

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

На правах рукописи



Чахлов Михаил Геннадьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОТИВОПУЧИННОЙ ЗАЩИТЫ
ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КАПИЛЛЯРНОГО
БАРЬЕРА В ЭКСПЛУАТИРУЕМОМ ЗЕМЛЯНОМ ПОЛОТНЕ**

Специальность 2.1.8 – «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов,
аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Разуваев Денис Алексеевич

Новосибирск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНО-ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА	11
1.1 Особенности развития деформаций морозного пучения на участках автомобильных дорог	11
1.2 Факторы возникновения морозного пучения в земляном полотне автомобильных дорог	20
1.3 Особенности и механизмы влагопереноса в промерзающих грунтах	25
1.4 Способы регулирования водно-теплового режима и влагопроводных свойств грунтов земляного полотна	31
1.5 Способы изменения свойств грунтов эксплуатируемого земляного полотна	35
1.5.1 Способы укрепления и уплотнения грунтов.....	36
1.5.2 Способы инъектирования грунтов	41
1.5.3 Вяжущие материалы для инъектирования грунтов	45
1.6 Цель и задачи исследования	46
ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА СОЗДАНИЯ ЗАКРЫТОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТА ДЛЯ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА	49
2.1 Мониторинг эксплуатируемых участков земляного полотна при закрытой и открытой системах промерзания	49
2.1.1 Выбор участка мониторинга.....	49
2.1.2 Проведение мониторинга.....	51
2.1.3 Анализ результатов мониторинга относительной влажности грунта земляного полотна при промерзании	60
2.2 Концепция капиллярного барьера в земляном полотне из стабилизированных грунтов	61

2.3 Моделирование работы капиллярного барьера в земляном полотне из стабилизированного грунта.....	64
2.4 Расчетно-теоретическое обоснование параметров капиллярного барьера.....	67
2.4.1 Решение для определения глубины капиллярного барьера	68
2.4.2 Решение для определения мощности капиллярного барьера	76
2.5 Выводы по главе 2	80
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯНОЕ ПОЛОТНО – КАПИЛЛЯРНЫЙ БАРЬЕР ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ	82
3.1 Экспериментальное определение двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влажнопереноса в грунтах земляного полотна	82
3.1.1 Постановка и проведение лабораторного эксперимента на грунтовых моделях с капиллярным барьером	82
3.1.2 Результаты определения двухпараметрических температурных критериев начала интенсивного криогенного влажнопереноса под капиллярным барьером	88
3.2 Экспериментальное исследование коэффициентов влажнопроводности силикатизированных грунтов при промерзании	94
3.2.1 Постановка и проведение лабораторного эксперимента для силикатизированных грунтов	94
3.2.2 Результаты лабораторного эксперимента по определению коэффициентов влажнопроводности силикатизированных грунтов	101
3.2.3 Оценка влияния процесса промерзания на коэффициенты влажнопроводности силикатизированных грунтов.....	104
3.3 Экспериментальное исследование коэффициентов морозного пучения силикатизированных глинистых грунтов.....	108

3.4 Выводы по главе 3	114
ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАПИЛЛЯРНОГО БАРЬЕРА В ЗЕМЛЯНОМ ПОЛОТНЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ	116
4.1 Алгоритм проектирования капиллярного барьера	116
4.2 Описание способа создания капиллярного барьера	123
4.3 Верификация методики определения глубины расположения капиллярного барьера	127
4.4 Оценка экономической эффективности применения обоснованной конструкции капиллярного барьера	133
4.5 Выводы по главе 4	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
Список литературы	142
Приложение А. Акты о внедрении результатов исследований	159
Приложение Б. Технологическая карта на устройство капиллярного барьера способом газовой силикатизации	161
Приложение В. Технологическая схема на устройство капиллярного барьера способом газовой силикатизации	162

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В соответствии с «Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» одной из важнейших задач является приведение транспортной инфраструктуры в соответствие с нормативными требованиями и обеспечение ее долговременной устойчивости [98]. Существенной сложностью при решении данной задачи является наличие на автомобильных дорогах пучиноопасных участков.

Ежегодно на действующей сети автомобильных дорог Российской Федерации в районах с преобладанием неблагоприятных грунтово-гидрологических условий и глубоким сезонным промерзанием грунтов, наблюдается большое количество деформаций дорожных конструкций, связанных с действием сил морозного пучения.

В отечественном и мировом опыте эксплуатации автомобильных дорог существует большое количество эффективных способов борьбы с морозным пучением грунтов рабочего слоя земляного полотна. К ним можно отнести регулирование свойств грунтов земляного полотна (замена грунтов, изменение свойств грунтов и др.) и регулирование водно-теплового режима земляного полотна (устройство поверхностного водоотвода, дренажей, противofильтрационных экранов, теплоизолирующих слоев, морозозащитных слоев, введение в грунт регуляторов температуры замерзания и др.).

Однако большинство эффективных способов возможны к применению только при строительстве, или при полном переустройстве эксплуатируемых дорожных конструкций. Этот факт не позволяет назвать данные способы экономически эффективными для эксплуатируемых участков автомобильных дорог, и считать проблему решенной в полной мере.

Поэтому исследования, направленные на снижение величины морозного пучения грунтов земляного полотна эксплуатируемых участков автомобильных дорог до допустимых значений, создание новых способов и методик

проектирования противопучинной защиты, являются весьма актуальными для транспортной отрасли.

Степень разработанности темы исследований.

Исследованиями в области водно-теплового режима земляного полотна и его регулирования занимались отечественные и зарубежные ученые: И.А. Золотарь, В.Н. Ефименко, С.В. Ефименко, А.В. Лыков, Н.А. Пузаков, В.И. Рувинский, В.М. Сиденко, А.Я. Тулаев, В.Н. Шестаков, А.И. Ярмолинский, В.А. Ярмолинский, W.N. Houston, M.S. Kersten, C.E. Zapata и их ученики.

В области изучения процессов морозного пучения и разработки противопучинной защиты, исследования проводили отечественные и зарубежные ученые: А.А. Ананян, Е.С. Ашпиз, А.М. Глобус, М.Н. Гольдштейн, Э.Д. Ершов, А.Л. Исаков, В.А. Кудрявцев, С.А. Кудрявцев, В.О. Орлов, В.Н. Парамонов, А.М. Пчелинцев, И.И. Сахаров, М.И. Сумгин, И.А. Тютюнов, В.И. Федоров, Г.М. Фельдман, А.А. Цернант, В.Г. Чеверев, Л.В. Чистотинов, Н.А. Цытович, Г.М. Шахунянц, П.Ф. Швецов, А.И. Шеслер, G. Beskow, F.Crory, A.E. Corte, M. Fukuda, I.Johnson, R.D. Miller, E. Penner и их ученики.

Цель исследования: снижение величины морозного пучения грунтов земляного полотна эксплуатируемых участков автомобильных дорог, обеспечивающее достижение значений допустимой величины поднятия покрытия дорожной одежды, с применением инъектирования (силикатизации).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Предложить способ снижения величины морозного пучения земляного полотна эксплуатируемых участков автомобильных дорог в районах с глубоким¹ промерзанием и близким² залеганием грунтовых вод за счет частичного по глубине преобразования свойств грунтов зоны промерзания инъектированием, и

¹ Под глубоким понимается промерзание грунта под дорожной одеждой на глубину более 0,5 м.

² Под близким понимается такой уровень грунтовых вод, при котором высота капиллярного поднятия воды над ним достигает зоны промерзания.

переводом системы промерзания в закрытую (способ устройства капиллярного барьера).

2. Обосновать глубину расположения капиллярного барьера на базе двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного³ криогенного влагопереноса в глинистых грунтах земляного полотна.

3. Экспериментально исследовать закономерности процессов пучения и влагопроводности силикатизированного грунта в зависимости от концентрации раствора силиката натрия, и числа пластичности исходного грунта, для определения толщины капиллярного барьера. Оценить влияние процесса промерзания на величину коэффициентов влагопроводности силикатизированного грунта.

4. Разработать методику проектирования капиллярного барьера из инъецированного раствора в грунтах земляного полотна эксплуатируемых участков автомобильных дорог.

Объект исследования – земляное полотно эксплуатируемого участка автомобильной дороги из глинистых грунтов ($I_p = 0,01 \dots 0,13$), расположенного в районах Западной Сибири с глубоким промерзанием и близким залеганием грунтовых вод (3 расчетная схема увлажнения).

Предмет исследования – закономерности пучения и влагопереноса при промерзании глинистых грунтов земляного полотна, в том числе при силикатизации.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложен подход к переводу открытой системы промерзания в закрытую путем создания капиллярного барьера в земляном полотне из силикатизированных грунтов.

2. Экспериментально получена функциональная зависимость двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного

³ Под интенсивным понимается криогенный влагоперенос за счет капиллярного механизма миграции воды в буферной зоне, примыкающей к границе промерзания.

криогенного влагопереноса в глинистых грунтах земляного полотна с числом пластичности от 0,05 до 0,13.

3. Установлена зависимость коэффициента влагопроводности силикатизированного глинистого грунта от плотности водного раствора силиката натрия с оценкой влияния процесса промерзания на изменение влагопроводных свойств силикатизированного грунта.

4. Определена функциональная зависимость изменения коэффициентов морозного пучения от плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия и числа пластичности исходного глинистого грунта.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Выполненные исследования позволили предложить подход к переводу открытой системы промерзания в закрытую путем создания капиллярного барьера в земляном полотне из силикатизированных грунтов, получить функциональные зависимости двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса в глинистых грунтах земляного полотна с числом пластичности от 0,05 до 0,13, получить зависимости коэффициента влагопроводности силикатизированного глинистого грунта от плотности водного раствора силиката натрия с оценкой влияния процесса промерзания на изменение влагопроводных свойств силикатизированного грунта, а также установить функциональные зависимости коэффициентов морозного пучения от плотности водного раствора силиката натрия и числа пластичности исходного грунта.

На основании проведенных исследований разработана методика проектирования капиллярного барьера на автомобильных дорогах.

Предложен и запатентован способ предотвращения образования пучин в земляном полотне эксплуатируемых автомобильных и железных дорог на сезоннопромерзающих грунтах (Патент РФ №2790090, МПК E02D 3/12).

Результаты исследования и отдельные положения внедрены на объектах Федерального управления автомобильных дорог «Сибирь» (ФКУ «Сибуправтодор»), в проектной организации ООО «РосИнсталПроект», а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «Сибирского государственного университета путей

сообщения» при подготовке бакалавров и специалистов для дорожной отрасли (Приложение А).

Методология и методы исследования. В основу методологии исследования положена совокупность теоретических и эмпирических методов научного исследования, способствующая достижению поставленной цели и решению сформулированных задач.

Теоретические методы исследования включают анализ, синтез и систематизацию знаний в области изучения процессов морозного пучения и влагопроводных свойств грунтов земляного полотна автомобильных дорог.

В качестве эмпирических методов применялись наблюдение (мониторинг), сравнение, физическое моделирование и эксперимент.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ устройства и методика проектирования капиллярного барьера на эксплуатируемых и проектируемых автомобильных дорогах.

2. Функциональная зависимость двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса в глинистых грунтах земляного полотна.

3. Зависимость коэффициента влагопроводности силикатизированного глинистого грунта от плотности водного раствора силиката натрия с оценкой влияния процесса промерзания на изменение влагопроводных свойств силикатизированного грунта.

4. Функциональная зависимость изменения коэффициентов морозного пучения от плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия и числа пластичности исходного глинистого грунта.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается обширным объемом натуральных и экспериментальных исследований, проведенных с использованием современного поверенного оборудования и подтверждена согласованностью результатов численных и экспериментальных исследований, воспроизводимостью результатов исследования.

Основные положения и материалы диссертационной работы представлены на шести международных конференциях:

– XI Международная научно-техническая конференция «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, СГУПС, ноябрь 2020 г.);

– XVIII Международная конференция «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» (г. Москва, РУТ (МИИТ), октябрь 2021 г.);

– 5th International Symposium on Transportation Soil Engineering in Cold Regions (TRANSOILCOLD 2021) (Китай, г. Гуанчжоу, декабрь 2021 г.);

– XIX международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» (г. Москва, РУТ (МИИТ), ноябрь 2022 г.);

– 6-й Международный Симпозиум по строительному инжинирингу грунтовых сооружений на транспорте в холодных регионах (TRANSOILCOLD 2023) (г. Москва, РУТ (МИИТ), октябрь 2023 г.);

– XIV Международной научно-практической конференции «Инвестиции, градостроительство, технологии как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения» (г. Томск, ФГБОУ ВО ТГАСУ, март 2024).

Публикации по теме диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в тринадцати печатных работах, из них пять – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, шесть в изданиях, внесенных в базу научного цитирования Scopus и две, входящие в РИНЦ. Зарегистрированы два патента на изобретение.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и списка литературы. Работа изложена на 162 страницах, содержит 58 рисунков и 16 таблиц. Список литературы включает 143 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНО-ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

1.1 Особенности развития деформаций морозного пучения на участках автомобильных дорог

Неблагоприятные последствия морозного пучения в дорожном строительстве известны еще с 19-го века. По данным А.Я. Тулаева [99], истоки борьбы с деформациями грунтов на дорогах России приходятся на конец первой половины прошлого столетия, когда при отсыпке и устройстве «мостовых дорог» начали осуществлять простейшие конструктивные мероприятия.

Проблема морозного пучения грунтов освещена многими учеными [51, 65, 128]. Отдельно стоит отметить большой вклад ученых ФГБОУ ВО ТГАСУ в решения многих вопросов, связанных с процессами водно-теплого режима и пучения грунтов земляного полотна автомобильных дорог для геологических и природно-климатических условий Сибири [30, 33, 34].

В общем случае под морозным (криогенным) пучением понимается внутриобъемное деформирование промерзающих влажных нескальных горных пород и грунтов, приводящее к увеличению их объема вследствие кристаллизации в них воды и образования ледяных включений в виде прослойков, линз, поликристаллов и т.д. [68].

К основным характеристикам деформируемости промерзающего грунта относятся величина пучения и ее производная – интенсивность [68].

Под величиной пучения h_i некоторой точки поверхности грунта, промерзающего на глубину z_i , принято понимать высоту перемещения этой точки относительно ее исходного положения в предзимний период. Величину пучения dh элементарного слоя dz называют интенсивностью пучения f , которая представляет собой дифференцированную по глубине слоя пучения алгебраическую сумму деформаций грунта за счет перемещения его вверх

(деформация пучения h_0) и одновременной внутриобъемной усадки его вниз ($-s_y$) вследствие консолидации намерзлого грунта [67, 68]:

$$f = \frac{dh}{dz}. \quad (1.1)$$

При

$$h = h_0 + (-s_y). \quad (1.2)$$

Отсюда, процесс пучения всегда неравнозначен процессу усадки, на что указывает знак «минус» перед ее значением.

Интенсивность пучения – важнейшая характеристика, выражающая способность (напряженность) грунта в условиях льдообразования деформироваться в отдельной точке его массива. В сущности, все закономерности пучения относятся к этому параметру, отражающему при интеграции величину пучения или ее относительное значение – модуль. Являясь ключевой микроскопической характеристикой, интенсивность определяет переход объемной и линейной деформаций грунта «от точки» к массиву в целом [65].

В теоретическом плане интенсивность пучения рассматривается как некоторая феноменологическая характеристика, поскольку, не раскрывая законов движения микроскопических компонентов точечной системы, ее уравнения содержат макроскопические соотношения с переменными параметрами, описывающими систему усредненно, применительно к единице объема грунта.

Наряду с отмеченными характеристиками в дорожном строительстве используются термины «относительное пучение» или «коэффициент пучения», соответствующие значению средней интенсивности пучения.

В зависимости от гранулометрического состава дисперсные грунты подразделяются на пучинистые и непучинистые. Последние составляют меньшинство в условиях Сибири. В свою очередь, все пучинистые грунты, в зависимости от степени дисперсности, водонасыщения, условий промерзания и других факторов в дорожном строительстве могут быть подразделены по степени пучинистости на группы, согласно действующим нормативным документам [18, 90].

Динамика формирования, развития и затухания деформаций в земляном полотне на действующих транспортных сооружениях наблюдается в течение всего года. Этот процесс тесно связан с годовыми колебаниями температуры и влажности, играющими ключевую роль в водно-тепловом режиме земляного полотна.

Анализ многолетних исследований [40, 78, 117] позволяет выработать общую модель круглогодичного цикла водно-теплового режима земляного полотна на транспортных сооружениях в период эксплуатации. Для регионов с сезонным промерзанием данный цикл включает четыре основных взаимосвязанных периода изменения влажности:

- 1) осенний (предзимний) период – первоначального накопления влаги в земляном полотне;
- 2) зимний период – промерзание, перераспределение и накопление влаги в земляном полотне;
- 3) весенний период – оттаивание земляного полотна и переувлажнение грунта;
- 4) летний период – просыхание земляного полотна.

Упомянутые периоды могут быть удлинены, сокращены или дополнительно разделены в зависимости от климатических условий района расположения.

В начале осеннего периода, когда влага активно накапливается, основной вклад в увлажнение приносят осадки из атмосферы и водяные пары. Результаты исследований, проведенных на дорогах и опытных станциях, свидетельствуют о том, что во время первоначального накопления влаги в земляном полотне важно не только количество осадков, но и их сила, длительность и температура, а также влажность воздуха.

В районах с сезонным промерзанием, конец периода первоначального влагонакопления обычно совпадает с началом устойчивого промерзания грунтов. Это происходит, когда среднесуточные температуры окружающего воздуха падают ниже минус 5 °С.

В зимний период влага в грунтах накапливается благодаря движению ее в направлении теплового потока. Этот процесс приводит к перераспределению внутренних запасов влаги и ее миграции от уровня подземных вод.

В то время, когда влага накапливается, грунт подвергается морозному пучению, что приводит к его разуплотнению. В большинстве случаев, максимальное пучение грунта зависит в первую очередь от количества накопленной зимней влаги.

Уровень влагонакопления и пучения в зимний период зависит не только от скорости промерзания грунта, но и от скорости перемещения воды. Эта скорость определяется типом грунта, его плотностью и условиями, в которых происходит приток воды, включая уровень грунтовых вод. Особенно опасны пылеватые грунты, которые имеют высокую поверхностную энергию и слабое сопротивление проникновению воды в поры [58]. Именно поэтому в таких грунтах наблюдается быстрый приток воды в зону пучения, что приводит к интенсивному образованию ледяных линз в грунте.

В случае, когда грунтово-гидрологические условия являются благоприятными, коэффициент пучения обычно составляет от 2 % до 3 %. Однако, при наличии неблагоприятных условий, этот коэффициент может достигать 15 %.

Третий период – оттаивания и максимального насыщения влагой – начинается в момент установления стабильно положительной температуры грунтов земляного полотна в уровне его поверхности и продолжается до полного оттаивания. Это приводит к увеличению влажности грунта и, следовательно, к его изменению и ослаблению. В результате, грунт становится менее прочным и подвергается деформированию.

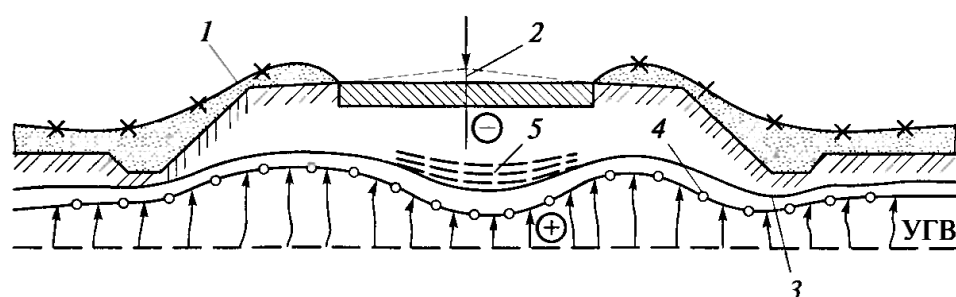
Исследования [3, 48, 79] показали, что при таянии льда в грунте часть высвобождающейся влаги уходит на гидратацию обезвоженных частиц (до 15 % от веса скелета грунта), часть воды остается в оттаявшем грунте в капиллярах и закрытых полостях, образовавшихся на месте ледяных линз. Оставшаяся

свободная вода опускается вниз по мере оттаивания, а часть ее под воздействием давления поднимается к поверхности и попадает в дренирующие слои.

С наступлением устойчивой теплой погоды земляное полотно проходит в четвертый этап – процесс сушки грунтов, при котором они становятся менее влажными и восстанавливают свою несущую способность. Под действием нагрузок пучины уплотняются. В местах, где ранее были выпуклости, происходит оседание, и пучина постепенно исчезает.

В автодорожном строительстве пучинами называют деформации и разрушения дорожной одежды в виде бугров и сетки трещин, возникающие в результате пучинообразования. Под пучинообразованием (пучением) понимают неоднородное по площади проезжей части взбугривание дорожной одежды [8].

На автомобильных дорогах начало процесса пучинообразования, как правило, совпадает с понижением температуры воздуха осенью и в начале зимы, когда верхние слои грунта имеют более низкую температуру, чем нижние. При дальнейшем понижении температуры граница промерзания грунта опускается, причем под дорожной одеждой промерзание происходит быстрее, чем под обочинами. В теле земляного полотна образуется зона межфазового перехода, где грунт уже имеет отрицательную температуру, а вода в его порах находится в жидком состоянии (рисунок 1.1) [7].



- 1 – снежный покров; 2 – поднятие поверхности дорожной одежды; 3 – линия промерзания земляного полотна; 4 – зона межфазового перехода грунта; 5 – линзы и прослойки льда; УГВ – уровень грунтовых вод

Рисунок 1.1 – Промерзание земляного полотна автомобильной дороги зимой [7]

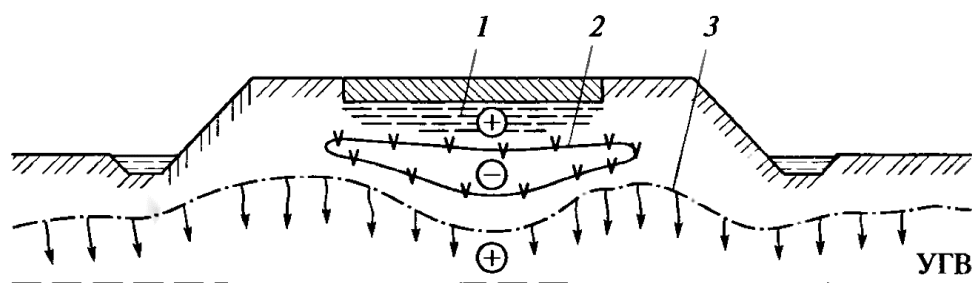
В результате льдообразования в теле земляного полотна поднятие верхней его части и дорожной одежды происходит всегда, но величина и равномерность

его различны. Если объем льда небольшой и поднятие равномерное, пучины не образуются [7].

Внешними признаками пучинистых мест в зимний период являются неравномерное поднятие участков покрытия, взбугривание отдельных мест покрытия или образование группы взбугриваний, развитых по площади проезжей части с различной степенью интенсивности. Значительная часть из них, как правило, приводит к образованию в дорожной одежде сетки трещин, концентрирующейся у вершины бугров пучения, и разрушению покрытия на отдельные куски различной площади и формы. Иногда пучины в большей степени развиваются на обочинах, и их поднятие может оказаться большим, чем в зоне проезжей части.

В весенний период после схода снега на пучинистых участках могут появляться влажные пятна, наблюдается иногда выход вместе с водой мелких частиц дренирующего слоя или грунта земляного полотна, а также волнообразные колебания дорожной конструкции при наезде транспортных средств.

Весной грунт в первую очередь оттаивает под дорожной одеждой. В этот момент лед превращается в жидкую фазу, которая под действием потенциала влажности и собственной массы мигрирует сверху вниз и задерживается на мерзлом, практически водонепроницаемом грунте [8]. Спустя несколько дней над мерзлой поверхностью грунта (донник) в верхней части полотна под дорожной одеждой возникает переувлажненное состояние (рисунок 1.2).



1 – переувлажненный грунт; 2 – мерзлый грунт (донник); 3 – линия промерзания

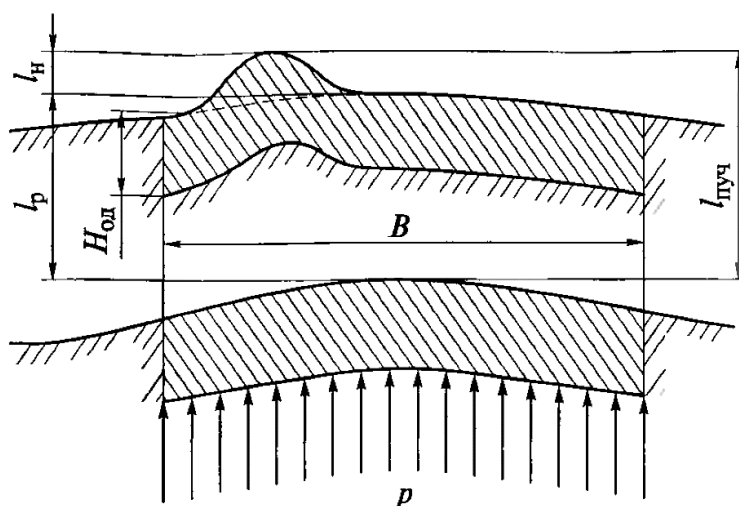
Рисунок 1.2 – Земляное полотно автомобильной дороги в момент оттаивания грунта [7]

Дорожная одежда теряет прочность, под действием транспортных нагрузок разрушается, ее материал перемешивается с переувлажненным грунтом. Такие разрушения обычно и называют пучинами.

При наезде на пучину колес автомобилей вода через трещины выплескивается на поверхность проезжей части. Наступает период, так называемого, фонтанирования пучины.

