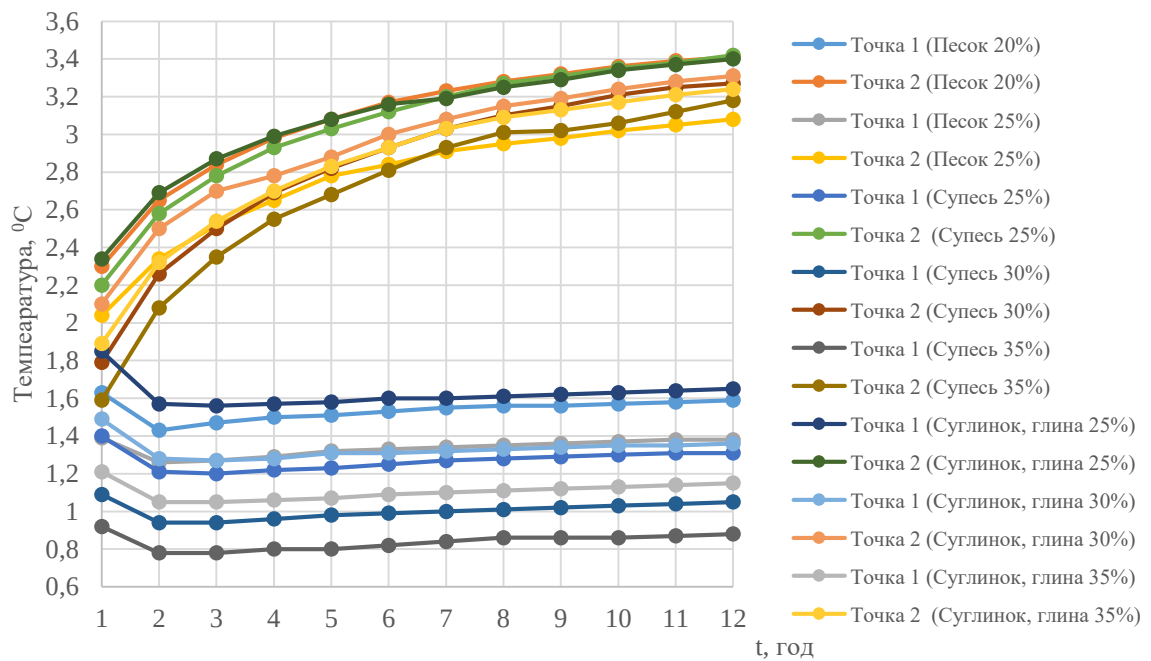


Рисунок 2.4. Изменение температуры в характерных точках 1, 2 при глубине водоема $h_b = 1$ м во времени

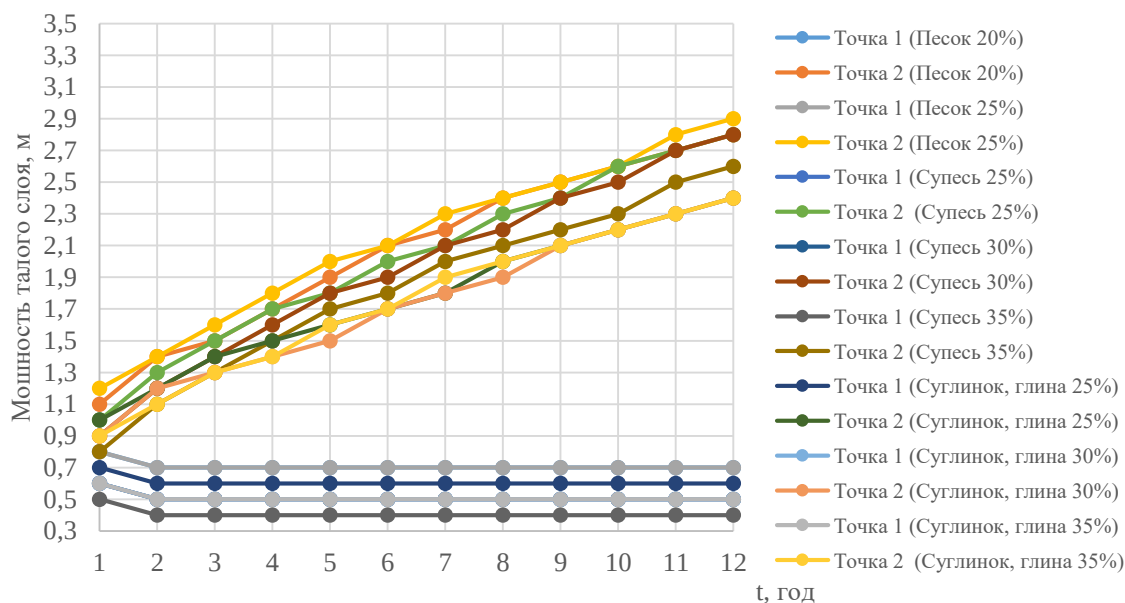


Рисунок 2.5. Изменение мощности талого слоя грунтов основания в характерных точках при глубине водоема $h_b = 1$ м во времени

На основании представленных результатов (см. рисунки 2.3, 2.5) установлено, что НВГММГ будет формироваться от разности глубин в характерных точках 1, 2. Схема формирования НВГММГ представлена на рисунке 2.6.

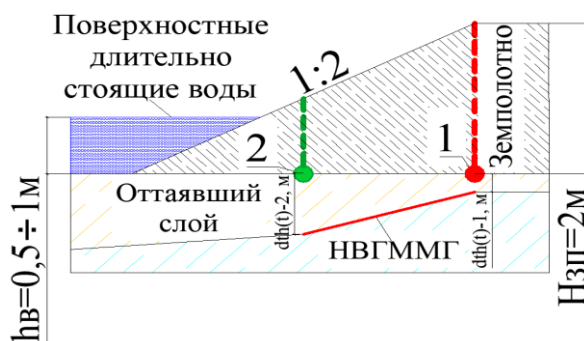


Рисунок 2.6. Формирование НВГММГ

На основании анализа результатов численного моделирования в ПК QFrost (см. рисунки 2.2–2.5) установлено, что температура и мощность талого слоя грунта основания при максимальном оттаивании под бровкой земполотна (точка 1) стабилизируются в период первого года эксплуатации. Температура и мощность талого слоя грунта основания в середине откоса (точка 2) не

стабилизируются в течение расчетного периода 12 лет и имеют тенденцию к повышению. Увеличение глубины водоема (от 0,5 до 1 м) приводит к формированию наиболее «крутого» угла НВГММГ (см. рисунки 2.7–2.8). Максимальное среднее значение угла НВГММГ зафиксировано у представительных грунтов с повышенной влажностью W_{tot} (супесь – 25, 30 %, суглинок – 25, 35 %, глина – 25, 35 %,) при $h_b = 1$ м и равно $\alpha_t = 49^\circ$. Для песчаного грунта (20 %) угол НВГММГ менее пологий, максимальное значение составило $\alpha_t = 35^\circ$. Максимальное значение угла НВГММГ для всех представительных грунтов с повышенной влажностью наступает на 12 год эксплуатации.

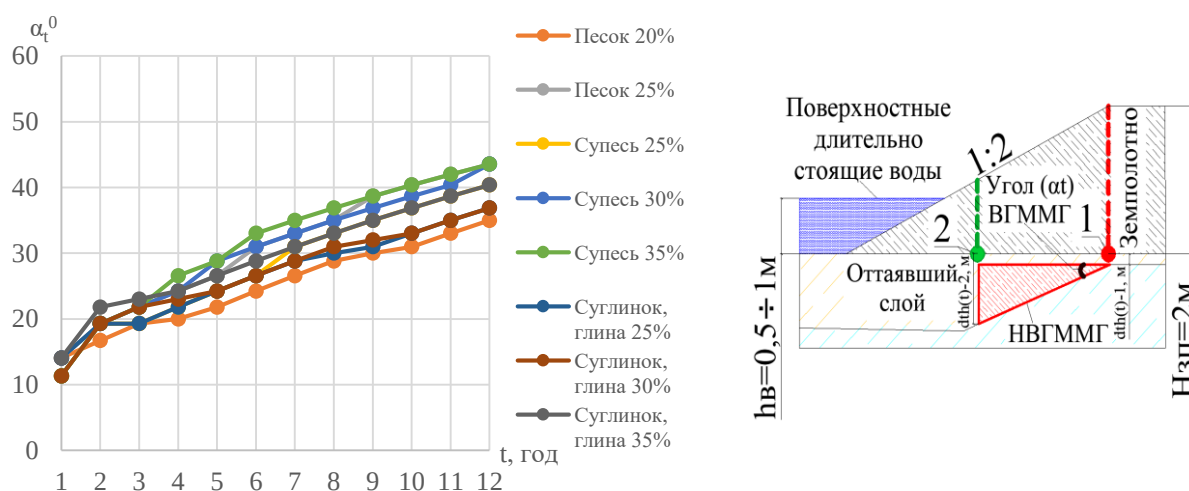


Рисунок 2.7. Изменение угла НВГММГ при глубине водоема $h_b = 0,5$ м во времени

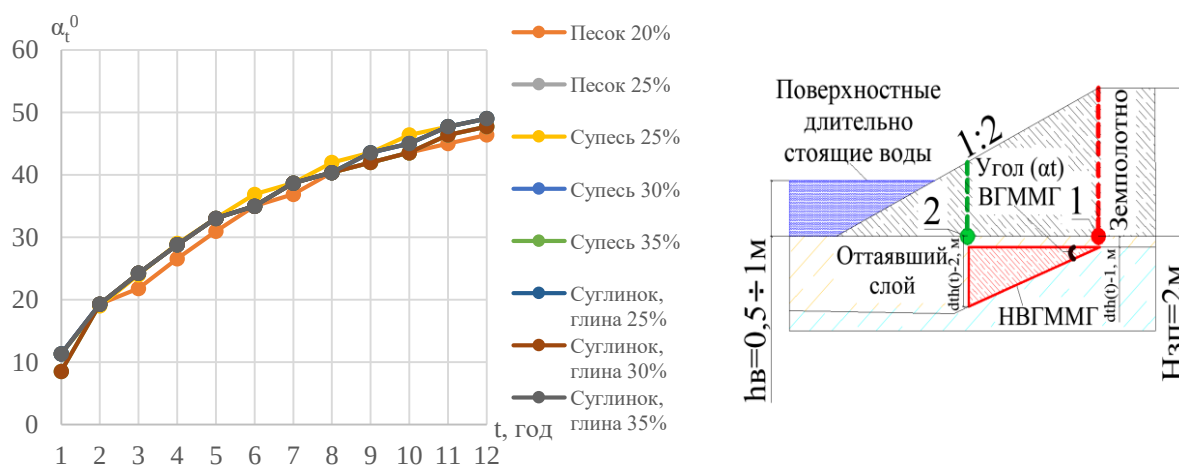


Рисунок 2.8. Изменение угла НВГММГ при глубине водоема $h_b = 1$ м во времени

В работах [70, 50] установлено, что изменение теплофизических и физических характеристик грунтов, представленных в СП 25.13330-2012, не приводит к резким изменениям результатов.

Для отображения общего характера формирования угла НВГММГ основания, зависящего от разницы глубины оттаивания в характерных точках 1 и 2, были выполнены дальнейшие расчеты с усредненными теплофизическими и физическими характеристиками грунтов основания. По результатам теплотехнических расчетов максимальная погрешность определения угла НВГММГ основания при воздействии неглубокого водоема с представительными грунтами с повышенной влажностью (песок, супесь, суглинок, глина) составила не более 10 % в сопоставлении с усредненными теплофизическими и физическими значениями характеристик грунтов основания. Усредненные теплофизические и физические значения характеристик грунтов основания представлены в таблице 2.21.

Таблица 2.21

Усредненные теплофизические и физические характеристики
представительных грунтов

Влажность 25 %					
$\rho_{d_f, d_{th}} = 15,55 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м³·°C)	$C_{th},$ кДж/(м³·°C)	$L_V,$ МДж/м³	$T_{bf},$ °C
2,11	1,81	1990,66	2800,01	104,16	-0,15

По результатам моделирования 12-летней эксплуатации земполотна выявлено, что увеличение глубины водоема ($h_v = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1 \text{ м}$) способствует формированию угла α_t (индекс t в обозначении указывает на период эксплуатации сооружения, при котором сформирован угол НВГММГ при максимальном оттаивании грунтов основания) НВГММГ в среднем на $\Delta\alpha_{t=12\text{лет}}^0 = 48 \div 55^\circ$ (см. рисунок 2.9).

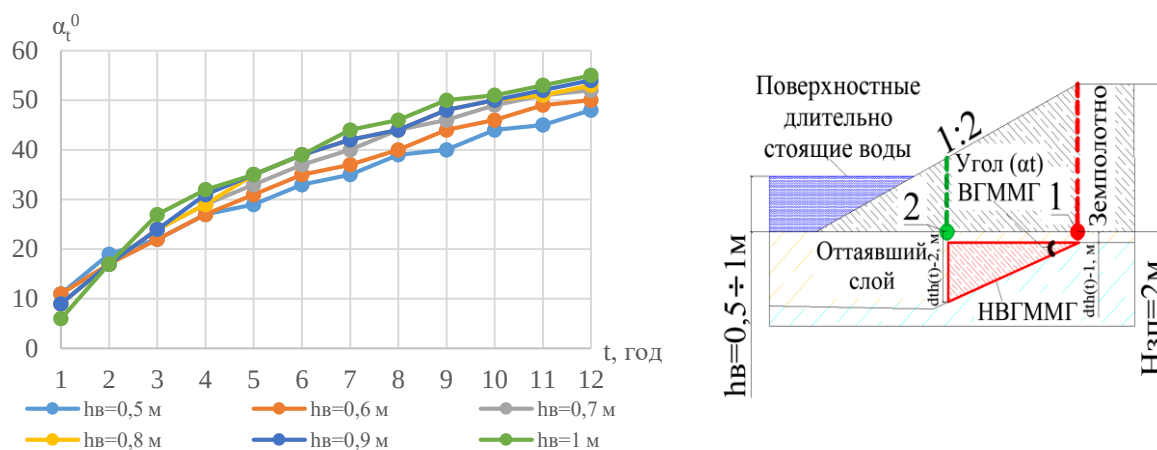


Рисунок 2.9. Влияние глубины водоема на изменение угла НВГММГ

Так как максимальное значение угла НВГММГ фиксируется при глубине водоема $h_v = 1$ м, для дальнейших исследований предложено принимать фиксированное значение глубины водоема $h_v = 1$ м. Изменение высоты земполотна ($H_{зп} = 1 \div 2$ м) приводит к увеличению среднего значения угла НВГММГ (см. рисунок 2.10) на $\Delta\alpha_{t=1 \div 12 \text{ лет}} = 2 \div 5^0$. Дальнейшее увеличение высоты земполотна ($H_{зп} = 3 \div 4$ м) приводит к уменьшению угла НВГММГ в среднем до $\Delta\alpha_{t=1 \div 12 \text{ лет}} = 2 \div 11^0$. По результатам численного моделирования установлено, что увеличение крутизны откоса земполотна (от 1:4 до 1:2) приводит к уменьшению угла НВГММГ на величину $\Delta\alpha_{t=12 \text{ лет}} = 2 \div 5^0$ (см. рисунок 2.11). Данный фактор объясняется уменьшением площадки притока тепла с более крутым откосом за счет конвективного теплообмена на границе «вода-откос». Установлено, что наиболее значимым фактором, влияющим на изменение формируемого угла НВГММГ, является глубина водоема.

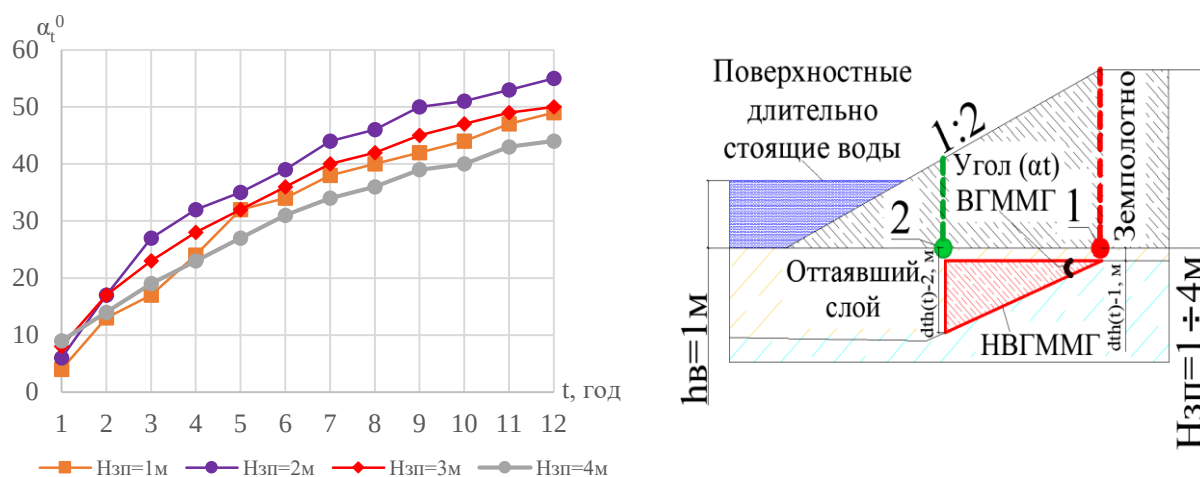


Рисунок 2.10. Влияние высоты земполотна на изменение угла НВГММГ при глубине водоема $h_в = 1 \text{ м}$

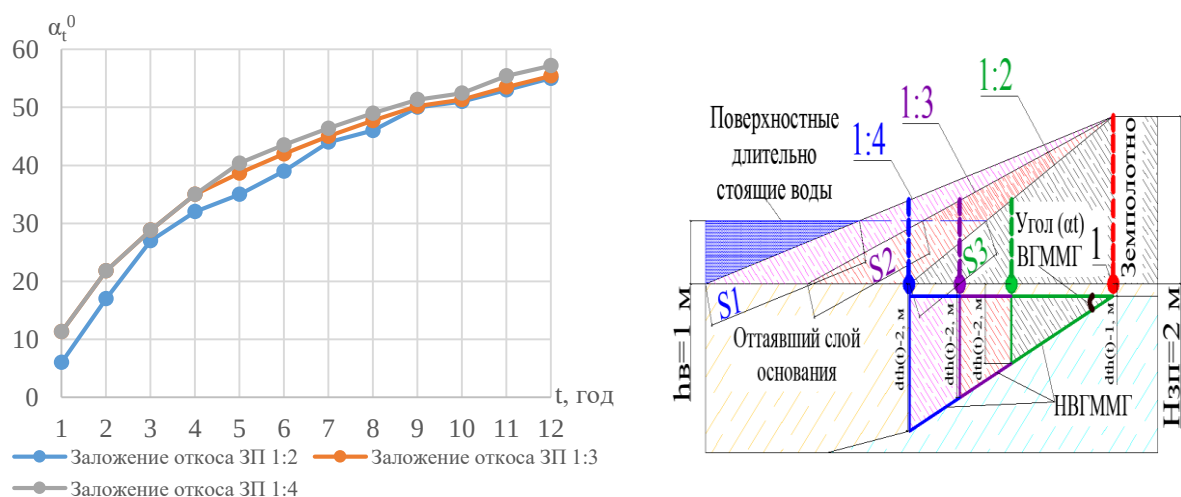


Рисунок 2.11. Влияние заложения откоса земполотна на изменение угла НВГММГ при глубине водоема $h_в = 1 \text{ м}$

На основании численного моделирования была выдвинута гипотеза о возможности управления формируемой и изменяемой во времени НВГММГ относительно горизонтальной плоскости, влияющей на устойчивость основания за счет регулирования ТР грунтов основания земполотна путем устройства теплоизоляционного материала, уменьшающего влияние теплового потока от неглубоких водоемов на грунты основания и устройства водонепроницаемого геосинтетического материала в конструкции и основании земполотна, ограничивающего инфильтрацию и инфлюацию воды.

Для подтверждения предложенной гипотезы были проведены экспериментальные полевые наблюдения на участке автомобильной дороги Сургут – Салехард, п. Пангоды (км 870) – п. Правохеттинский (км 936).

2.2. Натурные исследования температурного режима и напряженно-деформированного состояния многолетнемерзлого основания автомобильной дороги при воздействии неглубокого водоема

Исследуемый объект расположен в Надымском районе Ямало-Ненецкого автономного округа. Данный регион характеризуется сложными геоэкологическими условиями. Рельеф местности слабохолмистый заболоченный. Климат района резко континентальный, суровая продолжительная зима. Лето непродолжительное, теплое, короткие осенние и весенние периоды, наблюдаются резкие перепады температуры. Среднемесячная температура по данным метеостанции г. Надым представлена в таблице 2.22.

Таблица 2.22

Среднемесячная температура воздуха г. Надым

Месяц	I	II	III	IV	V	VI
Температура воздуха, °С	–24,5	–24,0	–16,8	–8,8	–1,0	8,8
Месяц	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, °С	15,5	11,4	5,6	–5,4	–16,1	–21,9

В рамках экспериментальных полевых исследований был проведен мониторинг участка автомобильной дороги Сургут – Салехард в районе населенных пунктов Пангоды (км 870) и Правохеттинский (км 936). Исследуемый участок автомобильной дороги располагается на пересеченной заболоченной местности с неглубоким водоемом вдоль южного откоса сооружения. Основные характеристики экспериментального участка автомобильной дороги приведены в таблице 2.23. Общий вид экспериментального участка автомобильной дороги представлен на рисунке 2.12.

Таблица 2.23

Характеристики экспериментального участка автомобильной дороги

Категория участка дороги	III
Протяженность, км	0,75
Расчетная скорость, км/ч	100
Ширина земляного полотна, м	12
Ширина проезжей части, м	7
Наименьшая ширина укрепленной полосы обочины, м	0,5
Расчетная интенсивность движения, авт/сут	2000–6000
Вид покрытия	Асфальтобетонное
Тип дорожной одежды	Капитальный

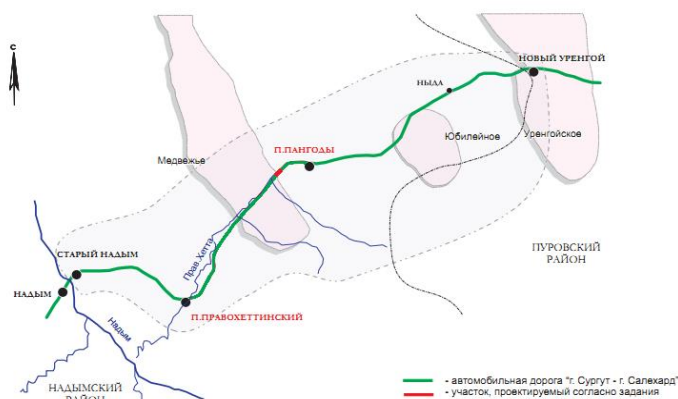


Рисунок 2.12. Схема расположения экспериментального участка автомобильной дороги

На обследуемом участке автомобильной дороги были выполнены ремонтные работы по восстановлению эксплуатационных качеств покрытия до проектных отметок. На момент проведения мониторинга были выявлены незначительные дефекты на проезжей части в виде трещин в продольном и поперечном направлении. На рисунках 2.13–2.14 представлен неглубокий водоем вдоль южного откоса сооружения и дефекты в виде трещин в продольном и поперечном направлении на проезжей части длиной до 7 м, шириной раскрытия до 1,2 см.



Рисунок 2.13. Продольные и поперечные трещины на проезжей части экспериментального участка



Рисунок 2.14. Вертикальные перемещения бровки на экспериментальном участке

Длительно стоящий водоем расположен вдоль южной части земляного полотна автомобильной дороги. Глубина данного водоема – до 1,3 м, средняя глубина – 1,0 м. Максимальная ширина участка водоема – до 10 м, длина – 25 м.

В целях дальнейшего анализа по выявлению причин циклических деформаций на экспериментальном участке были выполнены инженерно-геологические изыскания. В соответствии с проведенными изысканиями в основании земляного полотна экспериментального участка автомобильной дороги представлено шестью инженерно-геологическими элементами различной консистенцией от талого до пластично-твердомерзлого состояния. Под всей поверхностью земляного полотна залегает супесь пластичная (ИГЭ – 1) с варьируемой мощностью от 0,30 до 4,20 м. В нижней части сооружения с южной стороны расположена линза из пластично-мерзлой супеси (ИГЭ – 4), мощность которой составляет от 0,50 до 1,50 м, а также торфяные слои

средней степени разложения (ИГЭ – 5 и ИГЭ – 6) мощностью от 0,50 до 2,20 м. В нижней северной стороне сооружения залегает средний водонасыщенный песок (ИГЭ – 2) мощностью от 0,60 до 5,60 м и прослойка из твердомерзлого песка (ИГЭ – 3), мощность которой варьируется в диапазоне от 0,70 до 2,00 м.

Для определения ТР грунтов основания устраивались термометрические скважины глубиной до 10,0 м. На рисунке 2.15 представлена схема расположения термометрических скважин на экспериментальном участке автомобильной дороги.