По мере оттаивания грунта влага мигрирует в нижние слои земляного полотна. Влажность начинает снижаться, прочность грунта увеличивается, а просадки стабилизируются. Пучины «закрываются» [7].

Общая схема морозного пучения конструкции дорожной одежды автомобильной дороги представлена на рисунке 1.3.



$l_{пуч}$ – общее пучение; l_p – равномерное пучение; l_n – неравномерное пучение; p – давление пучения; $H_{од}$ – толщина дорожной одежды; B – ширина проезжей части

Рисунок 1.3 – Общая схема морозного пучения конструкции дорожной одежды автомобильной дороги [7]

В нашей стране на действующей сети автомобильных дорог пучины распространены во многих регионах. В частности, такие деформации характерны для автомобильных дорог на территории Новосибирской области (рисунок 1.4).

По данным ГКУ НСО ТУАД, за последние 5 лет среднегодовые расходы на устранение пучин на региональных дорогах Новосибирской области, составляют около 500 млн. рублей, что приблизительно равно 11% среднегодовых затрат на

содержание дорог за этот период [24]. Расходы значительны, учитывая, что они не включают в себя затраты на ремонт, капитальный ремонт и реконструкцию автомобильных дорог.



Рисунок 1.4 – Примеры характерных последствий от образования пучин на участках автомобильных дорог в Новосибирской области

а – участок а/д «Инская-Барышево» - 39 км а/д «К-19р» (Новосибирский район); б – участок а/д Чаны - Венгерово - Кыштовка (Венгеровский район); в – участок а/д Чаны - Венгерово – Кыштовка (Чановский район); г – участок а/д 1151 км а/д «М-51» - Барабинск (Барабинский район)

Обобщая анализ многочисленных исследований особенностей развития деформаций морозного пучения на автомобильных дорогах [8, 38, 110] можно сделать вывод, что пучины по природе проявления неоднородны. Неоднородность заключается в наличие на автомобильных дорогах участков с равномерным и неравномерным пучением конструкции дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна (рисунок 1.3). Проявление деформаций, в виде разрушения покрытия автомобильной дороги, происходит на участках с неравномерным пучением. Если для участков полного разрушения (рисунок 1.4) решение

очевидно – переустройство рабочего слоя земляного полотна и устройство новой дорожной одежды, то участки с равномерным пучением остаются потенциально опасными в плане развития будущих деформаций. На таких участках из года в год пучины проявляются в новых местах, что вынуждает нести ежегодные расходы на замену рабочего слоя земляного полотна и переустройство дорожной одежды (рисунок 1.5). Площадь «поражения» дорожной одежды на них постепенно увеличивается.



Рисунок 1.5 – Участки фрагментарного переустройства дорожной одежды

Для таких участков необходимы исследования, направленные на стабилизацию деформативной способности грунтов земляного полотна эксплуатируемых пучиноопасных участков автомобильных, без переустройства конструкции дорожной одежды, при первых проявлениях пучин.

Для дальнейших исследований, направленных на стабилизацию деформативной способности грунтов земляного полотна эксплуатируемых автомобильных дорог на участках распространения процессов пучинообразования изначально необходимо определить основные факторы, влияющие на развитие описанных выше деформаций.

1.2 Факторы возникновения морозного пучения в земляном полотне автомобильных дорог

Образование в земляном полотне автомобильных дорог пучин, превышающих нормативные требования [76], возможно при одновременном сочетании трех основных факторов:

- 1) промерзание грунта земляного полотна под конструкцией дорожной одежды на глубину $\geq 0,5$ м (глубокое промерзание);
- 2) интенсивное влагонакопление, при котором максимальная относительная влажность грунта рабочего слоя земляного полотна: $W_{max} \geq 0,75W_L$;
- 3) наличие пучинистых грунтов в рабочем слое земляного полотна.

Вышеперечисленные факторы образования пучин напрямую или косвенно связаны с водно-тепловым режимом (ВТР) земляного полотна и физико-химическими процессами, протекающими в слагающих его грунтах при промерзании и оттаивании.

ВТР земляного полотна автомобильных дорог формируется в условиях теплообмена с окружающей средой и зависит от многочисленных факторов: климатического, литологического, гидрогеологического, геоморфологического и инженерного характера [30, 40, 101]. Не касаясь влияния каждого из этих факторов на изменение водно-теплого режима, ограничимся рассмотрением основных его составляющих, приводящих к процессам промерзания и пучения грунтов земляного полотна.

В составе всех видов грунтов содержится вода различного фазового состояния. В зависимости от состава, строения и энергетического уровня она находится в сложном взаимодействии с минеральным скелетом, обменными ионами и растворенными веществами, образуя физико-химические и физико-механические (по П.А. Ребиндеру) связи со скелетом грунта. Гидратация грунтовых частиц приводит к тому, что жидкая фаза обладает свойствами ионного, молекулярного и коллоидного растворов [86].

В соответствии с современными представлениями воду в грунтах при температуре выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ подразделяют на следующие категории: свободная вода – гравитационная и капиллярная; связанная вода – пленочная и гигроскопическая; водяной пар.

Одной из форм свободной воды является гравитационная вода, перемещающаяся в грунтах под влиянием силы тяжести. Она движется при наличии разности напоров – градиента давления. Эта вода обнаруживается в грунтах при их полном водонасыщении.

С грунтовыми водами гидравлически связана капиллярная, заполняющая частично или полностью поры грунта на некоторую высоту от уровня грунтовых вод – кайму капиллярного поднятия и имеющая поверхность, ограниченную вогнутыми менисками. В основе капиллярного механизма движения влаги лежат молекулярные силы, действующие как между молекулами жидкости, так и во взаимодействии ее с твердым телом. Капиллярная вода воспринимает напряжения сжатия и растяжения, но в отличие от связанной не оказывает сопротивления касательным усилиям и, следовательно, не обладает структурным сцеплением.

Под связанной водой понимают воду, испытывающую влияние силового поля минеральных частиц и удерживающуюся в их зоне электромолекулярным притяжением, превосходящим у поверхности частиц силу тяжести в десятки тысяч раз [68].

Энергия молекулярного притяжения воды проявляется на весьма коротком расстоянии, соизмеримом с радиусом глинистых фракций, но не превышающем $0,25\text{-}0,5\text{ мкм}$ [110].

Связанную воду подразделяют на два вида: прочносвязанную и рыхлосвязанную с толщиной полимолекулярного слоя до $0,35\text{ мкм}$. Однако провести четкую границу между этими категориями воды весьма затруднительно. В настоящее время процессы связывания воды в грунтах трактуются на основе представлений об активных центрах поверхности минеральных частиц, которые оказывают влияние на структуру воды и обуславливают ее энергетическую неоднородность и основные категории.

Выделяя в зависимости от энергетического уровня три вида прочносвязанной и два вида рыхлосвязанной воды, Е. М. Сергеев [88] указывает, что в начальной стадии гидратации молекулы воды не образуют на поверхности частиц монослоя, а располагаются отдельными группами у наиболее активных ее центров.

Способность к образованию сплошного слоя проявляется лишь в последней стадии формирования прочносвязанной воды.

Прочносвязанная вода тождественна, по А. А. Роде [67], гигроскопической воде. По своим физическим свойствам она обладает избытком энергии активации, близка к упругому твердому телу, так как имеет плотность больше единицы, не замерзает и способна производить расклинивающее давление между диффузными оболочками коллоидных частиц грунта [26]. Молекулы прочносвязанной воды не обладают подвижностью, поэтому последняя перемещается, только переходя в пар. Эта вода не играет самостоятельной роли в пучинообразовании.

Рыхлосвязанная, или, по А. Ф. Лебедеву [59], пленочная вода удерживается в сфере влияния частиц силами молекулярного притяжения в сотни ньютонов на 1 см². Обладая малой энергией активации [59], такая вода относительно подвижна; в зависимости от толщины пленки температура замерзания ее может быть более низкой, чем у свободной воды.

Водяной пар образуется в грунтах за счет испарения прежде всего воды капиллярной зоны. Парообразная влага перемещается под влиянием дефицита упругости паров, возникающего в результате колебаний температуры грунта [75]. Миграция парообразной влаги в большей степени проявляется при малом влагосодержании грунта [12, 68], причем основная роль в пучинообразовании отводится паропроницаемости промерзшего грунта. По данным В. П. Титова [97], льдонакопление в грунте имеет место в том случае, если его проницаемость недостаточна для полной передачи пара в атмосферу, т. е. при проницаемости грунта, не превышающей 10 мкм, что соответствует коэффициенту фильтрации 8,6 м/сутки. Однако и в этих условиях грунты, как правило, не выходят за пределы категории слабопучинистых.

Большинство ученых отводят незначительную роль парообразной влаге в процессе пучинообразования и признают перенос этой фазы воды лишь в качестве одного из факторов теплопередачи [68, 109].

По результатам анализа научно-технической литературы, следует отметить, что большинство ученых [40, 65, 94] сходятся во мнении, что возникновение морозного пучения грунтов – это совокупность сложных многофакторных процессов. Однако, многолетнее изучение некоторых из этих процессов позволило ученым на данном этапе сформулировать ряд общих положений, которые могут быть приняты в исследовании как исходные.

Первым из них, является фундаментальное положение о перераспределении влаги в промерзающих грунтах, сформулированное Н. А. Цытовичем [107], как «принцип миграции». В настоящее время нет необходимости доказывать это положение, нашедшее всеобщее признание в научном мире на основе экспериментальных работ многочисленного ряда исследователей. Не вызывает возражений и ведущая роль криогенной миграции в процессе пучения.

Актуальность и сложность решения этой проблемы заключаются в выявлении методов количественной оценки влагонакопления в различных литологических разностях грунта, что связано с изучением кинетических основ, механизма и области движения отдельных категорий и фаз грунтовой воды в условиях изменения температурного режима и физико-химических параметров грунтовой среды.

Второе исходное положение касается места развития деформаций пучения. Согласно этому положению, процесс пучения протекает в некотором слое грунта – зоне промерзания, характеризуемой интервалом изменения отрицательной температуры, экстремальные значения которой определяют начало и конец пучения. Наличие зоны одновременного пучения грунта неоспоримо доказывает, что избыточное льдовыделение обусловлено миграцией влаги в этой зоне. Так, согласно данным Л. В. Чистотинова [110], величина потока внутри зоны промерзания может достигать 50 % и более от общего его значения на границе

промерзания. Таких же величин, по данным автора [110], достигало пучение отдельных горизонтов мерзлого грунта

В том, что процесс пучения протекает выше границы промерзания, характеризующейся началом кристаллизации воды, убеждают результаты исследований многих авторов [5, 67, 109]. Такое утверждение не вызывает сомнения в настоящее время. Вопрос может быть поставлен лишь в аспекте уточнения количественной значимости избыточного льдовыделения в зависимости от гидротермических условий зоны промерзания грунта различного литологического состава.

Следует отметить, что в расчетах характеристик пучения это положение пока не находит широкого применения, что прежде всего объясняется слабой изученностью количественных соотношений и критериев в зоне промерзания. В этой связи особого внимания заслуживает исследование Н.А. Пузакова [40], который впервые в методе расчета влагонакопления учел динамику перераспределения незамерзшей воды.

Третьим исходным положением является то немаловажное обстоятельство, что процесс пучения любого грунта неизменно сопровождается консолидацией минеральных частиц в подстилающем талом слое, приводящей к внутриобъемной усадке грунта. Компрессионная усадка грунта есть результат гидродинамических процессов промерзающей грунтовой среды, связанных с перераспределением влаги у фронта промерзания и избыточным льдовыделением. В зависимости от начальной влажности грунта величина усадки может колебаться от нескольких до 100 % относительно величины пучения, а в отдельных случаях способна даже превысить последнюю [68], что подтверждается исследованиями по изменению микроструктуры глин при промерзании [109].

На перемещение минеральных частиц в условиях роста кристаллов льда в промерзающей породе в общих чертах указывали многие исследователи [3, 47, 108]. Наиболее детальные исследования этого вопроса провел А. М. Пчелинцев [79].

Основываясь на вышеизложенных положениях, можно сделать вывод, о том, что в процессе пучения ведущая роль отводится криогенной миграции влаги. Именно криогенную миграцию влаги в зону промерзания можно назвать одним из основных факторов возникновения морозного пучения в земляном полотне автомобильных дорог. Следовательно, для дальнейшей разработки концепции и способа предотвращения морозного пучения необходимо рассмотреть особенности и механизмы влагопереноса в промерзающих грунтах земляного полотна.

1.3 Особенности и механизмы влагопереноса в промерзающих грунтах

Если в несвязных крупнозернистых грунтах (пески, крупнообломочные породы с песчаным заполнителем) механизм пучения может быть представлен простейшей моделью увеличения объема гетерогенной замкнутой системы за счет расширения (при фазовом переходе) одного из компонентов (воды), то в связных грунтах механизм пучинообразования обусловлен сложным комплексом процессов тепловлагообмена, доминирующая роль в которых принадлежит кинетике и характеру перераспределения влаги в промерзающем грунте. Поэтому при изучении процессов пучения и льдовыделения в тонкодисперсных грунтах главное внимание исследователей направлено на познание динамики криогенной миграции влаги. Однако чрезвычайная сложность проявления этого процесса в условиях его зависимости от многочисленных факторов, фазовых превращений и трансформации различных модификаций воды до настоящего времени не позволяет создать единую достаточно полную и количественно обоснованную теорию влагопереноса в промерзающих грунтах.

За период изучения данной проблемы учеными выдвинуто множество теорий и концепций, подробные обзоры по которым даны в работах [59, 68, 109]. В работе [68] отмечены основные физические и физико-химические аспекты наиболее популярных теорий, определяющие процессы, условия и динамику

перераспределения влаги в грунтах. С некоторыми допущениями они могут быть подразделены на четыре группы.

1. Гидрокинетические – молекулярные особенности и изменения структуры капиллярной и пленочной воды при взаимодействии с минеральными частицами в условиях формирования гидротермических градиентов в грунте.

2. Электрохимические – адсорбция органоминеральных частиц, обменная адсорбция ионов внутри фаз и на поверхности их раздела, гидратация, осмос в гидратационных пленках частиц, изменение электрохимических потенциалов частиц, термоосмос.

3. Кристаллоадсорбционные – кристаллизация воды, приводящая к градиенту давления в системе лед – вода, адсорбция пленок воды кристаллами льда.

4. Структурообразующие – коагуляция, агрегирование и диспергирование частиц, ведущие к изменению свободной поверхностной энергии, компрессионная усадка, разуплотнение агрегатов, образование криогенной текстуры.

Находясь в тесной взаимосвязи между собой, изменяя и дополняя один другого, указанные процессы и явления создают сложный и многоступенчатый механизм перераспределения влаги в промерзающем грунте.

Наиболее оригинальны и значимы в этом направлении теоретические исследования А.А. Ананяна, М.Н. Гольдштейна, И.А. Тютюнова, П.Ф. Швецова, позволившие с позиции физикохимии поверхности твердого тела, молекулярно-кинетических представлений и теории необратимости процессов дать основу для дальнейших разработок рассматриваемой проблемы.

Следует различать две области перераспределения влаги, характеризующие различные механизмы ее движения и стадийность формирования процессов льдовыделения и деформируемости грунта.

К первой области относится зона немерзлого грунта, примыкающая к границе промерзания – буферная зона миграции влаги. В условиях достаточно высокого водонасыщения грунта движение влаги в этой зоне в основном

обеспечивает капиллярный механизм, который приводится в действие градиентом влажности, образуемым в результате нарушения на границе промерзания равновесного состояния жидкой фазы. Глубина буферной зоны зависит от многих факторов: от дисперсности грунта, обуславливающей его физические свойства, в частности, влагопроводность, капиллярность, влагосодержания, определяемого источниками питания, скорости кристаллизации воды и всасывающей способности (кинетики) промерзающего грунта.

В условиях, когда кайма капиллярного поднятия не достигает границы промерзания, в буферной зоне действует пленочный механизм миграции, также вызываемый градиентом влажности. По значимости влияния на пучение этот механизм занимает промежуточное место между капиллярной миграцией и миграцией воды в парообразном состоянии. По существу, буферная зона служит балансирующим источником, восполняющим часть кристаллизующейся влаги на границе промерзания.

Второй областью миграции является зона промерзания, где движение воды по пленкам осуществляет пленочно-кристаллизационный механизм.

Согласно современным представлениям физикохимии поверхностных явлений многообразие свойств влажных тонкодисперсных систем обуславливается комплексом факторов, к которым относятся природа и поверхность твердой составляющей грунта, состав и концентрация порового раствора, гравитация, поровое пространство, а главное – состав и строение межфазных адсорбционных слоев. Все явления, связаны с кинетикой переноса воды – капиллярные, миграционные, осмотические, адсорбционные, термопереносные и др. В конечном итоге они порождаются минеральной составляющей грунта и проявляются при взаимодействии с поровой водой (объемной фазой, по И. А. Тютюнову [100]) посредством этих адсорбционных слоев. Электрокинетическая теория влагопереноса в промерзающий грунт подробно описана в работах [68, 109].

Помимо отмеченных явлений, в формировании механизма и кинетики движения воды в зоне промерзания участвуют и другие процессы. Уже

отмечалось, что понижение температуры грунта следует рассматривать как основной фактор формирования кинетических основ миграции воды. Понижение температуры вызывает приращение свободной энергии минеральной части [109, 124], от которой зависят обменно-адсорбционная способность и количество воды, удерживаемой поверхностными силами. Возрастание свободной энергии объясняется тепловой трансформацией запасов потенциальной энергии системы, частично идущей на повышение энергетического уровня кристаллов льда. Свободная энергия тем больше, чем выше твердость минеральных частиц, которая, в свою очередь, зависит от температурного деформирования последних, формирующего микропути движения воды [68]. Вместе с тем некоторые грунты при охлаждении подвергаются объемному сжатию (контракции), связанному с отдачей тепла при межслоевой гидратации ионов в минералах с подвижной структурой (типа монтмориллонита), что способствует более плотной упаковке системы [75, 104].

Другим обстоятельством, характеризующим миграцию воды, является самопроизвольный (термодинамически неустойчивый) процесс коагуляции коллоидных частиц в зоне промерзания.

Согласно теории устойчивости и коагуляции коллоидов [27], разработанной Б. В. Дерягиным совместно с Л. Д. Ландау, скорость коагуляции возрастает с увеличением концентрации растворов. В промерзающих грунтах процесс интенсивной коагуляции протекает под влиянием обменных катионов, представленных обычно ионами водорода, щелочных и щелочноземельных металлов [63, 110]. Способствуя дифференциации компонентов грунта и образованию микротрещин и микроагрегатов, процесс коагуляции, напротив, вызывает спад свободной энергии, поскольку с уменьшением поверхности раздела фаз ее запас в системе уменьшается. Это приводит к дегидратации минеральных частиц с последующим переходом воды в лед.

Таким образом, в результате сложной взаимосвязи процессов, протекающих в зоне промерзания, закон изменения свободной энергии имеет нелинейный характер: интенсивная коагуляция и агрегирование вызывают спад возросшей в

начальной стадии охлаждения грунта свободной энергии минеральных частиц, что приводит, с понижением температуры, к уменьшению потока пленочной воды.

В стадии начального понижения температуры грунта ниже температуры начала фазового перехода, кинетика свободной воды при кристаллизации и теплообмене приводит к образованию комплекса физико-химических и механических процессов, которые условно могут быть разделены на следующие этапы [68]:

- зарождение центров кристаллизации в жидкой фазе с последующим превращением их в кристаллы сегрегационного льда;

- рост кристаллов льда в линзы и прослойки при одновременном нарушении равновесного состояния поровой воды и формировании капиллярно-пленочного механизма ее перераспределения в смежных с кристаллами льда объемах грунта буферной зоны;

- образование гидротермически градиентной зоны промерзания и формирование в ней пленочного механизма миграции влаги;

- внутриобъемная (компрессионная) усадка грунта в буферной зоне вследствие дифференциации твердой и жидкой его фаз, выраженной в перемещении минеральной части в сторону противоположную росту кристаллов льда и движению к ним воды;

- разуплотнение минерального скелета промерзающего грунта и его перемещение вверх (пучение) одновременно с усадкой грунта буферной зоны и кристаллизацией пленочной воды в зоне промерзания.

В соответствии с данной концепцией, согласно которой движение воды в талом грунте осуществляет капиллярно-пленочный механизм в результате образования градиента концентрации влаги, обоснованно предположить, что ее движение одновременно подчиняется как закону Дарси, так и основному закону миграции (капиллярной влагопроводности), установленному Е. Букингом. В этом случае одним из основных показателей, характеризующий перенос влаги при

ламинарном и миграционном потоке является коэффициент влагопроводности талого грунта.

Учитывая, однако, что силовой эффект влагопереноса обусловлен энергетическими потенциалами зоны промерзания, где и формируется механизм «всасывания» воды, правомерно заключить, что скорость перемещения воды в буферной зоне будет зависеть, при прочих равных условиях, от скорости ее движения в зоне промерзания.

Фазовые переходы поровой воды, приводящие к образованию сегрегационного льда флотационного происхождения, изменению гетерогенной грунтовой системы в зоне промерзания, и, вместе с тем, нарушающие равновесное состояние жидкой фазы в буферной зоне, вызывают процесс пучинообразования лишь в его начальной стадии. Однако этим не ограничивается их роль в процессе пучения, поскольку они определяют также энергетический уровень жидкой фазы, кинетику и условия ее пленочной миграции в зоне промерзания.

Доминирующая стадия процесса пучинообразования заключается в перераспределении в зоне промерзания пленочной воды, способной при кристаллизации в замкнутом объеме грунта вызвать развитие упругопластических деформаций, а следовательно, и увеличение его промерзающего массива.

Процесс влагонакопления в промерзающем грунте будет протекать до тех пор, пока на пути миграции действует градиент концентрации влаги, поддерживающийся в результате перехода у границы промерзания части свободной воды в пленочную. По мере уменьшения толщины пленок воды диффузного слоя с понижением отрицательной температуры удельный поток воды в промерзающем грунте будет уменьшаться.

Рассмотрев особенности процесса морозного пучения и факторы, влияющие на деформирование земляного полотна, а также установив, что в процессе пучения ведущая роль отводится криогенной миграции влаги за счет влагопереноса в промерзающих грунтах различного генезиса, можно сделать следующие промежуточные выводы:

- для снижения деформативности конструкции дорожной одежды эксплуатируемых автомобильных дорог на участках распространения процессов пучинообразования перспективно использовать способы регулирования водно-теплового режима земляного полотна и влагопроводных свойств грунтов рабочего слоя земляного полотна;

- для потенциально опасных, с точки зрения пучения, участков, предпочтение следует отдавать способам, не требующим переустройства конструкции дорожной одежды автомобильной дороги.

1.4 Способы регулирования водно-теплового режима и влагопроводных свойств грунтов земляного полотна

В настоящее время, в дорожном строительстве, согласно нормативно-технической документации [90], по характеру и степени увлажнения в зависимости от источников увлажнения местность подразделяется на три типа.

Первый тип местности по характеру и степени увлажнения – это сухие места с источником увлажнения от атмосферных осадков. В данном типе местности обеспечен поверхностный водоотвод, а грунтовые воды не оказывают влияние на увлажнение верхней толщи грунтов.

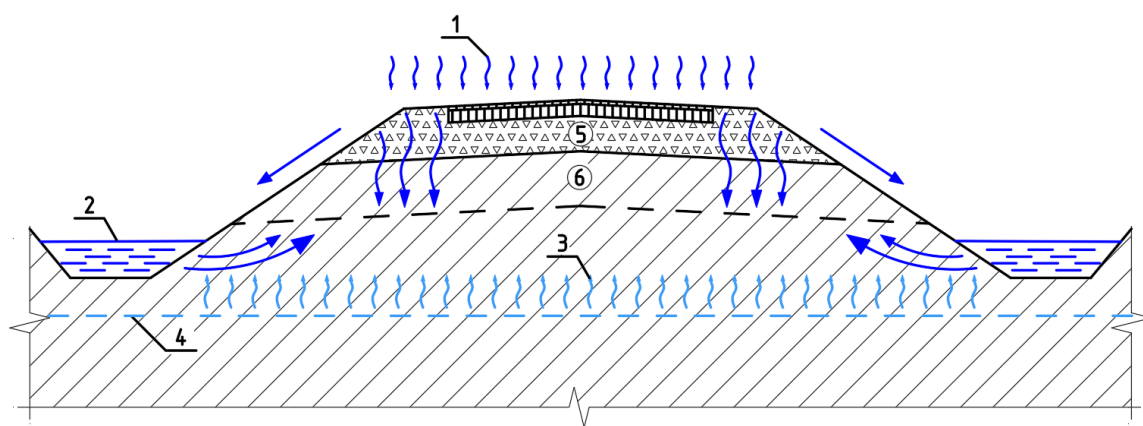
Второй тип местности по характеру и степени увлажнения – это сырые места, источником увлажнения, которых служат кратковременные стоящие (до 30 суток) поверхностные воды и атмосферные осадки. Поверхностный сток не обеспечен, при этом, грунтовые воды не оказывают влияния на увлажнение верхней толщи грунтов.

Третий тип местности по характеру и степени увлажнения – мокрые участки с постоянным избыточным увлажнением. В качестве источников увлажнения могут служить грунтовые или длительно стоящие (более 30 суток) поверхностные воды, а также атмосферные осадки. Для данного типа местности грунтовые или

длительно стоящие поверхностные воды оказывают влияние на увлажнение верхней толщи грунтов.

С точки зрения опасности возникновения и протекания процессов морозного пучения на автомобильных дорогах, из перечисленных типов местности по характеру и степени увлажнения является – третий. При этом, третьему типу местности соответствует третья расчетная схема увлажнения грунта рабочего слоя земляного полотна автомобильной дороги [76, 90]. Расчетная схема увлажнения является одним из важнейших факторов при назначении мероприятий по регулированию водно-теплового режима земляного полотна и влагопроводных свойств его грунтов.

Третья расчетная схема увлажнения, по аналогии с третьим типом местности, является наиболее опасной, с точки зрения возникновения и протекания процессов морозного пучения на автомобильных дорогах. Следовательно, далее в исследовании, в качестве основной, будет рассматриваться третья расчетная схема увлажнения рабочего слоя земляного полотна (рисунок 1.6).



1 – атмосферные осадки; 2 – вода в канавах (длительно стоящие поверхностные воды); 3 – увлажнение грунтовыми водами; 4 – уровень грунтовых вод; 5 – конструкция дорожной одежды; 6 – рабочий слой земляного полотна

Рисунок 1.6 – Иллюстрация третьей расчетной схемы увлажнения рабочего слоя земляного полотна автомобильной дороги

Анализ нормативной и научно-технической литературы [14, 26, 40] показывает, что существует большое количество эффективных способов

регулирования водно-теплового режима и влагопроводных свойств грунтов земляного полотна. На рисунке 1.7 приведены основные из них.

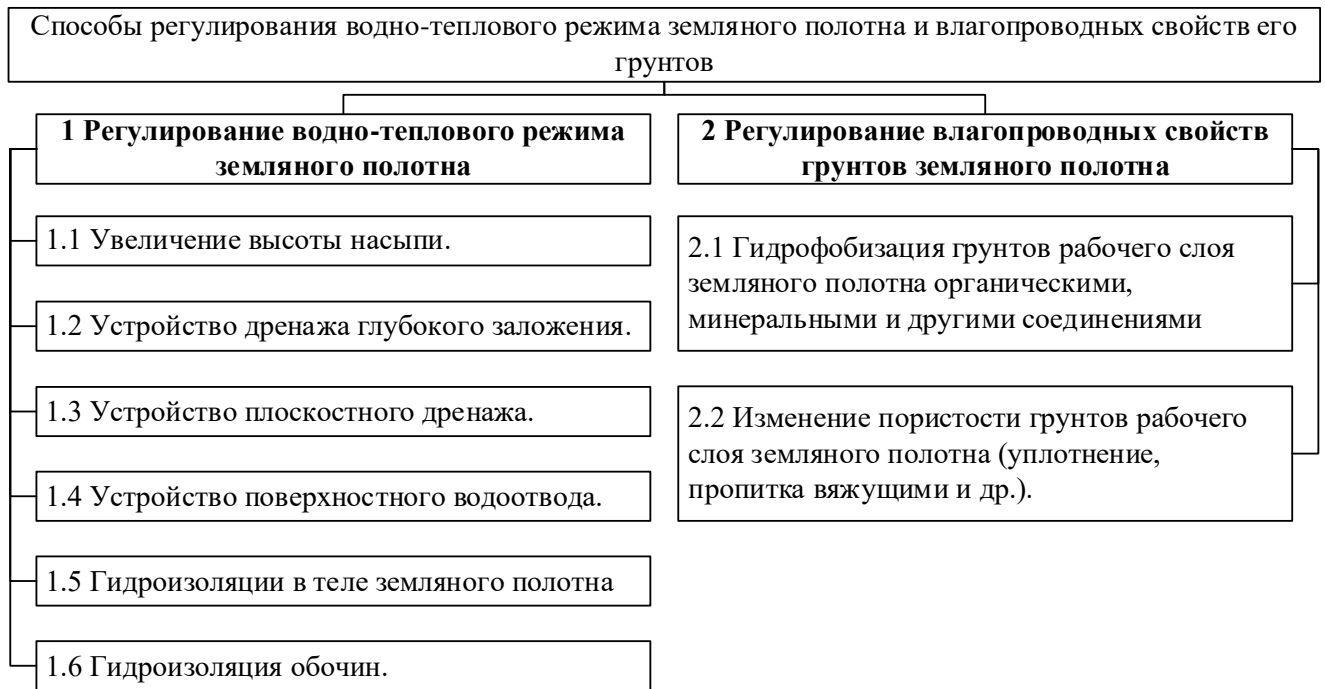


Рисунок 1.7 – Основные способы регулирования водно-теплового режима и влагопроводных свойств грунтов земляного полотна

Способы устройства поверхностного водоотвода (1.4) эффективны при 1 и 2 расчетных схемах увлажнения рабочего слоя земляного полотна автомобильной дороги. Гидроизоляция обочин (1.6) применима, только в случае увлажнения земляного полотна атмосферными осадками (1 расчетная схема увлажнения).

Способы устройства дренажа глубокого заложения (1.2) малоэффективны для равнинного рельефа местности Западно-Сибирской низменности и при близком залегании грунтовых вод.

Способы увеличения высоты насыпи (1.1) реализуемы только при новом строительстве или реконструкции автомобильной дороги с разборкой существующей конструкции дорожной одежды.

Дренирование избыточной воды путем устройства плоскостного дренажа или дренирующего слоя (1.3) – распространенный способ регулирования водно-теплового режима земляного полотна, однако его реализация также возможна только при строительстве или реконструкции автомобильной дороги с разборкой существующей конструкции дорожной одежды.

Способы устройства гидроизоляции в теле земляного полотна (1.5) могут применяться для различных гидрогеологических условий, в том числе при близком залегании грунтовых вод. Осуществление способов возможно при новом строительстве или реконструкции автомобильной дороги с разборкой дорожной одежды, только если не используются иные способы, позволяющие реализацию без переустройства конструкции дорожной одежды.

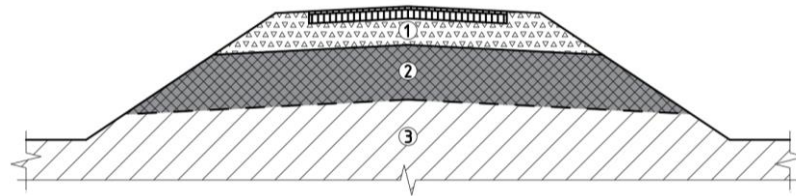
Гидрофобизация грунтов рабочего слоя земляного полотна органическими, минеральными или высокомолекулярными соединениями, и другими материалами (2.1), обеспечивающими гидрофобность грунтов может применяться при любой расчетной схеме увлажнения. При этом, эффективность способа достигается только при перемешивании грунта с гидрофобизатором и его дальнейшим уплотнением, что можно осуществить только при новом строительстве или реконструкции автомобильной дороги с разборкой существующей конструкции дорожной одежды.

Эффективными способами являются, связанные с изменением пористости (уплотнение, пропитка вяжущим и др.) грунтов рабочего слоя земляного полотна (2.2). Данные способы подходят для любой расчетной схемы увлажнения. Особенностью данных способов, является возможность изменения свойства грунтов рабочего слоя земляного полотна без переустройства конструкции дорожной одежды с помощью инъецирования.

Большинство из представленных выше способов реализуются только при новом строительстве или реконструкции с полным переустройством дорожной одежды. Решения, связанные с переустройством дорожной одежды, является дорогостоящими и, следовательно, их экономическая эффективность для эксплуатируемых участков земляного полотна автомобильных дорог не всегда обоснована.

Часть из рассмотренных способов регулирования водно-теплового режима земляного полотна применима только для условий 1 и 2 расчетных схем увлажнения, что не подходит для рассматриваемых условий увлажнения (3 расчетная схема увлажнения).

Исходя из проведенного анализа, для земляного полотна эксплуатируемых участков автомобильных дорог в условиях третьей расчетной схемы увлажнения, наиболее подходящими являются способы изменения свойств (пористости) грунтов рабочего слоя земляного полотна (рисунок 1.8) без демонтажа существующих конструкций.



1 – конструкция дорожной одежды; 2 – рабочий слой из грунта с измененными свойствами; 3 – грунты земляного полотна и основания

Рисунок 1.8 – Общая схема земляного полотна с измененными свойствами грунта рабочего слоя земляного полотна

Далее в исследовании необходимо рассмотреть существующие способы изменения свойств грунтов для эксплуатируемых участков земляного полотна автомобильных дорог без демонтажа и переустройства конструкции дорожной одежды.

1.5 Способы изменения свойств грунтов эксплуатируемого земляного полотна

Для дальнейшего анализа существующих способов изменения свойств грунтов эксплуатируемого земляного полотна, необходимо определить рассматриваемые граничные условия по грунтам.

Согласно классификации, представленной в СП 34.13330 [90], грунты по степени пучинистости делятся на пять групп (I...V). Наиболее пучиноопасные грунты (чрезмерно пучинистые) представлены в V группе с относительным морозным пучением более 10 %. В данной группе представлены глинистые грунты от супеси пылеватой до суглинка легкого пылеватого. Грунты V группы

повсеместно распространены на значительной части территории Западной Сибири, в частности, и на территории Новосибирской области [34, 93].

Основываясь на вышесказанном, далее в исследовании, будут рассмотрены способы, возможные к применению для глинистых грунтов с числом пластичности от 0,01 до 0,13, в том числе относящихся по гранулометрическому составу к пылеватым.

1.5.1 Способы укрепления и уплотнения грунтов

Большинство широко используемых при строительстве способов укрепления и уплотнения грунтов [46, 62] практически нереализуемы без полного переустройства дорожной одежды. В связи с этим, в дальнейшем будут рассмотрены способы укрепления и уплотнения грунтов без нарушения их сложения (в конструкции), в соответствии с классификацией, представленной на рисунке 1.9 [2, 10, 14].

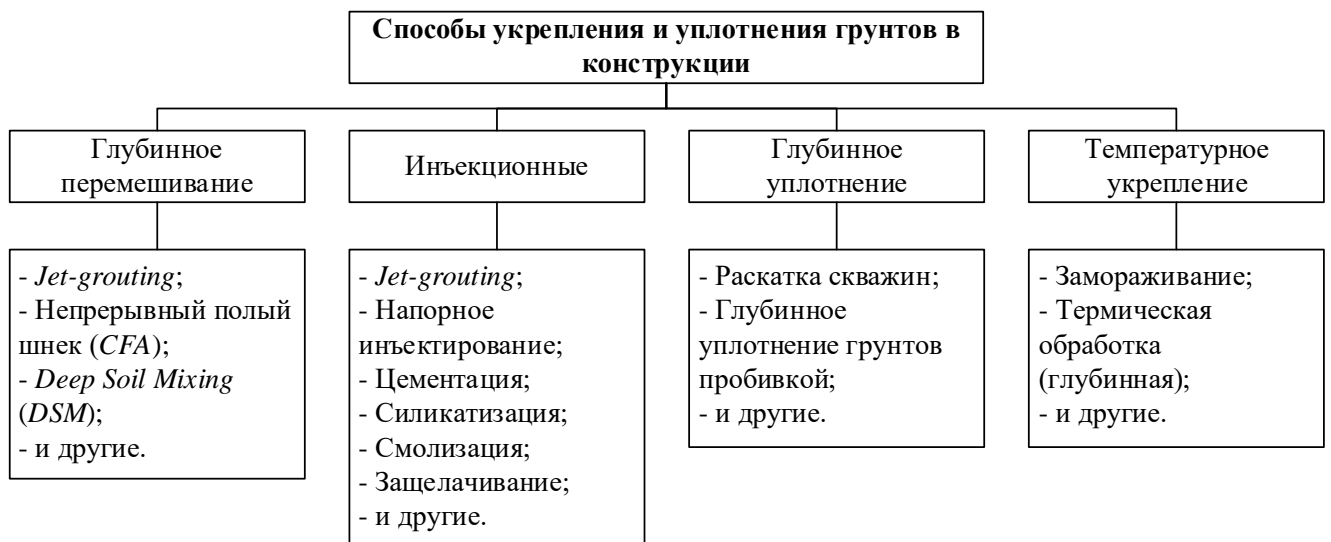


Рисунок 1.9 – Применяемые способы укрепления и уплотнения грунтов без разбора конструкции дорожной одежды

На сегодняшний день наблюдается активное развитие способов, основанных на технологии глубинного перемешивания грунтов [6, 35, 61]. Способы глубинного перемешивания грунтов эффективны при слабых

обводненных грунтах. С помощью данных способов в грунтовых массивах создаются грунтоцементные колонны диаметром от 0,5 до 1,5 м и более. Для реализации способов глубинного перемешивания грунтов, как правило, в качестве основных материалов используется: вода, цемент и местный грунт [25]. При этом различия заключается в технологических подходах создания грунтоцементных колонн.

Одним из самым распространенных способов глубинного перемешивания грунтов является – *Jet-grouting*. Данный способ заключается в нагнетании под высоким давлением (до 40-50 МПа) цементного раствора в скважину (диаметром 100-130 мм) для разрушения и одновременного перемешивания частиц грунта с цементным раствором. В ходе такого перемешивания после затвердевания цементного раствора образуется грунтоцемент с высокими деформационно-прочностными и противодиффузионными характеристиками (в сравнении с исходным грунтом). Укрепленный таким способом массив грунта называется «грунтоцементным элементом» или «грунтоцементной колонной» и имеет диаметр от 0,6 до 2,0 м.

Также, к способам глубинного перемешивания грунтов относятся *CFA* (*Continuous Flight Auger*) и *DSM* (*Deep Soil Mixing*).

Технология *CFA*, также известная как непрерывный полый шнек (НПШ) – это процесс устройства буронабивных колонн с помощью специального шнекового инструмента, через который, по достижению требуемой глубины и в процессе извлечения, подается цементный раствор для заполнения скважины. Подача раствора осуществляется под давлением с помощью бетононасоса, благодаря чему происходит дополнительное уплотнение стенок и забоя скважины.

Технология *DSM* (глубинное перемешивание грунта) заключается в изготовлении грунтоцементных колонн при помощи специального бурсмесительного инструмента, состоящего из полый штанги и рабочего органа. При этом происходит механическое перемешивание грунта с цементным раствором. Перемешивание осуществляется при помощи лопастей, а цементный

раствор подается через полые штанги к отверстиям на конце рабочего органа. Вращательное бурение и нагнетание цементного раствора происходит одновременно. В отличие от струйной цементации диаметр грунтоцементной колонны гарантируется размером лопастей и составляет 0,25-1,20 м.

В нашей стране и за рубежом кроме широкого распространение буросмесительных способов для усиления оснований зданий и сооружений имеется положительный опыт его использования и для линейных транспортных сооружений (в том числе автомобильных дорог). Однако, использование буросмесительных способов для изменения свойств грунтов в рабочем слое эксплуатируемого земляного полотна не представляется возможным из-за высоких давлений нагнетания раствора, что приведет к деформациям конструкции дорожной одежды. В связи с чем, далее в исследовании буросмесительные способы не рассматриваются.

Способы глубинного уплотнения основываются на создании в грунтовых массивах скважин путем вытеснения (уплотнения) грунта в окружающее пространство скважины без его удаления на поверхность.

Глубинное уплотнение грунтов пробивкой предполагает создание скважин в грунтовом массиве с помощью ударных снарядов. Под воздействием сильных динамических нагрузок происходит вытеснение грунта вокруг. Полученные скважины заполняются инертными материалами (щебень, щебеночно-песчаная смесь и т.д.) или местным грунтом с уплотнением [57].

Одним из основных способов глубинного уплотнения грунта является раскатка скважин. Способ подразумевает создание в грунтовом массиве набивных свай в раскатанных скважинах. При этом, процесс образования скважины выполняется без выемки грунта в отличие от шнекового бурения. Образованные раскаткой скважины могут заполняться как инертными материалами (песок, щебнем и т.д.), так и низкомарочными бетонными смесями или грунтово-цементными растворами [57].

Существенными недостатками, описанных выше способы глубинного уплотнения являются высокая трудоемкость и относительно малая

эффективность, в рамках решения поставленной задачи. Необходимо отметить, что опыт применения данных способов в автодорожном строительстве практически отсутствует. Следовательно, далее в работе способы глубинного уплотнения также не рассматриваются.

Все способы температурного укрепления грунтовых массивов основываются на повышении структурной прочности грунта за счет воздействия низких или высоких температур.

Термическое укрепление (обжиг) грунтов [31] применяется для улучшения физико-механических свойств связных грунтов. Обжиг применим для незаторфованных грунтов с содержанием глинистых частиц не менее 7 % и с коэффициентом водонасыщения менее 0,8.

Обжиг грунта осуществляется через пробуренные без обсадки скважины с помощью специального оборудования. Для термической обработки может использоваться природный газ, который сжигается в скважине с подачей холодного сжатого воздуха для поддержания горения и регулирования температуры. В результате обжига горячие газы под избыточным давлением проникают в поры грунта, обжигая его в радиусе 0,8 – 1,5 м за 5 – 10 суток.

К достоинствам термического укрепления (обжига) грунтов можно отнести коренное изменение свойств (укрепление) грунтов в результате воздействия необратимых физико-химических процессов в его структуре. Это позволяет значительно повысить его физико-механические характеристики.

Труднопреодолимыми препятствиями реализации способов термического укрепления являются исключительно большая теплоемкость и малая теплопроводность грунта. Для преодоления отмеченных особенностей грунта требуется значительная затрата тепловой энергии в течение длительного времени. Для отдаленных районов размеры транспортных расходов для доставки топлива и материалов, применяемых при обжиге, являются важной причиной ограниченного использования термоукрепленных грунтов в практике строительства. Применению способов термического укрепления грунтов в дорожном

строительстве также препятствует отсутствие нормативной документации, обобщающей и регламентирующей технологию производства работ.

К способам температурного укрепления также относят искусственное понижение отрицательных температур. Данный способ применяют, как правило, для восстановления многолетнемерзлых грунтов в основаниях сооружений [106]. Для охлаждения многолетнемерзлых грунтов и для восстановления мерзлого состояния грунтов оснований, протаявших во время эксплуатации сооружений, широко применяют автоматические самонастраивающиеся охлаждающие установки (СОУ). Однако, опыт использования искусственного понижения температуры грунтов для борьбы с морозным пучением в условиях Западной Сибири отсутствует.

С учетом вышесказанного использование температурных способов укрепления грунтов является нерациональным и в настоящей работе в дальнейшем не рассматривается.

Инъекционные способы укрепления грунтов включают в себя множество способов с разнообразными материалами и схемами работы, которые могут применяться для решения многих инженерных задач.

Процесс инъецирования основан на внедрении в грунтовый массив твердеющих растворов под давлением, что, в некоторых режимах, приводит к уплотнению окружающего грунта.

К основным способам можно отнести: напорное инъецирование, цементацию, силикатизацию, смолизацию, защелачивание и другие. При этом, с точки зрения сохранения существующей конструкции дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна, инъекционные способы являются более подходящими в сравнении с другими рассмотренными способами. Также инъекционные способы имеют ряд преимуществ, связанных с простотой используемого оборудования, относительно недорогими материалами и очень большим опытом применения в транспортном строительстве [45, 55]

Используя инъекционные способы, можно достичь изменения характеристик грунтов рабочего слоя земляного полотна или создать

водонепроницаемый слой без необходимости переустройства существующей дорожной конструкции.

Вышеприведенный анализ показал, что изменение свойств грунтов земляного полотна на глубине около трех метров от поверхности покрытия, без переустройства дорожной одежды, целесообразно выполнить способами инъектирования, с погружением наклонных инъекторов за пределами проезжей части. Следовательно, далее в исследовании, необходимо подробно рассмотреть способы инъектирования грунтов и выбрать оптимальный для решения поставленных задач.

1.5.2 Способы инъектирования грунтов

Под инъекционными способами понимается укрепление грунта, при котором искусственно (через нагнетание инъекционных растворов) создаются дополнительные прочные связи и заполняются поры между частицами грунта. Это приводит к уменьшению пористости, увеличению прочности, снижению водопроницаемости и чувствительности грунтов к изменению внешних условий, особенно к влажности [45, 69, 92].

Классификация инъекционных способов преобразования свойств грунтов представлена на рисунке 1.10.

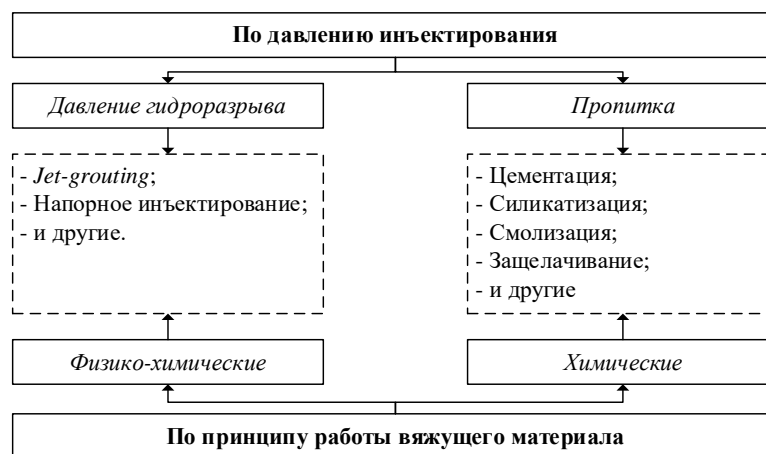


Рисунок 1.10 – Классификация инъекционных способов преобразования свойств грунтов

Инъектирование твердеющих растворов может выполняться в режиме пропитки (цементация, силикатизация, смолизация, защелачивание и другие) и гидроразрыва (*Jet-grouting*, напорное инъектирование и другие). Режим пропитки характеризуется давлением инъектирования не превышающим структурную прочность грунта. Это позволяет равномерно распределять твердеющий раствор по поровому пространству грунта без нарушения его структуры. В режиме гидроразрыва давление инъектирования превышает структурную прочность грунта. При этом происходит разрыв структуры грунта, а твердеющий раствор заполняет образованные трещины и слабые слои в массиве [45, 53].

Многочисленные решения научно-практических задач, связанных с особенностями инъектирования твердеющих растворов в режиме пропитки отражены в трудах многих отечественных и зарубежных ученых [9, 14, 88].

На сегодняшний день, инъектирование твердеющих растворов в режиме пропитки для стабилизации грунтов является общепринятым способом [119].

Для инъекционных способов укрепления грунтов в режиме пропитки, к которым относятся цементация, силикатизация, смолизация, защелачивание и другие, используется распространенное и относительно недорогое оборудование (инъекторы, насосы и др.) [53, 54]. В режиме пропитки инъектирование производится по зонам под небольшими давлениями от 0,2 до 0,6 МПа, что позволяет получить вокруг каждого инъектора закрепленный массив цилиндрической формы с радиусом от 0,2 до 0,8 м, поры которого заполнены раствором. Радиус действия одного инъектора зависит от вида грунта, его пористости и применяемых материалов. В режиме пропитки можно образовать сплошной массив из укрепленного грунта.

При напорном инъектировании в массиве грунта образуются трещины, полости и разрывы, в которые свободно проникают различные растворы на основе цементного вяжущего [2, 53, 123]. Твердеющий раствор в массиве грунта распространяется по пути наименьшего сопротивления, армируя и уплотняя слабые зоны [54, 55, 121].

Теоретические и практические обоснования различных аспектов напорного инъектирования приведено в монографии А. Камбефора [45].

При напорном инъектировании нагнетание твердеющего раствора в массив грунта производится с помощью растворонасосов по высоконапорным шлангам через инъектор, заранее погруженный в грунт.

Струйная технология укрепления грунтов (*Jet-grouting*) также выполняется в режиме гидроразрыва и описана в разделе 1.5.1.

Существенными недостатками способов инъектирования в режиме гидроразрыва, в рамках настоящего исследования, являются нарушение структуры грунта земляного полотна, неконтролируемость распределения раствора в земляном полотне и высокая вероятность выхода раствора на поверхность при небольших глубинах инъектирования.

Химические способы укрепления грунтов, такие как однорастворная, двухрастворная и газовая силикатизация, смолизация, цементация и защелачивание основаны на изменении свойств грунтов с использованием химических реагентов. Они преобразуют свойства грунтов на их естественном местоположении [87]. Эти способы основаны на взаимодействии между химическими реагентами, вводимыми в грунт, или на реакции между химическим раствором и активной частью грунта [88]. В результате образуется грунтобетонный массив с улучшенными характеристиками прочности, пористости и водонепроницаемости.

Основные характеристики грунтов, влияющие на процесс химического укрепления, делятся на две группы:

1. Первая группа включает в себя коэффициент фильтрации, плотность, пористость и естественную влажность грунта, оказывающие влияние на технологические аспекты процесса укрепления;

2. Вторая группа параметров включает показатели, которые оказывают влияние на физико-химические процессы, происходящие в грунте при его укреплении, т.е. на его способность к укреплению: уровень pH грунта и

грунтовых вод, способность грунта к поглощению, содержание в грунте карбонатов, гипса и органических веществ.

К достоинствам химических способов следует отнести широкий спектр укрепляемых грунтов, быстрый набор прочности, водонепроницаемость и другие. Кроме того, укрепленный таким образом грунт устойчив к действию агрессивных сред, замерзанию и оттаиванию.

Недостатками смолизации и защелачивания грунтов являются канцерогенность и токсичность применяемых исходных реагентов (и сопутствующих материалов) при реализации способов. Ввиду возрастания требований к защите окружающей среды и техники безопасности при производстве работ, большинство смол и сопутствующих им электролитов (кислот) в настоящее время не рекомендуется к применению. В связи с чем, в дальнейшем из химических способов рассмотрим только силикатизацию, основой которой являются экологически безвредные водные силикатные растворы, и цементацию.

Силикатизация грунтов основана на использовании силикатных растворов и их производных, которые при соединении с коагулянтom образуют гель кремниевой кислоты, цементирующей частицы грунта [77, 87]. В зависимости от водопроницаемости грунта и его химической активности используют двух- или однорастворный способ силикатизации.

Анализ научно-технической литературы показывает, что силикатизация рекомендуется для создания водонепроницаемых завес и стенок гидротехнических сооружений [1, 60, 87].