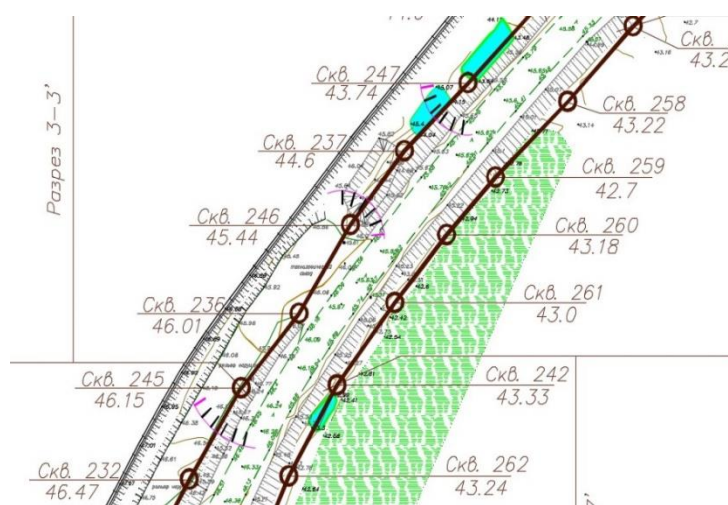


Рисунок 2.15. Схема расположения геологических скважин на экспериментальном участке автомобильной дороги

Многолетнемерзлые грунты имеют температуру от минус 0,3 до минус 0,6 °С за счет мохового и торфянистого покрова, средняя температура многолетнемерзлых грунтов минус 0,4 °С. Температура начала замерзания T_{bf} супесей, суглинков, торфа минус 0,2 °С, песчаных грунтов 0,1 °С.

На экспериментальном участке были вскрыты грунтовые воды. Первые водоносные горизонты проходят в основном над толщей ММГ. Источником пополнения водоносных горизонтов является инфильтрация атмосферных осадков и таяние сезонномерзлых и ММГ.

Физико-механические свойства грунтов земполотна и основания на экспериментальном участке приведены в таблице 2.24. Теплофизические свойства грунтов в талом и мерзлом состоянии представлены в таблице 2.25.

Таблица 2.24

Физико-механические свойства грунтов

Вид грунта	Грунт земполотна	ИГЭ – 1	ИГЭ – 2	ИГЭ – 3	ИГЭ – 4	ИГЭ – 5	ИГЭ – 6
W, %	20	25	28	23	39	69	155
γ , кН/м ³	18	18,8	20,4	19,5	17	12	9,5
e, д. ед.	0,65	0,65	0,66	0,68	1,20	2,5	2,5
S _r , д. ед.	0,69	0,70	1,13	0,91	0,88	0,4	1,11
ϕ , град.	20	20	36	36	18	7	29
C, МПа	0,000	5	0,001	0,009	0,014	0,006	0,014
E, МПа	30	30	30	100	7	2,8	80

Таблица 2.25

Показатели теплофизических свойства грунтов

Вид грунта	$\lambda_{th}, \frac{Вт}{(м \cdot ^\circ C)}$	$\lambda_f, \frac{Вт}{(м \cdot ^\circ C)}$	$C_{th}, \frac{кДж}{(м^3 \cdot ^\circ C)}$	$C_{th}, \frac{кДж}{(м^3 \cdot ^\circ C)}$	T _{bf} , °C
Грунт земполотна	1,194	1,352	1660,0	1428,5	–0,1
ИГЭ – 1	1,940	2,260	2342,4	1776,6	–0,1
ИГЭ – 2	2,490	3,040	2991,4	2074,5	–0,1
ИГЭ – 3	1,800	1,860	3110,0	2120,0	–0,15
ИГЭ – 4	0,580	1,044	1831,2	1257,1	–0,2
ИГЭ – 5	0,950	1,400	4046,4	2498,9	–0,35

По результатам инженерно-геологических изысканий был построен поперечный разрез экспериментального участка автомобильной дороги. В основании сооружения под южной частью откоса автомобильной дороги была зафиксирована таликовая зона мощностью до 4 м. В основании под северной частью автомобильной дороги мощность таликовой зоны составляла до 2 м. На рисунке 2.16 представлен инженерно-геологический разрез в поперечном направлении экспериментального участка автомобильной дороги.

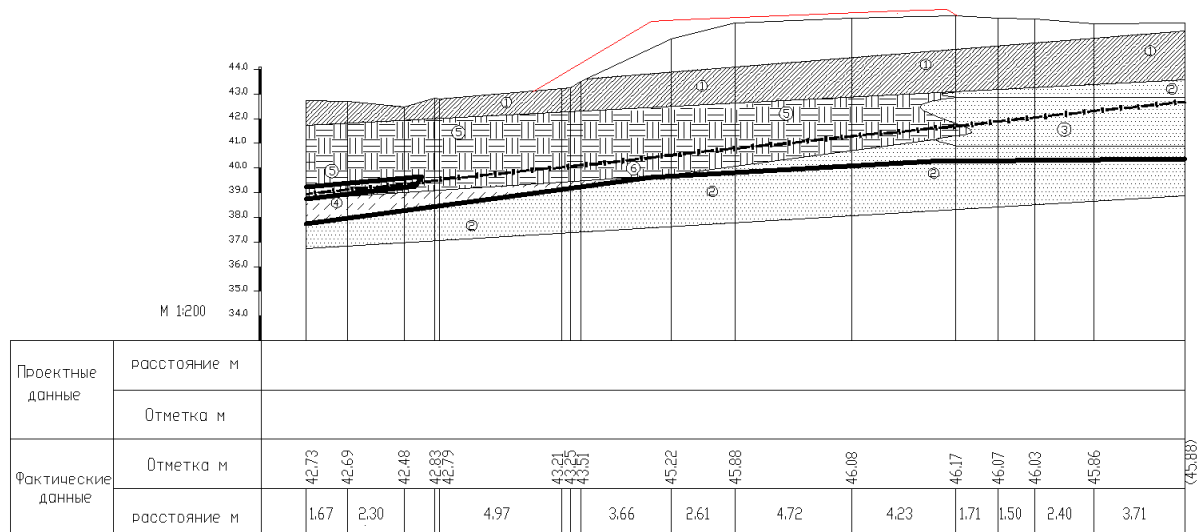


Рисунок 2.16. Поперечный профиль экспериментального участка (красной линией обозначено проектное положение земполотна)

Поперечный разрез основания экспериментального участка автомобильной дороги представлен из неоднородного напластования. Под всей подошвой земполотна располагается слой из пластичной супеси. Нижележащие слои с правой (северной) стороны представлены песком, левая (южная) часть основания представлена торфом и прослойкой супеси. На проезжей части с южной (подтопленной неглубокими водоемами) стороны участка автомобильной дороги зафиксированы деформации и дефекты на асфальтобетонном покрытии. Схема развития деформаций на проезжей части представлена на рисунке 2.17.

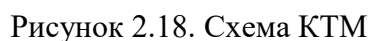


Рисунок 2.17. Развитие деформаций на экспериментальном участке

На основании анализа результатов инженерно-геологических изысканий и обследования экспериментального участка автомобильной дороги было

По результатам инженерно-геологических изысканий на экспериментальном участке установлено, что максимальное значение оттаивания многолетнемерзлого основания было зафиксировано в южной откосной части сооружения со стороны скопления водоема. Для повышения устойчивости грунтов основания автомобильной дороги предложено разработать дополнительное мероприятие в южной откосной части. Основным фактором, влияющим на появление ежегодных циклических деформаций в южной части сооружения, является деградация ММГ основания из-за скопления вдоль откосной части сооружения неглубокого водоема.

В качестве решения было предложено разработать и внедрить КТМ, направленное на повышение устойчивости основания автомобильной дороги за счет ограничения влияния (инфильтрации) неглубокого водоема вдоль южного откоса сооружения на ТР грунтов основания. На рисунке 2.18 представлена схема КТМ.



Было предложено разработать в южной откосной части основания автомобильной дороги продольную траншею (см. рисунок 2.19) вдоль оси сооружения ниже нормативной глубины сезонного оттаивания слоя (не менее 2 – 3 м) и разместить в траншее геосинтетический материал. Геосинтетический материал анкерился в толщу ММГ (см. рисунок 2.20) путем обратной засыпки выработанным грунтом из разработанной траншеи. После этого в земполотне автомобильной дороги формировалась грунтовая призма (см. рисунок 2.21), верхняя граница которой планировалась параллельно существующему откосу (см. рисунок 2.22) автомобильной дороги. Ширина призмы составляла $l_2 = 2$ м, высота $h_2 = 0,75$ м, внутренняя грань призмы размещалась на расстоянии $l_1 = 8$ м от оси сооружения.



Рисунок 2.19. Разработка продольной траншеи



Рисунок 2.20. Обратная засыпка траншеи выработанным грунтом



Рисунок 2.21. Размещение армирующего элемента



Рисунок 2.22. Общий вид призмы

Представленное КТМ способствует уменьшению вертикальных и горизонтальных перемещений, снижению воздействия неглубокого водоема, расположенных вдоль откосной части сооружения путем изменения ТР грунтов основания за счет снижения коэффициента фильтрации на границе «основание-земполотно».

Армирование выполнялось геотекстилем «Геоспан ТН 80». Технические свойства материала приведены в таблице 2.26.

Таблица 2.26

Технические свойства армирующего материала

Минимальная прочность до разрыва, R_p , кН/м, (не менее) по длине/по ширине	Максимальное удлинение до разрыва, не более, % по длине/по ширине	Промежуточное удлинение при 25% нагружения до разрыва, не более, % по длине/по ширине	Коэффициент фильтрации не менее, м/сут, при давлении: 2 кПа/20 кПа/100 кПа
80/80	20/20	7/7	11/7/4.5

Схема расположения термометрических скважин в откосной части земполотна на экспериментальном участке представлена на рисунке 2.23.

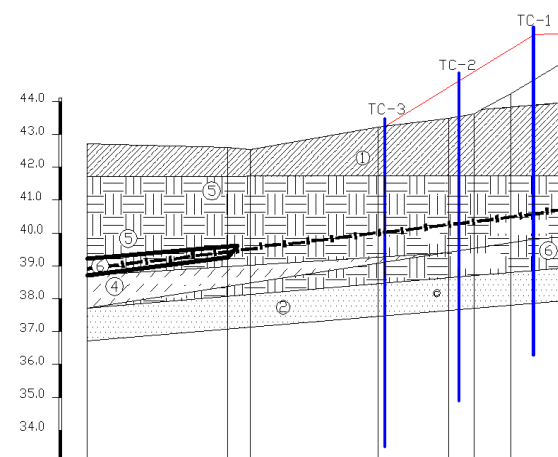


Рисунок 2.23. Поперечный разрез экспериментального участка с расположенными термометрическими скважинами (красной линией обозначено проектное положение земполотна)

Схема расположения грунтовых марок и мессдоз представлена на рисунке 2.24.

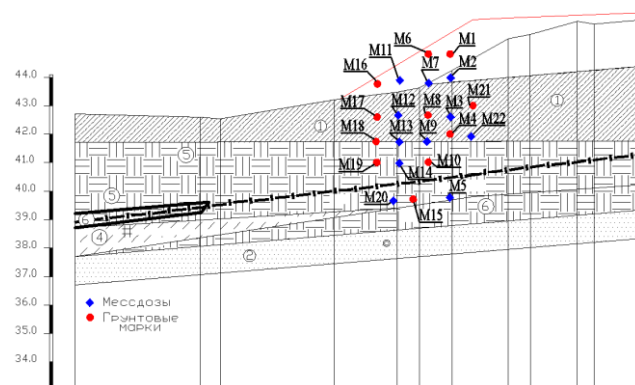


Рисунок 2.24. Схема расположения грунтовых марок и мессдоз на экспериментальном участке автомобильной дороги (синим цветом обозначены мессдозы, красным — грунтовые марки; красной линией отмечено проектное положение земполотна)

2.4. Приборы и оборудование для проведения натуральных экспериментальных исследований

Температуру, вертикальные напряжения и перемещения на экспериментальном участке автомобильной дороги измеряли современным

оборудованием, разработанным и апробированным во многих научных работах.

Для измерения вертикальных перемещений слоев грунтового основания и земполотна автомобильной дороги использовали грунтовые марки (см. рисунок 2.25).



Рисунок 2.25. Общий вид грунтовой марки

Для погружения грунтовых марок в массив грунта пробуривались лидерные скважины (см. рисунок 2.26) $d = 250$ мм. Глубина лидерной скважины превышала проектную отметку грунтовой марки на 0,5 м. Далее к грунтовой марке крепили леску и продергивали ее через металлическую трубку, таким образом, чтобы грунтовая марка плотно была подтянута к нижнему концу металлической трубки. Затем грунтовые марки с металлической трубкой опускались по лидерной скважине и далее закручивались в массив грунта на глубину 0,5 м. Для исключения влияния на измеряемые маркой вертикальные перемещения деформаций вышележащих грунтов металлическую трубку, обеспечивающую защиту лески от грунта, приподымали из массива грунта на 0,5 м от отметки грунтовой марки.



Рисунок 2.26. Погружение грунтовой марки, заполнение скважины песком

Вертикальные перемещения измерялись датчиками часового типа ИЧ с точностью измерения 0,01 мм. Для обеспечения корректных показаний индикаторы перемещений располагали строго вертикально над леской. Для исключения проскальзывания лески, направленной от грунтовой марки, ее обматывали в два оборота на задние барабаны индикаторов перемещений, на конце лески закрепляли противовесы. Исключение влияния природных факторов (снег, дождь, ветер и т. д.) на точность показаний индикаторов перемещений обеспечивалось путем размещения приборов в специальных металлических защитных кожухах (см. рисунок 2.27).



Рисунок 2.27. Установка индикатора часового типа с противовесом в защитном кожухе

Для корректировки показаний перемещений грунтовых марок в результате деформаций сооружения с установленным измерительным оборудованием на поверхности производился дополнительный геодезический контроль планово-высотного положения индикаторов часового и дорожного покрытия. Геодезическая съемка осуществлялась высокоточным нивелиром (см. рисунок 2.28) третьего класса точности.



Рисунок 2.28. Геодезическая съемка

Вертикальные и горизонтальные напряжения в грунтовом массиве измерялись мессдозами мембранного типа, которые были изготовлены по методике А. В. Голли, Б. И. Далматова и др. (см. рисунок 2.29). Обойма мессдозы производится из берилловой бронзы $d = 30$ мм, толщиной мембраны 0,2 мм, с модулем упругости $E = 1320$ МПа. Такая толщина мембраны позволяет получить измерения напряжений в грунте с точностью до 0,001 МПа.



Рисунок 2.29. Общий вид мессдозы

После изготовления мессдоз на специальном стенде выполнялось их тарирование для оценки чувствительности измерительного элемента. Тарировочный процесс заключается в загрузке мессдоз в тарировочный стенд и ступенчатой подаче нагрузки сжатым воздухом на мессдозы. Такой способ позволяет проверять герметичность корпуса без нанесения повреждений.

Внедрение мессдоз в грунтовый массив выполнялось специальным режущим устройством (см. рисунок 2.30). Напряжения в массиве грунта измерялись для всех мессдоз с помощью персонального компьютера посредством программного обеспечения, позволяющего в режиме реального времени отслеживать показания напряжений.



Рисунок 2.30. Способ погружения мессдоз в грунт

Для замеров температуры грунтов земполотна и основания устанавливали термометрические скважины. В выбуренные скважины внедряли термометрические металлические трубы $d = 73$ мм (см. рисунок 2.31), нижняя часть трубы была с заглушенным концом. Верхняя часть термометрической трубы, находящаяся на дневной поверхности, была термоизолирована. Верхнее отверстие термометрической трубы имело заглушку для предотвращения попадания осадков, диаметр заглушки был больше на 1–2 мм самой термометрической трубы для плотного соединения.



Рисунок 2.31. Термометрические скважины

Температура грунтов замерялась с помощью термометрической косы. Согласно с ГОСТ 25358-2020, термометрическую косу опускают в скважину и

выдерживают определенное количество времени, по прошествии которого производят измерение с помощью регистрирующей аппаратуры (см. рисунок 2.32).



Рисунок 2.32. Процесс измерения температуры грунта

Общий вид экспериментального участка с установленным контрольно-измерительным оборудованием представлен на рисунке 2.33.



Рисунок 2.33. Общий вид экспериментального участка с установленным контрольно-измерительным оборудованием

2.5. Анализ результатов натурного эксперимента и сопоставление с численными и аналитическими решениями

После внедрения КТМ в течение трех лет проводили геотехнический мониторинг на экспериментальном участке. Геотехнический мониторинг включал в себя замеры температуры грунтов основания в термометрических скважинах, а также регистрацию значений с мессдоз и грунтовых марок с целью оценки НДС.

В период с февраля по март в ходе проведения работ по реализации КТМ при разработке траншеи в основании земполотна был выявлен дополнительный тепловой источник – фильтрационный поток воды, проходящий через уплотненный слой торфа на границе «основание-земполотно» (см. рисунок 2.34). Формирование дополнительного теплового источника объясняется тем, что в период максимального промерзания (февраль) водоем, расположенный вдоль южного откоса (см. рисунок 2.35), не промерзает в течение зимы, обеспечивая за счет фильтрации воды дополнительный приток тепла в основание сооружения. Толщина фильтрационной прослойки составила 0,1 м. Экспериментальным путем были определены коэффициент фильтрации и температуры в начале и в конце фильтрационной прослойки. Коэффициент фильтрации через уплотненный торфяной слой составил $0,005 \text{ м}^3/\text{ч}$, температурный градиент в начале и в конце фильтрационной прослойки равен $1,8 \div 2,4 \text{ }^\circ\text{C}$. На рисунке 2.36 представлен и зафиксирован объем скопившейся воды в разработанной продольной траншее.



Рисунок 2.34. Фильтрация воды через уплотненный торфяной слой на границе «основание-земполотно»



Рисунок 2.35. Общий вид незамерзшего водоема на конец зимнего периода



Рисунок 2.36. Скопление воды в разработанной траншее, образовавшееся за счет фильтрации на границе основание – земполотно

По результатам 3-летних натурных наблюдений (см. рисунок 2.37) построены графики изменения температурного режима грунтов геотехнической системы «основание-земполотно» на период максимального оттаивания (октябрь).

За первый год наблюдения после внедрения КТМ средняя температура ММГ геотехнической системы «основание-земполотно» в откосных частях основания автомобильной дороги повысилась до $\Delta 0,3^{\circ}\text{C}$. Объясняется это тем, что в период внедрения КТМ происходило дополнительное тепловое воздействие от солнечной радиации и накопленной в траншеях воды. На третий год эксплуатации автомобильной дороги было зафиксировано понижение средней температуры ММГ геотехнической системы «основание-земполотно» в откосных частях основания автомобильной дороги на $\Delta 0,5^{\circ}\text{C}$ и уменьшение мощности талого слоя под южным откосом на 1 м.

Для проведения последующих численных экспериментов и калибровки параметров модели выполнялся теплотехнический расчет экспериментального

участка (см. рисунок 2.37) в ПК QFrost с сопоставлением результатов расчета и эксперимента. В основе численного моделирования – двухслойная явная разностная схема с применением метода балансов и с энтальпийной формулировкой задачи Стефана. Установлено, что расхождение расчетных результатов расположения границы ММГ в южной откосной части сооружения с экспериментальными данными составляет до 15 %.

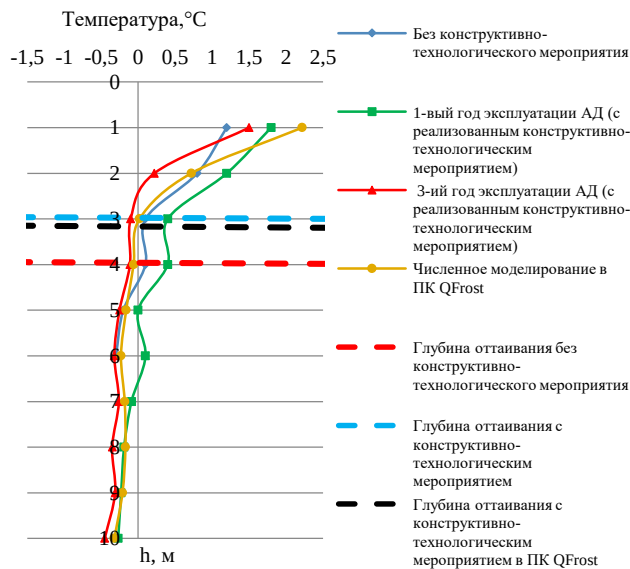


Рисунок 2.37. Результаты экспериментальных и численных расчетов температуры грунтов основания в южной откосной части земполотна

По результатам натурных исследований получены изолинии вертикальных напряжений и перемещений в геотехнической системе «основание-земполотно». Численное моделирование НДС грунтов геотехнической системы «основание-земполотно» выполнялось в ПК Midas GTS FEA с использованием упругой идеально-пластической модели грунта Мора-Кулона (см. рисунок 2.38–2.39). Расхождение результатов моделирования в ПК Midas GTS FEA со значениями, полученными в эксперименте на конец третьего года наблюдений, составляют: по вертикальным перемещениям не более 20 %, по вертикальным напряжениям не более 30 %.

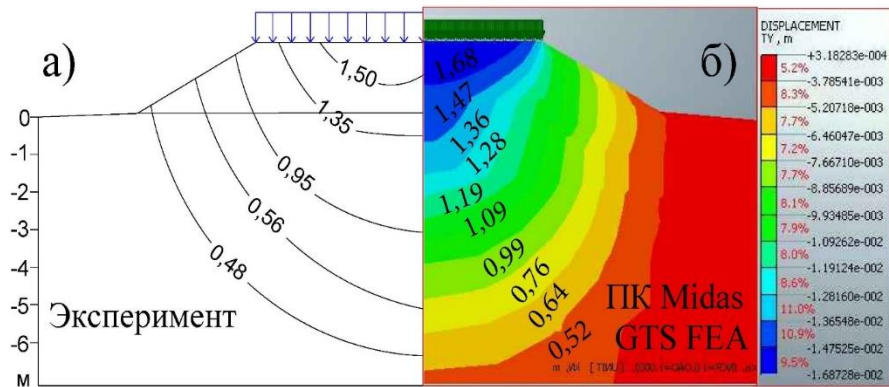


Рисунок 2.38. Экспериментальные и расчетные изолинии вертикальных перемещений на конец третьего года наблюдений: а) экспериментальные, см; б) расчетные, м

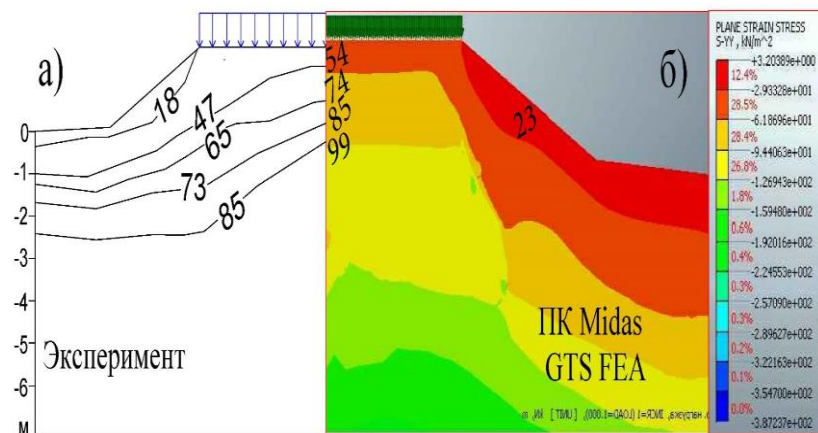


Рисунок 2.39. Экспериментальные и расчетные изобары вертикальных напряжений на конец третьего года наблюдений: а) экспериментальные, кПа; б) расчетные, кПа

На основании мониторинга ТР на экспериментальном участке автомобильной дороги был определен угол НВГММГ. Сопоставление угла НВГММГ с численным моделированием (ПК QFrost) показало удовлетворительный результат, максимальная погрешность составила 12 %.

Согласно [28], коэффициент устойчивости назначается в зависимости от класса сооружения. В исследованиях профессора В. А. Флорина [83] коэффициент устойчивости назначается в зависимости от класса и типа сооружения, а также от степени достоверности определения расчетных параметров сопротивления сдвигу и применяемых методов расчета рекомендуемые значения коэффициента устойчивости могут изменяться от 1 до 1,5 при среднем значении 1,25–1,3 [83].

Прогноз устойчивости основания с ММГ на натурном участке основывается на анализе напряженного состояния (НС) в точках грунтового

массива (σ_z , σ_x , τ_{xz}), расположенных на НВГММГ (см. рисунок 2.40). Экспериментальные значения напряжений в точках на НВГММГ в натурных условиях определялись исходя из расположения мессдоз.