Цементация базируется на заполнении полостей, трещин и крупных пор в крупнообломочных грунтах цементными растворами. Это приводит к образованию твердых материалов, представляющих собой цементные камни с повышенной несущей способностью и прочностью.

Вышеприведенный анализ показывает, что изменение свойств грунтов земляного полотна на глубине до 3 м без нарушения структуры грунтового

массива возможно только инъектированием твердеющих растворов в режиме пропитки.

1.5.3 Вяжущие материалы для инъектирования грунтов

Для инъектирования в режиме пропитки необходимо использовать растворы или жидкие составы, консистенция которых позволяет беспрепятственное прохождение по шлангам и инъекторам. Растворы и составы для инъектирования, а также конечный результат должны соответствовать требованиям по охране окружающей среды. Способ укрепления должен обладать минимальной энергоемкостью, возможностью выполнения работ в труднодоступных местах. Под эти критерии попадают следующие растворы: цементационное молоко, силикат натрия и поливиниловый спирт. В первом случае используется экологически чистое, и широко распространенное вяжущее – цемент. Для силикатизации и ее вариантов используется водный раствор силиката натрия Na_2SiO_3 [10, 77, 87], который также соответствует требованиям по охране окружающей среды и часто применяется на территории Российской Федерации, в том числе в холодных регионах. Интересным аспектом является возможность применения поливинилового спирта для укрепления грунтов земляного полотна с использованием способа криотропного гелеобразования [92].

Земляное полотно автомобильных дорог на пучиноопасных участках в большинстве случаев сложено глинистыми грунтами, а твердеющие растворы на основе широко распространенного цемента не имеют проникающей способности в глинистых грунтах в режиме пропитки. Кроме того, цементные растворы не создают сплошного укрепления, что резко снижает гидроизолирующие функции преобразованного грунтового массива.

На сегодняшний день, криогель на основе поливинилового спирта не имеет достаточного количества исследований и их апробаций на действующих транспортных объектах, что не позволяет оценить его эффективность.

Перечисленные недостатки не наблюдаются у инъекционных растворов на основе силиката натрия. Соответственно, силикатизация является рациональным способом изменения свойств грунтов земляного полотна для снижения морозного пучения.

1.6 Цель и задачи исследования

Анализ научно-технической литературы показывает, что несмотря на широкое распространение такого процесса, как морозное пучение, в настоящее время отсутствуют обоснованные способы и методики для проектирования мероприятий по снижению пучинообразования без разбора конструкций эксплуатируемых автомобильных дорог.

В нашей стране ежегодные расходы на устранение последствий пучинообразования крайне высоки. Это связано, с неоднородностью проявления пучин, которая заключается в наличии на автомобильных дорогах участков с равномерным и неравномерным пучением грунтов рабочего слоя земляного полотна. Проявление деформаций, в виде разрушения покрытия, происходит на участках с неравномерным пучением, на которых необходимо выполнять переустройство конструкции. Участки с равномерным пучением остаются потенциально опасными в плане развития будущих деформаций. Для таких участков необходимы исследования, направленные на предупреждение и снижение величины морозного пучения до допустимых значений, без переустройства конструкции дорожной одежды, при первых проявлениях пучин.

Анализ выполненных к настоящему моменту исследований показал, что в процессе пучения ведущая роль отводится криогенной миграции влаги за счет влагопереноса в промерзающих грунтах различного генезиса. Следовательно, для снижения величины морозного пучения дорожных конструкций эксплуатируемых автомобильных дорог на участках распространения процессов пучинообразования перспективно использовать способы регулирования водно-теплового режима и

влагопроводных свойств грунтов рабочего слоя земляного полотна. При этом, для потенциально опасных, с точки зрения пучения, участков, предпочтение следует отдавать способам, не требующим переустройства конструкции дорожной одежды автомобильной дороги.

Для участков автомобильных дорог, эксплуатируемых в условиях третьей расчетной схемы увлажнения, без разбора существующей конструкции дорожной одежды и нарушения структуры грунтового массива земляного полотна целесообразно применять способ инъецирования растворов на основе силиката натрия в режиме пропитки.

Однако, для такого способа отсутствуют расчетно-теоретические обоснования, специфические для решаемых задач свойства силикатизированных грунтов, решения по мощности зоны силикатизации и так далее.

В связи с этим, целью диссертационной работы является снижение величины морозного пучения грунтов земляного полотна эксплуатируемых участков автомобильных дорог, обеспечивающее достижение значений допустимой величины поднятия покрытия дорожной одежды, с применением инъецирования (силикатизации).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Предложить способ снижения величины морозного пучения земляного полотна эксплуатируемых участков автомобильных дорог в районах с глубоким промерзанием и близким залеганием грунтовых вод за счет частичного по глубине преобразования свойств грунтов зоны промерзания инъецированием, и переводом системы промерзания в закрытую (способ устройства капиллярного барьера).

2. Обосновать глубину расположения капиллярного барьера на базе двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса в глинистых грунтах земляного полотна.

3. Экспериментально исследовать закономерности процессов пучения и влагопроводности силикатизированного грунта в зависимости от концентрации раствора силиката натрия, и числа пластичности исходного грунта, для

определения толщины капиллярного барьера. Оценить влияние процесса промерзания на величину коэффициентов влагопроводности силикатизированного грунта.

4. Разработать методику проектирования капиллярного барьера из инъецированного раствора в грунтах земляного полотна эксплуатируемых участков автомобильных дорог.

ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА СОЗДАНИЯ ЗАКРЫТОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТА ДЛЯ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

2.1 Мониторинг эксплуатируемых участков земляного полотна при закрытой и открытой системах промерзания

В рамках диссертационной работы проведен мониторинг водно-теплового режима земляного полотна эксплуатируемого участка автомобильной дороги при закрытой и открытой системах промерзания.

Проведение мониторинга обосновано необходимостью выявления закономерностей распределения миграционного потока влаги и температуры в теле земляного полотна при закрытой и открытой системах промерзания в периоды годового цикла промерзания-оттаивания.

2.1.1 Выбор участка мониторинга

Исключительно в рамках решения задач исследования, при выборе участка автомобильной дороги для оборудования постов наблюдения за водно-тепловым режимом земляного полотна, с учетом ранее сделанных выводов, приняты следующие условия:

- участок должен соответствовать дорожным районам на территории Новосибирской области с преобладающим типом глинистых грунтов V группы по [93, 34];

- участок по большей части должен отражать третью расчетную схему увлажнения рабочего слоя земляного полотна (открытая система промерзания) согласно [76, 90];

- доступность участка для проведения необходимых работ и периодических выездов в рамках мониторинга.

Анализ карт дорожного районирования территории Новосибирской области и характеристик дорожных районов [93, 34] показал, что для принятых условий выбора участка подходят три дорожных района: П.Р.2, Ш.Х.1 и Ш.Х.2. Однако, в рамках решаемых задач, в качестве территории расположения участка мониторинга принят дорожный район Ш.Х.2. Это обусловлено удобством расположения района и предоставлением со стороны ГКУ НСО ТУАД полного доступа к участку автомобильной дороги, пролегающему по данному району.

В качестве объекта мониторинга предоставлен эксплуатируемый участок автомобильной дороги Инская – Барышево – 39 км а/д «К-19р» (в гр. района) в Новосибирской области.

Перед выполнением работ по мониторингу на выбранном участке автомобильной дороги, получено письменное согласование с органом управления дорожно-строительным комплексом Новосибирской области – ГКУ НСО ТУАД (письмо № 8797 от 20.10.21).

Принятый участок автомобильной дороги относится к IV категории по СП 34.13330 [90]. Основные характеристики участка представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные характеристики участка автомобильной дороги

Характеристика	Значение
Расчетная схема увлажнения	3
Категория	IV
Тип земляного полотна	Насыпь
Грунты земляного полотна	Глинистые
Высота земляного полотна, м	1,0-1,8
Ширина земляного полотна, м	10
Тип дорожной одежды	Капитальный
Материал покрытия	Асфальтобетон
Ширина покрытия с укрепленной частью обочины, м	7,0
Число полос движения, шт	2
Ширина обочины без укрепленной части, м	1,5
Материал обочины	Щебеночно-песчаная смесь

Климат района расположения участка автомобильной дороги резко-континентальный, характеризующийся продолжительной морозной и ветреной

зимой и коротким жарким летом. Согласно картам дорожного районирования территории Новосибирской области [93, 34] объект мониторинга расположен в дорожном районе Ш.Х.2, включающем географическую зону лесостепей, характеризуемую значительным увлажнением земляного полотна в отдельные годы.

2.1.2 Проведение мониторинга

До начала мониторинга в границах принятого участка (рисунок 2.1) бурением разведочных скважин были определены два поста наблюдения с открытой и закрытой системами промерзания.



Рисунок 2.1 – Схема расположения участка мониторинга на автомобильной дороге Инская – Барышево – 39 км а/д «К-19р»

Закрытая система промерзания, в рамках мониторинга, выявлена на посту №1 (рисунок 2.2, а). На данном посту наблюдения глубокое залегание грунтовых вод (до глубины скважины 6,0 м вода не встречена). Следовательно, доступ грунтовых вод к элементам земляного полотна ограничен.

Открытая система промерзания предполагает наличие близкого залегания грунтовых вод, приводящих к миграции влаги в зону промерзания. Обычно это происходит, когда расстояние от фронта промерзания до зеркала грунтовых вод не превышает высоту капиллярного поднятия. Близкое залегание грунтовых вод

(глубина 2,5 м от поверхности покрытия) обнаружено на посту наблюдения №2 (рисунок 2.2, б).

Характерным визуальным отличием принятых постов наблюдения является их эксплуатационное состояние, которое на момент обследования не соответствовало требованиям ГОСТ Р 50597 [22]. А именно, на посту №2 (рисунок 2.2б), с открытой системой промерзания, в период эксплуатации и в процессе настоящего мониторинга, наблюдались локальные бугры и просадки. Такие деформации располагались на проезжей части с характерными трещинами (сеткой трещин) произвольного очертания, образующими замкнутые контуры. Выявленные, в ходе визуального обследования, деформации покрытия характерны при развитии процессов морозного пучения грунтов земляного полотна.

а)



б)



Рисунок 2.2 – Выделенные участки для мониторинга

а – пост наблюдения №1 с глубоким залеганием грунтовых вод (закрытая система промерзания); б – пост наблюдения №2 с близким залеганием грунтовых вод (открытая система промерзания)

На посту №1, с закрытой системой промерзания, подобных характерных деформаций не выявлено (рисунок 2.2а).

Мониторинг водно-теплового режима земляного полотна на назначенных постах выполнялся в период начала промерзания грунтов (11.11.2021), в период их промерзания на максимальную глубину (05.03.2022), а также в промежуточные периоды – 13.12.2021 и 25.01.2022.

В период проведения мониторинга климатических аномалий не наблюдалось. Это подтверждается анализом климатических характеристик, полученных с агрометеостанции «Огурцово» (п. Элитный, Новосибирский район) для данного периода [64].

При первом выезде на объект мониторинга производилась привязка к местности назначенных постов, далее осуществлялись геометрические измерения поперечного профиля земляного полотна.

Для контроля температурного режима грунтов земляного полотна на каждом посту устанавливалась термометрическая скважина согласно ГОСТ 25358 [19]. Термометрическая скважина располагалась на обочине автомобильной дороги, и представляла из себя обсадную полипропиленовую трубу диаметром 32 мм и длиной 5 метров, заглубленную в грунт тела земляного полотна и его основания. Обсадная труба устанавливалась в ранее пробуренную скважину, а затрубное пространство заполнялось местным грунтом (рисунок 2.3). Для защиты термометрической скважины от наезда транспортных средств и от других механических воздействий, ее верхняя часть заглублялась на 0,2 м, закрывалась колпаком и защитным коробом.

а)



б)



Рисунок 2.3 – Термометрическая скважина на объекте мониторинга

а – рабочий момент бурения скважины с помощью установки УКБ 12/25; б – установленная полипропиленовая обсадная труба

Периодические замеры температуры производились по ГОСТ 25358 [19] с помощью термометрической косы и контроллера цифровых датчиков ПКЦД-1/100 (рисунок 2.4). Датчики были установлены через каждые 0,5 м по длине термометрической косы.

а)



б)



Рисунок 2.4 – Рабочий момент замера температуры в термометрической скважине
 а – момент снятие показаний температуры с помощью термометрической косы (общий вид); б – контроллер с показаниями температуры на одном из датчиков

Обработка полученных данных о температурах грунта производилась в камеральных условиях с построением необходимых графиков.

Мониторинг влажностного режима грунтов земляного полотна и основания выполнялся прямым методом. Схема расположения шурфа и скважины представлена на рисунке 2.5 (конструкция дорожной одежды, обочины и земляного полотна показаны условно).

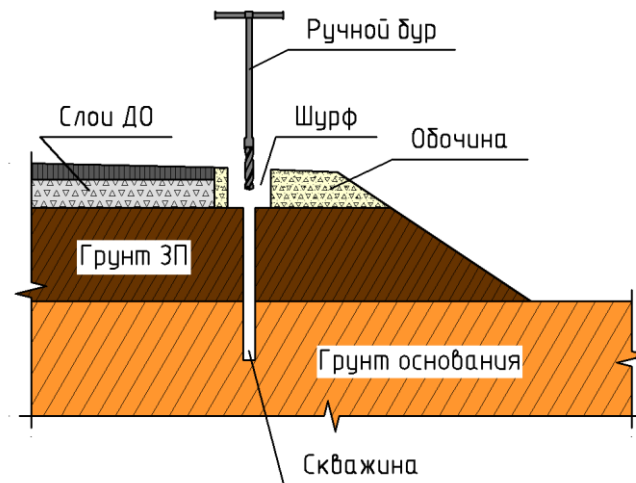


Рисунок 2.5 – Схема расположения шурфа и скважины в поперечном профиле

В подготовленных шурфах, согласно действующим нормативным документам, с помощью ручного бура производилось бурение скважин глубиной до 2,0 м с непрерывным отбором и упаковкой образцов грунта нарушенного сложения каждые 10 см. Последовательность работы показана на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Последовательность проходки скважины

а – работа с ручным буром геолога; б – общий вид шурфа; в – отбор образцов грунта; г – упаковка образцов грунта

После полевых работ образцы грунта доставлялись в геотехническую лабораторию, где в соответствии с требованиями ГОСТ 5180 [21], ГОСТ 12536 [15], ГОСТ 28622 [20] определялись необходимые характеристики (влажность естественная, влажности на границе текучести и раскатывания, гранулометрический состав, степень пучинистости и др.). Затем производились промежуточная камеральная обработка и анализ полученных результатов лабораторных испытаний.

По результатам лабораторных испытаний грунты земляного полотна и основания на постах наблюдения сложены суглинком легким пылеватым сильнопучинистым. Характеристики грунта представлены в таблице 2.2.

Промерзание грунта рабочего слоя земляного полотна затруднило отбор проб ручным буром геолога, поэтому было принято решение о применении ручной переносной буровой установки УКБ 12/25 (рисунок 2.7).

На рисунке 2.7а конструкция дорожной одежды, обочины и земляного полотна показаны условно.

Таблица 2.2 – Характеристики грунта на участке мониторинга

Наименование грунта	I_p , д.е.	ρ_s , г/см ³	ρ_{dmax} , г/см ³	Гранулометрический состав, %, по диаметрам фракции в мм:									Относительное морозное пучение, % (степень пучинистости)	
				>10	10-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,10	0,10-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002		<0,002
Суглинок легкий пылеватый	0,10	2,69	1,75	0	0	0	0	0	0	7	37	22	34	9,2 (сильнопучинистый)

Примечание – в таблице использованы следующие условные обозначения:
- I_p – число пластичности грунта, д.е;
- ρ_s – плотность частиц грунта, г/см³;
- ρ_{dmax} – плотность скелета грунта максимальная, г/см³.

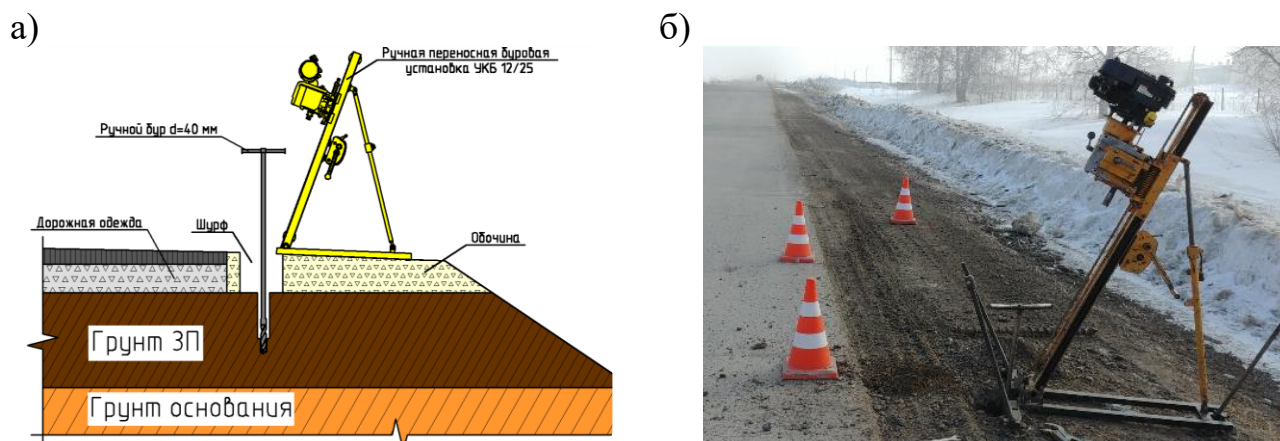


Рисунок 2.7 – Схема отбора проб в период после промерзания грунта с помощью буровой установки УКБ 12/25 и ручного бура

а – схематичное изображение процесса; б – натурное изображение процесса

Для замеров влажности в различные периоды времени, каждый раз разрабатывались новые скважины в радиусе не более 0,5 м от первоначальных (исходных) скважин.

Параллельно с мониторингом водно-теплового режима земляного полотна, выполнялся контроль за вертикальными перемещениями асфальтобетонного покрытия. Данный контроль осуществлялся для сравнительной оценки величин вертикальных перемещений асфальтобетонного покрытия на участках с открытой и закрытой системами промерзания.

Точки, предназначенные для наблюдения за вертикальными перемещениями покрытия, были закреплены на проезжей части дороги дюбель-

гвоздями. Для решения конкретной задачи, поставленной в рамках мониторинга, была разработана схема размещения точек на покрытии автомобильной дороги (рисунок 2.8). Для постов наблюдения №1 и №2 схемы расположения точек идентичны.

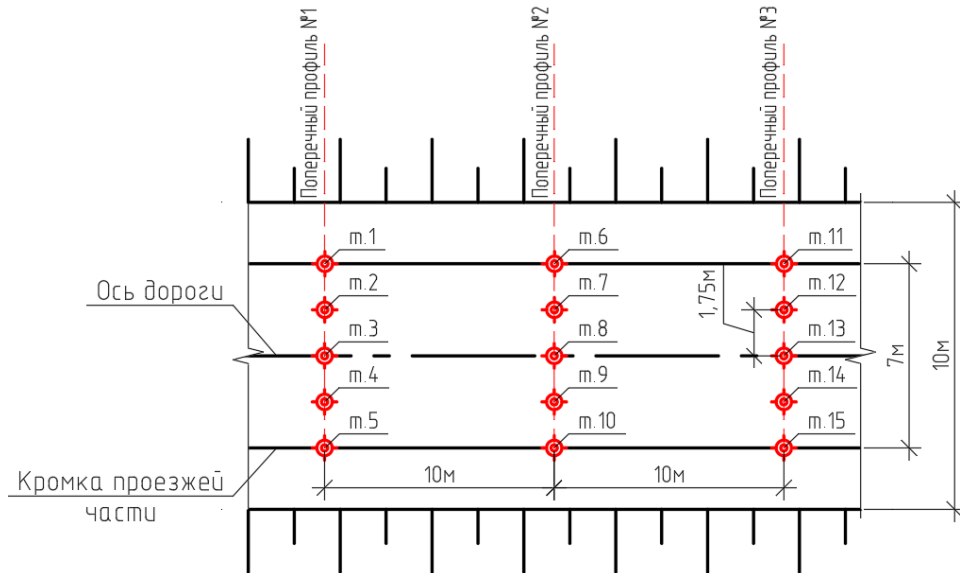


Рисунок 2.8 – Схема закрепления точек на асфальтобетонном покрытии для постов наблюдения

Для каждого поста назначено 15 точек наблюдения, из которых точки с 1 по 5, расположены на поперечном профиле №1, точки с 6 по 10 на поперечном профиле №2 и точки с 11 по 15 на поперечном профиле №3 (рисунок 2.8). На каждом поперечном профиле точки располагались на оси, кромках асфальтобетонного покрытия и по центру полосы движения (рисунок 2.9).

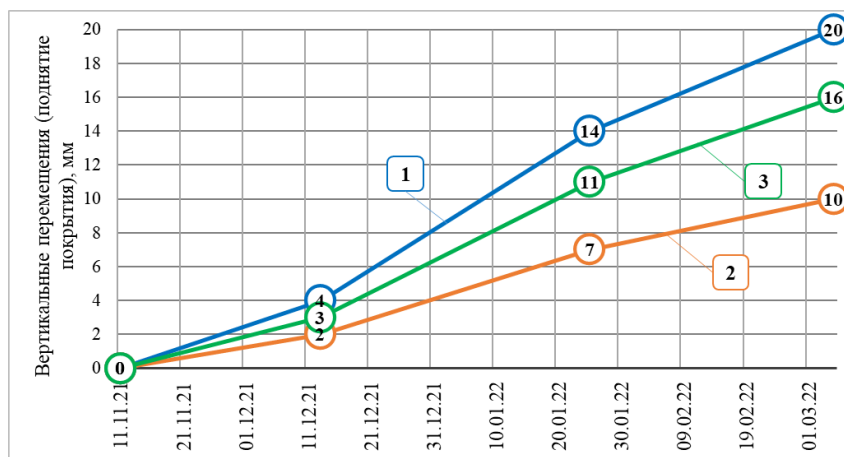


Рисунок 2.9 – Рабочие моменты при контроле за вертикальными перемещениями асфальтобетонного покрытия

В качестве относительных реперов, были назначены точки (болты крепления) на фундаментах опор линии электропередач, расположенных неподалеку от дороги.

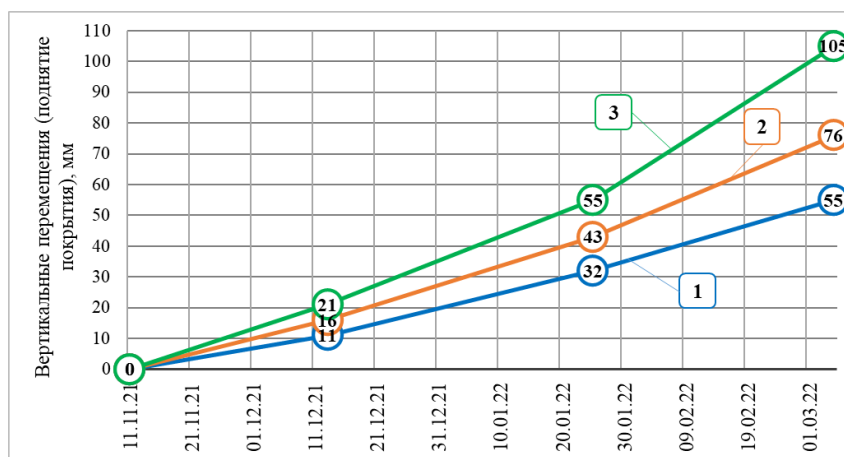
Съемка производилась в те же периоды годового цикла, что и мониторинг водно-теплового режима грунтов земляного полотна.

По результатам измерений для двух постов наблюдения построены графики вертикальных перемещений асфальтобетонного покрытия в зависимости от даты съемки (рисунки 2.10 и 2.11). На графиках представлены средние значения вертикальных перемещений по пяти точкам на каждом измеренном поперечном профиле.



1 – поперечный профиль №1 (точки 1-5); 2 – поперечный профиль №2 (точки 6-10); 3 – поперечный профиль №3 (точки 11-15)

Рисунок 2.10 – Средние вертикальные перемещения асфальтобетонного покрытия на посту №1 (закрытая система промерзания)



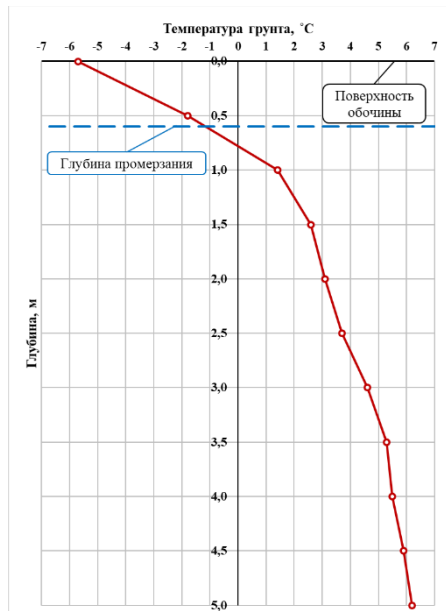
1 – поперечный профиль №1 (точки 1-5); 2 – поперечный профиль №2 (точки 6-10); 3 – поперечный профиль №3 (точки 11-15)

Рисунок 2.11 – Средние вертикальные перемещения асфальтобетонного покрытия на посту №2 (открытая система промерзания)

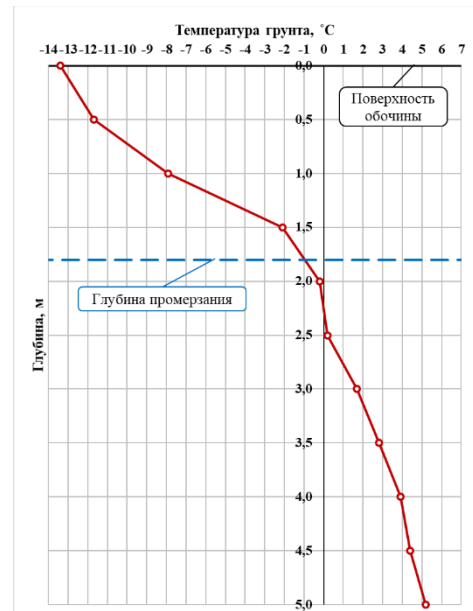
На посту наблюдения №1 (закрытая система промерзания) вертикальные перемещения покрытия составили от 10 до 20 мм, что не превышает предельно допустимого значения пучения на поверхности покрытия дорожной одежды по [23]. На посту наблюдения №2 (открытая система промерзания) вертикальные перемещения составили от 55 до 105 мм, что значительно превышает предельные значения по [23].

Результаты контроля температурного режима грунтов земляного полотна на посту №2 для периодов начала (11.11.2021) и завершения интенсивного промерзания (05.03.2022) представлены в виде графиков (рисунок 2.12).

а)



б)

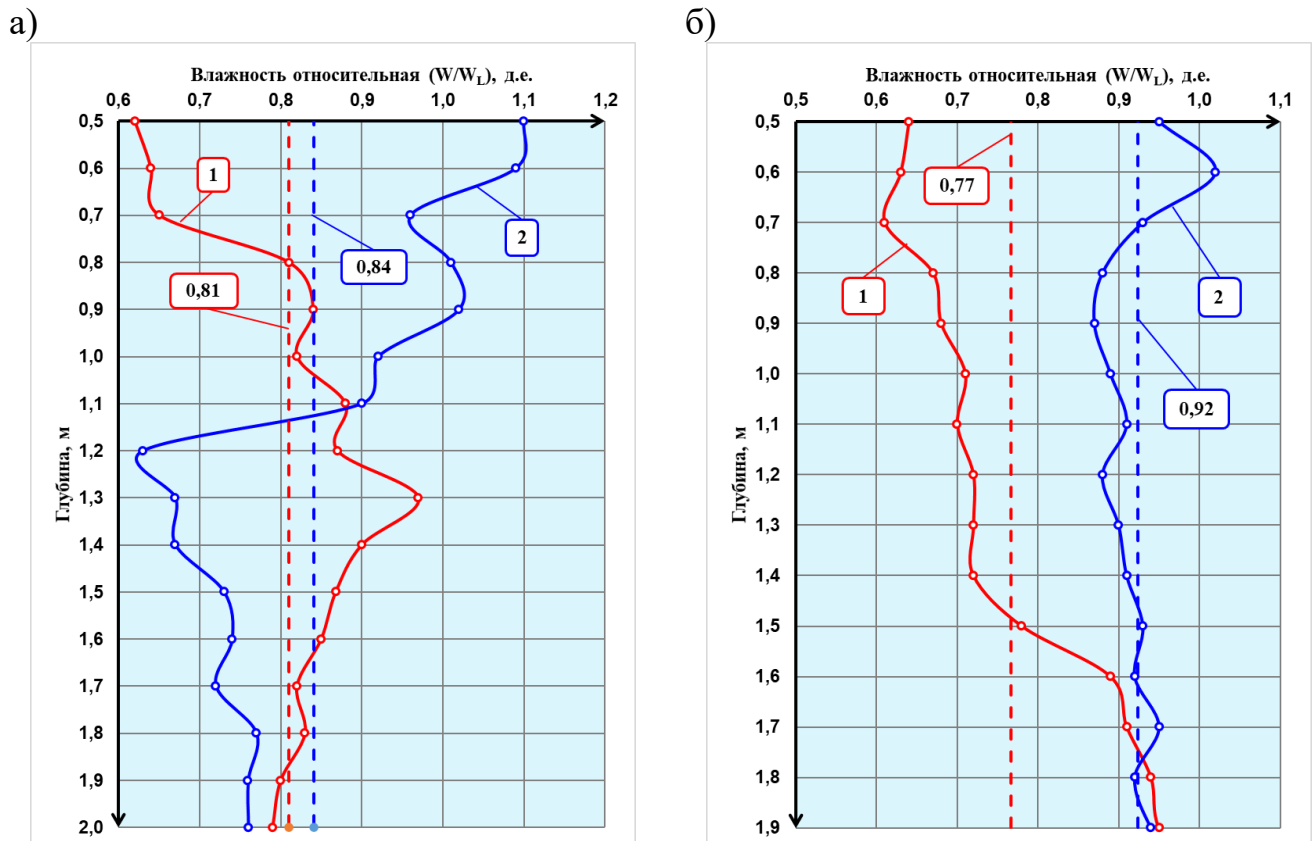


1 – период начала промерзания грунтов (11.11.2021); 2 – период промерзания грунтов на максимальную глубину (05.03.2022)

Рисунок 2.12 – График изменения температуры грунта от глубины

а – по натурным замерам от 11.11.2021; б – по натурным замерам от 05.03.2022

По результатам контроля влажностного режима, построены графики зависимости относительной влажности (W/W_L) грунта земляного полотна от глубины его залегания (рисунок 2.13) для периодов начала (11.11.2021) и завершения интенсивного промерзания (05.03.2022). Графики построены относительно поверхности земляного полотна.



1 – период начала промерзания грунтов (11.11.2021); 2 – период промерзания грунтов на максимальную глубину (05.03.2022)

Рисунок 2.13 – Зависимость относительной влажности грунта (W/W_L) от глубины его залегания под дорожной одеждой

а – пост наблюдения №1 с глубоким залеганием грунтовых вод (закрытая система промерзания); б – пост наблюдения №2 с близким залеганием грунтовых вод (открытая система промерзания)

2.1.3 Анализ результатов мониторинга относительной влажности грунта земляного полотна при промерзании

Полученные результаты подтвердили механизмы и пути миграции воды в теле земляного полотна при промерзании, а также закономерности распределения влажности грунтов.

Сравнительный анализ постов наблюдения №1 и №2 (рисунок 2.9) показывает, что отсутствие грунтовых вод на посту №1 или искусственное

ограничение доступа грунтовых вод в зону промерзания на любом из подобных участков, ограничивает зону активного влагопереноса. Ориентировочно, зона активного влагопереноса ограничивается глубиной, близкой к глубине промерзания, а усредненное количество воды в грунтовой толще зоны промерзания будет оставаться постоянной величиной, в пределах погрешности измерения. Так, по результатам мониторинга, усредненное, по зоне промерзания, значение относительной влажности на посту №1 составляет $W/W_L=0,81$ в ноябре и $W/W_L=0,84$ в марте. На посту №2 наблюдается значительное увеличение усредненного по зоне промерзания значения относительной влажности с $W/W_L=0,77$ в ноябре до $W/W_L=0,92$ в марте за счет капиллярной миграции грунтовых вод в зону промерзания.

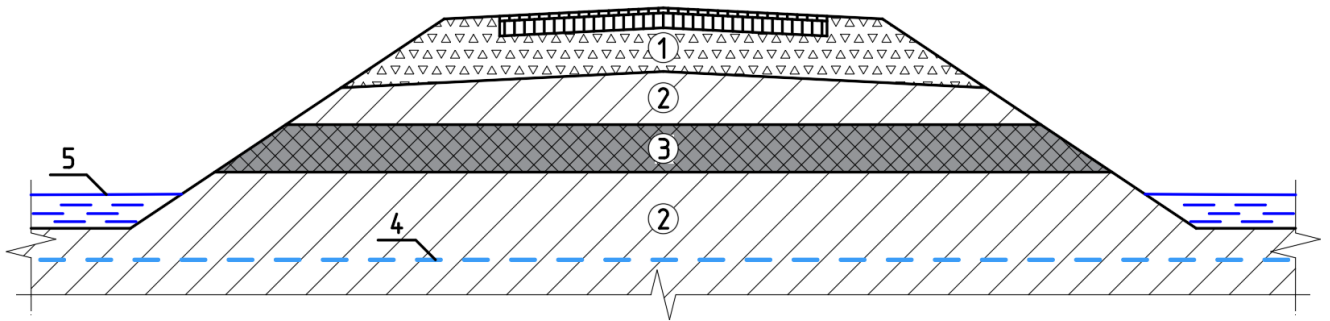
Таким образом, результаты мониторинга показали, что для снижения морозного пучения, в земляном полотне, достаточно сделать относительно водонепроницаемый слой из стабилизированного грунта определенной толщины. Данный слой будет служить барьером для интенсивного влагопереноса в зону промерзания.

В связи с этим, для создания закрытой системы промерзания, далее в исследовании, необходимо разработать концепцию капиллярного барьера в земляном полотне из стабилизированных грунтов.

2.2 Концепция капиллярного барьера в земляном полотне из стабилизированных грунтов

В качестве основы для создания закрытой системы промерзания предлагается комбинирование двух подходов: регулирования водно-теплового режима рабочего слоя земляного полотна (гидроизоляция) и регулирование влагопроводных свойств грунтов рабочего слоя земляного полотна (стабилизация). При этом предлагается использовать принцип частичного по глубине изменения свойств (стабилизация) грунтов рабочего слоя земляного

полотна, с формированием гидроизоляционного слоя определенной толщины – капиллярного барьера. Обобщенная принципиальная схема устройства капиллярного барьера представлена на рисунке 2.14.



1 – конструкция дорожной одежды; 2 – грунт земляного полотна; 3 – капиллярный барьер из стабилизированного грунта; 4 – уровень грунтовых вод; 5 – длительно стоящие поверхностные воды

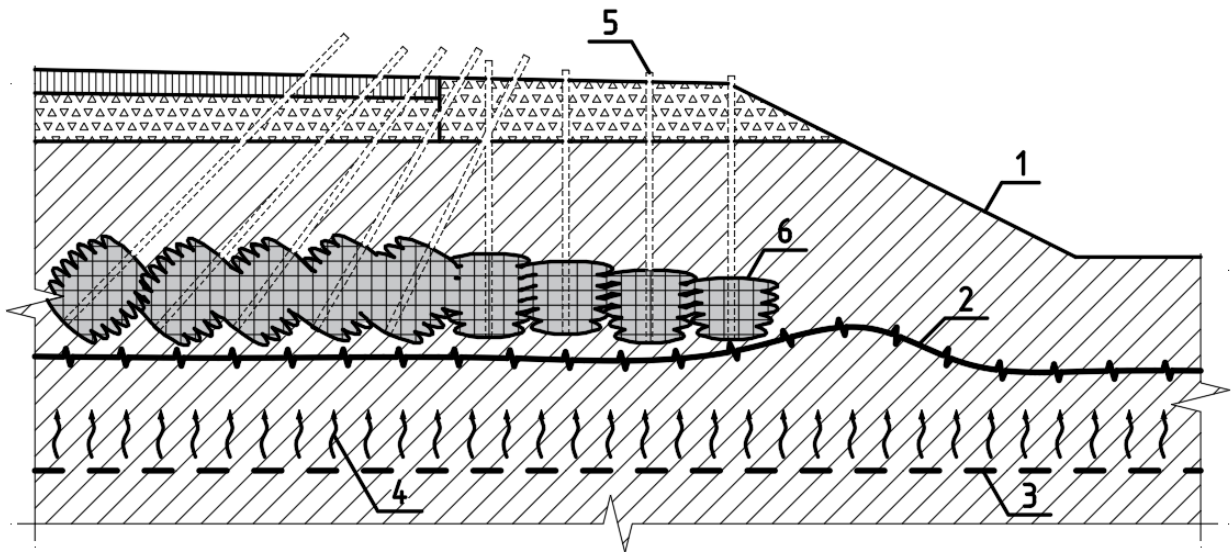
Рисунок 2.14 – Обобщенная принципиальная схема устройства капиллярного барьера

Функционально капиллярный барьер (рисунок 2.14) выполняет роль гидроизоляционного слоя, переводя открытую систему промерзания грунта в закрытую, за счет прерывания интенсивного криогенного влагопереноса. Кроме того, применение в качестве капиллярного барьера стабилизированного грунта (непучинистого материала) с формируемыми цементационными связями, позволяет добиться дополнительного положительного эффекта. В совокупности, это позволит снизить деформации морозного пучения конструкции дорожной одежды до предельно допустимых значений.

Для реализации концепции капиллярного барьера на эксплуатируемых участках автомобильных дорог, без переустройства дорожной одежды, предложена обобщенная схема с применением инъекционного способа изменения свойств грунтов (рисунок 2.15).

Разработанная схема конструкции земляного полотна с капиллярным барьером из стабилизированных грунтов, представляет собой совокупность отдельных относительно водонепроницаемых элементов [82, 132, 133]. На

представленной схеме (рисунок 2.15) стабилизация грунтов выполнена по технологии инъектирования водного раствора силиката натрия.



1 – земляное полотно автомобильной дороги; 2 – условная граница зоны сезонного промерзания грунта; 3 – уровень грунтовых вод; 4 – зона капиллярной миграции влаги; 5 – контуры инъекторов; 6 – элементы капиллярного барьера из гидроизолирующего раствора, инъектированного в грунт

Рисунок 2.15 – Обобщенная конструкция земляного полотна автомобильной дороги с капиллярным барьером

Реализация предлагаемого способа осуществляется следующим образом. В земляное полотно осуществляют погружение инъекторов вертикально и под наклоном до определенной глубины, согласно ранее разработанной схеме расстановки инъекторов. Разработанная схема должна обеспечить условие для создания замкнутого сплошного слоя капиллярного барьера. Далее через инъекторы нагнетают материал (силикат натрия). Нагнетание водного раствора силиката натрия в грунты производится в режиме пропитки. Высота стабилизированного элемента капиллярного барьера задается длиной перфорированной части инъектора.

Подача раствора в режиме пропитки производится до момента достижения расчетного диаметра стабилизированного элемента грунта. Регулирование подачи раствора происходит путем изменения давления с помощью насосов. Контроль подачи раствора выполняется по расходомерам. Момент достижения расчетного

диаметра стабилизированного элемента определяется по расчетному расходу инъецируемого материала.

По всей высоте барьера образуются элементы стабилизированного грунта, которые пересекаются с другими элементами стабилизированного грунта. В местах пересечения образуются связи, за счет способности инъецируемого материала заполнять пустоты между частицами грунта и затвердевать, превращая элементы в монолитный водонепроницаемый слой.

Для проверки работоспособности конструкции капиллярного барьера, далее в работе проведены исследования по моделированию работы капиллярного барьера в лабораторных условиях.

2.3 Моделирование работы капиллярного барьера в земляном полотне из стабилизированного грунта

Для проверки работы силикатизированного грунта в качестве капиллярного барьера, выполнены лабораторные исследования специально подготовленных образцов грунта – масштабных моделей зоны промерзания.

Лабораторные образцы (рисунок 2.16) подготавливались как масштабные модели зоны промерзания земляного полотна с расположенным в нижней части капиллярным барьером из силикатизированного грунта. Для подготовки образцов использовался суглинок легкий пылеватый с числом пластичности 0,10, отобранный с земляного полотна автомобильной дороги в дорожном районе Ш.Х.2. Характеристики грунта представлены в разделе 2.1.2.

В качестве вяжущего применялся водный раствор метасиликата натрия марки Б по ГОСТ 13078 [16].

В образцах №2 (рисунок 2.16, б) и №3 (рисунок 2.16, в) смоделировано наличие капиллярного барьера из силикатизированного грунта в нижней зоне промерзания, мощностью $1/3$ и $2/3$ высоты образца.

Образцы №1 – контрольные (рисунок 2.16, а), моделируют зону промерзания без капиллярного барьера. Образцы №4 (рисунок 2.16, г) моделируют ситуацию силикатизации зоны промерзания на всю мощность слоя.

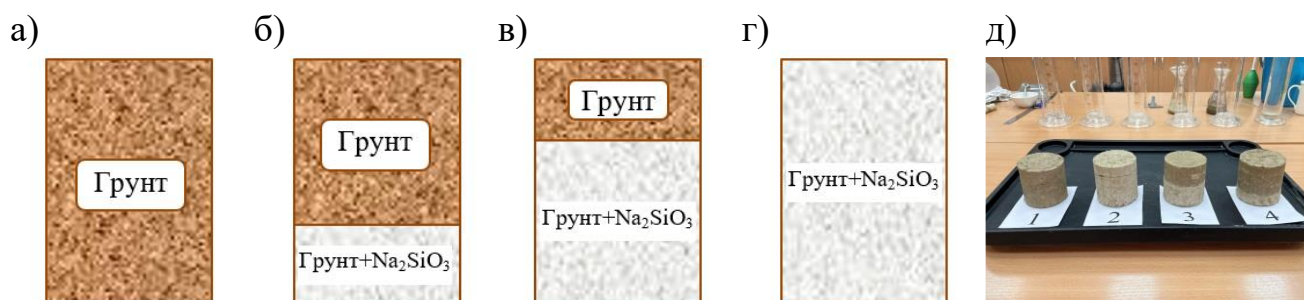


Рисунок 2.16 – Лабораторные образцы с силикатизированным грунтом
а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3; г – образец №4; д – общий вид
подготовленных образцов

Далее подготовленные образцы подвергались полному водонасыщению. Наступление критерия полного водонасыщения контролировалось периодическим взвешиванием образцов по остановке приращения общей массы. По контрольным образцам определялась влажность исходного и силикатизированного грунта до испытания на промерзание.

После полного водонасыщения образцы помещались в специальный прибор для определения величины морозного пучения по ГОСТ 28622 [20]. Величина морозного пучения грунта определялась по значению относительной деформации морозного пучения. Относительная деформация морозного пучения (ε_{fh}) является отношением абсолютной вертикальной деформации морозного пучения промерзающего грунта к мощности промерзшего слоя [20].

Результаты лабораторных исследований образцов в виде графика относительной деформации морозного пучения ε_{fh} (%) от относительной высоты зоны силикатизации h_s/h представлены на рисунке 2.17.

Средняя относительная деформация морозного пучения образцов №1 составила $\varepsilon_{fh} = 6,2$ %. Силикатизация данного грунта позволяет снизить определяемый показатель до $\varepsilon_{fh} = 0,7$ %.

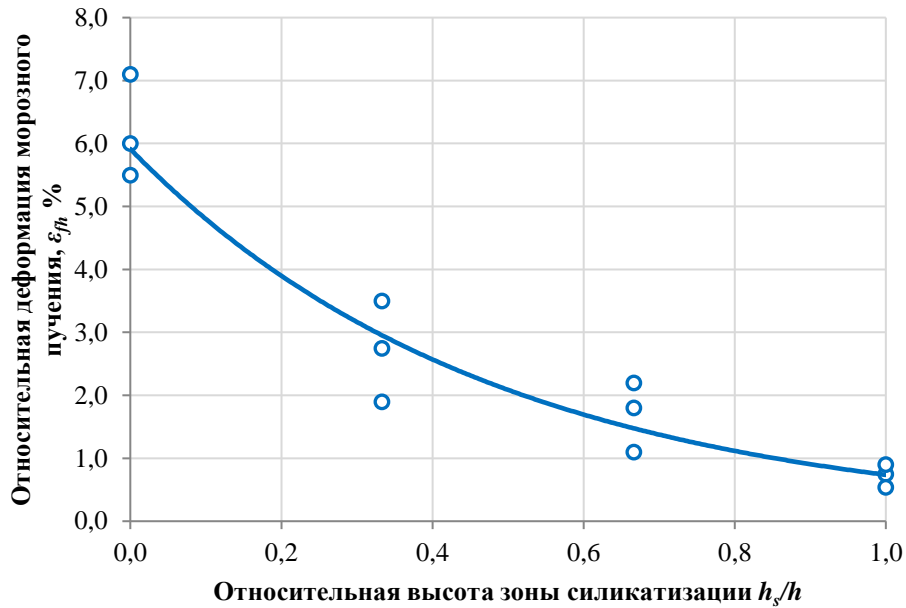


Рисунок 2.17 – Зависимость относительной деформации морозного пучения от относительной высоты зоны силикатизации

Наличие в образце капиллярного барьера из силикатизированного грунта в нижней зоне промерзания, относительной мощностью $1/3$, снижает показатель морозного пучения до значений 1,9-3,5 %, что почти в два раза меньше, чем для контрольных образцов без силикатизации.

Эти результаты объясняются не только формированием цементационных связей в грунте после силикатизации, но и капилляропрерывающим эффектом.

Таким образом, результаты эксперимента показали, что создание капиллярного барьера из стабилизированного грунта, способом инъектирования водного раствора силиката натрия, преграждающего доступ грунтовых вод в зону промерзания, позволяет снизить величину морозного пучения. Кроме того, в случае размещения стабилизированного массива грунта не за пределами зоны промерзания, а в ее нижней части, дополнительно снизится величина пучения грунтов за счет формирования цементационных связей в грунте.

Тем не менее, для практического применения предложенной концепции, важнейшими задачами исследования являются поиск решения для определения расчетной глубины расположения капиллярного барьера в теле земляного полотна и его рациональной толщины.

2.4 Расчетно-теоретическое обоснование параметров капиллярного барьера

Для практического применения предложенного способа создания капиллярного барьера в земляном полотне из стабилизированных инъектированием грунтов важнейшими задачами исследования являются определение расчетной глубины расположения капиллярного барьера z_{bl} в теле земляного полотна и его проектной мощности $h_b^{пр}$.

Решение данных задач позволит создать методику проектирования капиллярного барьера, реализация которой позволит существенно снижать величину морозного пучения рабочего слоя земляного полотна, и выполнять расчет деформации морозного пучения при проектировании как для закрытой системы промерзания по одному из известных решений [40, 41, 68].

Для решения поставленной задачи, в первую очередь, необходимо определится, что считается «закрытой» и «открытой» системой промерзания, а также, что необходимо считать за условие перехода открытой в закрытую систему при создании капиллярного барьера.

В научной литературе отсутствуют четкие, общепризнанные определения, тем не менее, в общем случае, под «закрытой» системой промерзания можно понимать такие условия, при которых основная миграция влаги при сезонном промерзании грунтов может идти только за счет перераспределения собственных запасов воды в зоне сезонного промерзания [41, 47, 109]. При «открытой» системе промерзания, напротив, формируются условия, способствующие миграции («подтягиванию») значительного количества влаги в зону сезонного промерзания из нижележащих грунтов земляного полотна, что, как правило, сопровождается существенным льдообразованием с формированием различной криогенной текстуры [41, 47, 109]. На основании этого, условием перевода открытой системы промерзания в закрытую при создании капиллярного барьера предлагаем считать снижение объема криогенной миграции влаги $\Delta W_{мг}$ в зону сезонного промерзания из нижележащих грунтов земляного полотна до значения $\Delta W_{мг}^0$ и

ниже, не оказывающего существенного влияния на величину морозного пучения дорожной одежды.

Величины объема криогенной миграции влаги в грунте $\Delta W_{\text{МГ}}$ и объема криогенной миграции влаги в капиллярном барьере $\Delta W_{\text{МГ}}^{\text{б}}$ определяются по известным решениям [40, 78], и, в первую очередь, зависят от коэффициентов влагопроводности грунта и материала капиллярного барьера соответственно.

Исходя из решения, полученного А.Л. Исаковым [41] для коэффициента пучения при закрытой системе $K_{\text{Пуч}}^3$, максимальное значение указанного параметра в закрытой системе наблюдается в случае равенства предзимней влажности W_0 и влажности полностью водонасыщенного грунта W_{sat} . Следовательно, при обеспечении условия (2.1) при создании капиллярного барьера (подборе толщины барьера и его коэффициента влагопроводности для исходных значений градиентов температур и влажности), открытую систему с капиллярным барьером можно считать закрытой.

$$\Delta W_{\text{МГ}}^{\text{б}} \leq W_{\text{sat}} - W_0. \quad (2.1)$$

Из 2.1 следует, что сумма предзимней влажности W_0 и объема криогенной миграции влаги в капиллярный барьер $\Delta W_{\text{МГ}}$ не должны превышать влажность полностью водонасыщенного грунта W_{sat} .

2.4.1 Решение для определения глубины капиллярного барьера

Для решения поставленной задачи определения расчетной глубины расположения капиллярного барьера z_{bl} , исходя из сформулированного условия перевода открытой системы промерзания в закрытую при создании капиллярного барьера, рассмотрены существующие теории тепло- и массообмена [47, 68, 109].

В современном представлении, на механизм криогенной миграции в различной степени влияют влагопроводные свойства грунтов в талой и мерзлой зонах, а также градиенты влажности и температуры (в некоторых источниках

скорость промерзания). В общем случае удельный поток влаги i_n достаточно полно описывается дифференциальным уравнением следующего вида [59]:

$$i_n = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_w \frac{\partial w}{\partial x} + K_w \delta \frac{\partial t}{\partial x} \right], \quad (2.2)$$

где K_w – коэффициент влагопроводности, м²/ч; δ – термоградиентный коэффициент; $\frac{\partial w}{\partial x}$ и $\frac{\partial t}{\partial x}$ соответственно градиент влажности и градиент температуры.

Подход отечественных ученых к решению задачи прогноза влагонакопления в промерзающих грунтах достаточно различен и основан на некоторых допущениях и эмпирических решениях. Тем не менее, многие авторы [40, 49, 56] сходятся во мнении, что при промерзании грунтов практически в любой момент времени существует зона интенсивного влагопереноса, близкая по глубинам к зоне фазовых переходов, но не точно совпадающая с ней. Ниже зоны фазовых переходов снижаются градиенты температур и влажности, выше существенно снижается коэффициент влагопроводности, то есть изменяются параметры, входящие в (2.2). Конечно же, вне зоны интенсивного влагопереноса эффект миграции влаги, в силу различных механизмов, имеет место быть. Однако, для решаемой задачи размещения капиллярного барьера (в пределах точности решения подобных задач) предлагаем ограничиться рассмотрением именно зоны интенсивного влагопереноса.