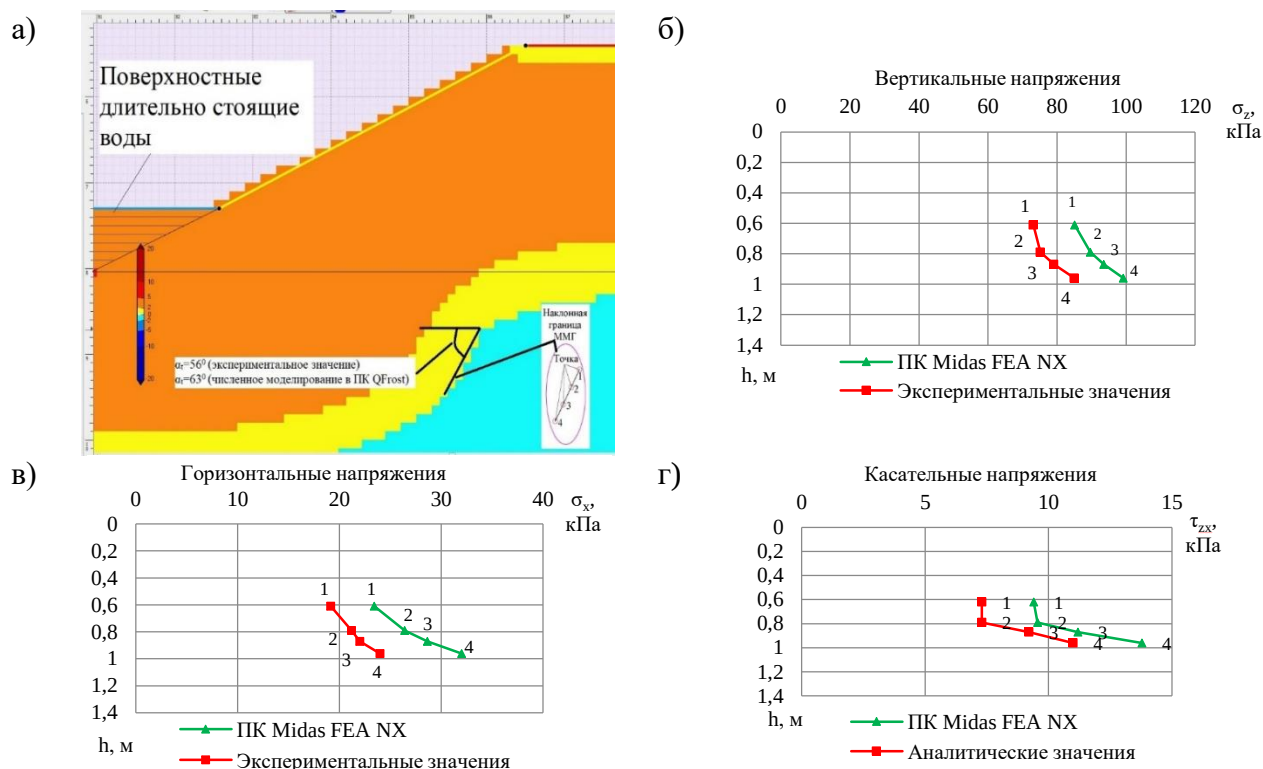


Рисунок 2.40. Результаты сопоставления экспериментальных данных с результатами аналитического расчета НС в точках грунтового массива на НВГММГ на конечный период мониторинга: а) угол НВГММГ; б) вертикальные напряжения; в) горизонтальные напряжения; г) касательные напряжения

При расчете устойчивости многолетнемерзлого основания земполотна необходимо учитывать, что в основании выше границы прочного водонепроницаемого ММГ формируется переувлажненная зона с наиболее низкими прочностными характеристиками грунта.

В работе Л. Т. Роман [81] установлено, что в оттаивающем основании сооружений на границе талого мерзлого слоя формируется «приконтактный слой» с пониженными прочностными характеристиками грунта. В таблице 2.27 представлены пониженные прочностные характеристики грунтов (сцепление, угол внутреннего трения) на НВГММГ.

Таблица 2.27

Прочностные характеристики грунтов на наклонной верхней границе
ММГ

Вид грунта	Начальная влажность $W_{tot}, \%$	Начальная степень водонасыщения S_r	Прочностные характеристики грунта на границе оттаивания	
			$C_{th}, \text{МПа}$	$\varphi_{th}, ^\circ$
Песок	8	0,48	0,002	30
	17	0,75	0,001	28
	32	0,99	0,000	22
Супесь	15	0,58	0,016	17
	17	0,62	0,008	15
	23	0,70	0,005	11
Суглинок	15	0,75	0,016	22
	20	0,78	0,012	18
	28	0,81	0,004	12
Глина	20	0,68	0,022	16
	29	0,79	0,014	12
	44	0,80	0,006	10

Значение коэффициента устойчивости K_{st} основания в точке грунтового массива оценивается по формуле, представленной в работе А. Н. Богомолова [19]:

$$K_{st} = \frac{[0,5(\sigma_z - \sigma_x)\cos 2\alpha + 0,5(\sigma_x - \sigma_z) + \tau_{xz}\sin 2\alpha + \sigma_{CB}]\operatorname{tg}\varphi}{0,5(\sigma_x - \sigma_z)\sin 2\alpha + \tau_{xz}\cos 2\alpha} = 0,87, \quad (2.1)$$

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

Численное значение коэффициента устойчивости многолетнемерзлого основания определялось в ПК Midas GTS FEA (см. рисунок 2.41) методом снижения прочностных характеристик (SRM). Данный метод удобен тем, что позволяет автоматически спрогнозировать наиболее вероятную поверхность скольжения. В ПК Midas GTS FEA «приконтактный слой» моделировался через параметры интерфейса.

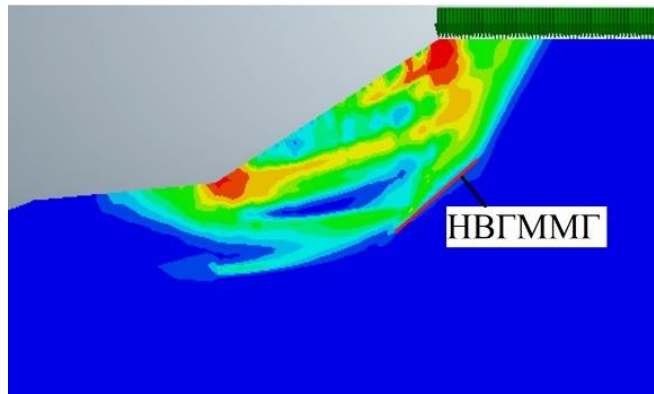


Рисунок 2.41. Определение K_{st} многолетнемерзлого основания земполотна в ПК Midas GTS FEA (значение коэффициента устойчивости – 1,01)

Сопоставление аналитического значения устойчивости основания с численным моделированием в ПК Midas GTS FEA методом снижения прочностных характеристик показало удовлетворительную сходимость результатов, максимальная погрешность составила 13 %.

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

При визуальном осмотре на различных пикетах выявлены дефекты на проезжей части автомобильной дороги. Результаты фотофиксации представлены на рисунках 2.42–2.48.



Рисунок 2.42. Трещина на левой стороне проезжей части плавно переходящая в просадку. Максимальная величина раскрытия Δ 50 мм, длина трещины $L = 23,10$ м, величина просадки равна Δ 47 мм



Рисунок 2.43. Трещина на проезжей части поперек оси автомобильной дороги (ПК597+22) с максимальным раскрытием Δ 40 мм (длина трещины $L = 7,20$ м)



Рисунок 2.44. Трещина на проезжей части поперек оси автомобильной дороги (ПК597+23,70) с максимальным раскрытием Δ 35 мм, длина трещины $L = 2,31$ м



Рисунок 2.45. Трещина на покрытии вдоль оси дороги по середине проезжей части с максимальной величиной раскрытия Δ 30 мм, длина трещины $L = 30$, м (ПК597+17,50 – ПК597+42,50)

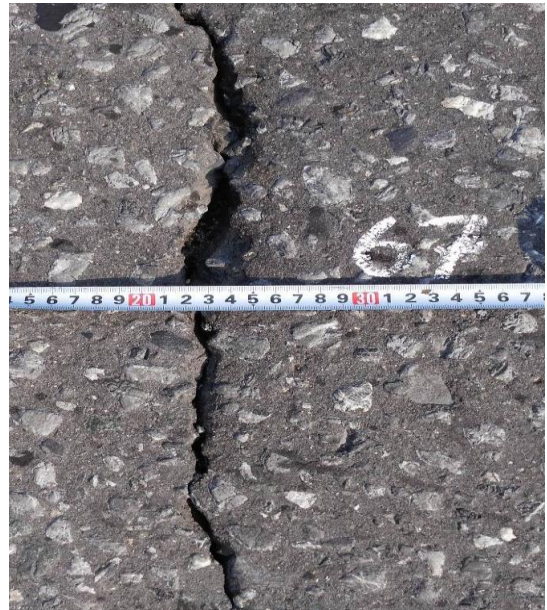


Рисунок 2.46. Трещина на покрытии вдоль оси дороги посередине проезжей части с максимальной величиной раскрытия Δ 50 мм, длина трещины $L = 18,45$ м (ПК597+25 – ПК597+42,50)

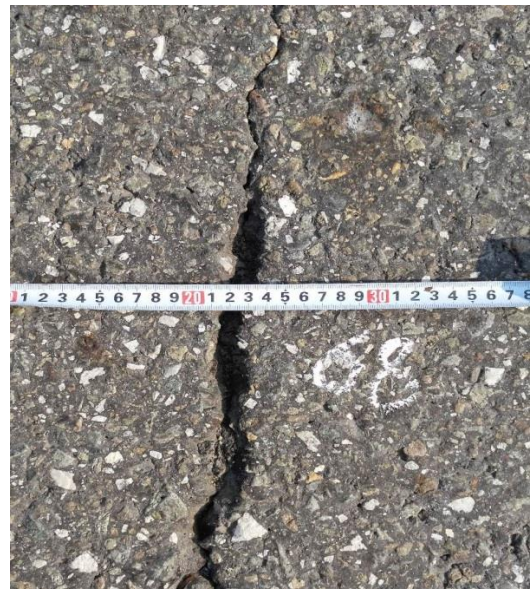


Рисунок 2.47. Трещина на проезжей части поперек оси автомобильной дороги (ПК597+33) с максимальным раскрытием Δ 40 мм, длина трещины $L = 9,30$ м



Рисунок 2.48. Трещина на покрытии поперек оси дороги на правой полосе проезжей части с максимальной величиной раскрытия Δ 25 мм, длина трещины $L = 1,44$ м (ПК597+42,50)

За трехлетний период наблюдений на покрытии автомобильной дороги зафиксированы дефекты в виде вертикальных деформаций с развитием трещин. Максимальная ширина раскрытия трещины составляла до $\Delta 50$ мм, протяженностью $L = 23$ м. Вертикальное перемещение южной части покрытия вдоль трещины, сформированной по оси конструкции автомобильной дороги, составляло 47 мм. Совокупность горизонтальных и вертикальных перемещений южной части покрытия обусловлена технологическими осадками от реализации КТМ и сдвиговыми деформациями в геотехнической системе «основание-земполотно», указывающими на потерю устойчивости грунтов основания по НВГММГ в основании автомобильной дороги.

2.6. Выводы по главе 2

Анализ результатов полевого эксперимента, численного моделирования и аналитического расчета позволил сделать следующие выводы:

1. Выявлены основные факторы, влияющие на формирование НВГММГ за счет разных величин мощности оттаивания под основной площадкой и откосом земполотна.

2. В процессе внедрения КТМ выявлен дополнительный тепловой источник – фильтрационный поток воды, проходящий через уплотненный слой торфа на границе «основание-земполотно». Тепловое воздействие фильтрационного потока на грунты основания приводит к понижению кровли ММГ, а неглубокий водоем ведет к образованию таликовой зоны в южной откосной части основания и обеспечивают фильтрацию воды на границе «основание-земполотно» до периода полного промерзания водоема.

3. Экспериментально установлены основные причины появления циклических деформаций, выраженные в действии тепловых источников в виде неглубокого водоема и фильтрации воды на границе «основание-земполотно», которые приводят к формированию таликовой зоны и понижению границы ММГ под сооружением, что, в свою очередь, ведет к развитию вертикальных деформаций в основании и конструкции автомобильной дороги за счет изменения геометрического положения НВГММГ.

4. Анализ результатов температурных измерений грунтов основания и земполотна с внедренным КТМ указывает на необходимость дополнительного ограничения теплового воздействия от неглубокого водоема путем применения современных водонепроницаемых геосинтетических материалов и частичной замены грунта обертываемой призмы теплоизоляционным материалом, позволяющим снизить тепловое воздействие на основание.

ГЛАВА 3. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МЕРОПРИЯТИЕ, НАПРАВЛЕННОЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА И УГЛА НАКЛОНА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕГЛУБОКИХ ВОДОЕМОВ

Развитие стратегических направлений в криолитозоне способствует увеличению транспортных средств на автомобильных дорогах. В связи с этим увеличивается объем ремонтных и восстановительных работ на существующей сети автомобильных дорог, вводятся в эксплуатацию новые участки. В обоих случаях для обеспечения бесперебойного и безопасного движения автотранспорта в условиях криолитозоны требуется разработка и внедрение комплексных мер для повышения эксплуатационных характеристик автомобильных дорог, так как традиционные мероприятия по сохранению ВГММГ становятся менее эффективными. Традиционные мероприятия реализованы, в частности, на участке автомобильной дороги Сургут – Салехард, п. Пангоды (км 870) – п. Правохеттинский (км 936), введенной в эксплуатацию в ноябре 2009 года [102]. В процессе эксплуатации на данном участке образовались циклические ежегодные деформации (превышавшие нормативные значения), связанные с потерей устойчивости многолетнемерзлого основания. С учетом выявленных деформаций было разработано и внедрено КТМ, которое способствовало снижению деформаций в незначительной степени, так как не было учтено, что грунтовый валик в откосной части сооружения не способствует ограничению теплового воздействия от неглубокого водоема. Скопление неглубокого водоема вдоль южной откосной части земполотна, а также фильтрация воды на границе «основание-земполотно» являются значимыми факторами, влияющими на понижение ВГММГ и снижение эксплуатационных характеристик на данном участке автомобильной дороги. В связи с чем необходима разработка и

обоснование новых или доработка существующих КТМ, направленных на обеспечение устойчивости многолетнемерзлого основания земполотна при воздействии неглубоких водоемов, внедряемых на стадии нового строительства, капитального ремонта и реконструкции автомобильной дороги.

3.1. Разработка конструктивно-технологического мероприятия

В рамках диссертационной работы было предложено доработать известное КТМ, представленное в главе 2 (см. рисунок 2.18). Его можно применять при новом строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог на ММГ при воздействии неглубоких водоемов, а также на всех категориях автомобильных дорог. Предлагаемое КТМ отличается от аналога, описанного выше тем, что ограничивает воздействие теплового потока от фильтрации воды на границе «основание-земполотно» за счет размещения водонепроницаемого геосинтетического материала и снижению теплового потока от неглубоких водоемов через откосную часть сооружения путем частичной замены грунта в нижней части грунтовых призм на теплоизоляционный материал, расположенный в основании откосной части земполотна. Предлагаемое мероприятие должно способствовать поднятию ВГММГ основания и поддерживать ее на требуемой глубине на протяжении всего периода эксплуатации сооружения.

С целью ограничения инфильтрации влаги в грунт разрабатывают продольную траншею в основании автомобильной дороги шириной не менее 0,5 м, глубиной ниже деятельного слоя – слоя сезонного промерзания и оттаивания. Следующим шагом является (ручное) раскатывание рулона из водонепроницаемого геотекстиля с максимальным натяжением материала для устранения перекосов. Рулон из геотекстиля раскатывают в поперечном направлении автомобильной дороги по обеим сторонам земполотна с запасом, достаточным для смыкания верхних ветвей полуобоймы. Далее в траншею

вертикально размещают водонепроницаемый геотекстиль. После размещения водонепроницаемого элемента производят обратную засыпку траншеи тем же выработанным грунтом с последующим послойным уплотнением. Так как откосная часть у автомобильной дороги является наиболее уязвимой, в ней располагают водонепроницаемые призмы с гранулированным теплоизоляционным материалом, которые укладывают в трапецеидальную форму. Верхнее основание трапеции устраивается выше уровня неглубоких водоемов.

После устройства призмы с гранулированным теплоизоляционным материалом выше уровня неглубоких водоемов свободные края водонепроницаемого материала заводят на поверхность с максимальным натяжением и минимальной шириной нахлеста 0,3 м. Далее выполняют послойную отсыпку и уплотнение земполотна. Полуобоймы устраивают для повышения устойчивости земполотна и предотвращения массового проникновения влаги в тело земполотна и многолетнемерзлое основание автомобильной дороги. Для снижения экзогенных процессов в откосной части автомобильной дороги устраивают биоматы с присыпкой некондиционных грунтов. Далее переходят к устройству конструктивных слоев дорожной одежды.

Таким образом, предлагаемое мероприятие обеспечивает мерзлое состояние грунта в основании сооружения и увеличивает устойчивость многолетнемерзлого основания за счет уменьшения угла НВГММГ путем сохранения холодного притока в зимний период через основную площадку земполотна и ограничения тепловых воздействий от снежных отложений на откосной части сооружения в холодный период, а также неглубоких водоемов в теплый период, расположенных вдоль откосных частей сооружения. Это позволяет уменьшить вертикальные и горизонтальные деформации дорожной одежды и обочин, что в значительной степени способствует повышению транспортно-эксплуатационных показателей автомобильной дороги. Общий вид КТМ представлен на рисунке 3.1.

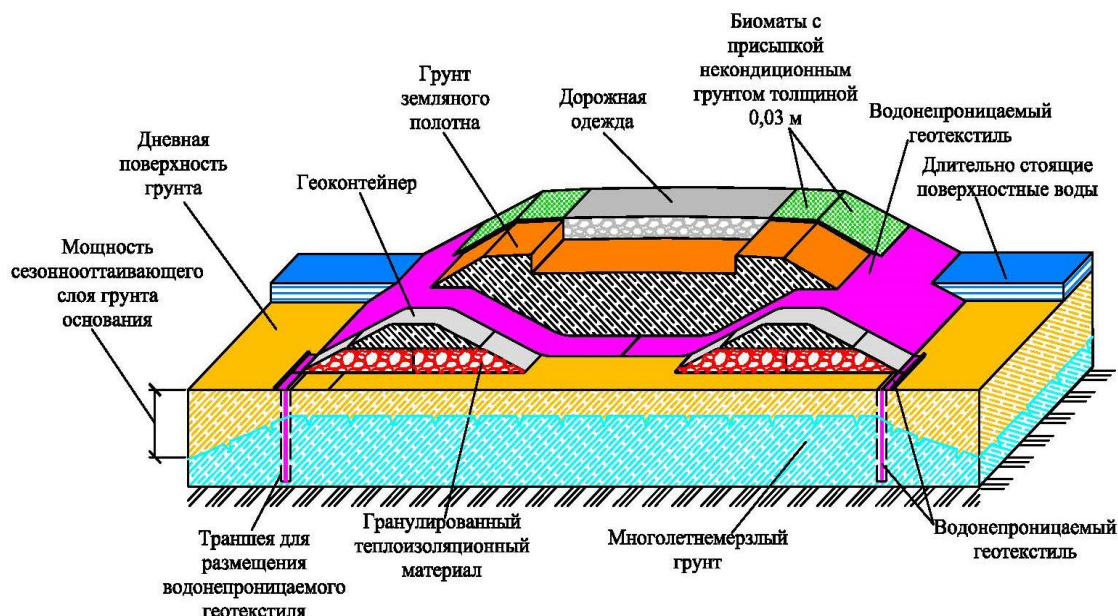


Рисунок 3.1. Схема КТМ

3.2. Обоснование критериев выбора геометрических размеров конструктивно-технологического мероприятия

Для определения влияния геометрических размеров КТМ на ТР грунтов основания проведена серия численных экспериментов в программном комплексе QFrost. Программный комплекс QFrost разработан Д. Г. Песоцким на основе численной модели Л. Н. Хрусталева [97, 104].

В качестве критерия выбора приемлемых геометрических размеров назначена температура в характерных точках основания, влияющая на глубину талого слоя и изменение угла НВГММГ относительно горизонтальной плоскости в основании сооружения в первый год внедрения КТМ в период максимального оттаивания. Варьируемые геометрические параметры КТМ представлены на рисунке 3.2.

Предельные размеры предлагаемого КТМ при численном моделировании с фиксированными параметрами (III категория автомобильной дороги, $H_{\text{зп}} = 2$ м; $h_{\text{в}} = 1$ м; заложение откоса ЗП 1:1,5÷1:2; теплофизические свойства гранулированного теплоизоляционного материала: $\lambda = 0,1$ Вт/(м · °С), $C = 576$ кДж/(м³ · °С); теплопроводность слоя

воды при конвективном перемешивании $\lambda = 200 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, без перемешивания $\lambda = 0,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$): заложение внешнего откоса призмы ($1 : m_1$) принималось идентично проектному заложению откоса сооружения; заложения внутреннего откоса призмы ($1 : m_2$) принимались равными 1:1, 1:2, 1:3; ширина верхней ($b_{\text{пр1}}$) и нижней частей ($b_{\text{пр2}}$) призмы варьировалась $b_{\text{пр1}} = 0,5 \div 1,5 \text{ м}$, шагом по 0,5 м, $b_{\text{пр2}} = 3 \div 6 \text{ м}$; высота горизонтально расположенного теплоизоляционного материала в грунтовой призме $h_{\text{тм}}$ варьировалась в пределах $0,1 \div 1 \text{ м}$ с шагом 0,1 м; высота призмы $h_{\text{пр}}$ принималась на 0,1 м выше уровня неглубоких водоемов, что обусловлено необходимостью предотвратить инфильтрацию воды в грунты земполотна за счет обертывания призмы водонепроницаемым геосинтетическим материалом.

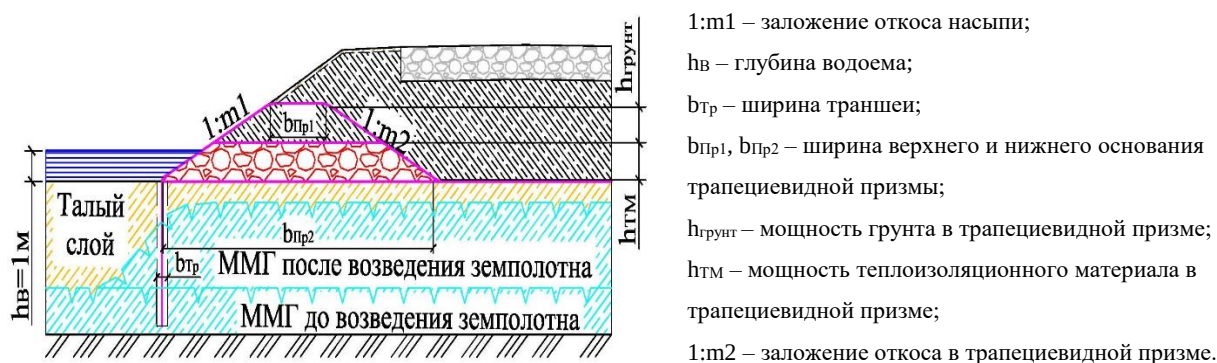


Рисунок 3.2. Варьируемые геометрические размеры КТМ

Геометрические размеры основания принимались шириной $B_{\text{осн.}}=100 \text{ м}$ и глубиной $H_{\text{осн.}}=100 \text{ м}$. Моделируемый грунтовой массив основания рассматривался из незасоленных песков, супесей, суглинков и глин. Влажность грунтов основания принималась по опубликованным результатам инженерно-геологических изысканий на территории ЯНАО, варьируемый диапазон при численном моделировании составил 20, 25, 30, 35 %. Вариационные показатели теплофизических и физических свойства грунтов основания при численном моделировании принимались согласно СП 25.13330.2020. При численном моделировании начальные температурные условия были приняты такие же, как и на натурном объекте «Строительство

автомобильной дороги г. Сургут – г. Салехард, участок г. Новый Уренгой – г. Надым: п. Пангоды (км 870) – п. Правохеттинский (км 936)». Среднемесячная температура окружающего воздуха представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Среднемесячная температура окружающего воздуха

Месяц	I	II	III	IV	V	VI
Температура воздуха, °C	–24,5	–24,0	–16,8	–8,8	–1,0	8,8
Месяц	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, °C	15,5	11,4	5,6	–5,4	–16,1	–21,9

В таблицах 3.2–3.20 представлены теплофизические и физические свойства представительных грунтов, используемых при численном моделировании для определения геометрических размеров КТМ.