В общем виде зона интенсивного влагопереноса (по времени T) имеет вид, представленный на рисунке 2.15 (заштрихована в границах, обозначенных сплошными линиями). В момент времени T_{fm} , соответствующий максимальной глубине сезонного промерзания, можно выделить нижнюю границу зоны интенсивного влагопереноса, которая соответствует глубине относительно поверхности земляного полотна z_{ms} , и верхнюю границу, соответствующую глубине z_{me} . На глубинах z_{ms} и z_{me} , соответственно начинается и заканчивается интенсивный влагоперенос в момент времени T_{fm} (момент максимальной глубины сезонного промерзания).

Принимая во внимание сформулированное условие перевода открытой системы промерзания в закрытую при создании капиллярного барьера, а также необходимость расположения капиллярного барьера из непучинистого материала именно в зоне промерзания, можно записать условия для расположения капиллярного барьера следующим образом:

$$z_{bl} = z_{ms}, \quad (2.3)$$

$$z_{ms} > z_{bu} \geq z_{me}, \quad (2.4)$$

где z_{bl} – глубина нижней границы капиллярного барьера (рисунок 2.18);
 z_{bu} – глубина верхней границы капиллярного барьера (рисунок 2.18).

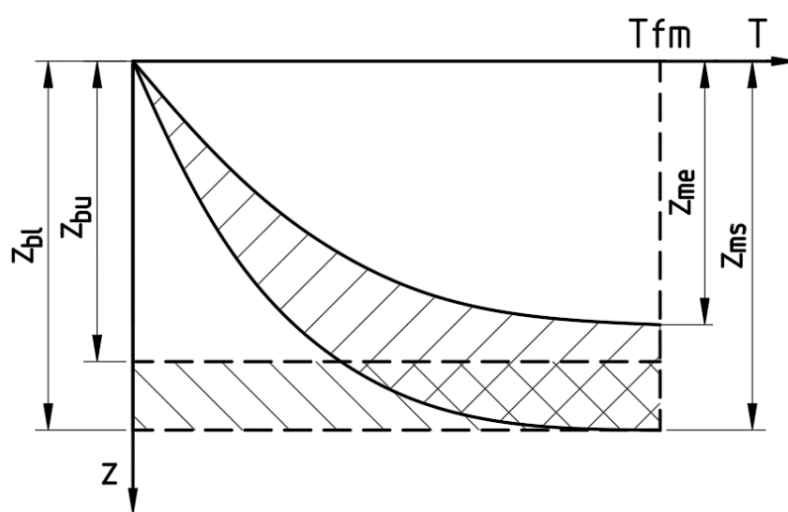


Рисунок 2.18 – Расположение капиллярного барьера относительно зоны интенсивного влагопереноса

Расположение капиллярного барьера ниже зоны интенсивного влагопереноса приведет к перерасходу материалов, выше нижней границы такой зоны – в лучшем случае приведет к образованию области переувлажнения под капиллярным барьером, в худшем к льдообразованию и пучению. Расположение капиллярного барьера выше верхней границы зоны интенсивного влагопереноса также будет приводить к перерасходу материалов, поскольку закрытая система промерзания уже будет обеспечена. Поэтому верхняя граница капиллярного барьера должна совпадать или находится ниже верхней границы зоны интенсивного влагопереноса, а толщина капиллярного барьера h_b будет зависеть

от свойств его материала, и, главным образом, от коэффициента влагопроводности K_w .

Исходя из условий (2.3) и (2.4), максимальная толщина капиллярного барьера будет составлять:

$$h_b^{max} = z_{ms} - z_{me}. \quad (2.5)$$

Для определения границы зоны интенсивного влагопереноса, а соответственно и границ расположения капиллярного барьера, возможно использовать решение, предлагаемое рядом исследователей [48, 78, 109]. Это решение основано на привязке зоны интенсивного влагопереноса к изолиниям температур в промерзающем массиве. Рядом авторов, на основании наблюдений за лабораторными и полевыми опытами установлено, что интенсивный влагоперенос для глинистых грунтов наблюдается в интервале изотерм от 0 °С до минус 3 – 5 °С [48, 78, 109]. Эксперименты по миграции влаги в замерзающих глинистых грунтах под влиянием градиента температуры с образованием прослоек льда были осуществлены еще в середине прошлого века. Обобщая результаты экспериментов, в работе [48] установлено, что большая часть потока влаги из талой зоны переносится внутри промерзающей зоны в пределах отрицательных температур от 0 °С до минус 4 °С. Более детально данный вопрос исследован в работе [109] на специально разработанных экспериментальных установках. С учетом S-образного характера кривой зависимости содержания незамерзшей воды от температуры $W_n(t)$ в работе [109] для пылевато-глинистых грунтов выделены три качественно различные температурные зоны. Среди этих зон, наибольший интерес представляет зона интенсивных фазовых переходов, приуроченная к интервалу температур от минус 0,6 °С до минус 3 °С (рисунок 2.19). Эта зона характеризуется диффузионно-пленочным механизмом влагопереноса и является зоной интенсивного влагопереноса. При температуре грунта ниже температуры начала замерзания $t_{нз}$, но не ниже минус 0,6 °С, замерзание влаги не вызывает ее дефицита и, соответственно, движущей силы криогенной миграции. Температура от минус 3 °С и ниже, соответствует наличию лишь осмотической, адсорбированной и химически связанной категорий воды,

которая, согласно опытным данным [109], практически не принимает участия в миграции. Конечно, миграция влаги возможна и при более низких температурах [111], но ее интенсивность крайне мала, и при рассмотрении решаемой задачи ее можно не учитывать.

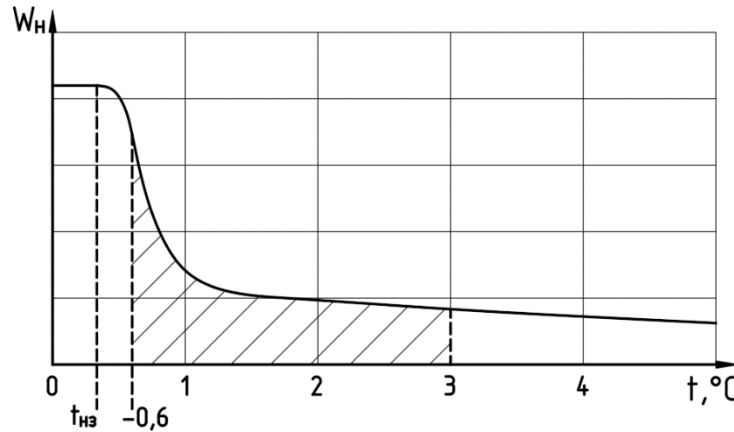


Рисунок 2.19 – Зона с диффузионно-пленочным механизмом влагопереноса на кривой зависимости содержания незамерзшей воды от температуры [109].

На основании [109], глубины начала и окончания интенсивного влагопереноса возможно привязать к глубинам изотерм минус 0,6 ($t_{-0,6}$) и минус 3 °C ($t_{-0,3}$) соответственно, определенные в момент времени T_{fm} :

$$z_{ms} = z_{-0,6}; z_{me} = z_{-3,0}, \quad (2.6)$$

тогда (2.3) и (2.4) примут вид:

$$z_{bl} = z_{-0,6}, \quad (2.7)$$

$$z_{-0,6} > z_{bu} \geq z_{-3,0}. \quad (2.8)$$

При этом общий алгоритм решения задачи о расположении капиллярного барьера в теле земляного полотна может иметь вид, представленный на рисунке 2.20.

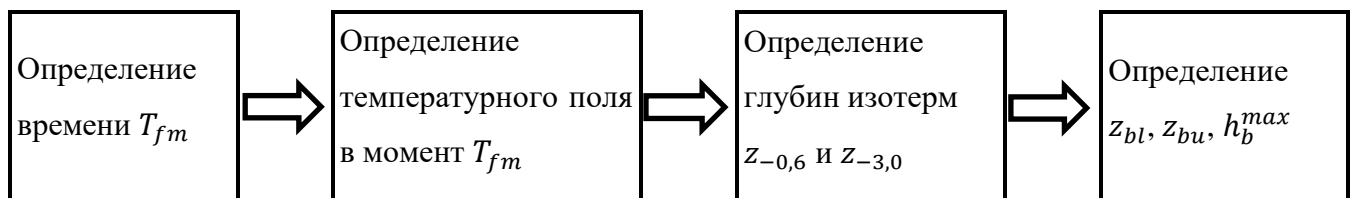


Рисунок 2.20 – Общий алгоритм решения задачи о расположении капиллярного барьера в теле земляного полотна

Указанные в первых двух блоках алгоритма параметры (рисунок 2.20) определяются исходя из решения основного дифференциального уравнения теплопроводности Фурье. Обобщая данные многолетних исследований [40, 47, 49], общее уравнение процесса промерзания-оттаивания для нестационарного теплового режима в трехмерном грунтовом пространстве можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial t}{\partial T} = \frac{\lambda_{th,f}}{c_{th,f}p} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + A, \quad (2.9)$$

в одномерной постановке

$$\frac{\partial t}{\partial T} = \frac{\lambda_{th,f}}{c_{th,f}p} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + A, \quad (2.10)$$

где $c_{th,f}$ – удельная теплоемкость талых или мерзлых грунтов; p – плотность грунта; $\lambda_{th,f}$ – коэффициент теплопроводности талых или мерзлых грунтов; t – температура грунтов; T – время; A – функции, учитывающие различные концепции, механизмы и теории теплопереноса в грунтах, в том числе внутренние источники тепла [40, 47, 49].

Наряду с решением уравнений (2.9) и (2.10), определение времени T_{fm} , соответствующего максимальной глубине сезонного промерзания, и температурного поля в конструкции в этот момент, возможно выполнять с использованием доступных и сертифицированных программных комплексов (*Freeze-1a*, *Frost3D*, *Termoground* и др.), что значительно упрощает процесс расчетов и проектирования при решении прикладных инженерных задач.

Получив эпюру температурного поля в конструкции в момент времени T_{fm} (пример на рисунке 2.21), возможно определить глубины изотерм минус 0,6 ($z_{-0,6}$) и минус 3 °C ($z_{-3,0}$), а также глубины нижней z_{bl} и верхней z_{bu} границы капиллярного барьера, и максимальную толщину капиллярного барьера h_b^{max} по (2.7), (2.8), и (2.5) соответственно.

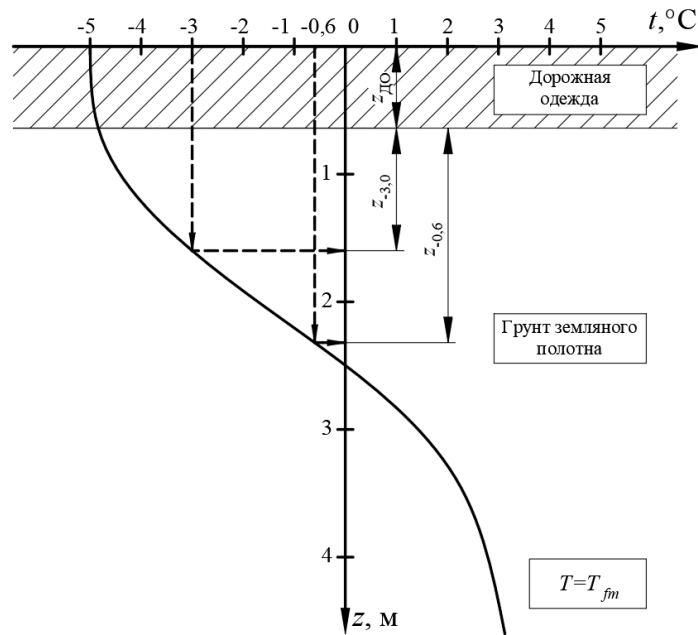


Рисунок 2.21 – Эпюра температурного поля (в одномерной постановке) в конструкции в момент максимального промерзания

Представленное выше решение задачи определения расчетной глубины расположения капиллярного барьера z_{bl} , основано на известном подходе с привязкой зоны интенсивного влагопереноса к изолиниям температур в промерзающем массиве. Это решение, конечно же, подходит для предварительных инженерных расчетов, однако не обладает достаточной точностью, поскольку недостаточно полно учитывает все механизмы криогенного влагопереноса, а также различия в видах глинистых грунтов. При этом известно [109], что на механизм криогенной миграции влияет не только градиент влажности, формируемый при промерзании в зоне фазовых переходов (ограничен интервалом изотерм от минус 0,6 °С до минус 3 °С), но и формируемый градиент температуры. Поэтому для более точных прогнозов поставлена задача по установлению двухпараметрического критерия (по значению температуры и градиента температуры) начала интенсивного криогенного влагопереноса для глинистых грунтов с различным числом пластичности.

Концепцией о применении двухпараметрического температурного критерия принимается, что при промерзании (охлаждении) грунтового массива существует температурная зона, с определенными сочетаниями температуры t^{KM} и градиента

температуры ∇t^{KM} , в которой происходит интенсивный криогенный капиллярно-пленочный влагоперенос (рисунок 2.22).

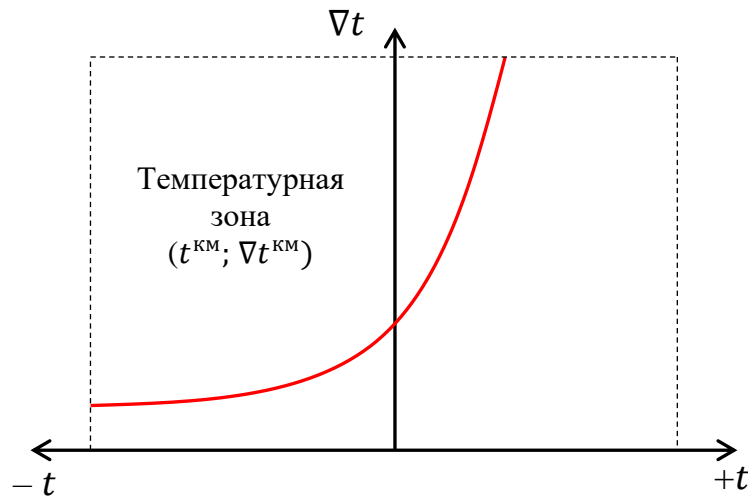


Рисунок 2.22 – Температурная зона интенсивного криогенного капиллярно-пленочного влагопереноса при промерзании грунтового массива

Экспериментально установлено, что граница зоны капиллярно-пленочного влагопереноса наиболее точно описывается экспоненциальной функцией. В этом случае, граница указанной зоны описывается уравнением:

$$\nabla t^{\text{KM}} - a \cdot e^{b \cdot t^{\text{KM}}} = 0, \quad (2.11)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от параметров грунтового массива.

Уравнение (2.11) описывает границу температурной зоны криогенного влагопереноса рассматриваемого вида грунтового массива по двухпараметрическому критерию. Принимая во внимание (2.11), двухпараметрический температурный критерий начала криогенного влагопереноса в грунтовом массиве будет иметь вид:

$$\nabla t - a \cdot e^{b \cdot t} > 0, \quad (2.12)$$

где ∇t – расчетный градиент температуры грунтового массива в зоне промерзания, $^{\circ}\text{C}/\text{см}$, t – расчетная температура грунтового массива в зоне промерзания.

При установлении двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса, общий алгоритм решения задачи о

расположении капиллярного барьера в теле земляного полотна будет иметь вид, представленный на рисунке 2.23.

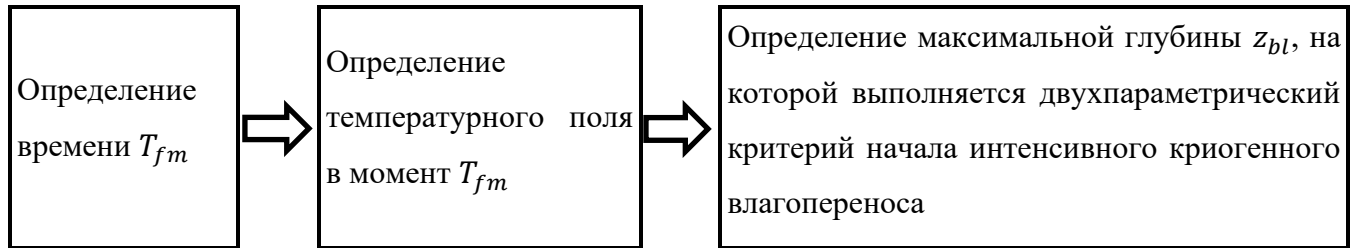


Рисунок 2.23 – Общий алгоритм решения задачи о расположении капиллярного барьера в теле земляного полотна на основе двухпараметрического критерия

Указанные в первых двух блоках алгоритма (рисунок 2.23) параметры также определяются по решению (2.9) и (2.10) или с использованием доступных и сертифицированных программных комплексов (*Frost3D*, *Freeze-1a*, *Termoground* и др.).

В дальнейшем, в рамках данного исследования, необходимо поставить, провести и обработать результаты лабораторного эксперимента, направленного на определение двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса для глинистых грунтов с различным числом пластичности.

2.4.2 Решение для определения мощности капиллярного барьера

Для дальнейшего развития расчетной базы в рамках создания капиллярного барьера в земляном полотне путем инъектирования, необходимо решить задачу обоснования расчетной толщины капиллярного барьера h_b , которая, будет в том числе зависеть от коэффициента влагопроводности материала самого барьера K_w .

Результаты обоснования глубины капиллярного барьера из инъектированного раствора (п. 2.4.1) позволяют составить схему к определению мощности капиллярного барьера h_b , представленную на рисунке 2.24.

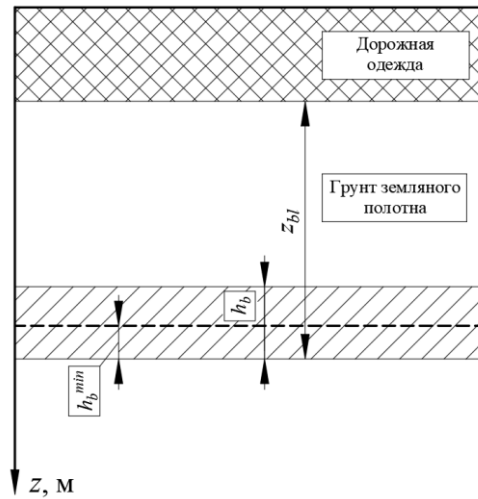


Рисунок 2.24 – Схема к определению мощности капиллярного барьера

Величину h_b возможно определить как минимальное значение из системы неравенств:

$$\begin{cases} h_b \geq h_b^{min}; \\ K_{пуч}^6 \cdot h_b + K_{пуч}^3 \cdot (z_{bl} - h_b) \leq l_{доп}; \\ h_b \geq h_{вп}, \end{cases} \quad (2.13)$$

где h_b^{min} – минимально допустимая мощность капиллярного барьера, исходя из принятого способа (технологии) его создания (способа и основного материала инъектирования); $K_{пуч}^6$ – коэффициент пучения материала капиллярного барьера при открытой системе промерзания; $K_{пуч}^3$ – коэффициент пучения грунта при закрытой системе промерзания; z_{bl} – глубина нижней границы капиллярного барьера относительно поверхности земляного полотна (низа дорожной одежды), определяемая по п. 2.5.1; $l_{доп}$ – предельно допустимое значение морозного пучения на поверхности дорожной дорожного покрытия по [23, 76, 112]; $h_{вп}$ – высота поднятия (миграции) влаги в капиллярном барьере за время его промерзания.

Обоснование минимально допустимой мощности капиллярного барьера h_b^{min} следует выполнять исходя из технологических возможностей того или иного способа инъектирования и принятого материала (твердеющего раствора).

Левая часть второго неравенства (2.13) соответствует расчетной величине деформации морозного пучения земляного полотна $h_{\text{пуч}}^{\text{б}}$ с капиллярным барьером в рабочем слое:

$$h_{\text{пуч}}^{\text{б}} = K_{\text{пуч}}^{\text{б}} \cdot h_b + K_{\text{пуч}}^{\text{з}} \cdot (z_{\text{bl}} - h_b). \quad (2.14)$$

Величина коэффициента пучения материала капиллярного барьера $K_{\text{пуч}}^{\text{б}}$ устанавливается эмпирическим путем в лабораторных условиях при открытой системе промерзания. В настоящей работе необходимо выполнить серию опытов, по результатам которых установить зависимости величины $K_{\text{пуч}}^{\text{б}}$ от исходной плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия ρ_{sal} , и числа пластичности I_p исходного глинистого грунта земляного полотна.

Коэффициент пучения грунта $K_{\text{пуч}}^{\text{з}}$ при закрытой системе промерзания возможно определить при лабораторных испытаниях по ГОСТ 28622 [20] без доступа воды в зону промерзания (при влажности образцов, соответствующей предзимней влажности в конструкции), или доступными расчетными методами. Одним из расчетных методов, является метод, предложенный А.Л. Исаковым [41]. Согласно этому методу, коэффициент пучения грунта при закрытой системе промерзания определяется следующим образом [41]:

$$K_{\text{пуч}}^{\text{з}} = 0,09 \frac{\rho_d}{\rho_w} (W_{\text{sat}} - W_{\text{нз}}) S_{\text{cr}},$$

где S_{cr} – введенный авторами параметр, названный показателем пучения [41], который зависит от предзимней влажности, влажности полностью водонасыщенного грунта, и критической влажности W_{cr} по [68].

Предельно допустимое значение морозного пучения на поверхности дорожной дорожного покрытия $l_{\text{доп}}$ определяется по [23, 76, 112] в зависимости от типа дорожной одежды и вида покрытия.

Высоту поднятия (миграции) влаги в капиллярном барьере $h_{\text{вп}}$ за время его промерзания предлагается определять, взяв за основу решения, полученные для прогноза зимнего влагонакопления участков земляного полотна И.А. Золотарем и Н.А. Пузаковым [40].

Согласно [40], передвижение воды зимой в талом слое грунта происходит в основном в жидком состоянии за счет подтягивания капиллярно-подвешенной влаги W_{oc} с переходом ее в пленочную, рыхлосвязанную воду, равную молекулярной влагоемкости W_0 на уровне нулевой изотермы грунта. Влагодвижущей силой в зоне положительных температур является разность потенциальной энергии поля капиллярных сил, пропорциональная разнице между W_{oc} и W_0 . Общий запас способной помещаться капиллярно-подвешенной воды составляет $H_{пр}(W_{oc} - W_0)$, где $H_{пр}$ – глубина промачивания грунта осенью.

При этом, скорость притока капиллярно-подвешенной воды в процессе промерзания грунта равна [40]:

$$V = K_w \frac{2(W_{oc} - W_0)}{\sqrt{12K_w T}} = 0,6(W_{oc} - W_0) \sqrt{\frac{K_w}{T}}.$$

Если рассматривать работу капиллярного барьера, то скорость притока можно выразить как отношение высоты поднятия влаги ко времени промерзания барьера T_b . Ввиду крайне малого количества свободных пор в силикатизированном грунте, за осеннюю влажность материала барьера примем влажность полностью водонасыщенного силикатизированного грунта W_{sat}^s , а за молекулярную влагоемкость – долю незамерзшей воды в силикатизированном грунте $W_{нз}^s$. Тогда получим

$$\frac{h_{пв}}{T_b} = 0,6(W_{sat}^s - W_{нз}^s) \sqrt{\frac{K_w}{T_b}}. \quad (2.15)$$

После математических преобразований, получим

$$h_{пв} = 0,6(W_{sat}^s - W_{нз}^s) \sqrt{T_b K_w}. \quad (2.16)$$

При отсутствии результатов экспериментов по определению доли незамерзшей воды в силикатизированном грунте $W_{нз}^s$, этот показатель предлагается приравнять к доле незамерзшей воды в исходном грунте $W_{нз}$, которая определяется по СП 25.13330 [89].

Для возможности использования решения (2.14), в рамках настоящей работы необходимо:

– определить зависимости коэффициентов влагопроводности силикатизированного грунта K_w от плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия и числа пластичности исходного грунта;

– оценить влияние процесса промерзания на коэффициенты влагопроводности силикатизированного грунта.

2.5 Выводы по главе 2

1. Разработан и обоснован способ снижения величины морозного пучения эксплуатируемого земляного полотна автомобильных дорог в районах с глубоким промерзанием и близким залеганием грунтовых вод (3 расчетная схема увлажнения) за счет частичного по глубине изменения свойств грунтов зоны промерзания инъектированием и переводом системы промерзания в закрытую.

Способ заключается в создании в рабочем слое земляного полотна капиллярного барьера из стабилизированных грунтов. Стабилизация грунтов выполняется по технологии инъектирования водного раствора силиката натрия (Na_2SiO_3) в режиме пропитки. На способ получен патент Российской Федерации № 2790090.

2. Выполнено расчетно-теоретическое обоснование основных параметров капиллярного барьера в земляном полотне из инъектированных гидроизолирующих составов, в том числе:

- сформулировано условие (2.1) перевода открытой системы промерзания в закрытую при создании капиллярного барьера и предложены критерии;

- предложено решение (п. 2.4.1) для определения глубины расположения капиллярного барьера z_{bl} на базе двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса в глинистых грунтах земляного полотна (2.12);

- получено решение (2.13) для определения расчетной толщины капиллярного барьера из условий технологической возможности применяемого

способа силикатизации (по h_b^{min}), обеспечения закрытой системы промерзания в рабочем слое земляного полотна (по $h_{вп}$), а также недопущения морозного пучения зоны промерзания (рабочий слой земляного полотна с материалом капиллярного барьера) выше допустимых значений морозного пучения на поверхности дорожного покрытия $l_{доп}$.

3. В рамках настоящего исследования, необходимо поставить, провести и обработать результаты лабораторного эксперимента, направленного на определение функциональной зависимости двухпараметрического критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса для глинистых грунтов с различным числом пластичности.

4. Для возможности применения решения (2.14), необходимо выполнить серию опытов, по результатам которых установить зависимости величины коэффициентов пучения силикатизированных грунтов $K_{пуч}^{sal}$ от исходной плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия ρ_{sal} , и числа пластичности I_p исходного глинистого грунта земляного полотна.

5. Для возможности использования решения (2.16), в рамках настоящей работы, необходимо определить зависимости коэффициентов влагопроводности силикатизированного грунта K_w от плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия и числа пластичности исходного грунта, а также оценить влияние процесса промерзания на коэффициенты влагопроводности силикатизированного грунта.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯНОЕ ПОЛОТНО – КАПИЛЛЯРНЫЙ БАРЬЕР ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ

Во второй главе обоснован способ борьбы с образованием пучин на эксплуатируемых участках автомобильных дорог путем создания закрытой системы промерзания грунта земляного полотна. Способ основан на создании в рабочем слое земляного полотна капиллярного барьера из стабилизированных грунтов. При этом стабилизация грунтов выполняется по технологии инъектирования водного раствора силиката натрия (Na_2SiO_3).

Для достижения цели исследования и разработки методики проектирования капиллярного барьера в земляном полотне автомобильных дорог, в выводах ко второй главе поставлен ряд экспериментальных задач, решаемых ниже.

3.1 Экспериментальное определение двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса в грунтах земляного полотна

3.1.1 Постановка и проведение лабораторного эксперимента на грунтовых моделях с капиллярным барьером

На основании анализа состояния существующих лабораторных методик, применимых для исследования механизмов и закономерностей формирования криогенных влагопроводных свойств грунтов при промерзании [3, 49, 108] был поставлен лабораторный эксперимент для определения температуры и градиента температур начала интенсивного криогенного влагопереноса в различных глинистых грунтах под капиллярным барьером.

В качестве основной лабораторной установки при выполнении эксперимента использовался автоматизированный прибор для определения степени морозного пучения ГТ 1.1.12 (рисунок 3.1), обеспечивающий контролируемое формирование водно-теплогового состояния грунтовых моделей.



Рисунок 3.1 – Общий вид автоматизированного прибора ГТ 1.1.12

Данная лабораторная установка укрупненно состоит из трех испытательных приспособлений для исследования грунтов, термостатирующей камеры, электроизмерительной аппаратуры, комплекта датчиков и программного обеспечения для ЭВМ. Несмотря на прямое назначение установки – определение степени морозного пучения грунтов, именно она, в комплексе с программным обеспечением, позволяет моделировать в образце грунта зону промерзания с контролируемыми параметрами (температура, градиент температур, параметры водонасыщения и влагопереноса), а также наличие капиллярного барьера.

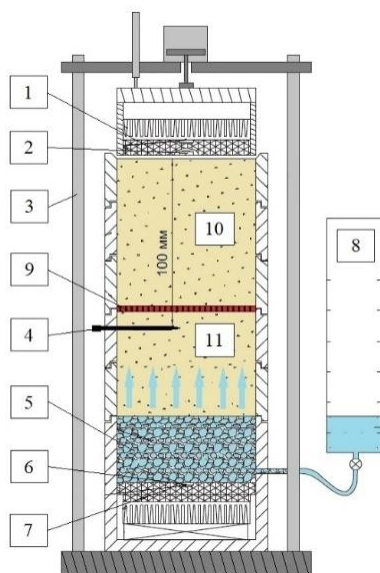
Принципиальная схема установки с подготовленной для проведения эксперимента грунтовой моделью, представлена на рисунке 3.2.

Для создания и поддержания отрицательной (t_i^B) и положительной (t_i^H) температуры на верхнем и нижнем торцах промораживаемой модели соответственно, применены два одинаковых термоэлектрических модуля (элементы Пельтье), под управлением ЭВМ через аппаратуру установки.

Для моделирования криогенного влагопереноса в нижней части грунтовой модели (под мембраной), обеспечена возможность подтока воды из мерного сосуда через пористый камень (песчаник), расположенный в поддоне прибора.

При достижении температурных критериев (температуры t^{KM} и градиента температур ∇t^{KM} начала криогенной миграции влаги), по изменению уровня воды в мерном сосуде фиксировалось начало интенсивного криогенного влагопереноса в грунтовой модели.

Модели, в рамках лабораторного эксперимента, изготавливались из грунтов нарушенной структуры с уплотнением до коэффициента 0,95. Начальная степень водонасыщения грунтовых моделей превышала $S_r > 0,9$. Для исключения изменения теплофизических свойств грунта по глубине модели и морозного пучения (факторы, ограничивающие возможности эксперимента), ее верхняя часть (над мембраной) водонасыщалась солевым раствором, что предотвращало возможность фазовых переходов.



1 – верхняя термостатированная плита (охлаждающая), 2 – термодатчик № 1,
3 – кольцевая обойма, 4 – термодатчик № 2, 5 – пористый камень (песчаник),
6 – термодатчик № 3, 7 – нижняя термостатированная плита (подогревающая), 8 –
сосуд с водой и нанесенной мерной шкалой, 9 – водонепроницаемая мембрана
(капиллярный барьер), 10 – верхняя часть грунтовой модели (над мембраной),
водонасыщенная солевым раствором, 11 – нижняя часть грунтовой модели,
подверженная капиллярному водонасыщению (водой)

Рисунок 3.2 – Принципиальная схема эксперимента

Эксперимент проводился при обеспечении стационарного температурного поля, основным свойством которого является постоянство теплового потока по

высоте модели. При этом в пределах каждого слоя, которые разделяла мембрана, градиент температуры постоянен, а температура меняется с глубиной по линейному закону.

Подготовленная модель представляла собой цилиндр грунта диаметром 100 мм, высотой 150 мм внутри кольцевой обоймы установки. При уплотнении грунта в кольцах внутри модели на глубине 90 мм устанавливалась водонепроницаемая мембрана из полиэтилена, моделирующая капиллярный барьер. Мембрана располагалась над температурным датчиком № 2 (рисунок 3.2).

Для эксперимента и дальнейших исследований приняты три вида исходных глинистых грунтов, представленных в таблице 3.1. Отбор грунтов для исследований производился в карьерах на территории Новосибирской области в двух дорожных районах П.Р.2 (супесь, суглинок легкий) и Ш.Х.1 (суглинок тяжелый) по [93, 34].

Характеристики принятых грунтов определены по ГОСТ 5180 [21] и ГОСТ 12536 [15].

Таблица 3.1 – Характеристики исследуемых грунтов

№ грунта	Наименование грунта	W_L , д.е.	W_P , д.е.	$W_{\text{опт.}}$, д.е.	I_P , д.е.	ρ_s , г/см ³	ρ_{dmax} , г/см ³	Гранулометрический состав, %, по диаметрам фракции в мм:									
								>10	10-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,10	0,10-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	<0,002
1	Супесь пылевая	0,26	0,21	0,15	0,05	2,66	1,82	0	0	0	0	1	3	10	67	7	12
2	Суглинок легкий пылеватый	0,30	0,21	0,17	0,09	2,70	1,73	0	0	0	0	0	0	12	60	11	17
3	Суглинок тяжелый пылеватый	0,33	0,20	0,18	0,13	2,71	1,78	0	0	0	0	0	1	21	51	13	14

Примечание – в таблице использованы следующие условные обозначения:

- W_L – влажность грунта на границе текучести, д.е.;
- W_P – влажность грунта на границе раскатывания, д.е.;
- $W_{\text{опт}}$ – влажность грунта оптимальная, д.е.;
- I_P – число пластичности грунта, д.е.;
- ρ_s – плотность частиц грунта, г/см³;
- ρ_{dmax} – плотность скелета грунта максимальная, г/см³.

Запуск установки осуществлялся после термостатирования грунтовых моделей в камере при температуре плюс 2 °С в течение суток. После запуска, с помощью лабораторной установки, создавалось одномерное стационарное температурное поле в модели.

Формирование температурного поля, термостатирование и контроль температурных параметров (температура и градиент температур) в грунтовой модели выполнялись по схеме, представленной на рисунке 3.3.

Согласно схеме (рисунок 3.3), на нижней плите прибора выставлялось фиксированное значение температуры t^H (термодатчик № 3). Далее поэтапно (1...n этапов) с шагом 0,2 °С понижалась температура на верхней плите t_i^B (термодатчик № 1).

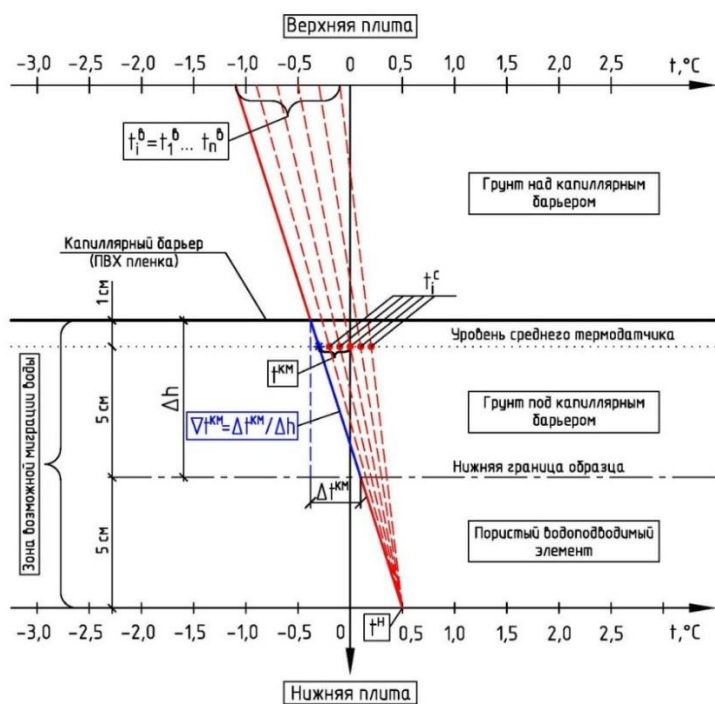


Рисунок 3.3 – Схема формирования и изменения температурного поля в грунтовой модели в процессе проведения эксперимента

Время каждого этапа зависело от времени термостатирования температурного поля в грунтовой модели. Показателями завершения термостатирования служили стабилизация температуры t_i^C у среднего термодатчика № 2 и формирование температурного поля в грунтовой модели по закону, близкому к линейному [85]. На каждом этапе выполнялась фиксация уровня воды в сосуде, с нанесенной мерной шкалой (рисунок 3.2).

Как только в нижней части модели (под капиллярным барьером) фиксировалась миграция воды (по изменению положения зеркала воды в сосуде), температура и градиент температуры под капиллярным барьером, на данном этапе опыта записывались, как температура t^{KM} и градиент температур ∇t^{KM} начала криогенной миграции влаги. Для следующего опыта (на той же грунтовой модели) изменялось значение температуры на нижней плите прибора t^{H} (термодатчик № 3), и опыт повторялся уже с формированием температурного поля с иными градиентами температур.

Каждый эксперимент состоял из шести последовательных опытов с различным значением температуры на нижних плитах установки t^{H} .

Последовательность и основные условия проведения лабораторного эксперимента по определению температурных критериев начала интенсивного криогенного влагопереноса для одного вида грунта представлены блок-схемой на рисунке 3.4.

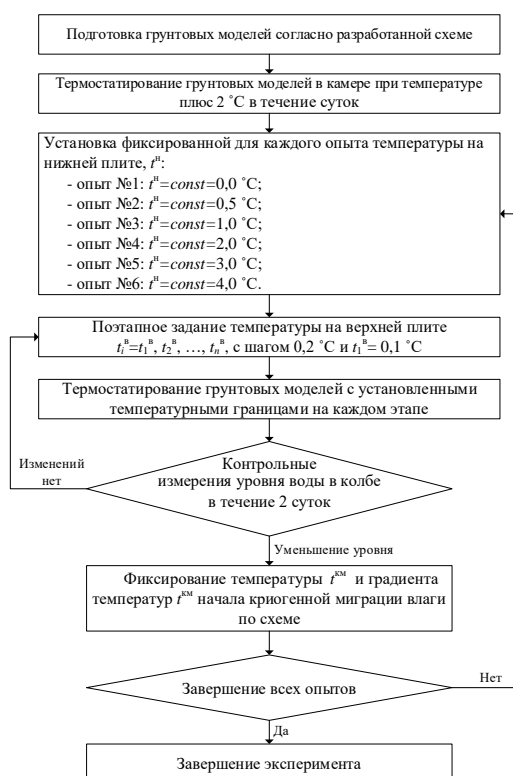


Рисунок 3.4 – Последовательность лабораторного эксперимента по определению температурных критериев начала интенсивного криогенного влагопереноса

Общий вид подготовленных для проведения эксперимента грунтовых моделей представлен на рисунке 3.5. Поскольку установка ГТ 1.1.12 позволяет

проводить до трех параллельных испытаний, испытания для каждого опыта проводились в трех повторностях.

а)



б)



Рисунок 3.5 – Подготовленные для проведения эксперимента грунтовые модели в установке ГТ 1.1.12

а – общий вид грунтовой модели с капиллярным барьером; б – грунтовые модели с установленными термоизоляцией и датчиками

В ходе эксперимента программный комплекс прибора позволял производить непрерывный контроль температур верха, низа и середины грунтовых моделей в реальном времени.

3.1.2 Результаты определения двухпараметрических температурных критериев начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером

Проведенный эксперимент позволил определить температурные критерии (температуру t^{KM} и градиент температур ∇t^{KM} под капиллярным барьером), соответствующие началу интенсивного криогенного влагопереноса.

Для наглядности методики проведения эксперимента по определению двухпараметрических температурных критериев начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером экспериментальные данные для суглинка тяжелого пылеватого представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Расширенные экспериментальные данные для суглинка тяжелого

№ Опыта	№ Этапа	Температура на плитах		Температурное поле под капиллярным барьером в грунтовых моделях		Изменение уровня воды в сосуде		
		Нижняя ($t^H, ^\circ\text{C}$)	Верхняя ($t_i^B, ^\circ\text{C}$)	Температура ($t^c, ^\circ\text{C}$)	Градиент температур ($\nabla t, ^\circ\text{C}/\text{см}$)	Образец №1	Образец №2	Образец №3
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0,0	0,0	0,0	0,00	нет	нет	нет
	2		-0,2	-0,1	0,01	нет	нет	нет
	3		-0,4	-0,2	0,02	нет	нет	нет
	4		-0,6	-0,3	0,03	нет	нет	нет
	5		-0,8	-0,4	0,04	нет	нет	нет
	6		-1,0	-0,5	0,05	нет	нет	нет
	7		-1,2	-0,6	0,06	нет	нет	нет
	8		-1,4	-0,7	0,07	нет	нет	нет
	9		-1,6	-0,8	0,08	нет	нет	нет
	10		-1,8	-0,9	0,09	нет	нет	да
	11		-2,0	-1,0	0,10	да	нет	-
	12		-2,2	-1,1	0,11	-	да	-
Температурные критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером					$t_1^{KM1}, ^\circ\text{C}$	-1,0	$\nabla t_1^{KM1}, ^\circ\text{C}/\text{см}$	0,10
					$t_2^{KM1}, ^\circ\text{C}$	-1,1	$\nabla t_2^{KM1}, ^\circ\text{C}/\text{см}$	0,11
					$t_3^{KM1}, ^\circ\text{C}$	-0,9	$\nabla t_3^{KM1}, ^\circ\text{C}/\text{см}$	0,09
2	1	0,5	-0,1	0,2	0,03	нет	нет	нет
	2		-0,3	0,1	0,04	нет	нет	нет
	3		-0,5	0,0	0,05	нет	нет	нет
	4		-0,7	-0,1	0,06	нет	нет	нет
	5		-0,9	-0,2	0,07	нет	нет	нет
	6		-1,1	-0,3	0,08	нет	нет	нет
	7		-1,3	-0,4	0,09	нет	нет	нет
	8		-1,5	-0,5	0,10	нет	да	нет
	9		-1,7	-0,6	0,11	нет	-	да
	10		-1,9	-0,7	0,12	да	-	-
Температурные критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером					$t_1^{KM2}, ^\circ\text{C}$	-0,7	$\nabla t_1^{KM2}, ^\circ\text{C}/\text{см}$	0,12
					$t_2^{KM2}, ^\circ\text{C}$	-0,5	$\nabla t_2^{KM2}, ^\circ\text{C}/\text{см}$	0,10
					$t_3^{KM2}, ^\circ\text{C}$	-0,6	$\nabla t_3^{KM2}, ^\circ\text{C}/\text{см}$	0,11
3	1	1,0	0,0	0,5	0,05	нет	нет	нет
	2		-0,2	0,4	0,06	нет	нет	нет
	3		-0,4	0,3	0,07	нет	нет	нет
	4		-0,6	0,2	0,08	нет	нет	нет
	5		-0,8	0,1	0,09	нет	нет	нет
	6		-1,0	0,0	0,10	нет	нет	нет
	7		-1,2	-0,1	0,11	нет	нет	нет
	8		-1,4	-0,2	0,12	нет	нет	нет
	9		-1,6	-0,3	0,13	да	да	нет
	10		-1,8	-0,4	0,14	-	-	да
Температурные критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером					$t_1^{KM3}, ^\circ\text{C}$	-0,3	$\nabla t_1^{KM3}, ^\circ\text{C}/\text{см}$	0,13
					$t_2^{KM3}, ^\circ\text{C}$	-0,3	$\nabla t_2^{KM3}, ^\circ\text{C}/\text{см}$	0,13
					$t_3^{KM3}, ^\circ\text{C}$	-0,4	$\nabla t_3^{KM3}, ^\circ\text{C}/\text{см}$	0,14
4	1	2,0	0,0	1,0	0,10	нет	нет	нет
	2		-0,2	0,9	0,11	нет	нет	нет
	3		-0,4	0,8	0,12	нет	нет	нет

Окончание таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	4		-0,6	0,7	0,13	нет	нет	нет
	5		-0,8	0,6	0,14	нет	нет	нет
	6		-1,0	0,5	0,15	нет	нет	нет
	7		-1,2	0,4	0,16	нет	нет	нет
	8		-1,4	0,3	0,17	нет	нет	нет
	9		-1,6	0,2	0,18	нет	нет	нет
	10		-1,8	0,1	0,19	нет	нет	да
	11		-2,0	0,0	0,20	нет	да	-
	12		-2,2	-0,1	0,21	да	-	-
Температурные критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером					$t_1^{KM4}, ^\circ C$	-0,1	$\nabla t_1^{KM4}, ^\circ C/cm$	0,21
					$t_2^{KM4}, ^\circ C$	0,0	$\nabla t_2^{KM4}, ^\circ C/cm$	0,20
					$t_3^{KM4}, ^\circ C$	0,1	$\nabla t_3^{KM4}, ^\circ C/cm$	0,19
5	1	3,0	0,0	1,5	0,15	нет	нет	нет
	2		-0,2	1,4	0,16	нет	нет	нет
	3		-0,4	1,3	0,17	нет	нет	нет
	4		-0,6	1,2	0,18	нет	нет	нет
	5		-0,8	1,1	0,19	нет	нет	нет
	6		-1,0	1,0	0,20	нет	нет	нет
	7		-1,2	0,9	0,21	нет	нет	нет
	8		-1,4	0,8	0,22	нет	нет	нет
	9		-1,6	0,7	0,23	нет	нет	нет
	10		-1,8	0,6	0,24	нет	нет	нет
	11		-2,0	0,5	0,25	нет	нет	нет
	12		-2,2	0,4	0,26	да	нет	да
	13		-2,4	0,3	0,27	-	да	-
Температурные критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером					$t_1^{KM5}, ^\circ C$	0,4	$\nabla t_1^{KM5}, ^\circ C/cm$	0,26
					$t_2^{KM5}, ^\circ C$	0,3	$\nabla t_2^{KM5}, ^\circ C/cm$	0,27
					$t_3^{KM5}, ^\circ C$	0,4	$\nabla t_3^{KM5}, ^\circ C/cm$	0,26
6	1	4,0	0,0	2,0	0,20	нет	нет	нет
	2		-0,2	1,9	0,21	нет	нет	нет
	3		-0,4	1,8	0,22	нет	нет	нет
	4		-0,6	1,7	0,23	нет	нет	нет
	5		-0,8	1,6	0,24	нет	нет	нет
	6		-1,0	1,5	0,25	нет	нет	нет
	7		-1,2	1,4	0,26	нет	нет	нет
	8		-1,4	1,3	0,27	нет	нет	нет
	9		-1,6	1,2	0,28	нет	нет	нет
	10		-1,8	1,1	0,29	нет	нет	нет
	11		-2,0	1,0	0,30	нет	нет	нет
	12		-2,2	0,9	0,31	нет	нет	нет
	13		-2,4	0,8	0,32	нет	да	да
	14		-2,6	0,7	0,33	да	-	-
Температурные критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером					$t_1^{KM5}, ^\circ C$	0,7	$\nabla t_1^{KM5}, ^\circ C/cm$	0,33
					$t_2^{KM5}, ^\circ C$	0,8	$\nabla t_2^{KM5}, ^\circ C/cm$	0,32
					$t_3^{KM5}, ^\circ C$	0,8	$\nabla t_3^{KM5}, ^\circ C/cm$	0,32

Экспериментальные данные (средние значения параметров температурного поля в грунтовых моделях в момент начала криогенного влагопереноса по

результатам не менее трех испытаний для каждого опыта) представлены в сводной таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Экспериментальные данные для исследуемых грунтов

№ Опыта	Средние значения параметров температурного поля под капиллярным барьером в грунтовых моделях в момент начала криогенного влагопереноса	
	Температура (t_i^c), °C	Градиент температур (∇t_i^c), °C/см
1	2	3
Исследуемый грунт: супесь пылевая с $I_p=0,05$		
1/1	-0,40	0,02
1/2	-0,30	0,03
3	-0,07	0,06
4	0,13	0,09
5	0,67	0,13
6	1,00	0,20
7	1,37	0,26
Исследуемый грунт: суглинок легкий пылеватый с $I_p=0,09$		
1	-0,80	0,08
2	-0,50	0,10
3	-0,17	0,12
4	0,30	0,17
5	0,87	0,21
6	1,10	0,29
Исследуемый грунт: суглинок тяжелый пылеватый с $I_p=0,13$		
1	-1,00	0,10
2	-0,60	0,11
3	-0,33	0,13
4	0,00	0,20
5	0,37	0,26
6	0,77	0,32

Аппроксимация полученных экспериментальных данных осуществлялась путем построения графиков с последующим подбором подходящих аппроксимирующих функций (линий тренда). На рисунке 3.6 представлены графики с нанесенными экспериментальными точками и аппроксимирующими кривыми для супеси пылевой ($I_p=0,05$), суглинка легкого пылеватого ($I_p=0,09$) и суглинка тяжелого пылеватого ($I_p=0,13$). Физический смысл аппроксимирующих функций на рисунке 3.6 – это граница области начала криогенного влагопереноса в грунтах ниже капиллярного барьера.

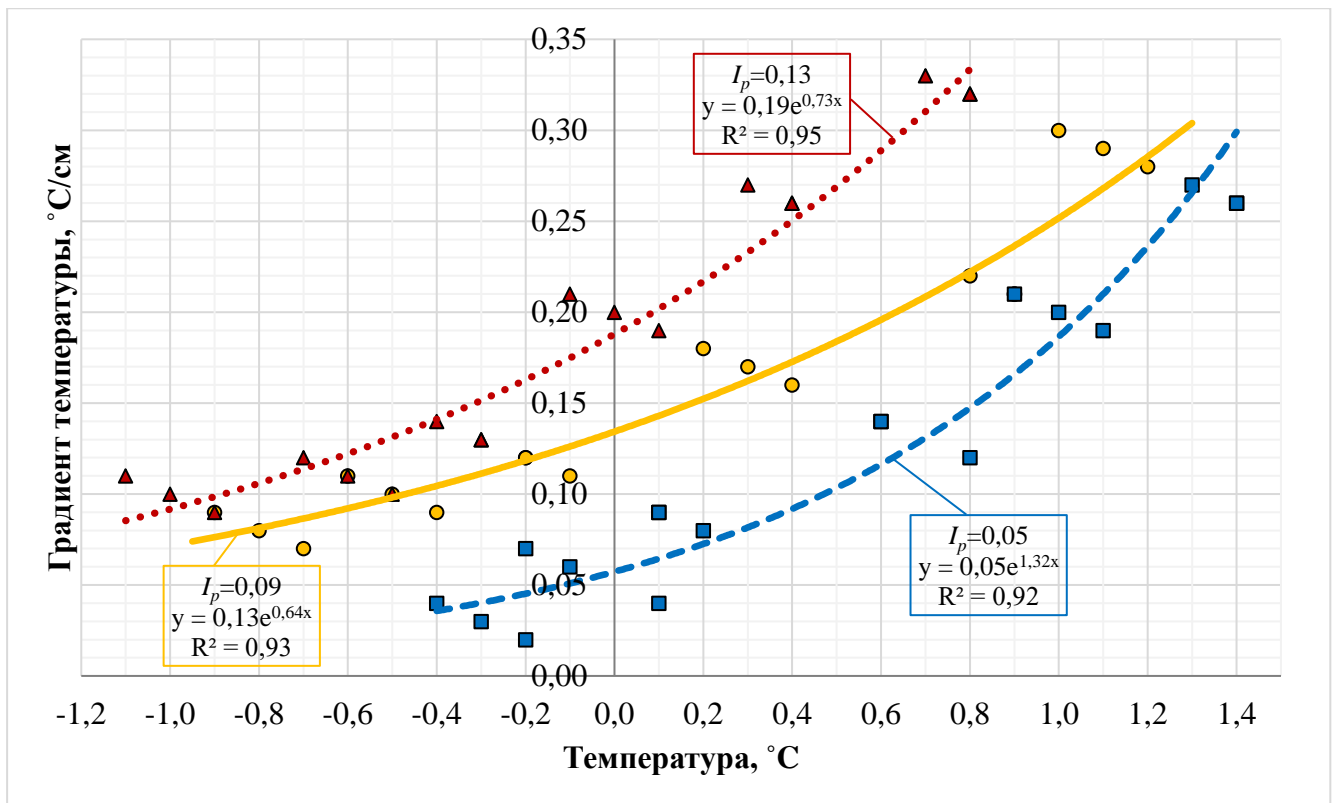


Рисунок 3.6 – Экспериментальные данные для супеси пылеватой ($I_p=0,05$), суглинка легкого пылеватого ($I_p=0,09$) и суглинка тяжелого пылеватого ($I_p=0,13$), аппроксимированные экспоненциальными функциями

Следует отметить, что именно «криогенный» влагоперенос, в классическом понимании, происходит в левой относительно оси ординат части графика. При относительно высоких градиентах температур, именно они становятся основной движущей составляющей влагопереноса, и миграция влаги начинается, в том числе, при положительных температурах грунта. Этот факт не препятствует получению, и даже расширяет возможности решения поставленной задачи – определения рациональной глубины расположения капиллярного барьера.