Таблица 3.2

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Суглинки и глины с влажностью 25 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
λ_f , Вт/(м·°C)	λ_{th} , Вт/(м·°C)	C_f , кДж/(м ³ ·°C)	C_{th} , кДж/(м ³ ·°C)	L_V , МДж/м ³	T_{bf} , °C
1,58	1,33	2071,45	2800,00	93,74	–0,20

Таблица 3.3

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Суглинки и глины с влажностью 30 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
λ_f , Вт/(м·°C)	λ_{th} , Вт/(м·°C)	C_f , кДж/(м ³ ·°C)	C_{th} , кДж/(м ³ ·°C)	L_V , МДж/м ³	T_{bf} , °C
1,65	1,45	2219,74	3094,00	108,17	–0,20

Таблица 3.4

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Суглинки и глины с влажностью 35 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
λ_f , Вт/(м·°C)	λ_{th} , Вт/(м·°C)	C_f , кДж/(м ³ ·°C)	C_{th} , кДж/(м ³ ·°C)	L_V , МДж/м ³	T_{bf} , °C
1,76	1,57	2368,04	3388,00	121,52	–0,20

Таблица 3.5

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Суглинки и глины с влажностью 25 %					
$\rho_{df,dth} = 16,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°С)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°С)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°С)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°С)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °С
1,75	1,51	2367,38	3200,00	107,14	-0,20

Таблица 3.6

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Суглинки и глины с влажностью 30 %					
$\rho_{df,dth} = 16,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°С)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°С)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°С)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°С)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °С
1,94	1,68	2219,74	3094,00	123,62	-0,20

Таблица 3.7

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Суглинки и глины с влажностью 20 %					
$\rho_{df,dth} = 18,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°С)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°С)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°С)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°С)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °С
1,86	1,57	2472,64	3222,00	100,44	-0,20

Таблица 3.8

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 25 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°С)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°С)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°С)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°С)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °С
1,84	1,57	1931,59	2660,00	93,74	-0,15

Таблица 3.9

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 25 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°С)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°С)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°С)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°С)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °С
1,98	1,74	2079,91	2954,00	108,17	-0,15

Таблица 3.10

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 30 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
1,98	1,74	2079,91	2954,00	108,17	-0,15

Таблица 3.11

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 35 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,00	1,80	2228,23	3248,00	121,52	-0,15

Таблица 3.12

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 20 %					
$\rho_{df,dth} = 16,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
1,78	1,62	2038,03	2704,00	89,28	-0,15

Таблица 3.13

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 25 %					
$\rho_{df,dth} = 16,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,00	1,80	2207,53	3040,00	107,14	-0,15

Таблица 3.14

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Супеси с влажностью 20 %					
$\rho_{df,dth} = 18,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,05	1,86	2292,78	3042,00	100,44	-0,15

Таблица 3.15

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Пески с влажностью 20 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,09	1,57	1643,38	2226,00	78,12	-0,10

Таблица 3.16

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Пески с влажностью 25 %					
$\rho_{df,dth} = 14,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,48	1,91	1791,73	2520,00	93,74	-0,10

Таблица 3.17

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Пески с влажностью 20 %					
$\rho_{df,dth} = 16,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,50	2,15	1878,15	2544,00	89,28	-0,10

Таблица 3.18

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Пески с влажностью 20 %					
$\rho_{df,dth} = 16,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,92	2,50	2047,69	2880,00	107,14	-0,10

Таблица 3.19

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Пески с влажностью 15 %					
$\rho_{df,dth} = 18,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,75	2,26	1922,19	2484,00	78,61	-0,10

Таблица 3.20

Теплофизические и физические характеристики представительных грунтов

Пески с влажностью 20 %					
$\rho_{d_f, d_{th}} = 18,0 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
3,05	2,67	2112,92	2862,00	100,44	-0,10

Таблица 3.21

Усредненные теплофизические и физические характеристики
представительных грунтов

Влажность 25 %					
$\rho_{d_f, d_{th}} = 15,55 \text{ кН/м}^3$					
$\lambda_f,$ Вт/(м·°C)	$\lambda_{th},$ Вт/(м·°C)	$C_f,$ кДж/(м ³ ·°C)	$C_{th},$ кДж/(м ³ ·°C)	$L_V,$ МДж/м ³	$T_{bf},$ °C
2,11	1,81	1990,66	2800,01	104,16	-0,15

При моделировании граничных условий использовали температурные значения, представленные в таблице 3.1. Граничные условия на верхней площадке земполотна задавались первым родом [50, 70, 96, 52]. При анализе температурного режима в откосной части сооружения необходимо учитывать экспозиции откосов, так как ориентация откосов север – юг имеет существенное отличие по температурным данным.

Проектирование земполотна по первому принципу с ориентацией откосов с севера на юг допускает формирование мерзлого грунтового ядра в теле насыпи, этот фактор влияет на устойчивость конструкции земполотна. Таким образом, на стадии проектирования земполотна данный фактор необходимо учитывать. В диссертационной работе предлагаемое КТМ рассматривается для второго принципа проектирования, формированием мерзлого грунтового ядра в теле земполотна можно пренебречь, а северную экспозицию откоса рассмотреть, как более благоприятную откосную часть по сравнению с южной. Граничные условия для южной откосной части задаются третьим родом с учетом коэффициента теплопередачи. В таблицах 3.22–3.24

представлены граничные условия для определения геометрических размеров КТМ.

Таблица 3.22

Граничные условия на придорожной полосе

Месяц	Температура воздуха, °C	Коэффициент теплопередачи α , Вт/(м ² ·°C)
I	–24,50	0,73
II	–24,00	0,65
III	–16,80	0,62
IV	–8,80	0,64
V	–1,00	1,64
VI	15,70	10,49
VII	23,63	9,53
VIII	18,82	8,57
IX	7,46	9,77
X	–5,40	3,47
XI	–16,10	1,29
XII	–21,90	0,85

Таблица 3.23

Граничные условия на южной откосной части земполотна

Месяц	Температура воздуха, °C	Коэффициент теплопередачи α , Вт/(м ² ·°C)
I	–24,50	0,36
II	–24,00	0,32
III	–16,80	0,30
IV	–8,80	0,31
V	–1,00	0,80
VI	15,70	10,49
VII	23,63	9,53
VIII	18,82	8,57
IX	7,46	9,77
X	–5,40	1,7

Продолжение таблицы 3.23

XI	–16,10	0,63
XII	–21,90	0,42

Таблица 3.24

Граничные условия на основной площадке земполотна

Месяц	Температура воздуха, °C
I	–24,50
II	–24,00
III	–16,80
IV	–8,80
V	–1,00
VI	15,70
VII	23,63
VIII	18,82
IX	7,46
X	–5,40
XI	–16,10
XII	–21,90

Высота снежных отложений в натурных условиях принималась по многолетним наблюдениям за объектом [70]. Граничные условия при моделировании зимних условий (снежный покров) задавались третьим родом. Высота снежных отложений представлена в таблице 3.25, граничные условия для придорожной полосы представлены в таблице 3.25.

Таблица 3.25

Натурные значения высоты снежных отложений

Месяц	Высота снега, м
I	0,55
II	0,64
III	0,69
IV	0,67

Продолжение таблицы 3.25

V	0,26
VI	Снежный покров отсутствует
VII	Снежный покров отсутствует
VIII	Снежный покров отсутствует
IX	Снежный покров отсутствует
X	0,09
XI	0,27
XII	0,45

В период обследования натурного участка автомобильной дороги средняя глубина водоема вдоль откосных частей сооружения составляла до 1 м (см. главу 2). При определении рациональных геометрических размеров КТМ численным моделированием глубина водоема назначалась по результатам натурных наблюдений, водоем представлен в квазистационарном состоянии, незасоленным. Теплофизические характеристики неглубоких водоемов с конвективным перемешиванием и без конвективного перемешивания [33, 50, 70] представлены в таблице 3.26.

Таблица 3.26

Теплофизические характеристики неглубоких водоемов

Наименование свойств грунта	Ед. изм.	Без конвективного перемешивания воды в водоеме	При конвективном перемешивании воды в водоеме
λ_f	Вт/(м·°C)	2,00	2,20
λ_{th}	Вт/(м·°C)	0,50	200,00

3.3. Результаты численного моделирования по обоснованию геометрических размеров конструктивно-технологического мероприятия

Согласно исследованиям Л. Н. Хрусталева, температура в основании земполотна у кромки проезжей части (характерная точка 1) должна быть

отрицательной (см. рисунок 3.3), что обеспечивает мерзлое состояние грунтов в основании под основной площадкой сооружения. Если температура положительная, то необходимо вводить дополнительное конструктивное мероприятие по понижению температуры [103].

По результатам численного моделирования (см. рисунок 3.4) установлено, что при заложении внутреннего откоса призмы 1:1 и максимальном соотношении оснований призм $b_{\text{пр1}}/b_{\text{пр2}} = 0,22$ у глинистых грунтов с суммарной влажностью $W_{\text{tot}} = 25 \div 35\%$ формируется отрицательная температура в характерной точке 1 равная минус $0,02 \div 0,2$ °С, а при максимальном соотношении оснований призм $b_{\text{пр1}}/b_{\text{пр2}} = 0,25$ отрицательная температура в характерной точке 1 составила минус $0,03 \div 0,2$ °С для всех рассматриваемых видов грунта. В случае заложения внутреннего откоса призмы 1:2 (см. рисунок 3.5) отрицательная температура в характерной точке 1 составляет минус $0,03 \div 0,15$ °С, кроме песчаных грунтов с суммарной влажностью $W_{\text{tot}} = 20 \div 25\%$ и минимальным соотношением оснований призм $b_{\text{пр1}}/b_{\text{пр2}} = 0,166$, формируется положительная температура в контрольной точке 1 плюс $0,09 \div 0,02$ °С. В условиях заложения внутреннего откоса призмы 1:3 (см. рисунок 3.6) формируется отрицательная температура в точке 1 в пределах от минус $0,03$ до минус $0,14$ °С для всех рассматриваемых видов грунта. Однако, при этом происходит перерасход теплоизоляционного материала на 20 %, с незначительным снижением температуры по сравнению с вариантом заложения откоса призмы 1:2 для песчаных грунтов, на $\Delta T = 0,07 \div 0,12$ °С. Из результатов моделирования следует, что заложение внутреннего откоса призмы рационально принимать 1:2.

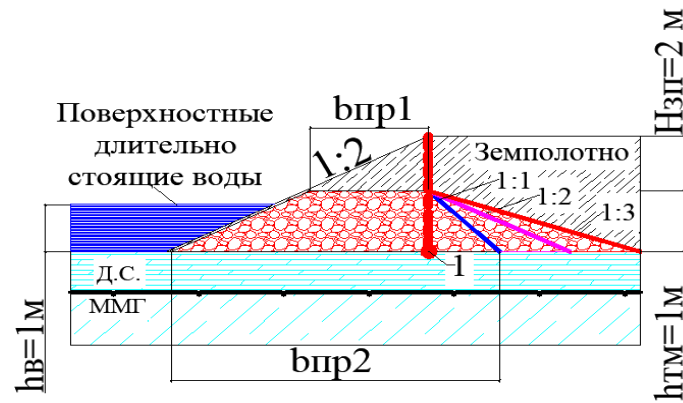


Рисунок 3.3. Расчетная схема КТМ

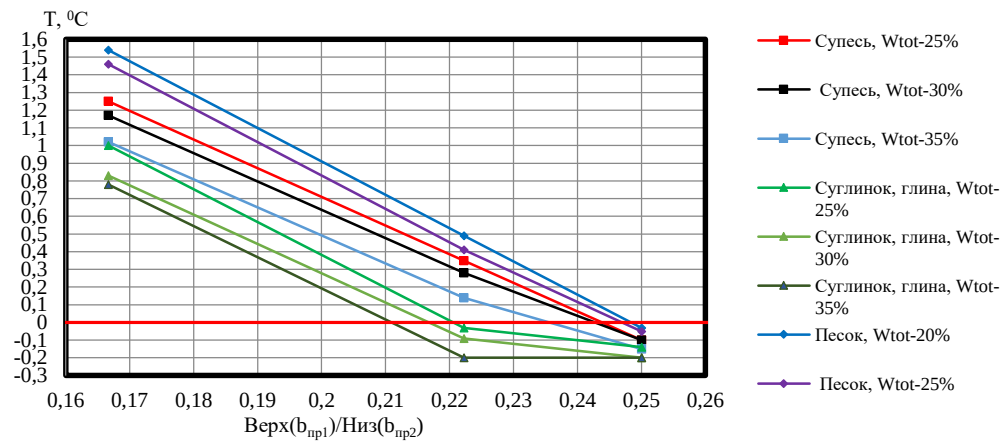


Рисунок 3.4. Заложение внутреннего откоса призмы 1:1

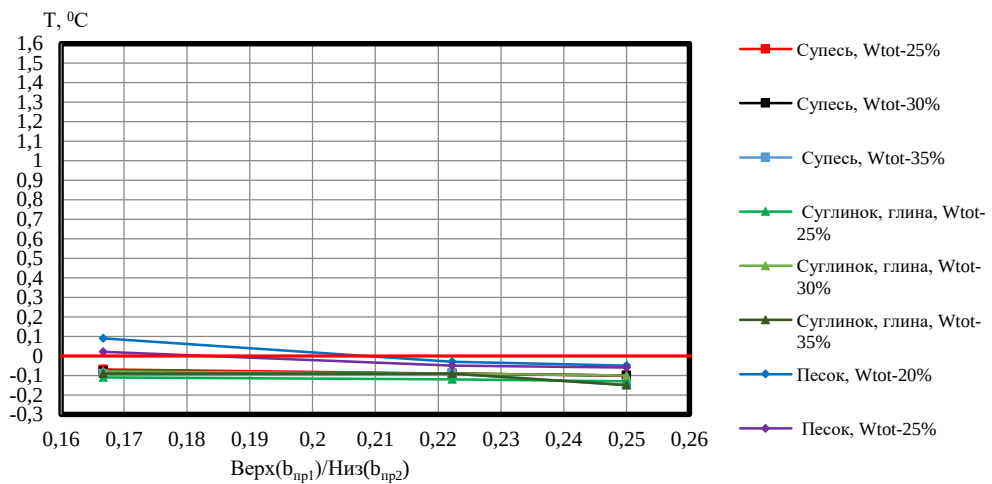


Рисунок 3.5. Заложение внутреннего откоса призмы 1:2

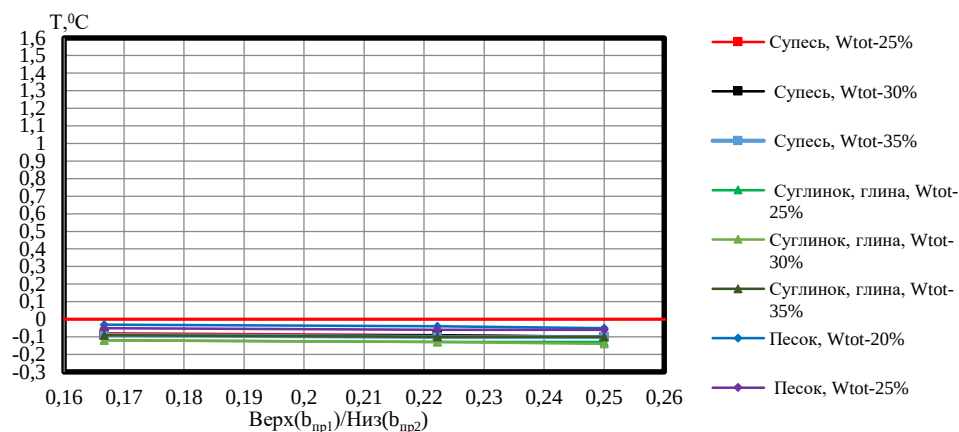


Рисунок 3.6. Заложение внутреннего откоса призмы 1:3

Для обеспечения отрицательной температуры в характерной точке 1 с глубиной талого слоя равной нулю в первый год эксплуатации достаточно использовать призму из теплоизоляционного материала высотой $h_{\text{ТМ}} = 0,9$ м (см. рисунок 3.7, 3.8). Увеличение высоты теплоизоляционного материала $h_{\text{ТМ}} = 0,6 \div 1$ м приводит к понижению температуры в характерной точке 1 в среднем на минус $0,03$ °C и уменьшению мощности талого слоя на $h_{\text{dth}(t)} = 0,4$ м в сравнении с высотой теплоизоляционного материала $h_{\text{ТМ}} = 0,5$ м. В рамках подбора рациональных параметров КТМ высоту теплоизоляционного материала для всех представительных грунтов с повышенной влажностью предложено принимать $h_{\text{ТМ}} = 0,5$ м (наиболее предпочтительный вариант).

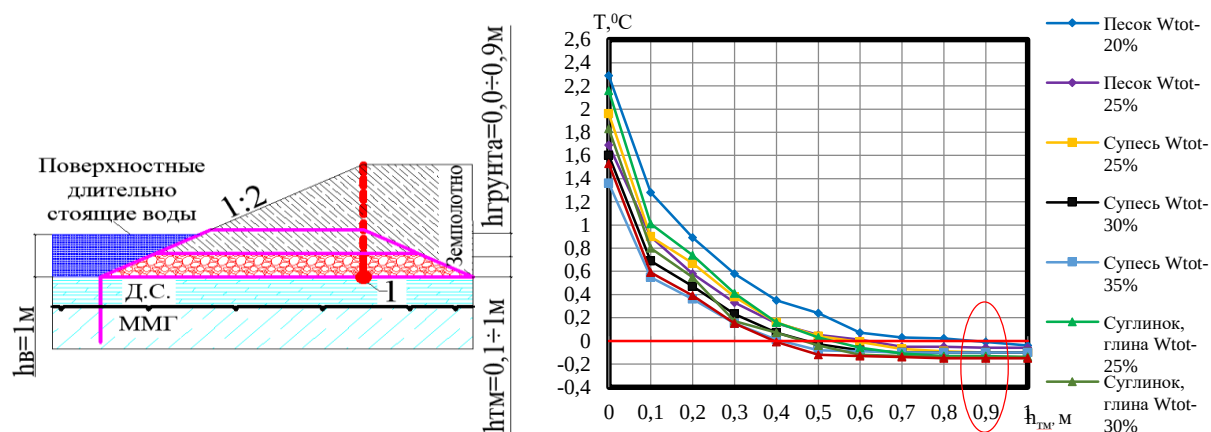


Рисунок 3.7. Изменение температуры в характерной точке в зависимости от высоты призмы

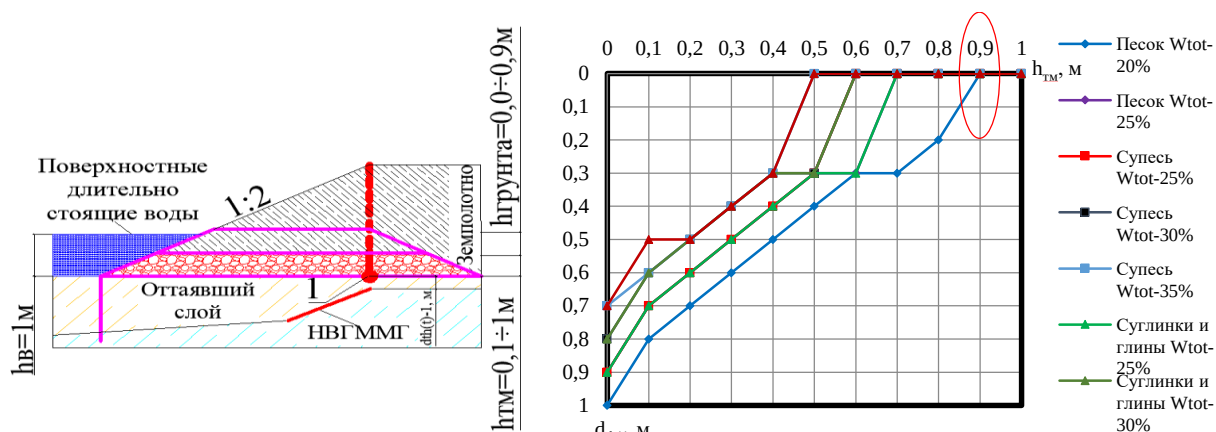


Рисунок 3.8. Изменение глубины талого слоя в характерной точке в зависимости от высоты призмы

КТМ считается эффективным при выполнении условия в сечениях основания сооружения $d_{th(t)}$ (в средней части откоса земполотна) $\rightarrow d_{th(t)}$ (под бровкой земполотна). В связи с чем была выбрана дополнительная характерная точка 2, отражающая температурный режим и мощность талого слоя грунта многолетнемерзлого основания в середине откосной части сооружения.

Для отображения общего характера формирования угла НВГММГ в основании земполотна, зависевшего от мощности оттаивания грунта в характерных точка 1, 2 (см. рисунок 3.9), было предложено последующие расчеты выполнять с усредненными теплофизическими и физическими характеристиками грунтов основания. Согласно представленным теплотехническим расчетам (см. главу 2), максимальная погрешность определения угла НВГММГ в основании земполотна при воздействии неглубоких водоемов с представительными грунтами (песок, супесь, суглинок, глина) с повышенной влажностью ($W_{tot} = 15, 20, 30, 35 \%$) составила не более 10 % в сопоставлении с усредненными теплофизическими и физическими характеристиками грунтов основания. Необходимо отметить, что усреднение теплофизических и физических характеристик грунтов основания при расчете способствует увеличению угла НВГММГ основания на $\alpha_t = 11^\circ$, что приводит к рассмотрению наихудшего варианта.

На основании численного моделирования подтверждена эффективность КТМ и выявлено, что условная стабилизация глубины талого слоя наступает с третьего года эксплуатации сооружения при толщине теплоизоляционного материала в основании призмы $h_{\text{ТМ}} = 0,1$ м и со второго года эксплуатации при мощности теплоизоляционного материала в основании призмы $h_{\text{ТМ}} = 0,5$ м без конвективного перемешивания воды в водоеме (см. рисунок 3.9), с конвективным перемешиванием воды в водоеме условная стабилизация глубины талого слоя наступает с десятого года эксплуатации при толщине теплоизоляционного материала в основании призмы $h_{\text{ТМ}} = 0,1$ м и с седьмого года эксплуатации при мощности теплоизоляционного материала в основании призмы $h_{\text{ТМ}} = 0,5$ м (см. рисунок 3.10), что напрямую указывает на период снижения угла наклона верхней границы ММГ до постоянного значения (см. рисунки 3.11–3.14).