Аппроксимация показала (рисунок 3.6), что полученные экспериментальные данные наиболее точно описываются экспоненциальными функциями. Достоверность аппроксимации (R^2) для каждого графика составила более 0,90, что демонстрирует адекватность математической модели и высокую степень близости аппроксимации экспериментальных данных выбранной функции.

Например, уравнение экспоненциальной аппроксимирующей функции для супеси пылеватой ($I_p=0,05$) имеет следующий вид:

$$\nabla t^{\text{KM}} - 0,05e^{1,32t^{\text{KM}}} = 0. \quad (3.1)$$

Тогда, исходя из полученного уравнения, двухпараметрический температурный критерий начала криогенного влагопереноса для супеси пылеватой ($I_p=0,05$) будет иметь вид:

$$\nabla t - 0,05e^{1,32t} > 0, \quad (3.2)$$

где ∇t – градиент температуры в зоне промерзания, °С/см, t – температура в зоне промерзания, °С.

Аналогично двухпараметрический температурный критерий начала криогенного влагопереноса для суглинка легкого пылеватого ($I_p=0,09$) будет иметь вид:

$$\nabla t - 0,13e^{0,64t} > 0. \quad (3.3)$$

Для суглинка тяжелого пылеватого ($I_p=0,13$):

$$\nabla t - 0,19e^{0,73t} > 0. \quad (3.4)$$

По результатам проведенного исследования установлены функциональные зависимости двухпараметрических температурных критериев начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером для грунтов с числом пластичности 0,05 (супесь пылеватая), 0,09 (суглинок легкий пылеватый) и 0,13 (суглинок тяжелый пылеватый), которые представлены в виде условий (3.2) – (3.4).

Формирование в грунтах земляного полотна ниже капиллярного барьера температурного поля, удовлетворяющего условиям (3.2), (3.3) и (3.4) будет свидетельствовать о начале криогенного влагопереноса под проектируемой конструкцией, что допускать не рекомендуется. В этом случае необходимо увеличивать глубину расположения капиллярного барьера в земляном полотне.

Полученные результаты исследования позволят, при известном прогнозном температурном поле в земляном полотне, определить рациональную глубину расположения капиллярного барьера z_{bl} .

3.2 Экспериментальное исследование коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов при промерзании

Для обоснованного назначения проектной толщины капиллярного барьера с использованием решения (2.14) (см. главу 2), поставлены следующие подзадачи:

- поставить и провести лабораторный эксперимент для определения коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов;
- определить зависимости коэффициентов влагопроводности силикатизированного грунта от плотности вяжущего (водного раствора силиката натрия) и числа пластичности исходного грунта;
- оценить влияние процесса промерзания на коэффициенты влагопроводности силикатизированного грунта.

3.2.1 Постановка и проведение лабораторного эксперимента для силикатизированных грунтов

Все разработанные к настоящему времени методы определения коэффициента влагопроводности талых грунтов основаны на законе переноса влаги, и в зависимости от характера и величины потока влаги через единичную площадь в единицу времени, делятся на две основные группы: стационарного или нестационарного влагообмена [37]. В условиях стационарного изотермического влагообмена удельный поток влаги в единицу времени имеет постоянное значение во всех сечениях образца. При нестационарном изотермическом влагообмене в каждом сечении образца поток влаги изменяется во времени.

Методы стационарного влагообмена позволяют давать более точные значения коэффициента влагопроводности грунтов. Однако, значительными недостатками таких методов являются сложность реализации в лабораторных условиях и высокая продолжительность одного опыта.

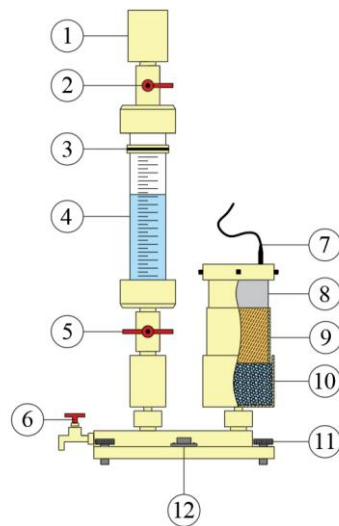
В свою очередь для условий нестационарного изотермического влагообмена существуют известные методики и приборы [73, 95, 109], а длительность лабораторного опыта не превышает нескольких часов, что является большим преимуществом при реализации лабораторных экспериментов. При этом, точность определения коэффициента влагопроводности при нестационарном изотермическом влагообмене можно повысить путем тщательного соблюдения начальных и граничных условий эксперимента.

На основании вышеизложенного дальнейшие исследования по определению коэффициентов влагопроводности грунтов проводились в условиях нестационарного изотермического влагообмена. По данной методике А.В. Сухоруковым [44, 95, 96] выполнены определения коэффициентов влагопроводности для широкого спектра глинистых грунтов дорожно-климатических районов Сибири.

В качестве основного лабораторного прибора при реализации эксперимента использовался прибор для определения коэффициента влагопроводности грунтов ПКВГ-Ф. Автор выражает благодарность коллегам из Томского государственного строительного университета за предоставленный для проведения исследований прибор ПКВГ-Ф и ценные советы по его применению.

Принципиальная схема конструкции прибора ПКВГ-Ф представлена на рисунке 3.7. Для оценки влияния на коэффициент влагопроводности процесса промерзания, использовался автоматизированный прибор ГТ 1.1.12.

Методика определения коэффициента влагопроводности с помощью прибора ПКВГ-Ф схожа с методикой для прибора конструкции И.А. Золотаря, Г.И. Собко, Ю.Г. Лазарева. Незначительные отличия методик обусловлены некоторой разницей в конструкциях приборов. При этом прибор ПКВГ-Ф обеспечивает те же начальные и граничные условия, что и прибор конструкции И.А. Золотаря, Г.И. Собко, Ю.Г. Лазарева [73].



1 – заливной цилиндр; 2 – заливной вентиль; 3 – фиксирующее кольцо; 4 – питающий сосуд с нанесенной шкалой расхода воды; 5 – питающий вентиль; 6 – сливной вентиль; 7 – сетевой шнур; 8 – регистрирующий блок со встроенным минутным таймером и датчиком определения влажности; 9 – кольцо с исследуемым грунтом (грунтовый цилиндр); 10 – форма с фильтрующим материалом; 11 – подъемные винты; 12 – круглый уровень.

Рисунок 3.7 – Схема конструкции прибора ПКВГ-Ф для определения коэффициента влагопроводности грунтов

Функционирование прибора построено на принципе работы сообщающихся сосудов, которые образуют форма для фильтрующего материала и питающая камера. Соединение питающего сосуда с питающей камерой при помощи трубки с косым отверстием, расположенной на уровне поверхности фильтрационного материала, при закрытом заливном вентиле обеспечивает их работу как сосуд Мариотта [73].

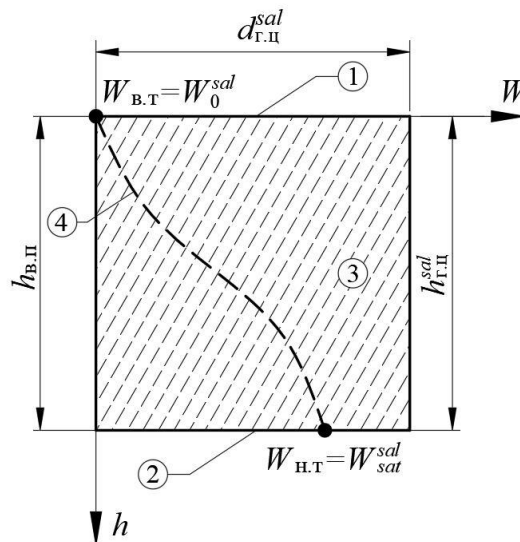
Впитывание определенного объема воды из формы для фильтрующего материала приводит к понижению ее уровня в питающей камере, куда незамедлительно поступает вода из питающего сосуда. Для обеспечения надежности работы питающего сосуда в подводящую трубку вставлен металлический стержень.

В качестве фильтрующего материала служит песок определенного зернового состава. Питающий сосуд и форма с фильтрующим материалом заполняются отстоянной термостатированной водой.

Важным условием точности определения коэффициентов влагопроводности является соблюдение начальных и граничных условий, которые сводятся к следующим положениям:

- создание равномерной одинаковой начальной влажности и плотности по высоте грунтового образца;
- увлажнение грунтового образца должно происходить в безнапорном режиме с постоянной интенсивностью;
- грунтовой образец, увлажняемый через нижнюю поверхность, не должен изменять влажность на верхнем торце.

Схема исследуемого образца силикатизированного грунта для определения коэффициентов влагопроводности представлена на рисунке 3.8.



1 – верхний торец образца; 2 – нижний торец образца; 3 – образец; 4 – эпюра влажности (график распределения влажности по высоте образца); $h_{г.ц}^{sal}$ – диаметр образца, см (7,0 см); $h_{г.ц}^{sal}$ – высота образца, см (7,0 см), $h_{в.п}$ – высота поднятия фронта увлажнения, см; $W_{в.т}$ – влажность на верхнем торце образца, д.е.; $W_{н.т}$ – влажность на нижнем торце образца, д.е.; W_0^{sal} – начальная влажность образца, д.е.; W_{sat}^{sal} – полная влагоемкость исследуемого силикатизированного грунта, д.е.

Рисунок 3.8 – Схема силикатизированного грунтового цилиндра с примером формирования эпюры влажности для прибора ПКВГ-Ф

В качестве исходных материалов для лабораторного эксперимента по определению коэффициентов влагопроводности приняты глинистые грунты с

числом пластичности (I_p) от 0,05 до 0,13. Физические характеристики грунтов для эксперимента представлены в таблице 3.1.

В качестве вяжущего применялся водный раствор метасиликата натрия марки Б по ГОСТ 13078 [16].

Для сравнительного анализа испытания выполнялись как для силикатизированных, так и для исходных грунтов.

Формирование лабораторных образцов для каждого вида грунта без силиката натрия производилось при оптимальной влажности до коэффициента уплотнения равному 0,95 с помощью прибора стандартного уплотнения. Затем из полученного монолита с помощью кольца, входящим в комплект прибора ПКВГ-Ф вырезался грунтовый цилиндр диаметром и высотой 7 см.

Для изготовления образцов силикатизированного грунта в приборе стандартного уплотнения предварительно рассчитывался необходимый объем водного раствора силиката натрия. Далее рассчитанный объем раствора тщательно перемешивался с исходным высушенным грунтом (рисунки 3.9, а и 3.9, б). Перемешанный силикатизированный грунт уплотнялся в приборе стандартного уплотнения. Из полученного монолита с помощью кольца прибора ПКВГ-Ф вырезался необходимый образец (рисунок 3.9, в). Затем образцы помещались в эксикатор, где производилось их отверждение и последующее водонасыщение до оптимальной влажности.



Рисунок 3.9 – Приготовление образца из силикатизированного грунта:

а – подготовка раствора силиката натрия требуемой концентрации; б – пропитка исходного грунта раствором силиката натрия; в – подготовка грунтового цилиндра

Параллельно с подготовкой образца грунта выполнялась подготовка прибора ПКВГ-Ф к работе в соответствии с паспортом (инструкцией).

В остальном, подробное описание методики подготовки и проведения испытания по определению коэффициентов влагопроводности грунтов на приборе ПКВГ-Ф представлено в работе А. В. Сухорукова [95].

На завершающей стадии испытания, при выходе фронта увлажнения на верхнюю поверхность лабораторного образца датчик фиксирует изменение влажности и останавливает минутный таймер. На таймере фиксируется время (τ), затраченное на перемещение фронта увлажнения от нижнего торца грунтового образца до его верхнего торца. В этот же момент фиксируется конечный уровень воды (H_k) в питающем сосуде, после чего испытание считается законченным.

Лабораторный эксперимент выполнялся для каждого из намеченных видов грунта (супесь, суглинок легкий, суглинок тяжелый). Каждый опыт для отдельного вида грунта состоял из пяти этапов с различной плотностью водного раствора (концентрацией) силиката натрия. В свою очередь каждый этап опыта проводился в шести повторностях.

Образцы исходного грунта увлажнялись только водой без добавления силиката натрия. Для таких образцов, для упрощения обработки результатов, плотность водного «раствора силиката натрия» принята 1,00 (без силиката натрия).

Значение переменных параметров опытов и этапов в рамках эксперимента представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Переменные параметры опытов и этапов в рамках эксперимента

№ этапа	Плотность водного раствора силиката натрия (ρ_{sal}^n), гр/см ³	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
		Супесь пылеватая ($I_p=0,05$)	Суглинок легкий пылеватый ($I_p=0,09$)	Суглинок тяжелый пылеватый ($I_p=0,13$)
0	1,00 (без силиката натрия)	•••••	•••••	•••••
1	1,05	•••••	•••••	•••••
2	1,10	•••••	•••••	•••••
3	1,15	•••••	•••••	•••••
4	1,20	•••••	•••••	•••••
5	1,25	•••••	•••••	•••••

Примечание: • - повторность испытания

Далее для подготовленных образцов проводились испытания согласно описанной выше методике. Пример проведения этапа эксперимента в приборе ПКВГ-Ф представлен на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – Проведение этапа эксперимента в приборе ПКВГ-Ф

За расчетное значение коэффициентов влагопроводности для каждого этапа эксперимента принимались результаты испытаний по шести определениям с доверительной вероятностью 0,95, при одностороннем (в большую сторону) ограничении доверительного интервала. Обработка полученных результатов производилась согласно ГОСТ 20522 [17].

Последовательность статистической обработки полученных экспериментальных данных представлена ниже.

Расчетное значение коэффициента влагопроводности (K_{wp}) вычислялось по формуле (3.5):

$$K_{wp} = \frac{\overline{K_w}}{\gamma_g}, \quad (3.5)$$

где $\overline{K_w}$ – среднеарифметическое значение коэффициента влагопроводности по n испытаниям, см²/ч; γ_g – коэффициент надежности для исследуемого грунта, определяемый по формуле (3.6):

$$\gamma_g = \frac{1}{1 + \rho_\alpha}, \quad (3.6)$$

где ρ_α – показатель точности (погрешности) среднего значения коэффициента вариации коэффициента влагопроводности, который определяется по формуле (3.7):

$$\rho_\alpha = \frac{t_\alpha V}{\sqrt{n}}, \quad (3.7)$$

где t_α – коэффициент Стьюдента для заданной односторонней доверительной вероятности (0,95) и числа степеней свободы $K=n-1$; n – число определений коэффициента влагопроводности; V – коэффициент вариации коэффициента влагопроводности, определяемый по формуле (3.8):

$$V = \frac{S}{\bar{K}_w}, \quad (3.8)$$

где S – среднеквадратическое отклонение результатов определения коэффициентов влагопроводности, вычисляемое по формуле (3.9):

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{K}_w - K_{wi})^2}. \quad (3.9)$$

Проведенный эксперимент позволил определить значения коэффициентов влагопроводности для трех видов исследованных видов грунтов с различной плотностью водного раствора (концентрацией) раствора силиката натрия.

3.2.2 Результаты лабораторного эксперимента по определению коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов

По определенным в ходе испытания значениям времени (τ) и количества впитавшейся воды (m_B) вычислены коэффициенты влагопроводности грунта по формуле:

$$K_w = \frac{4}{3,14d^4\tau} \left[\frac{m_B}{\rho_d(W_{sat} - W_0)} \right]^2, \quad (3.10)$$

где d – диаметр грунтового образца, см (7 см); τ – время водонасыщения, ч; m_B – масса впитавшейся в образец воды, определяемая по формуле (3.11) г; ρ_d – плотность сухого материала, г/см³; W_{sat} – полная влагоемкость образца, определяемая по формуле (3.12), д.е.; W_0 – начальная влажность образца, близкая к оптимальной, д.е.

$$m_B = H_K - H_H, \quad (3.11)$$

где H_n – начальный уровень воды в питающем сосуде, г; H_k – конечный уровень воды в питающем сосуде, г.

$$W_{sat} = \frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s}, \quad (3.12)$$

где ρ_s – плотность частиц грунта, г/см³.

Результаты определения коэффициентов влагопроводности для силикатизированных и исходных грунтов представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты определения коэффициентов влагопроводности для исследуемых грунтов

№ опыта	№ этапа	I_p , д.е.	ρ_{sal} , г/см ³	n	$\overline{K_w}$, см ² /ч	K_{wp} , см ² /ч
1	0	0,05	1,00*	6	3,07	3,53
	1	0,05	1,05	6	1,26	1,35
	2	0,05	1,10	6	0,41	0,53
	3	0,05	1,15	6	0,06	0,10
	4	0,05	1,20	6	0,06	0,09
	5	0,05	1,25	6	0,03	0,05
2	0	0,09	1,00*	6	2,17	2,31
	1	0,09	1,05	6	1,06	1,15
	2	0,09	1,10	6	0,32	0,37
	3	0,09	1,15	6	0,08	0,13
	4	0,09	1,20	6	0,05	0,08
	5	0,09	1,25	6	0,02	0,03
3	0	0,13	1,00*	6	1,16	1,33
	1	0,13	1,05	6	0,70	0,74
	2	0,13	1,10	6	0,38	0,42
	3	0,13	1,15	6	0,05	0,08
	4	0,13	1,20	6	0,02	0,03
	5	0,13	1,25	6	0,01	0,02

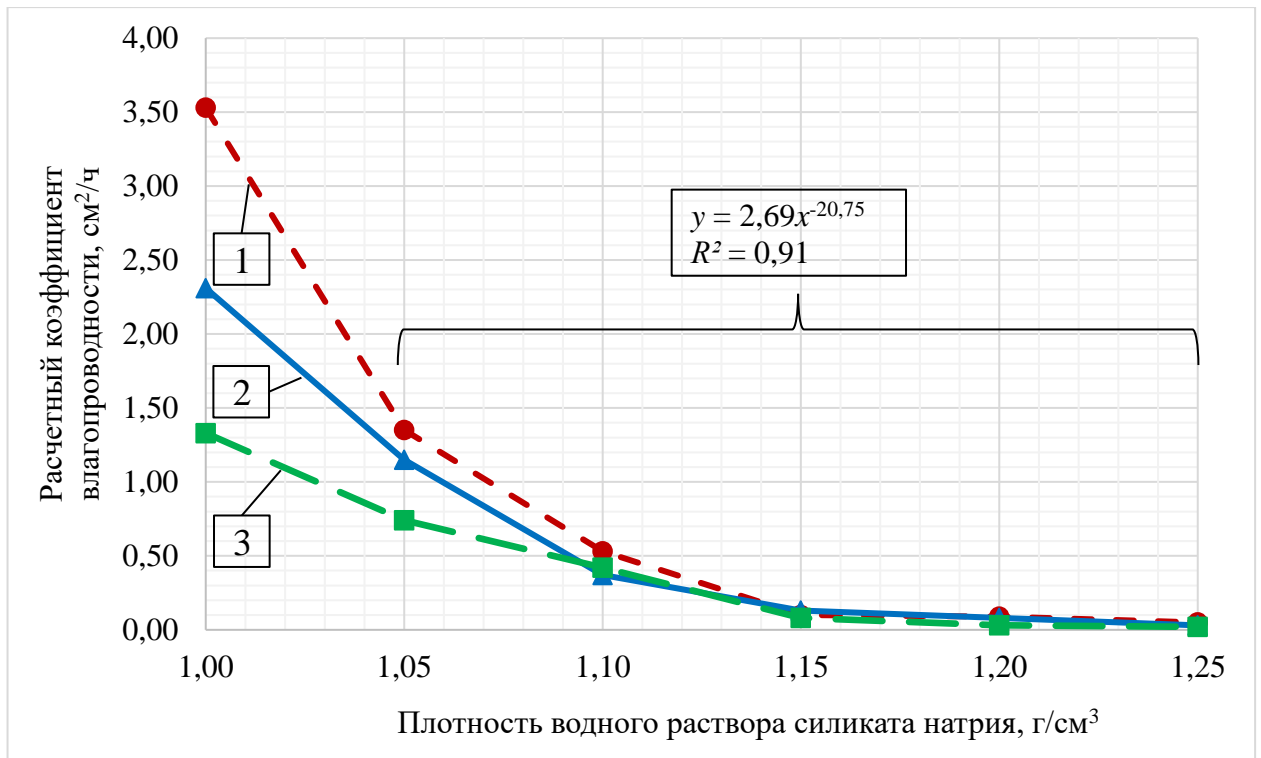
Примечание – в таблице использованы следующие условные обозначения:

- * – исходный грунт (без силиката натрия);

- n – число определений коэффициента влагопроводности;

- $\overline{K_w}$ – среднеарифметическое значение коэффициента влагопроводности по n испытаниям, см²/ч.

На рисунке 3.11 представлены зависимости расчетных коэффициентов влагопроводности исследуемых грунтов от плотности силиката натрия.



1 – супесь пылеватая ($I_p=0,05$), 2 – суглинок легкий пылеватый ($I_p=0,09$), 3 – суглинок тяжелый пылеватый ($I_p=0,13$)

Рисунок 3.11 – Расчетные значения коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов по результатам проведенного эксперимента

Анализ, приведенных выше результатов показывает, что фактические значения коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов при плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия более $1,15 \text{ г/см}^3$, стремятся к нулю. Соответственно, получаемый в результате силикатизации материал капиллярного барьера можно считать водонепроницаемым. При этом, стоит отметить, что силикатизация нивелирует отличия в коэффициенте влагопроводности для грунтов с различным числом пластичности [83].

Поэтому, зависимость коэффициента влагопроводности силикатизированного глинистого грунта (в диапазоне I_p от 0,05 до 0,13) от плотности водного раствора силиката натрия (в диапазоне от 1,05 до $1,25 \text{ г/см}^3$) можно аппроксимировать функцией $K_w = f(\rho_{sal})$.

Аппроксимация показала, что полученные значения лучше всего описываются степенной функцией. Достоверность аппроксимации (R^2) составила 0,91, что демонстрирует адекватность и высокую степень близости аппроксимации и полученных значений.

Уравнение аппроксимирующей функции для зависимости коэффициента влагопроводности силикатизированного глинистого грунта (в диапазоне I_p от 0,05 до 0,13) от плотности водного раствора силиката натрия (в диапазоне от 1,05 до 1,25 г/см³) имеет следующий вид:

$$K_w = 2,69\rho_{sal}^{-20,75}. \quad (3.13)$$

3.2.3 Оценка влияния процесса промерзания на коэффициенты влагопроводности силикатизированных грунтов

Применение силикатизированного грунта в качестве материала капиллярного барьера для минимизации морозного пучения подразумевает его расположение в зоне сезонного промерзания [81, 131, 134]. В связи с этим необходимо качественно оценить влияние промерзания на величину коэффициента влагопроводности силикатизированного грунта.

Понижение температуры грунта следует рассматривать как основной фактор формирования кинетических основ миграции воды. Понижение температуры вызывает приращение свободной энергии минеральной части [68], от которой зависят обменно-адсорбционная способность и количество воды, удерживаемой поверхностными силами. Свободная энергия тем больше, чем выше твердость минеральных частиц, которая, в свою очередь, зависит от температурного деформирования последних, формирующего микропути движения воды [68]. Вместе с тем некоторые грунты при охлаждении подвергаются объемному сжатию (контракции), связанному с отдачей тепла при межслоевой гидратации ионов в минералах с подвижной структурой, что способствует более плотной упаковке системы [68, 110].

Основываясь на вышесказанном, существует вероятность изменения влагопроводных свойств силикатизированного грунта капиллярного барьера при его промерзании. Поэтому, для оценки влияния промерзания на коэффициент влагопроводности силикатизированного грунта выполнены дополнительные лабораторные исследования.

Дополнительные лабораторные исследования представляли собой модификацию описанной выше методики определения коэффициента влагопроводности профессора И.А. Золотаря [73], но с моделированием условий промерзания.

В качестве установки для моделирования промерзания использовались автоматизированный прибор ГТ 1.1.12 и термостатирующая камера.

Установка в комплексе с программным обеспечением, позволяет моделировать в образце силикатизированного грунта зону промерзания с контролируемыми параметрами температуры и схемы увлажнения.

Поскольку ранее отмечено, что силикатизация нивелирует отличия в коэффициенте влагопроводности глинистых грунтов от числа пластичности, поэтому для данного эксперимента принят грунт с максимальным числом пластичности 13. При этом значения плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия приняты $1,05 \text{ г/см}^3$ и $1,25 \text{