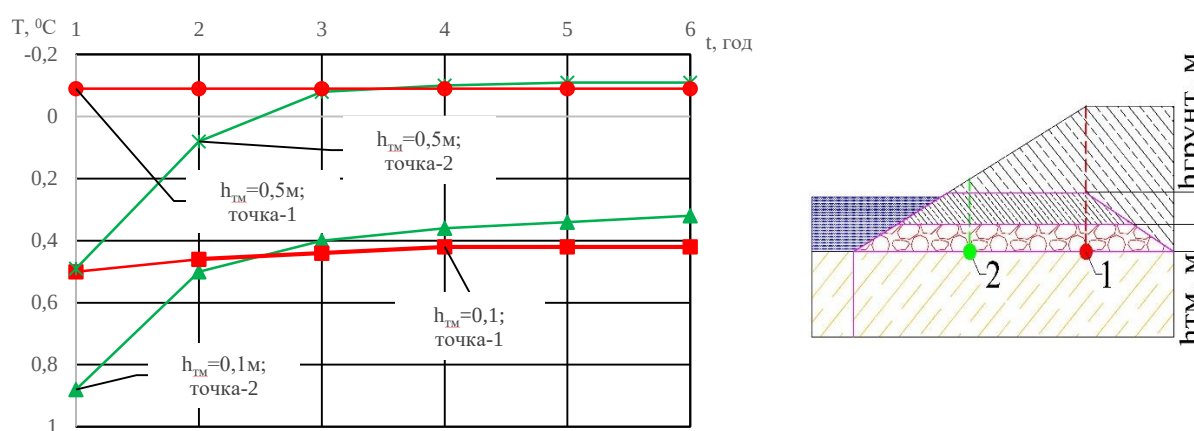


Рисунок 3.9. Изменение температуры без конвективного перемешивания воды в водоеме

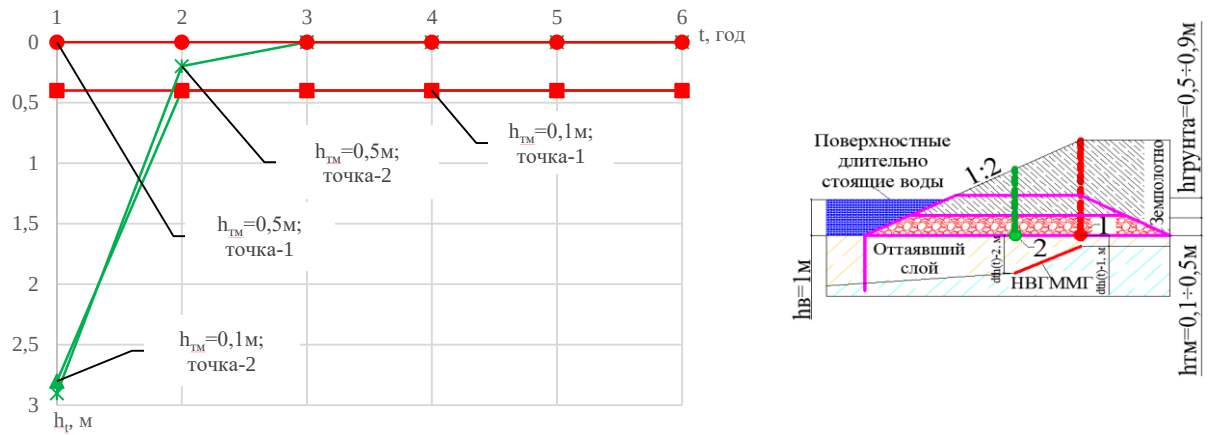


Рисунок 3.10. Изменение глубины талого слоя без конвективного перемешивания воды в водоеме

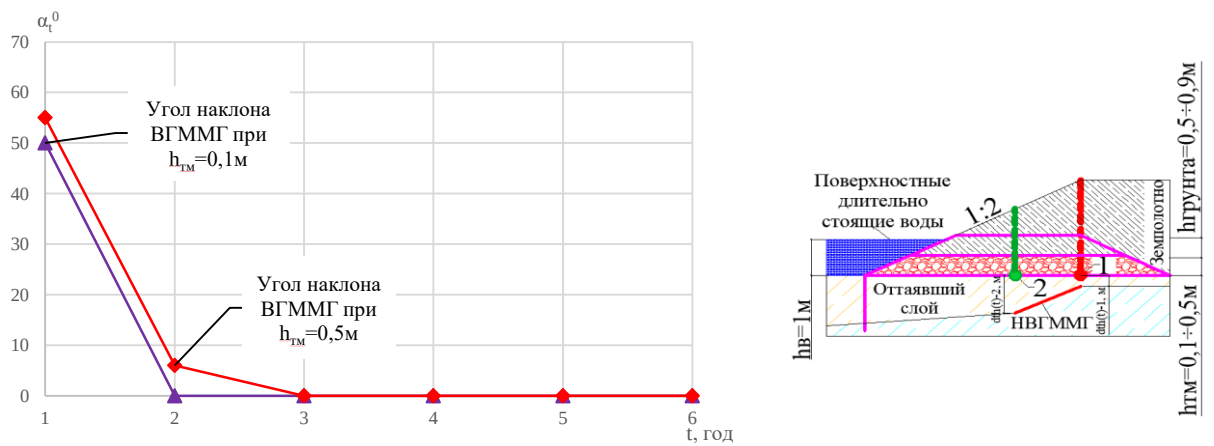


Рисунок 3.11. Изменение угла НВГММГ без конвективного перемешивания воды в водоеме

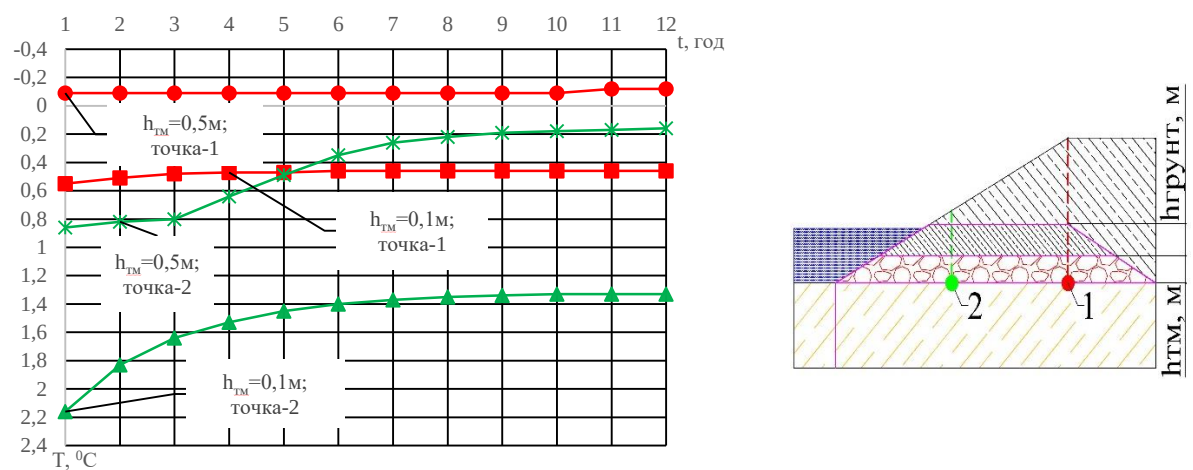
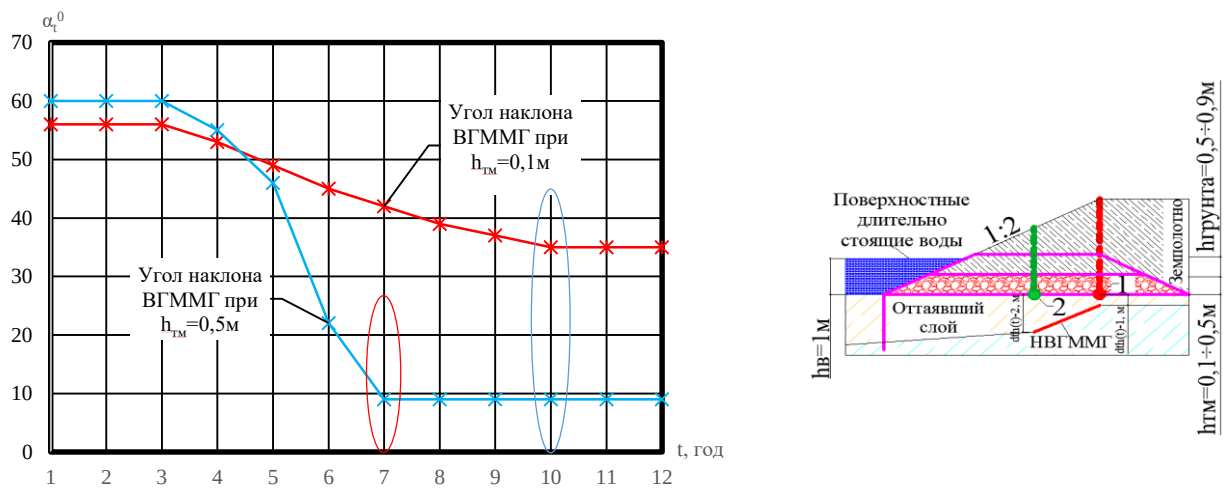
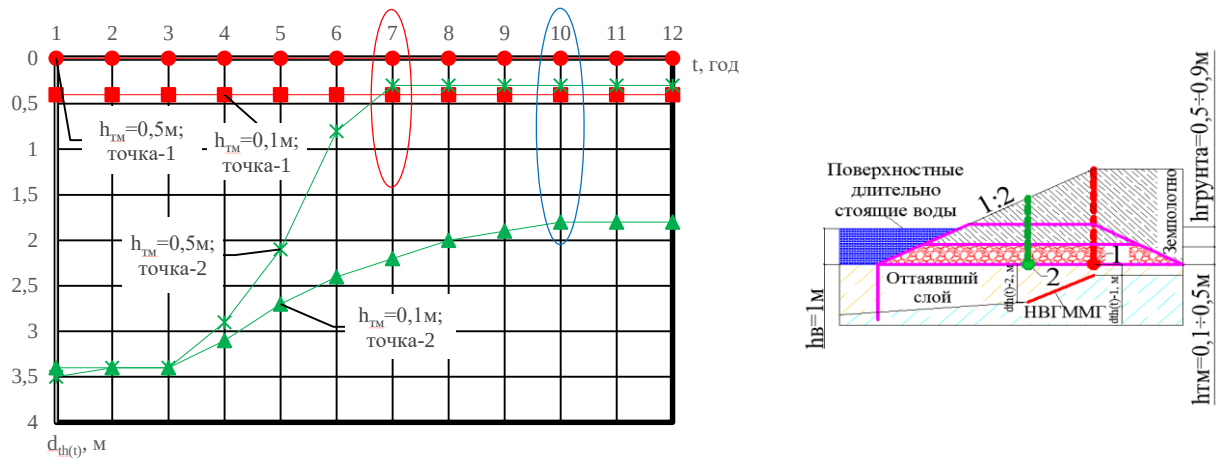


Рисунок 3.12. Изменение температуры с конвективным перемешиванием воды в водоеме



3.4. Выводы по третьей главе

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Численным моделированием подтверждена эффективность предложенного КТМ, заключающаяся в сохранении ВГММГ основания и поддержании ее на требуемой глубине на протяжении всего периода эксплуатации сооружения при воздействии неглубоких водоемов, расположенных вдоль откосной части сооружения.
2. Замена верхней части теплоизоляционного материала в призме местным грунтом позволяет снизить расход теплоизолятора на 45 %, а расположение

теплоизоляционного материала в основании обертываемой призмы позволяет снизить тепловое воздействие от неглубоких водоемов, расположенных вдоль откосной части сооружения, на ММГ основания. Расположение таким образом материалов (грунт/теплоизолятор) позволяет исключить неравномерное протаивание грунтов основания в характерных точках 1, 2.

3. На основании численного моделирования установлены оптимальные геометрические размеры КТМ (максимальное соотношение оснований призм – $\text{верх}(b_{\text{пр1}})/\text{низ}(b_{\text{пр2}})$; заложение внутреннего откоса призмы – 1:2; высота призмы с теплоизоляционным материалом – 0,5 м, общая высота призмы грунт/теплоизолятор должна быть на 0,1 м выше расчетного уровня неглубоких водоемов).

4. Разработанное КТМ на стадии нового строительства показало эффективность с первого года эксплуатации с конвективным перемешиванием и без конвективного перемешивания воды в водоеме.

5. При реализации КТМ на стадии капитального ремонта или реконструкции сооружения без конвективного перемешивания воды в водоеме период формирования квазистационарной глубины талого слоя и угла НВГММГ составляет три года, с конвективным перемешиванием воды в водоеме период формирования квазистационарной глубины наступает на седьмой год эксплуатации.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕГЛУБОКИХ ВОДОЕМОВ

Для исследования ТР и НС основания земполотна и обоснования рациональных геометрических размеров КТМ была использована методика приближенного маломасштабного моделирования эксперимента. Проведение лабораторных маломасштабных экспериментов, моделирующих работу сооружений в сложных климатических и инженерно-геологических условиях, является экономически целесообразной и доступной задачей, позволяющей исследовать и реализовать новые технические мероприятия, направленные на повышение устойчивости многолетнемерзлого основания земполотна.

На стадиях проектирования, строительства, реконструкции, капитального ремонта автомобильной дороги на многолетнемерзлом основании необходимо выполнять оценку изменения во времени устойчивости грунтов ММГ основания и прорабатывать дополнительные КТМ, направленные на повышение устойчивости многолетнемерзлого основания. Для этого необходимо разработать методику расчета изменения во времени устойчивости многолетнемерзлого основания автомобильной дороги при воздействии неглубоких водоемов с учетом влияния геометрических параметров предложенного КТМ.

4.1. Маломасштабная экспериментальная модель земполотна автомобильной дороги на основании с многолетнемерзлым грунтом

Маломасштабное экспериментальное моделирование геотехнической системы «основание-земполотно» с применением общепринятой теории подобия позволяет максимально приблизиться к натурным условиям и исследовать температурный режим и напряженное состояние объекта. Такие

исследования, по сравнению с натурными исследованиями, менее трудоемкие и экономически затратные. Их можно проводить многократно с соблюдением идентичных условий, что практически невозможно осуществить в натурных условиях. Все это позволяет качественно оценить влияние различных факторов на исследуемый объект.

Лабораторные экспериментальные исследования конструкций земляного полотна и основания автомобильной дороги с ММГ выполнялись в три серии.

- В первой серии моделировалось многолетнемерзлое основание земляного полотна автомобильной дороги в закрытой системе (без моделирования неглубоких водоемов и снежного покрова), силовое подобие от веса сооружения и транспортной нагрузки не учитывалось.
- Во второй серии моделировалось многолетнемерзлое основание земляного полотна автомобильной дороги в открытой системе (с моделированием неглубоких водоемов и снежного покрова) с учетом силового подобия от веса сооружения и транспортной нагрузки.
- В третьей серии моделировалось многолетнемерзлое основание земляного полотна автомобильной дороги в открытой системе (с моделированием неглубоких водоемов и снежного покрова) с учетом силового подобия от веса сооружения и транспортной нагрузки с предложенным КТМ. В таблице 4.1 приведены геометрические параметры натурального объекта и лабораторной модели.

Таблица 4.1

Геометрические параметры натурального объекта и лабораторной модели.

Наименование показателя	Натурный размер, м (М 1:1)	Модельный размер, м (М 1:30)
Ширина земляного полотна	12	0,4
Ширина основания земляного полотна	19,8	0,66
Заложение откосов	1:1,5	1:1,5
Ширина проезжей части	7	0,23
Ширина обочины	2,5	0,08
Высота насыпи	2	0,066

При моделировании многолетнемерзлого основания земполотна автомобильной дороги использовали однородный водоносный суглинок нарушенной структуры. Для основания модели земполотна использовали суглинок с влажностью 28–30 %, такая влажность обусловлена тем, что грунт в основании должен находиться в водонасыщенном состоянии. Для возведения земполотна автомобильной дороги использовали суглинок с влажностью 14,55 %. Физико-механические характеристики грунта определялись в соответствии с [40]. В таблице 4.2, 4.3 приведены физико-механические и теплофизические характеристики грунта основания и земполотна.

Таблица 4.2

Физико-механические и теплофизические характеристики грунта (основание)

Наименование		Значение
Удельный вес грунта, кН/м ³		18,6
Естественная влажность, %		29,5
Пластичность	Предел текучести, %	30,4
	Предел раскатывания, %	17,6
	Число пластичности, %	13,2
Показатель текучести, д.ед.		0,9
Средняя плотность сухого грунта, кН/м ³		15,6
Плотность частиц грунта, кН/м ³		26,9
Коэффициент пористости, д.ед.		0,79
Коэффициент водонасыщения, д.ед.		0,95
Угол внутреннего трения, град.		13
Удельное сцепление, МПа		0,021
Модуль деформации основания (деятельного слоя), МПа		4,3
Теплопроводность грунта в мерзлом состоянии λ_f , Вт/(м·°C)		1,65
Теплопроводность грунта в талом состоянии λ_{th} , Вт/(м·°C)		1,45
Объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии C_f , кДж/(м ³ ·°C)		2805,60
Объемная теплоемкость грунта в талом состоянии C_{th} , кДж/(м ³ ·°C)		3332,70
Теплота таяния (замерзания) грунта L_v , МДж/м ³		116,510
Температура начала замерзания грунта T_{bf} , °C		–0,20

**Физико-механические и теплофизические характеристики грунта
(земполотно)**

Наименование	Значение
Удельный вес грунта, кН/м^3	18,6
Естественная влажность, %	14,55
Максимальная плотность грунта, кН/м^3	17,1
Коэффициент пористости, д.ед.	0,65
Угол внутреннего трения, град.	15
Удельное сцепление, МПа	0,025
Модуль деформации земполотна, МПа	15
Теплопроводность грунта в мерзлом состоянии λ_f , $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	1,07
Теплопроводность грунта в талом состоянии λ_{th} , $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	0,95
Объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии C_f , $\text{кДж/(м}^3\cdot^\circ\text{C)}$	1879,85
Объемная теплоемкость грунта в талом состоянии C_{th} , $\text{кДж/(м}^3\cdot^\circ\text{C)}$	2319,30
Теплота таяния (замерзания) грунта L_v , МДж/м^3	62,0
Температура начала замерзания грунта T_{bf} , $^\circ\text{C}$	-0,20

4.2. Приборы и оборудование для проведения маломасштабных экспериментальных исследований

Для замораживания грунта модели основания и земполотна автомобильной дороги использовалась автоматическая морозильная камера сплит-система POLAIR, обеспечивающая необходимый ТР (см. рисунок 4.1).

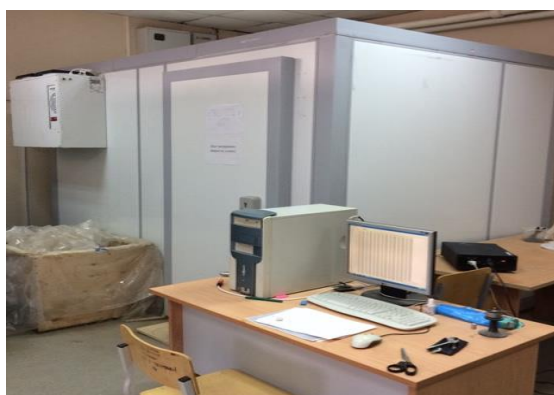


Рисунок 4.1. Холодильная сплит-система POLAIR

Технические характеристики морозильной камеры сплит-системы POLAIR приведены в таблице 4.4

Технические характеристики сплит-системы POLAIR

Условие работы при температуре окружающего воздуха, °С	от 10 до 40
Относительная влажность воздуха, %	от 80 до 40
Температура во внутреннем объеме, °С	от –18 до +10
Габаритные размеры, мм	415 × 420 × 300
Рекомендуемая доза заправки хладагента (R404A), г	560
Точность поддержания, °С	±0,2

Для измерения температуры использовался измеритель теплопроводности многоканальный ИТ-2-48 (см. рисунок 4.2) с термоэлектрическими хромель-копелевыми преобразователями (термопара) типа L. Данный прибор имеет паспорт и проходит тарировку на заводе-изготовителе. Измеритель температуры многоканальный ИТ-2-48 предназначен для измерения температуры (°С) по 16 каналам при помощи подключаемых к прибору термопар (см. рисунок 4.3) с последующей передачей данных на ЭВМ. Сбор показаний с термопар ведется в автоматическом режиме. Запись показаний происходит каждые 60 секунд. Результаты измерения выводятся на экран компьютера в виде таблицы.



Рисунок 4.2. Измеритель теплопроводности многоканальный ИТ-2-48



Рисунок 4.3. Термоэлектрические хромель-копелевые преобразователи (термопара) типа L

Технические характеристики измерителя теплопроводности многоканального ИТ-2-48 и термопарами типа L приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5

**Технические характеристики измерителя теплопроводности
многоканального ИТ-2-48 и термопар типа L**

Количество измерительных каналов (в зависимости от исполнения прибора)	16, 32, 48, 64, 80, 96
Вид индикации	на экране компьютера
Диапазон измерения напряжения с выходов датчиков, мВ	–99,999...+99,999
Связь с ЭВМ	RS-232
Питание	~ 220 В; 50 Гц
Вид климатического исполнения по ГОСТ 15150-69	УХЛ4.1
Температура окружающего воздуха, °С	20±5
Ток потребления, не более, мА	50
Степень защиты от проникновения твердых предметов и воды по ГОСТ 14254-96	IP20

Для высушивания образцов грунта использовали сушильный шкаф производства НПП «Теплоприбор» (см. рисунок 4.4). Согласно ГОСТ 5180-2015, высушивание осуществлялось при температуре +105 °С [40].



Рисунок 4.4. Сушильный шкаф ШС-0,25-20

Технические характеристики сушильного шкафа ШС-0,25-20 приведены в таблице 4.6

Таблица 4.6

Технические характеристики сушильного шкафа ШС-0,25-20

Рабочее пространство, мм	250 × 245 × 320
Габаритные размеры	490 × 410 × 500
Температура во внутреннем объеме, °С	от +50 до +250
Мощность, кВт	1,5

Определение механических характеристик талых грунтов осуществлялось прибором одноплоскостного среза автоматизированной серии стандарт ГТ 1.2.11 и прибором компрессионного сжатия автоматизированной серии стандарт ГТ 1.1.9 (см. рисунок 4.5).

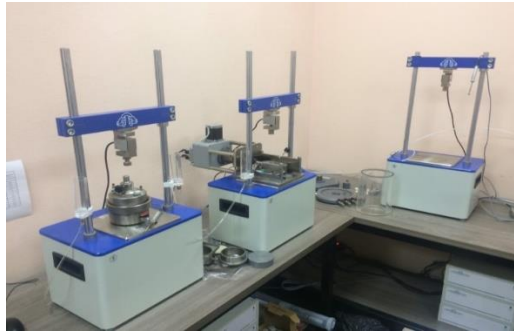


Рисунок 4.5. Приборы для определения механических свойств талых грунтов

Морозильная камера (см. рисунок 4.6) предназначена для проведения испытаний мерзлых грунтов с поддержанием заданной программой испытаний температуры воздуха.



Рисунок 4.6. Приборы для определения механических свойств многолетнемерзлых грунтов

Измерение общих напряжений осуществлялось тензометрическими мессдозами мембранного типа. Изготовление мессдоз выполнялось по методике, предложенной А. В. Голли [35]. Корпуса мессдоз были изготовлены из титанового сплава; диаметром 35 мм и толщиной мембраны 0,2 мм (см. рисунок 4.7). Точность измерения при данной толщине мембраны составляет 0,001 МПа.



Рисунок 4.7. Грунтовая мессдоза (слева) и стенд для тарирования мессдоз (справа)

Гидравлический бутылочный домкрат MATRIX MASTER 50756 (см. рисунок 4.8) использовался для загрузки конструкции земполотна и формирования напряженного состояния от земполотна, сопоставимого с натурными значениями. Основные рабочие элементы гидравлического домкрата – корпус, плунжер (поршень), рабочая жидкость (гидравлическое масло). Корпус является одновременно направляющим цилиндром для поршня и резервуаром для рабочей жидкости. Технические характеристики гидравлического бутылочного домкрата приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7

Технические характеристики гидравлического домкрата MATRIX MASTER 50756

Наименование	Значение
Высота подхвата, мм	246
Высота подъема, мм	413
Материал корпуса	сталь
Грузоподъемность, т	5
Ход выдвижного винта, мм	48
Рабочий ход, мм	149



Рисунок 4.8. Гидравлический домкрат

Электронный динамометр «Дин-1» предназначен для контроля работы и регистрации нагрузок силового оборудования (см. рисунок 4.9). Основным достоинством электронного динамометра «Дин-1» является высокая точность измерения нагрузок. Технические характеристики электронного динамометра приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8

Технические характеристики электронного динамометра «Дин-1»

Название	Значение
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения силы, %	$\pm 0,24$; $\pm 0,45$
Габаритные размеры электронного блока, мм	150x70x25
Потребление, Вт, не более	1,0
Пределы измерений, кН	
Верхние пределы шкалы	1,0...2000
Нижние пределы шкалы	0,1...200



Рисунок 4.9. Электронный динамометр «Дин-1»

Лабораторные весы Госметр ВЛТЭ-210/510С – двухдиапазонные весы с наибольшим пределом взвешивания – 210–510 г, дискретностью – 0,001–0,01 г и II высоким классом точности (см. рисунок 4.10).



Рисунок 4.10. Лабораторные весы Госметр ВЛТЭ-210/510С

Для фиксации перемещений использовались индикаторы часового типа 6-ПАО с точностью измерения 0,01 мм (см. рисунок 4.11). Измеритель перемещений представляет собой индикатор часового типа, конструкция которого дополнительно оснащена барабаном для увеличения свободного хода. Соединение датчика перемещений и штампа производилось при помощи стальной струны диаметром 0,3 мм. Струна с одной стороны жестко крепилась к грунтовым маркам (см. рисунок 4.12) и погружалась в грунт, с другой стороны наматывалась несколькими витками на барабан датчика с закреплением на конце нити отвеса. Индикаторы устанавливались на неподвижной реперной системе.



Рисунок 4.11. Индикатор часового типа 6-ПАО

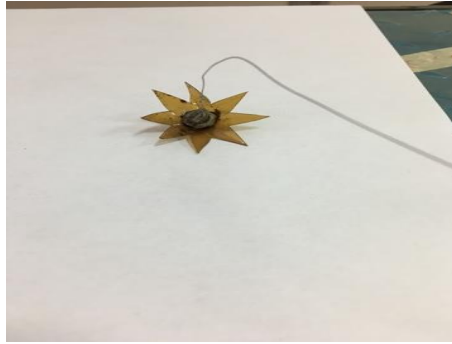


Рисунок 4.12. Грунтовая марка

Все используемые при испытаниях измерительные приборы имели государственную поверку.

4.3. Планирование эксперимента

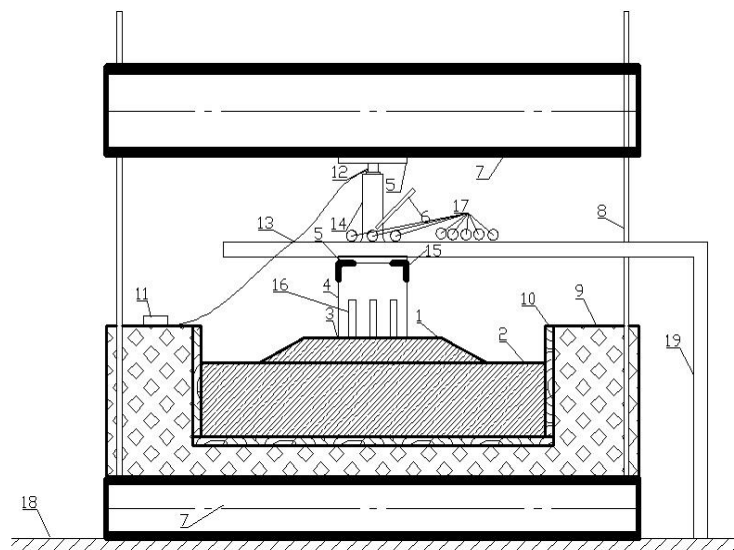
Для исследования ТР и НС модели многолетнемерзлого основания земполотна автомобильной дороги на базе центральной научно-исследовательской лаборатории «Строительство на вечной мерзлоте» Тюменского индустриального университета (ТИУ) была проведена серия лабораторных экспериментальных исследований в закрытой системе (без воздействия неглубоких водоемов, снежного покрова и транспортной нагрузки) и в открытой системе (с воздействием неглубоких водоемов, имитацией снежного покрова и транспортной нагрузки).

Лабораторные исследования проводились в одинаковых условиях, что дает равнозначное значение влияния случайных факторов на всю серию экспериментов и позволяет сделать качественную оценку полученных данных. В каждой серии проводилось не менее шести экспериментов. Лабораторные лотковые исследования позволяют многократно повторять эксперимент с соблюдением одинаковых условий, что практически невозможно сделать на натурных объектах.

Основной плюс маломасштабных исследований заключается в том, что они проводятся быстрее, чем натурные, позволяют исследовать и реализовать

новые технические мероприятия и являются экономически доступными. Проведение маломасштабных экспериментальных исследований возможно только с использованием геометрического моделирования – сходство геометрических фигур с выдерживанием геометрического, механического и силового подобия с реальным объектом.

Для проведения лабораторных исследований был разработан деревянный лоток (см. рисунок 4.13) с геометрическими размерами $1200 \times 1000 \times 450$ мм. Для избегания промерзания боковых стенок и дна испытательной установки выполнялось оклеивание поверхности установки утеплителем пенополистиролом ППС-10. На стенки испытательной установки наносился солидол для снижения сил трения. После этого на боковые стенки и дно испытательного лотка укладывали полиэтиленовую пленку в два слоя, что позволяло сохранить влажность водонасыщенного грунта. Схема испытательного лотка представлена на рисунке 4.13.



1 – земполотно автомобильной дороги; 2 – многолетнемерзлое основание автомобильной дороги; 3 – органическое стекло; 4 – деревянный брусок; 5 – металлическая пластина; 6 – рукоятка домкрата; 7 – металлическая балка; 8 – анкерные металлические тяги; 9 – утеплитель ППС-10; 10 – деревянный каркас; 11 – динамометр «Дин-1»; 12 – датчик измерения силы; 13 – кабель; 14 – домкрат; 15 – металлические уголки; 16 – отверстия для конвекции холодного воздуха; 17 – датчики перемещения 6-ПАО; 18 – пол морозильной камеры; 19 – независимая реперная система

Рисунок 4.13. Схема экспериментального лотка для исследования температурного режима и напряженного состояния модели многолетнемерзлого основания земполотна автомобильной дороги при воздействии неглубоких водоемов

До загрузки грунта в экспериментальный лоток определялась начальная влажность как средняя по трем отобраннным образцам. Влажность грунта определялась как отношение массы влаги, содержащейся в грунте, к массе сухого грунта по формуле 4.1:

$$W = \frac{m_{\text{влаж.грунта}}}{m_{\text{сух.грунта}}} \cdot 100 \%, \quad (4.1)$$

где W – влажность грунта, %; $m_{\text{влаж.грунта}}$ – масса влажного грунта, г;
 $m_{\text{сух.грунта}}$ – масса сухого грунта, г.

Образцы грунта взвешивались на лабораторных весах с точностью до 0,05 г, после чего высушивались в сушильном шкафу (см. рисунок 4.14) при температуре 105 °С до постоянной массы и снова взвешивались.



Рисунок 4.14. Высушивание грунта в сушильном шкафу до воздушно-сухого состояния

Далее грунт предварительно перемешивался в специально подготовленной таре (см. рисунок 4.15) с добавлением воды до образования однородной массы с $w = 28-30 \%$.



Рисунок 4.15. Подготовка грунта для экспериментальных исследований

Исходя из результатов численного моделирования и данных литературных источников известно, глубина нулевых колебаний температур в грунте в масштабе 1:1 составляет 10 метров. В таком случае высота исследуемого основания в масштабе 1:30 составляет 330 мм.

Грунтовое основание в лотке возводили (см. рисунок 4.16) с послойным уплотнением ($h = 50$ мм) и с консолидацией каждого слоя. Такой подход позволил провести эксперименты в одном диапазоне грунтовых условий.

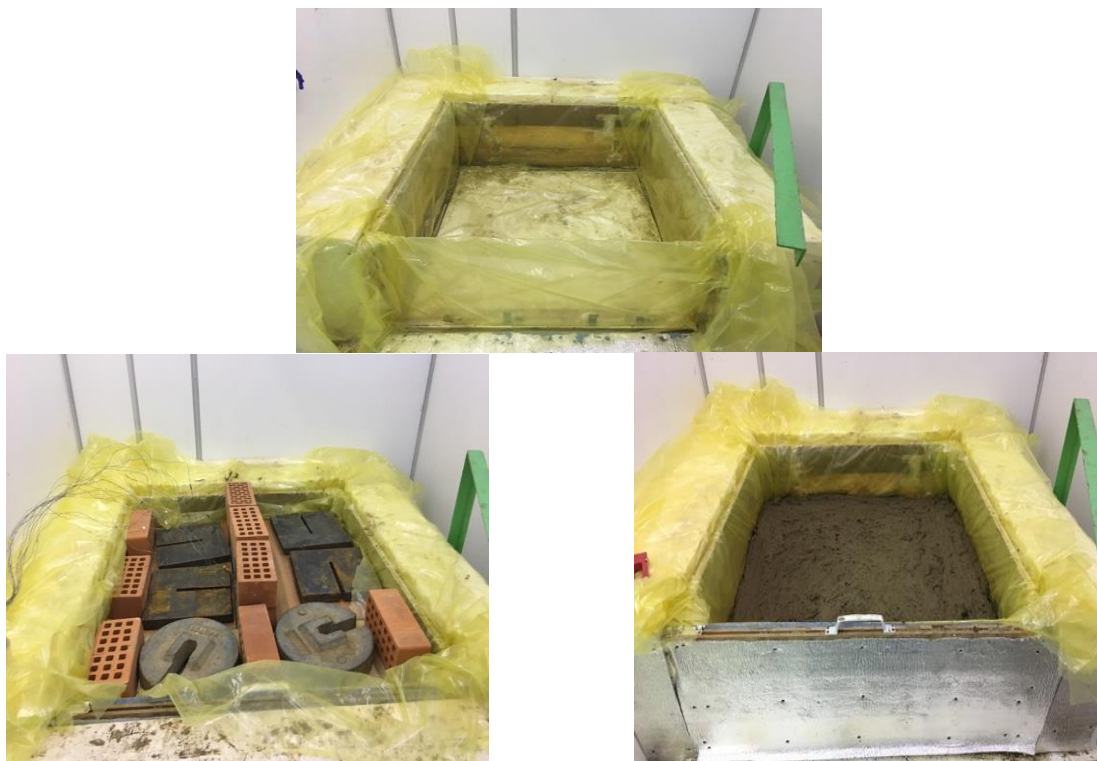


Рисунок 4.16. Послойное возведение модели многолетнемерзлого основания земполотна автомобильной дороги

После загрузки лотка моделировали ММГ путем промораживания грунтового основания до температуры минус 0,2 °С. Далее в морозильной камере предварительно выполнялась температурная стабилизация основания путем циклического замораживания и оттаивания. Температурная стабилизация нужна для формирования деятельного слоя основания.

Перед возведением земполотна автомобильной дороги в лабораторных условиях была определена максимальная плотность сухого грунта и соответствующая ей влажность (см. рисунок 4.17).



Рисунок 4.17. Определение максимальной плотности и оптимальной влажности грунта

Результаты лабораторного исследования по определению максимальной плотности и оптимальной влажности представлены на рисунке 4.18.

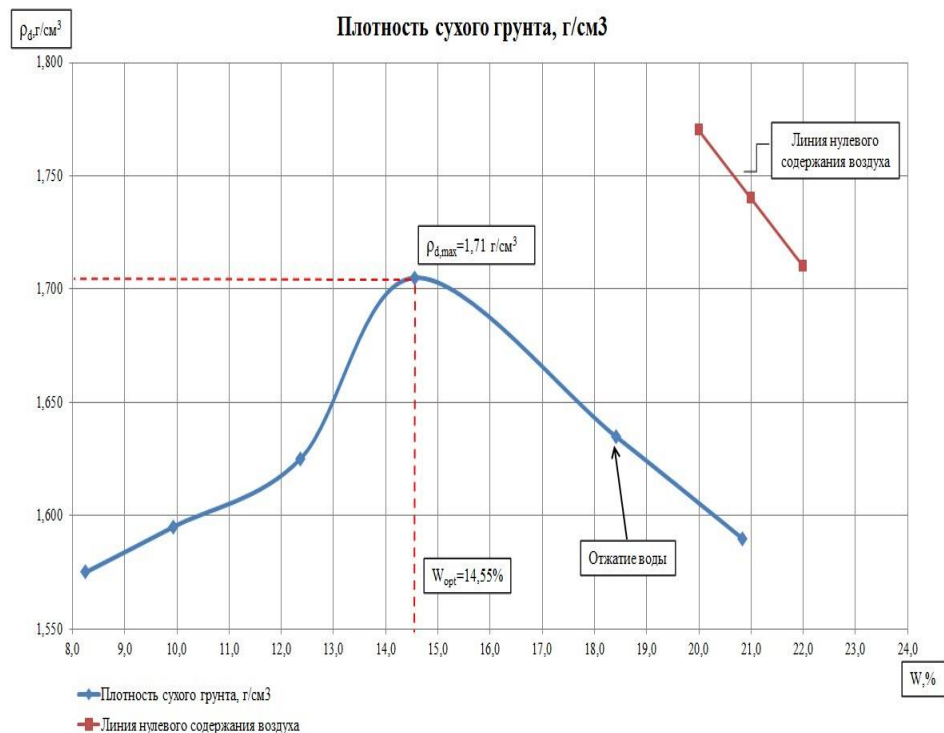


Рисунок 4.18. График испытания грунта методом стандартного уплотнения

На предварительно стабилизированном многолетнемерзлом основании мощностью $h = 330$ мм возводили земполотно из охлажденного грунта. Грунт для возведения земполотна выдерживался в морозильной камере в течение 24 часов при температуре 0°C , что обеспечивало условия возведения земполотна близкие к натурным. Земполотно автомобильной дороги моделировалось по второму принципу проектирования. Второй принцип проектирования предусматривает частичное оттаивание грунтов многолетнемерзлого основания с учетом возникающих при этом допустимых деформаций.

Модель земполотна возводилась с послойным уплотнением. Высота моделируемой насыпи автомобильной дороги составляла $h = 66$ мм (в масштабе $1:1$ $h = 2,0$ м). После возведения насыпи земполотна выполнялось профилирование откосной части сооружения. Заложение откоса принималось равным $1:1,5$.

Экспериментальная часть в лабораторных условиях делилась на три серии. В первой серии экспериментов были проведены исследования ТР и НС модели многолетнемерзлого основания земполотна автомобильной дороги без

моделирования неглубоких водоемов и снежного покрова, кроме того, не учитывалось силовое подобие от веса сооружения и транспортной нагрузки. Также не моделировалась фильтрационная прослойка (см. главу 2) на границе «основание-земполотно» автомобильной дороги.

Во второй серии экспериментальных исследований моделировалось полное подобие натурального объекта – открытая система с моделированием неглубоких водоемов и снежного покрова. Учитывалось геометрическое, физическое и силовое подобие, а также воздействие подвижной нагрузки. Во второй серии моделировалась фильтрационная прослойка в виде торфяного слоя, устраиваемого на всю ширину подошвы земполотна на границе «основание-земполотно» мощностью $h = 3,3$ мм. Фильтрационная прослойка представлена на рисунке 4.19.



Рисунок 4.19. Устройство фильтрационной прослойки на границе «основание-земполотно»

Для имитации сложных климатических условий, приближенных к объекту «Строительство автомобильной дороги г. Сургут – г. Салехард, участок г. Новый Уренгой – г. Надым. 1 пусковой комплекс: п. Пангоды (км 870) – п. Правохеттинский (км 936)» испытательный лоток помещался в морозильную камеру. Температурные условия $T_{f,m} = -14,8$ °С и $T_{th,m} = +10,0$ °С были приняты как средние значения (см. главу 2, таблица 2.1) по многолетним наблюдениям положительных и отрицательных температур натурального

объекта. Продолжительность теплого и холодного периода была принята по методике В. Д. Карлова [61]. При проведении эксперимента в лабораторных условиях был принят геометрический масштаб исследуемого объекта в лотке 1:30 (масштаб выбирался исходя из параметров морозильной камеры), масштаб времени – 1:900, т. к. последний должен быть равен квадрату масштаба линейных размеров. Согласно [26], расчетный период отрицательных температур при масштабе 1:1 равен 5032,80 ч, расчетный период положительных температур при масштабе 1:1 – 3727,20 ч. В результате величина холодного периода для эксперимента в лабораторных условиях составила 5,59 ч, величина теплого периода – 4,14 ч.

Для соблюдения натурных условий моделировался снежный покров. При подборе материала, который должен выполнять роль теплоизолятора, основным критерием являются его теплоизоляционные свойства. Выбранный материал в качестве снежного покрова необходимо распределять на всю поверхность придорожной полосы и на откосную часть модели земполотна автомобильной дороги согласно моделируемой толщине снежного покрова.

Наиболее подходящим материалом для моделирования снежного покрова является органическое стекло. Оргстекло необходимо вырезать по размерам откосной части земляного полотна и придорожной полосы автомобильной дороги. Согласно результатам натурных наблюдений в открытых источниках (метеостанция г. Надым), среднегодовое количество твердых осадков в районе ЯНАО составляет от 0,3÷0,62 м. Моделируемая высота снежного покрова из оргстекла на откосах земполотна автомобильной дороги составляет $h = 9$ мм (в масштабе 1:1 это значение соответствует $h = 0,62$ м высоты снежного покрова). Высота снежного покрова (моделируемая оргстеклом) на придорожной полосе составляет $h = 11$ мм (в масштабе 1:1 это значение составляет $h = 0,62$ м высоты снежного покрова и $h = 0,60$ м глубины промерзших неглубоких водоемов). Так как устойчивый снежный покров на территории ЯНАО образуется довольно рано, моделирование снежного покрова из органического стекла прикладывали на

откосную часть и придорожную полосу при достижении температуры $T_{f,m} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в морозильной установке.

Весенний период моделировался с подтоком воды с диапазоном температуры воды от $+2$ до $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ [70]. При моделирования водного режима рассматривали уровень половодья ближайшей реки, расположенной близко к натурному объекту. Пик в р. Надым наблюдается сразу после весеннего половодья и приходится на июнь и июль, далее идет понижение русла реки и наступает так называемая межень бассейна реки. Расчетный период пика воды для р. Надым составил в масштабе 1:1 – 2791,2 ч, в результате длительность воды для экспериментального исследования составила 3,10 ч.

Проточную воду, залитую в емкость, заранее заносили в холодильную камеру для понижения температуры. Воду наливали на придорожную полосу до отметки 3,33 см после 1,04 ч с момента начала теплого периода и поддерживали данный уровень в течение 3,1 ч, после этого часть воды (2,0 см) выкачивали с помощью медицинского шприца. Конвективное перемешивание воды в водоеме от ветрового воздействия моделировали с помощью электрического вентилятора.

Для приближения к условиям натурального объекта необходимо оценить НС модели многолетнемерзлого основания земполотна на НВГММГ. В работе В. Д. Карлова [61] представлена методика моделирования НС на маломасштабных моделях.

Для оценки НС важно учитывать расчетную транспортную нагрузку, передаваемую на многолетнемерзлое основание земполотна. Схема нагружения модели многолетнемерзлого основания земполотна принята согласно ГОСТ 52748-2007 [38]. При расчете конструкции автомобильной дороги в качестве временной подвижной нагрузки принимают нормативную нагрузку АК. Нагрузка от транспортных средств приводится к эквивалентному слою грунта земполотна.

Толщину эквивалентного слоя грунта $h_{\text{э}}$, м, вычисляют по формуле 4.2:

$$h_3 = \frac{4 \cdot 18K}{(D+0,2)(c+0,8)\gamma_{гр}} = 2,38 \text{ м}, \quad (4.2)$$

где 18K – нормативная нагрузка АК для расчета осадки насыпи – 10 кН; $B_{зп}$ – ширина земполотна – 12 м; n – число полос движения – 2; D – база нормативной нагрузки АК – 2,5 м; $\gamma_{гр}$ – удельный вес грунта – 18,9 кН/м³.

Масса нагружения составит:

$$F_{\text{нагружение М 1:1}} = 539,19 \frac{\text{кН}}{\text{п.м.}}, \quad (4.3)$$

$$F_{\text{нагружение М 1:1}} = \frac{539,19}{12} = 44,93 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}. \quad (4.4)$$

Для выдерживания силового подобия величина прикладываемой транспортной нагрузки на экспериментальную модель «основание-земполотно» в масштабе 1:30 составила:

$$F_{\text{нагружение М 1:30}} = 1,33 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}. \quad (4.5)$$

Загружение экспериментальной модели производилось при помощи гидравлического домкрата. Усилие, передаваемое от домкрата, фиксировалось при помощи электронного динамометра «Дин-1». При загрузении домкрат устанавливалось в центре модели земполотна. Реактивное усилие от домкрата воспринималось стальной балкой, закрепленной металлическими стержнями $d = 12$ мм к швеллеру под основанием экспериментального лотка. Для равномерного распределения нагрузки по поверхности модели земполотна устанавливался деревянный брус с отверстиями 30×80 мм. Отверстия выполнялись для обеспечения конвекции воздуха. Для усиления конвективного теплообмена между деревянным брусом и поверхностью моделируемого земполотна устанавливали органическое стекло с отверстиями $d = 20$ мм и шагом 50 мм.

На протяжении всего времени эксперимента опрос термодатчиков осуществлялся с частотой 60 секунд. Данные температуры сохранялись в текстовый файл с указанием времени опроса датчиков.

Вертикальные перемещения основания и земполотна автомобильной дороги регистрировались каждые полчаса датчиками часового типа (6-ПАО) с точностью измерения 0,01 мм, установленными поперечно оси автомобильной дороги.

Также после каждого цикла промораживания – оттаивания велась фотофиксация состояния объекта.

Влажность грунта основания и земполотна определялась по формуле 4.1 методом режущего кольца после каждого цикла промораживания – оттаивания.

Схема установки грунтовых марок и датчиков измерения температуры (термопар) для первого и второго этапов лабораторного моделирования представлена на рисунке 4.20.

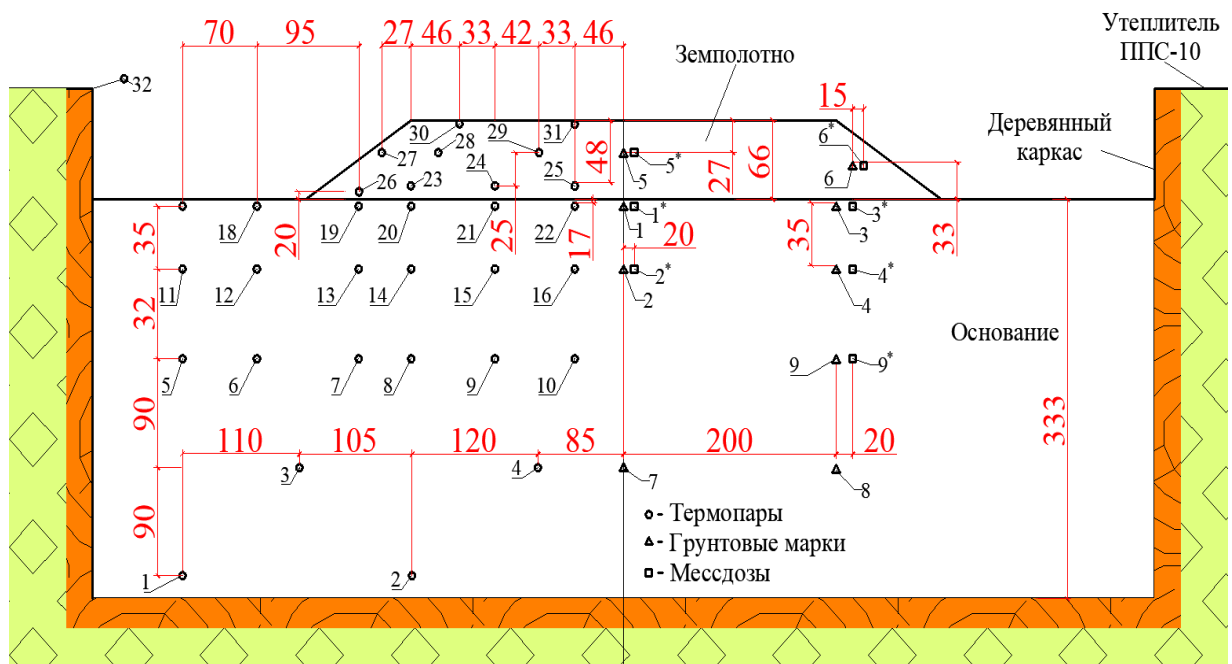


Рисунок 4.20. Схема расстановки датчиков измерения первой и второй серии экспериментальных исследований

Последовательность возведения модели земполотна для первой и второй серии экспериментальных исследований показана на рисунках 4.21 – 4.24.



Рисунок 4.21. Отсыпка грунта



Рисунок 4.22. Уплотнение



Рисунок 4.23. Профилировка откоса



Рисунок 4.24. Общий вид модели земполотна

Общий вид модели первой и второй серии экспериментальных исследований представлен на рисунке 4.25 – 4.27.



Рисунок 4.25. Общий вид испытательного лотка первой серии экспериментальных исследований



Рисунок 4.26. Общий вид лотка второй серии экспериментальных исследований с моделированием снежного покрова



Рисунок 4.27. Общий вид лотка второй серии экспериментальных исследований с моделированием подтока воды

В третьей серии экспериментальных исследований моделировалось предложенное КТМ в идентичных условиях, что и для второй серии эксперимента.

Способ повышения устойчивости многолетнемерзлого основания автомобильной дороги при воздействии неглубоких водоемов заключается в совокупности двух мероприятий: первое мероприятие направлено на ограничение попадания влаги в грунт основания и земполотна, а второе – на ограничение теплового воздействия воды с откосной части земполотна. Для исключения попадания влаги в многолетнемерзлое основание (см. рисунок 4.29) и земполотно разрабатывается в основании продольная траншея шириной не менее 60 см в масштабе 1:1 и 2 см на исследуемой маломасштабной модели, глубиной ниже деятельного слоя – слоя сезонного промерзания – оттаивания. Водонепроницаемый материал «Теплонит 600» раскатывают в поперечном направлении автомобильной дороги с запасом длины материала по обеим сторонам земполотна, достаточной для смыкания верхних ветвей полуобоймы. Затем в траншею вертикально размещают водонепроницаемый материал (см. рисунок 4.30). После размещения водонепроницаемого материала производят обратную засыпку траншеи выработанным грунтом с последующим послойным уплотнением. Так как откосная часть у земполотна является наиболее уязвимой, в ней располагают

трапецевидную призму выше уровня водоема (см. рисунок 4.31) из водонепроницаемого материала, наполненную гранулированным теплоизолятором «ДиатомИК». Гранулированный теплоизолятор применяется для сохранения ВГММГ и ограничения теплового воздействия воды. После устройства трапецевидной призмы свободные края водонепроницаемого материала (см. рисунок 4.31) заводят на поверхность с максимальным натяжением и минимальной шириной нахлеста 30 см для натурального объекта и 1 см для исследуемой модели. Далее выполняют послойную отсыпку и уплотнение земполотна (см. рисунок 4.32).

Физические и теплофизические характеристики гранулированного теплоизоляционного материала «ДиатомИК» приведены в таблице 4.9. Характеристики гидроизоляционного полотна «Теплонит 600» приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.9

Физические и теплофизические характеристики гранулированного теплоизоляционного материала «ДиатомИК»

Наименование	Значение
Размер гранул, мм	2–5
Насыпная плотность, кг/м ³	450
Водопоглощение по объему, %	2–4
Теплопроводность в мерзлом состоянии λ_f , Вт/(м·°C)	0,1
Теплопроводность в талом состоянии λ_{th} , Вт/(м·°C)	0,15
Объемная теплоемкость в мерзлом состоянии C_f , кДж/(м ³ ·°C)	576
Объемная теплоемкость в талом состоянии C_{th} , кДж/(м ³ ·°C)	576
Температура начала замерзания T_{bf} , °C	0
Модуль деформации, МПа	2,8

Показатели гидроизоляционного полотна «Теплонит 600»

Наименование	Значение
Поверхностная плотность, г/см ²	600±60
Разрывная нагрузка по длине, кгс на 5 см, кН/м, не менее	70 (13,8)
Разрывная нагрузка по ширине, кгс на 5 см, кН/м, не менее	60 (11,8)
Относительное удлинение при разрыве по длине, %, не более	110
Относительное удлинение при разрыве по ширине, %, не более	110
Толщина полотна при давлении 2 кПа, мм	2,7 ± 0,3
Водоупорность, мм вод. ст., кПа, не менее	4500 (44,2)
Водопроницаемость без давления	Водонепроницаем

Схема установки грунтовых марок и датчиков измерения температуры (термопар) для третьей серии представлена на рисунке 4.28.

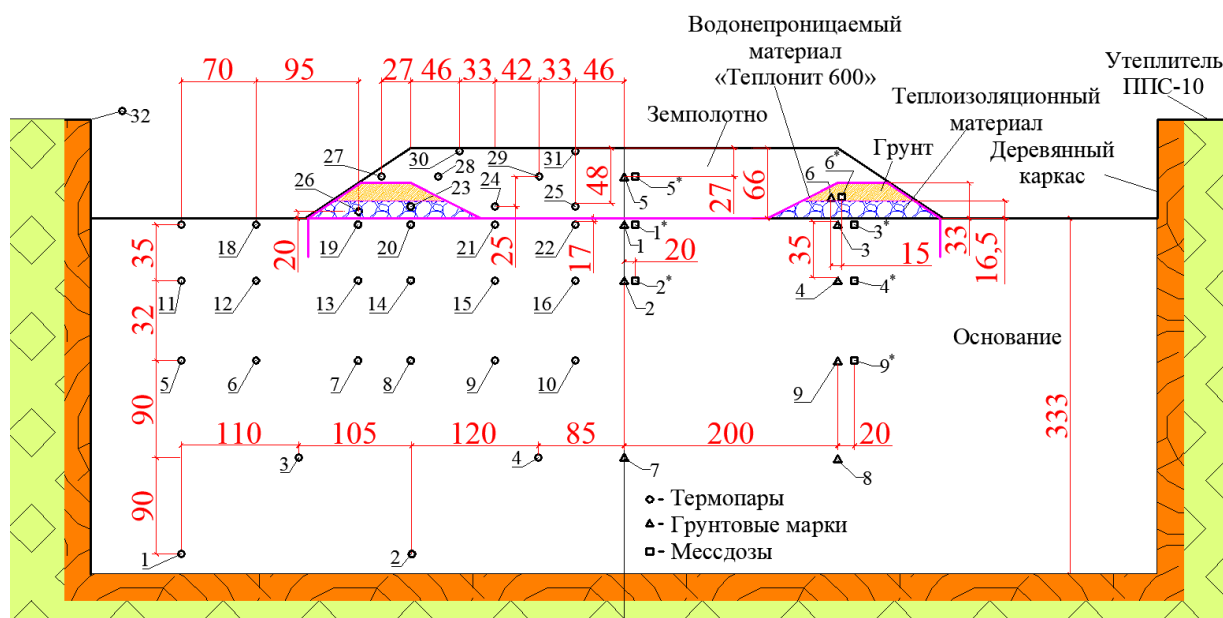


Рисунок 4.28. Схема расстановки датчиков измерения третьей серии экспериментальных исследований

На рисунках 4.29–4.34 представлен технологический процесс размещения в нижней части водонепроницаемой геомембраны и

теплоизоляционного материала, а также устройство модели земполотна на многолетнемерзлых грунтах.



Рисунок 4.29. Разработка траншей для размещения водонепроницаемой геомембраны в нижней части земполотна



Рисунок 4.30. Устройство водонепроницаемой геомембраны в нижней части земполотна



Рисунок 4.31. Устройство в нижней части земполотна теплоизоляционного материала в водонепроницаемой геомембране



Рисунок 4.32. Монтаж опалубочной конструкции и послойное устройство земполотна



Рисунок 4.33. Общий вид экспериментального стенда моделируемого земполотна и основания автомобильной дороги на ММГ в период оттаивания



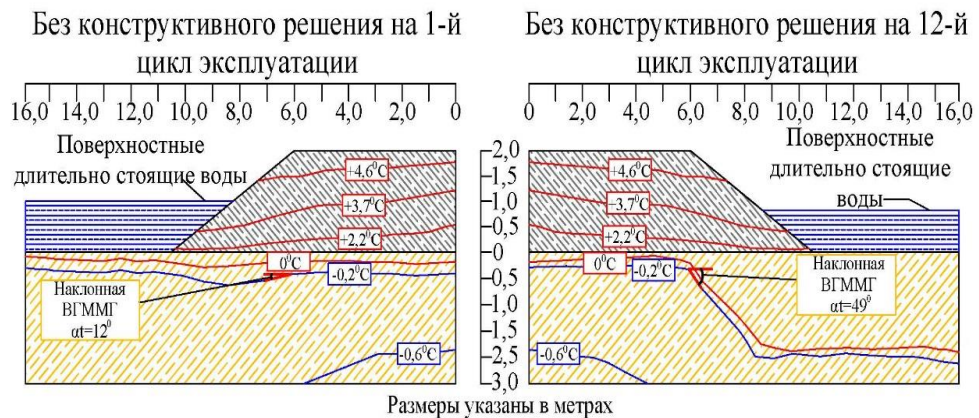
Рисунок 4.34. Общий вид экспериментального стенда моделируемого земполотна и основания автомобильной дороги на ММГ в период промерзания

4.4. Результаты экспериментального исследования в лабораторных условиях многолетнемерзлого основания автомобильной дороги при воздействии неглубоких водоемов

Результаты первой серии экспериментальных исследований рассматривались с целью верификации полученных данных как обобщенное понятие для проведения дальнейших исследований в открытой системе с выдерживанием силового подобия.

Результаты второго и третьего этапа моделирования основания автомобильной дороги с ММГ в открытой системе без КТМ и с ним, представлены на рисунках 4.35–4.37.

а)



б)

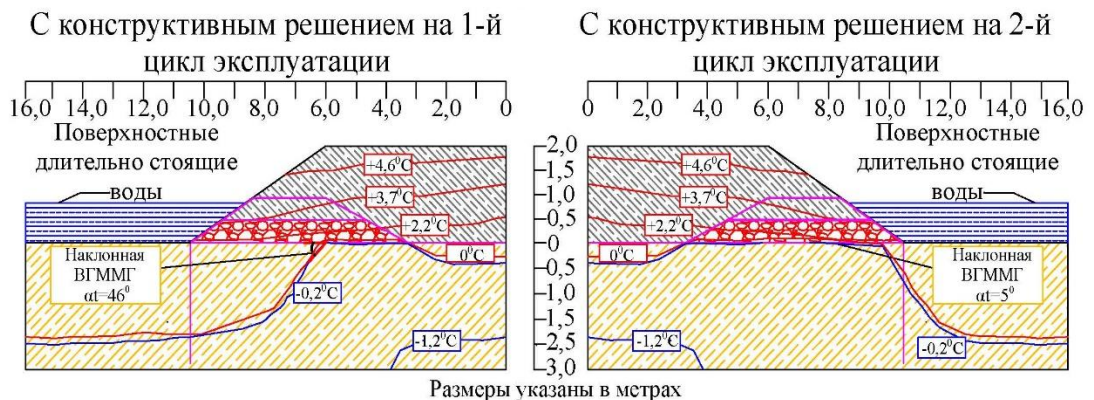


Рисунок 4.35. Результаты экспериментальных исследований ТР многолетнемерзлых грунтов основания земполотна при воздействии неглубоких водоемов: а) без КТМ; б) с КТМ



Рисунок 4.36. Сохранение верхней границы ММГ в откосной части сооружения при воздействии неглубоких водоемов с КТМ



Рисунок 4.37. Талый слой основания под основной площадкой земполотна при воздействии неглубоких водоемов с КТМ

Линейные размеры исследуемой модели представлены в натуральную величину с учетом масштабного фактора. Экспериментально установлено, что в период максимального оттаивания на 12-й цикл эксплуатации в основании сооружения без КТМ (см. рисунок 4.35 а) формируется НВГММГ под углом $\alpha_{t=12 \text{ цикл}} = 49^{\circ}$. Предложенное КТМ способствует со второго цикла (см. рисунок 4.35 б) эксплуатации уменьшению угла НВГММГ на $\Delta\alpha_{t=2 \text{ года}} = 44^{\circ}$ за счет изменения ТР и поднятия ВГММГ под бровкой и откосной (см. рисунок 4.36) частью сооружения (характерные точки – 1, 2).

Также необходимо отметить, что в основании земполотна под основной площадкой на 12-й цикл эксплуатации (см. рисунок 4.37) с применением КТМ зафиксирована «талая чаща». Среднее значение глубины талого слоя по оси сооружения составило $h = 0,45 \text{ м}$ в масштабе 1:1.

4.5. Разработка методики расчета изменения во времени устойчивости основания автомобильной дороги с многолетнемерзлыми грунтами при воздействии неглубоких водоемов

В диссертационной работе изложена методика определения угла НВГММГ и изменения во времени коэффициента устойчивости многолетнемерзлого основания автомобильной дороги при воздействии неглубоких водоемов.

В основу разработанной методики легли научные труды А. Н. Богомолова [19]. Аналитическое решение определения коэффициента устойчивости K_{st} базируется на анализе НС в точке грунтового массива на НВГПС при помощи решения соответствующих задач линейной теории упругости и упругопластических задач. Далее в работе НВГПС будет называться НВГММГ. Коэффициент устойчивости на НВГММГ определятся по формуле:

$$K_{st} = \frac{[0,5(\sigma_z - \sigma_x)\cos 2\alpha + 0,5(\sigma_x - \sigma_z) + \tau_{xz}\sin 2\alpha + \sigma_{CB}]\operatorname{tg}\varphi}{0,5(\sigma_x - \sigma_z)\sin 2\alpha + \tau_{xz}\cos 2\alpha}, \quad (4.1)$$

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

Полученное решение согласуется с общепринятым подходом к определению величины коэффициента устойчивости K_{st} с учетом того, что его численное значение определяется как отношение суммы удерживающих сил к сумме сдвигающих сил, действующих вдоль НВГММГ.

В работах А. Н. Богомолова, О. А. Богомоловой, А. В. Даркова, К. В. Королева, А. М. Караулова, И. З. Лобанова, Д. Е. Польшина, Р. Е. Подвального, Сон Ен-Вуна представлены аналитические решения определения напряженного состояния в основании земполотна [83, 19, 44, 63, 64, 68, 84, 95].

В методике [83] угол (α) НВГПС определяется путем решения квадратного уравнения. В диссертационной работе угол (α_i) НВГММГ связан с изменением ВГММГ в период эксплуатации земполотна под воздействием тепловых источников (фильтрация воды на границе «основание-земполотно»

и неглубокие водоемы). В настоящее время отсутствует аналитическая методика расчета, позволяющая оценить геометрическое положение границы многолетнемерзлых грунтов в основании автомобильной дороги с учетом воздействия неглубоких водоемов с перспективой расчета от момента ввода автомобильной дороги в эксплуатацию до первого капитального ремонта. Такие задачи решаются с помощью современных программных комплексов, способных производить теплотехнический расчет.

В методику определения угла (α_t) НВГММГ положен аппроксимационный результат численных решений. Получены закономерности для изменения во времени угла (α_t) НВГММГ, учитывающие глубину водоема и глубину оттаивающего слоя в виде линейных функций, коэффициенты которых зависят от глубины водоема, геометрических параметров КТМ и типа грунта (см. главу 2).

Угол (α_t) НВГММГ определяется по полученной формуле регрессии без КТМ ($h_{\text{TM}} = 0$):

$$\alpha_t = a + b \cdot h_{\text{в}} + c \cdot t + d \cdot h_{\text{TM}}, \quad (4.2)$$

где a, b, c, d – коэффициенты регрессии, град./м; t – период эксплуатации земполотна, 1÷12 год; $h_{\text{в}}$ – глубина водоема, 0,5 ÷ 1 м; h_{TM} – высота теплоизоляционного материала, 0,1÷0,5 м.

В таблице 4.11 представлены коэффициенты регрессии, полученные на основании численного моделирования с учетом климатических и инженерно-гидрометеорологических условий по метеостанции г. Надым для представительных грунтов (песок, супесь, суглинок, глина) с разной влажностью (20, 25, 30, 35 %) и плотностью грунта (14; 16; 18 кН/м³) при фиксированном коэффициенте фильтрации $K_{\text{ф}}$ воды через прослойку торфа на границе «основание-земполотно» равном 0,005 м³/ч. Изменение высоты земполотна и заложение откоса не вошли в статистическую обработку данных, так как данные параметры статистически не значимы и их изменение способствует увеличению угла (α_t) НВГММГ на 5° (см. главу 2). Но при расчете устойчивости многолетнемерзлого основания земполотна полученное значение ($\alpha_t = 5^\circ$) допускается учитывать, как дополнительное слагаемое.

Таблица 4.11

Коэффициенты регрессии без КТМ с конвективным перемешиванием воды в водоеме

a	b	c	d
Песок – 20 %			
–3,82	21,91	2,49	1
Песок – 25%			
9,89	5,12	2,89	1
Супесь – 25 %			
0,98	17,3	2,71	1
Супесь – 30 %			
7,37	8,76	2,9	1
Супесь – 35 %			
10,16	4,82	2,97	1
Суглинок, глина – 25 %			
5,31	9,72	2,5	1
Суглинок, глина – 30 %			
5,47	8,99	2,64	1
Суглинок, глина – 35 %			
9,42	4,41	2,75	1
Усредненные теплофизические характеристики грунтов			
4,03	10,31	3,69	1

На основании полученных коэффициентов регрессии установлено, что прирост значения угла (α_t) НВГММГ в зависимости от глубины водоема, типа и влажности грунта составляет $\alpha_t = 2,49\text{--}2,97^0$ в год.

Так как максимальное значение угла (α_t) НВГММГ достигается при глубине водоема $h_b = 1$ м, то при получении формулы регрессии с учетом влияния геометрических параметров КТМ глубина водоема принимается за постоянное значение $h_b = 1$ м.

$$\alpha_t = \bar{a} + c \cdot t + d * h_{\text{ТМ}}, \quad (4.3)$$

где $\bar{a}$, c , d – коэффициенты регрессии, градус/м; t – период эксплуатации земполотна, $1 \div n$ год (при конвективном перемешивании воды в водоеме для песков 20–25 %; супесей 25–35 %; суглинков, глин $n = 1 \div 5$ лет. Для усредненных теплофизических характеристик грунтов $n = 1 \div 7$ лет. Без конвективного перемешивания воды в водоеме при усредненных теплофизических характеристиках грунтов $n = 1 \div 2$ года); $h_{\text{тм}}$ – высота теплоизоляционного материала, $0,1 \div 0,5$ м.

В таблице 4.12 представлены коэффициенты регрессии с учетом геометрических размеров КТМ.

Таблица 4.12

Коэффициенты регрессии с КТМ с конвективным перемешиванием воды в водоеме ($h_{\text{в}} = 1$ м)

$\bar{a}$	c	d
Песок 20 %		
68,05	–16,49	–12,99
Песок 25 %		
68,59	–14,57	–13,03
Супесь – 25 %		
70,37	–39,34	–11,69
Супесь – 30 %		
68,72	–21,44	–12,16
Супесь – 35 %		
71,22	–22,52	–12,89
Суглинок, глина – 25 %		
57,19	–22,89	–10,31
Суглинок, глина – 30 %		
67,43	–20,35	–12,81
Суглинок, глина – 35 %		
70,90	–25,06	–13,05
Усредненные теплофизические характеристики грунтов		
74,57	–4,27	–29,75

Усредненные теплофизические характеристики грунтов без конвективного перемешивания воды в водоеме		
96,6	6	–46,2

На рисунке 4.38 представлен алгоритм методики расчета изменения во времени коэффициента устойчивости основания автомобильной дороги с многолетнемерзлыми грунтами при воздействии неглубоких водоемов с учетом влияния геометрических параметров КТМ.

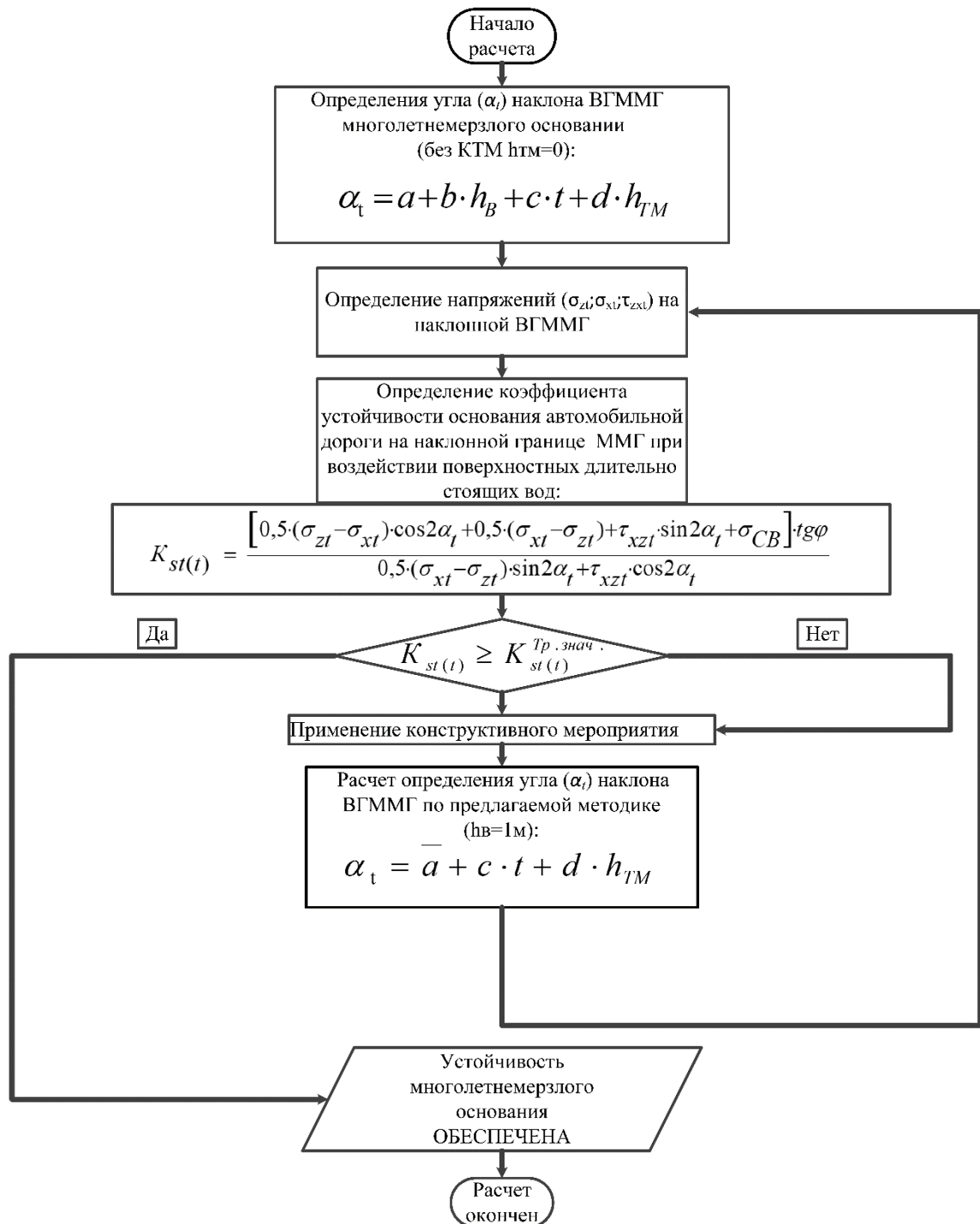


Рисунок 4.38. Блок-схема определения $K_{st(t)}$ грунтового основания с ММГ при воздействии неглубоких водоемов на НВГММГ основания

На рисунках 4.39, 4.40 представлено сопоставление предложенной методики с аналитическим расчетом и численным моделированием.

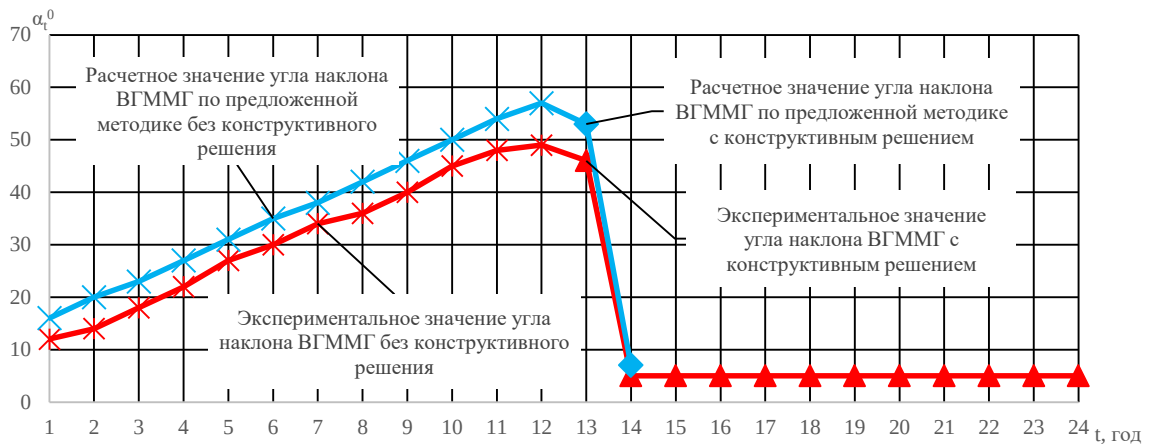


Рисунок 4.39. Сопоставление результатов изменения угла НВГММГ в основании земполотна

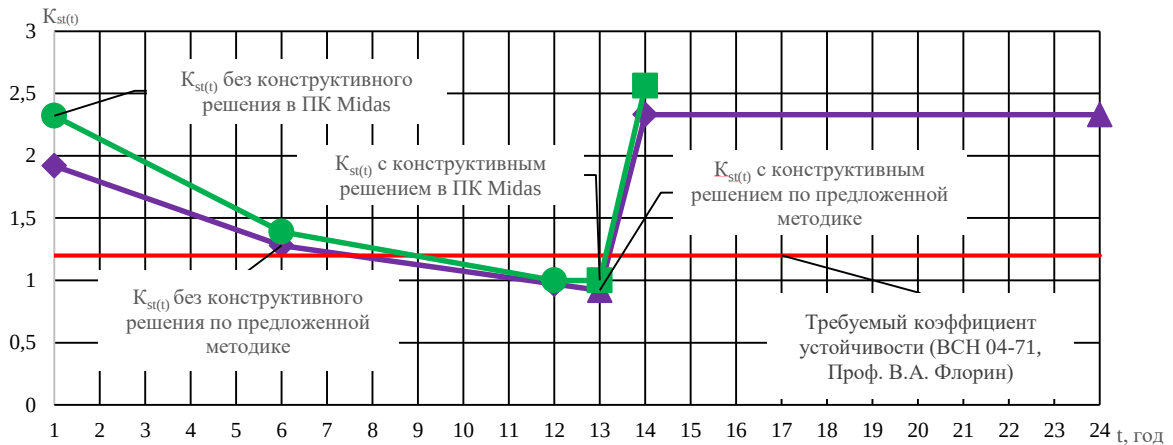


Рисунок 4.40. Сопоставление результатов изменения $K_{st(t)}$ основания земполотна

4.6. Выводы по четвертой главе

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

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

2. Реализация предложенного КТМ способствует смещению наклонной верхней границы ММГ из-под откосной части основания к подошве сооружения, но в то же время под основной площадкой сооружения земполотна наблюдается сезонное оттаивание грунтов основания на $d_{th} = 0,45$ м в масштабе 1:1.

3. Экспериментально обоснованы основные геометрические параметры предлагаемого КТМ.

4. Экспериментально установлено, что в период максимального оттаивания (12 цикл) в основании откосной части сооружения без КТМ формируется НВГММГ под углом $\alpha_{(t=12 \text{ цикл})} = 49^0$. Предложенное КТМ (без конвективного перемешивания воды в водоеме) со второго цикла после внедрения способствует уменьшению угла НВГММГ на $\Delta\alpha_{(t=2 \text{ года})} = 44^0$ за счет изменения ТР, влияющего на глубину оттаивания (в характерных точках 1, 2) и формирования НВГММГ основания.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

2. Получены закономерности для изменения во времени угла наклонной ВГММГ, учитывающие глубину водоема и глубину оттаивающего слоя в виде линейных функций, коэффициенты которых зависят от высоты неглубоких водоемов, геометрических параметров ЗП и типа грунта. Проведены натурные экспериментальные исследования на участке АД с неглубоким водоемом вдоль южной откосной части сооружения с учетом известного КТМ. По результатам экспериментальных исследований установлено, что при воздействии неглубокого водоема в основании формируется НВГММГ под углом $\alpha_t=560$, что обеспечивает среднее значение $K_{st(t)}$ основания в точках грунтового массива, равного 0,87. При нормативном $K_{st(t)}=1,2$ полученный по результатам мониторинга $K_{st(t)}$ не обеспечивает устойчивость основания, что указывает на необходимость проработки дополнительных мероприятий по обеспечению устойчивости многолетнемерзлого основания.

3. Разработано КТМ, направленное на ограждение влияния теплового потока от фильтрации воды на границе «основание-земполотно» и снижение теплового потока от неглубоких водоемов через откосную часть сооружения. Отличием КТМ от известных мероприятий является частичная замена грунта на теплоизоляционный материал в основании обертываемой призмы, расположенной в нижней части ЗП и изменение во времени угла НВГММГ влияющего на устойчивость основания. Внедренное КТМ способствует со второго года

эксплуатации уменьшению угла наклона ВГММГ на $\alpha_t=2$ года= 44° за счет поднятия кровли ММГ в характерных точка (под бровкой и в середине откоса сооружения) и смещению наклонной ВГММГ к подошве ЗП. Техническую новизну КТМ подтверждает полученный патент на изобретение №2732774.

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

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Black, P.F. Permafrost: A. Review. / P.F. Black. – Direct text. // Geological Society of America Bulletin. – 1954. – № 9. – P. 839-856.
2. Brown, J. 1997. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions, Circum-Pacific Map Series / J. Brown., O.J. Ferrians, J.A.Heginbottom, E.S.Melnikov. – URL: <https://nsidc.org/data/ggd318/versions/2> / (date of the application 22.02.2025).
3. Kokkonen P., Beobachtungen über die Struktur des Bodenfrostes / P.Kokkonen. –Helsinki, 1926. – 54 p.
4. Liu, J. Numerical studies for the thermal regime of a roadbed with insulation on permafrost / J. Liu, Y. Tian // Cold Regions Science and Technology. – 2002. – №35. – P. 1-13.
5. Mollard, J.D. Airphoto interpretation applied to highway engineering in Western Canada / J.D. Mollard, H.E. Dishsaw // Roads and Engineering Construction. – 1958. – № 11. – P. 76-94.
6. Thompson, S.F., Construction in Permafrost / S.F. Thompson // Western Construction. – 1953. – №10. – P. 58-65.
7. Taber, S. The Mechanics of Frost Heaving / S. Taber // The Journal of Geology. – 1930. – №4. – P. 303-317.
8. Wintermeyer, A.M. Percentage of Water Freezable in Soil / A.M.Wintermeyer. // Public Roads: A Journal of Highway Research. – 1925. – № 12. – P. 5-9.
9. Zhang, Yu. Reinforcement effects of ground treatment with dynamic compaction replacement in cold and saline soil regions / Y. Zhang, J. Liu, J. Fang, A. Xu // Sciences in Cold and Arid Regions. – 2013. – №4. – P. 440.
10. Андрианов, П. И. I. Коэффициенты расширения грунтов при замерзании. II. Температуры замерзания грунтов: учебник / П. И. Андрианов – М.: Изд-во Академии наук, 1936 – 55 с.
11. Ашпиз, Е. С. Мониторинг земляного полотна при эксплуатации железных дорог. – М.: Путь-пресс, 2002. – 112 с.

12. Ашпиз, Е. С., Хрусталева Л.Н. Использование синтетических теплоизоляторов для сохранения условий в основании железнодорожной насыпи / Е. С. Ашпиз, Л. Н. Хрусталева // Криосфера земли. – 2008. – С. 32-37.

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

14. Артюшенко, И. А. Усиление основания земляного полотна вертикальными столбами из щебня на участках с многолетнемерзлыми грунтами. : 05.23.02 : дис. канд. техн. наук / И.А. Артюшенко; РУТ (МИИТ) – Москва, 2020. – 175 с.

15. Александрова, Н. С. Изменение геокриологических условий восстанавливаемой железной трассы «Салехард-Надым» под влиянием техногенных факторов. / Н.С. Александрова. // Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире : десятая междун. конф. по мерзлотоведению. 25-29 июня 2012 г. – Тюмень, 2012. – С. 7–12.

16. Богданов, Н. С. Вечная мерзлота и сооружения на ней / Н.С.Богданов. – Санкт-Петербург: Общественная польза, 1912. – 220 с.

17. Белокрылов, И. Д. Вечная мерзлота и железнодорожный транспорт. / И. Д. Белокрылов // Вечная мерзлота и железнодорожное строительство. – 1931. – №8. – С. 11-51.

18. Быков, Н. А., Каптерев П. Н. Вечная мерзлота и строительство на ней. Государственное транспортное железнодорожное издательство. Москва, 1940. – 370 с.

19. Богомолова, О. А. О возможности оценки устойчивости откосов и склонов на основе решения смешанной задачи теории упругости и теории пластичности грунта / О. А. Богомолова, А. В. Жиделев // Строительство и архитектура. – 2020. – №1. – С. 48–58.

20. Бурукин, А. Ю. Глубинное упрочение грунтов в основании дорог на таликах / А. Ю. Бурукин, С. Я. Луцкий, К. Н. Хрипков // Второй

международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах, 24-26 сентября 2015 г. – Новосибирск, 2015. – С. 64-71.

21. Бедрин, Е. А. Обеспечение термической устойчивости основания земляного полотна автомобильных дорог: монография / Е. А. Бедрин, А. М. Завьялов, М. А. Завьялов. – Омск: СибАДИ, 2012. – 178 с.

22. Воронцов, В. В. Расчетное обоснование конструктивного решения по укреплению основания и насыпи земляного полотна существующей автомобильной дороги на территории ЯНАО / В.В. Воронцов, А. Н. Краев, М. Е. Игошин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 2. – С. 119-123.

23. Валиев, Н. А. Эксперименты по стабилизации земляного полотна на центральном участке Байкало-Амурской магистрали с помощью солнцесадкозащитных навесов / Н. А. Валиев, В. Г. Кондратьев // Инженерная геология. – 2015. – № 4. – С. 56-63.

24. Вялов, С. С. Реология мерзлых грунтов / С. С. Вялов; ред. В. Н. Разбегина. – Москва: Стройиздат, 2000. – 463 с.

25. Вязкопластичность льда и мерзлых грунтов / Ю. К. Зарецкий, Б. Д. Чумичев, А. Г. Щеболев, К. Ф. Войтковски. – Новосибирск: Наука, 1986. – 182 с.

26. ВСН 84-89. Изыскание, проектирование и строительства автомобильных дорог в условиях вечной мерзлоты : утв. М-вом транспортного строительства СССР 13.03.1989 : введ. в действие с 30.03.1989. – Москва : Союздорнии, 1990. – 271 с.

27. ВСН 61-89. Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты: утв. М-вом транспортного строительства СССР 20.07.1989: введ. в действие с 01.01.1990. – Москва : ВНИИГ, 1990. – 208 с.

28. ВСН 04 – 71. Указания по расчету устойчивости земляных откосов: утв. Главтехстройпроектом Минэнерго СССР 21.01.1971: введ. в действие с 01.11.1971. – Москва: ЦНИИС, 1971. – 104 с.

29. Воронцов, В. В. Стабилизация критических деформаций земляного полотна автомобильной дороги в криолитозоне / В. В. Воронцов, А. Н. Краев, М. Е. Игошин // Вестник, сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2014. – № 6. – С. 67-72.

30. Вельчев, С. П. Особенности строительства нефтегазовых объектов на вечномёрзлых грунтах / С. П. Вельчев. // Журнал нефтегазового строительства. – 2014. - № 2. – С. 34-37.

31. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. : издание официальное : утв. и введ. в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 июля 2012 г. № 190-ст м: введ. впервые : дата введ. 2013-01-01 / разработан Национальным объединением изыскателей (НОИЗ). – Москва: «Стандартинформ», 2013. – 38 с.

32. Городков, Б. Н. Вечная мерзлота в северном крае / Б. Н. Городков – Ленинград : Академия наук, 1932 г. – 109 с.

33. 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. – № 1. – С. 10–40.

34. Гаврилова, М. К. Современный климат и вечная мерзлота на континентах / М. К. Гаврилова. Новосибирск: Наука, 1981. – 112 с.

35. Голли, А. В. Методика измерения напряжений и деформаций в грунтах : учебное пособие / А. В. Голли // Ленинград: ЛИСИ. – 1984. – 53 с.

36. Гравис, Г. Ф. Цикличность термокарста на Приморской низменности в верхнем плейстоцене и голоцене / Г. Ф. Гравис // Доклады и сообщения : III междунар. конф. по мерзлотоведению. – Оттава, 1978. – С. 283-287.

37. Гамзаев, Р. Г. Системы термостабилизации грунта при строительстве в криолитозоне / Р. Г. Гамзаев, Я. А. Кроник // Инженерная геокриология : пятая конференция геокриологов России, 14-17 июня 2016 г. – Москва, 2016. – С. 245-252.

38. ГОСТ 52748-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения: издание официальное : утв. и введ. в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 сентября 2007 г. N 250-ст : введ. впервые : дата введ. 2008-01-01. / разработан ООО "Дорожный инженерный центр", Российской академией транспорта – Москва : Стандартинформ, 2008. – 17 с.

39. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация : издание официальное : утв. и введ. в действие: приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 июля 2020 г. № 384-ст : введ. впервые : дата введ. 2021-01-13 / разработан ООО «Техречсервис». – Москва : Стандартинформ, 2020. – 41 с.

40. ГОСТ 5180-2015. Методы лабораторного определения физических характеристик: издание официальное : утв. и введ. в действие : Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 3 ноября 2015 г. N 1694-ст : дата введ. 2016-04-01 / разработан ОАО "ПНИИИС". – Москва : Стандартинформ, 2016. – 26 с.

41. ГОСТ 33063-2014 Дороги автомобильные общего пользования : Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 августа 2015 г. N 1118-ст : дата введ. 2015-12-01/ разработан ФГБУ "РОСДОРНИИ. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 54 с.

42. Дыдышко, П. И. Обеспечение стабильности земляного полотна железнодорожного пути в районах вечной мерзлоты / П.И. Дыдышко // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : научно- техническая международная конференция. – Москва, 2014. – С. 43–57.

43. Дыдышко, П.И. Усиление земляного полотна на оттаивающих вечномерзлых грунтах : монография / П.И. Дыдышко, С.М. Жданова. – Хабаровск : ДВГУПС, 2005. – 135 с.

44. Дарков, А.В. Приближенный способ определения сдвигающих усилий в подошве насыпи. / А.В. Дарков // Вопросы путевого хозяйства. – 1957. – Вып. 94. – С. 67-82.

45. Евдокимов, В. С. Исследование работы сезоннодействующего термостабилизатора грунта / В. С. Евдокимов, В.А. Максименко, В.К. Васильев, А.В. Третьяков // Проблемы региональной энергетики. – 2014. – №3. – С. 74-80.

46. Евгеньев, И.Е. Казарновский, В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах / И.Е. Евгеньев, В.Д. Казарновский. – Москва : Транспорт, 1976. – 271 с.

47. Ершов, Э. Д. Общая геокриология: учебник / Э. Д. Ершов – Москва: МГУ, 2002. – 682 с.

48. Жданова, С.М. Усиление земляного полотна на оттаивающих вечномёрзлых грунтах. / С.М. Жданова // Путь и путевое хозяйство. – 2007 – № 5. – С. 33-37.

49. Жданова, С. М. Земляное полотно на подземных льдах и основаниях из льдистых грунтов / С. М. Жданова, О. А. Нератова, А. А. Пиотрович // Вестник Сибирского государственного университета путей и сообщения. – 2020. – № 4. – С. 65-73.

50. Земеров, И. В. Влияние обводнения на температурный режим мерзлого основания насыпных сооружений: 23.11.23 : автореф. дис. канд. техн. наук / И.В. Земеров. – Якутск, 2023. – 24 с.

51. Исаков, В.А. Основные типы и причины развития деформаций на автомобильных и железных дорогах в Норильском промышленном районе / В.А Исаков. // десятая международная конференция по мерзлотоведению. 25-29 июня 2012 г. – Салехард, 2012. – С. 207-211.

52. Исаков, В. А. Температурный режим в основаниях дорог на вечной мерзлоте / В.А. Исаков // Вестник Московского университета. – 2015. – № 3. – С. 25-34.

53. Инженерные проблемы строительного материаловедения, геотехнического и дорожного строительства : материалы III международ. науч.-техн. конференции. – Волгоград : ВГАСУ, 2012. – 251 с.

54. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях: учебн. пособие / В.А.Кудрявцев, Л.С.Гарагуля, К.А. Кондратьева [и др.]; Московский государственный университет. – Москва, 1974. – 431 с.

55. Общее мерзлотоведение / М.И. Сумгин, С. П. Качурин, Н.И. Толстихин, В. Ф. Тумель. – Москва; Ленинград : Академия наук СССР, 1940. – 340 с.

56. Кудрявцев, В. А. Общее мерзлотоведение / В. А. Кудрявцев. – Москва : МГУ, 1978 – 464 с.

57. Кондратьев, В. Г. Как защитить федеральную автодорогу «Амур» Чита – Хабаровск от опасных инженерно-геокриологических процессов и явлений / В. Г. Кондратьев, С. В. Кондратьев // Инженерная геология. – 2013. – № 5. – С. 40-47

58. Кудрявцев, С.А. Разработка конструкций для укрепления оползневого массива грунта на участке автомобильной дороги «Амур» с использованием современных геосинтетических материалов / С.А. Кудрявцев, Т.Ю. Вальцева, Е.Д. Гончарова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – № 4. – С. 111-122.

59. Кудрявцев, С.А. Исследование работы врезных геосинтетических обойм из камня в частично оттаявшем основании насыпей железных дорог на вечномёрзлых грунтах / С.А. Кудрявцев, А.В. Кажарский, В.Д. Цыганков // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2015. – № 3. – С. 28-33.

60. Качурин, С.П. Термокарст на территории СССР / С.П. Качурин – Москва : Академия наук, 1961. – 292 с.

61. Карлов, В.Д. Сезоннопромерзающие грунты как основания сооружений : 05.23.02 : дис. докт. техн. наук / В.Д. Карлов; СПбГАСУ. – Санкт-Петербург, 1998. – 349 с.

62. Кроник, Я.А. Динамика аварийности и безопасности природно-техногенных систем в криолитозоне / Я.А. Кроник // Материалы IV Конференции геокриологов России. – 2011. – С. 285-292.

63. Королев, К.В. Начальная несущая способность консолидирующегося основания дорожной насыпи / К.В. Королев, А.М. Караулов, Сон Ен-Вун // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2010. – № 4. – С. 97–102.

64. Королев, К.В. Предельное давление насыпи на слабое консолидирующееся основание / К.В. Королев, Сон Ен-Вун, А.М. Караулов. // Вестник СГУПС – 2010. – № 23. – С. 27-33.

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. Литовко, А.В., Сыромятников И.И. Комплексные геокриологические исследования на автомобильной дороге «Умнас». / А.В. Литовко, И.И. Сыромятников. // Мониторинг в криолитозоне: шестая конференция геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. 14 - 17 июня 2022 – Москва, 2022. – С. 257–263.

67. Луцкий, С. Я. Развитие исследований геотехнических сооружений в криолитозоне / С. Я. Луцкий, Т. В. Шепитько, А. М. Черкасов, Дж. Лю // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 6. – С. 30-33.

68. Лобанов, И. З. Рекомендации по проектированию и сооружению насыпей в местах расположения водопропускных труб. // Сооружение

земполотна железной дороги Новокузнецк – Абакан – Тайшет. – М., 1970. – С.142–151.

69. Морозов, К. Д., Проектирование и сооружение мостов в условиях вечной мерзлоты / К. Д. Морозов. – Москва : Трансжелдориздат, 1936. – 136 с.

70. Макаров, А. С. Влияние поверхностных длительно стоящих вод на температурный режим грунтов земляного полотна и многолетнемерзлого основания: 2.1.2 : автореф. дис. канд. техн. Наук / А. С. Макаров ; ТИУ. – Тюмень, 2023. – 24 с.

71. Минайлов, Г. П. Пути повышения устойчивости насыпей, возводимых на маревых участках БАМа / Г.П. Минайлов, В.В. Гулецкий. – Текст : непосредственный // Транспортное строительство, – 1982. – № 2. – С. 5–7.

72. Мельников, В. П. Современные проблемы геокриологии / В. П. Мельников, А. В. Брушков, Д. С. Дроздов. // Инженерная геокриология : Пятая конференция геокриологов России, 14-17 июня 2016 г. – Москва, 2016. – С. 5–25.

73. Маслов, Н. Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов / Н. Н. Маслов. – Москва: Высш. школа, 1982. – 511 с.

74. Методические рекомендации по проектированию земляного полотна автомобильных дорог общего пользования из местных талых и мерзлых переувлажненных глинистых и торфяных грунтов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов: издание официальное : утв. и введ. на основании распоряжения Федерального дорожного агентства (Росавтодор) от 25.07.2018 № 2886-р. : введ. впервые : дата введ. 2018-06-25 / разработан ООО «ЦАДИ». – Москва : Информавтодор, 2020. – 50 с.

75. Методические рекомендации по геокриологическому прогнозированию устойчивости дорожных сооружений при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог утв. и введ.: на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 21.08.2019 № 2215-р. :

введ. впервые : дата введ. 2019-08-21 / разработан ООО «СибИНДОР». – Москва : Росавтодор, 2019. – 125 с.

76. Невмержицкая, Л. И. Методика учета теплового влияния поверхностных и грунтовых вод при проектировании транспортных сооружений на вечной мерзлоте: 05.23.11: автореф. дис. канд. техн. наук: / Л.И. Невмержицкая ; ЦНИИС. – Москва, 2005. – 20 с.

77. Нак, И. В. Методы организации и технологии строительно-путевых работ в условиях Заполярья: 05.23.11 : дисс. канд. техн. наук: / И. В. Нак ; МИИТ. – Москва, 2003. – 179 с.

78. Оценочный отчет. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования. – Москва: ОМННО «Совет Гринпис», 2010. – 44 с.

79. Опыт и перспективы проектирования, строительства и эксплуатации дорог в криолитозоне на примере железнодорожной линии Обская – Бованенково / А. А. Цернант, В. В. Пассек, В. А. Герасимов, С. Г. Суворов. – М.: ЦНИИС, 2012. – 163 с.

80. Пузыревский, Н. П. Теория напряженности землистых грунтов. / Н.П. Пузыревский // Строительная механика: сборник ЛИИПС – СПб, 1929. – С. 5-72.

81. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов / Л. Т. Роман, М. Н. Царапов, А. М. Черкасов. [и др.] ; КДУ. – Москва : Университетская книга, 2018. – 188 с.

82. Пархоменко, С. Г., Программа для изучения явлений, связанных с мерзлотой почв и грунтов. / С.Г. Пархоменко. – Москва : Советская Азия, 1932. – 59 с.

83. Пономарев, А. Б. Расчет устойчивости откосов: учеб.-метод. пособие / А.Б. Пономарев, О. А. Богомоллова, А. Н. Богомоллов. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2022. – 128 с.

84. Подвальный, Р. Е. К вопросу о распределении напряжений в насыпях и бортах выемок. / Р. Е. Подвальный. // труды ВНИИТС, ЦНИИС. – Москва, 1970. – С.28–36.

85. Романовский, Н. Н. Талики в области многолетнемерзлых пород и схема их подразделение / Н. Н. Романовский // Вестник Московского университета. – 1972. – № 1. – С. 23-34.

86. Романовский, Н. Н. Основы криогенеза литосферы: учебное пособие / Н. Н. Романовский. – Москва: Изд-во МГУ, 1993. – 336 с.

87. Родионова, Т. В. Исследование динамики термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам : 25.00.33 :автореф дис. канд. геогр. наук / Т. В. Родионова ; МГУ имени М.В. Ломоносова. – Москва, 2014. – 26 с.

88. Роман, Л. Т. Механика мерзлых грунтов / Л. Т. Роман. – Москва: МАИК Наука. Интерпериодика, 2002. – 426 с.

89. Рувинский, В. И. Оптимальные конструкции земляного полотна / В. И. Рувинский. – Москва: Транспорт, 1992. – 240 с.

90. Рувинский, В. И. Пособие по устройству теплоизолирующих слоев из пенопласта Styrofoam на автомобильных дорогах России / В. И. Рувинский. – Москва : Транспорт, 2000. – 71 с.

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

92. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: учебное пособие / В. В. Виноградов, Г. Г. Коншин, А. М. Никонов, Т. Г. Яковлева [и др.] – Москва : Маршрут, 2003. – 486 с.

93. Спиридонов, А. М. Технология железнодорожного строительства: учебник для специалистов / А. М. Спиридонов, А. М. Призмазов. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2014. – 592 с.

94. Системы температурной стабилизации: [сайт]. URL : <https://www.npo-fsa.ru/sites/default/files/tehresh-pdf.pdf> (дата обращения: 21.02.2025).

95. Сон Ен-Вун. Устойчивость земляного полотна железных и автомобильных дорог на слабых водонасыщенных глинистых основаниях: 05.23.11: дис. канд. техн. наук: / Сон Ен-Вун; СГУПС – Новосибирск, 2014. – 131 с.

96. Степанов, С. П. Численное моделирование трехмерных задач тепло- и массопереноса в криолитозоне: 05.13.18 дис. канд. техн. наук: / С.П. Степанов; ИМИ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова – Якутск, 2017. – 128 с.

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

98. Свод правил. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85: СП 34.13330.2012 : утв. Приказом Минрегиона России от 30.06.2012 : введ. в действие с 01.07.2013. – Москва: 2013. – 128 с.

99. Свод правил. Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства. СП 313.1325800.2017 : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 14 декабря 2017 г. N 1669/пр : введен в действие с 15.06. 2018 г. – Москва : 2018. – 77с.

100. Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция : СНиП 2.02.04-88 : СП 25.13330.2020 : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2020 г. N 915/пр : введен в действие с 01.07.2021 г. – Москва, 2012. – 123 с.

101. Федосов А. Е., Физико-механические процессы в грунтах при их замерзании / А. Е.Федосов. – Москва : Трансжелдориздат, 1935 г. – 47 с.

102. Федеральная государственная информационная система контроля за формированием и использованием средств дорожных фондов : [сайт]. – URL : <https://скдф.рф/roads/1969912> (дата обращения: 15.02.2025).

103. Хрусталева, Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне: учебник / Л. Н. Хрусталева. – Москва : Изд-во Моск. унта, 2005 – 544 с.

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

105. Хрипков, К. Н. Конструктивно – технологические решения по сооружению земляного полотна в таликовых зонах распространения многолетнемерзлых грунтов: 05.23.11 дис. канд. техн. наук: / К.Н. Хрипков ; МГУПС МИИТ. – Москва, 2015. – 211 с.

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

107. Цернант, А. А. Развитие научно-методической базы технического нормирования железнодорожного строительства в криолитозоне / А.А.Цернант : науч. труды ОАО ЦНИИС. – Москва: ОАО ЦНИИС, 2011. – 194 с.

108. Шур, Ю. Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст / Ю.Л. Шур. – Новосибирск: Наука, 1988. - 212 с.

109. Шур, Ю. Л. О причинах возникновения термокарста / Ю.Л. Шур // Физико-геологические процессы в промерзающих и протаивающих породах. – 1974. – Вып. 70. – С. 31-47.

110. Шахунянц, Г. М. Земляное полотно железных дорог. / Г. М. Шахунянц. – Москва: Трансжелдориздат, 1953. – 827 с.

111. Юсупов, С. Н. Конструктивно-технологические решения устройств водоотвода для земляного полотна железных и автомобильных дорог на вечной мерзлоте: 05.23.11 : автореф. дис. канд. техн. наук: / С. Н. Юсупов ; ЦНИИС. – Москва, 2003. – 32 с.

Результаты исследований аспиранта ФГБОУ ВПО ТюмГАСУ З.Ш. Шанхоева, 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 ПК597+20 – ПК597+45; тип поперечного профиля 3А. Техническим результатом мероприятий по стабилизации левой части земляного полотна и основания автомобильной дороги является то, что армирующий элемент, обёртывающий валик, вертикально погружается в основание ниже уровня многолетнемёрзлых грунтов, что позволяет наиболее жестко зафиксировать концы армирующего элемента в мёрзлом грунте. Кроме того понижение коэффициента фильтрации за счёт вертикального размещения армирующего материала позволит изменить водно-тепловой режим под валиком в сторону поднятия границы многолетнемёрзлых грунтов. Стабилизация конструкции земляного полотна осуществляется за счёт жесткого защемления концов армирующего элемента в слое мёрзлого грунта, которое позволит снизить развитие деформаций на данном участке в сторону откоса.

Проектное решение реализовано на ПК597+20 – ПК597+45 согласно актам выполненных работ и акту ввода в эксплуатацию автомобильной дороги в 2013 г.

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

Генеральный директор
ООО «Дорстройтехнология»

Е.И. Хожай



ПРИЛОЖЕНИЕ Б



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА
И ДОРОЖНОГО ХОЗЯЙСТВА
РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ «УПРАВЛЕНИЕ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ
РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)»

ул. Автодорожная 10/2, г. Якутск,
Республика Саха (Якутия), 677021
тел. 8(4112) 35-79-55, факс 35-73-00

uprdor@sakha.ru

ОГРН 1111435002194

ИНН/КПП 1435238811/143501001

28.10.2020 № 483-20 от 10.10.2020 г.

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

Согласование основных проектных решений

Уважаемая Лена Вячеславовна!

Рассмотрев представленные технические решения по объекту: «Ремонт автомобильной дороги «Устье-Кемпендэй» на опытном участке км 40+700 - 42+700 в Республике Саха (Якутия)», Заказчик согласовывает следующие технические решения:

- Тип поперечного профиля №1. Применяется при возведении земляного полотна высотой менее 2,0м из привозного грунта, при обеспеченном водоотводе на участках ПК0+00 - ПК15+70, ПК16+00 - ПК20+00;

- Тип поперечного профиля №2. Применяется на многолетнемерзлых грунтах с теплоизолирующим слоем из «Пеноцеолита» толщиной h=25см в основании насыпи на участках ПК10+50 - ПК10+80, ПК15+70 - ПК16+00, ПК19+40 - ПК19+70;

- Тип поперечного профиля №3. Применяется на многолетнемерзлых грунтах с теплоизолирующим слоем в основании насыпи из «Пеноцеолита» (Биг-бэг) на участке ПК15+40 - ПК15+70;

- Конструкция дорожной одежды на всем протяжении участка принять из ПГС С-2 толщиной 20 см по оси.

Генеральный директор

С.В. Филиппов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

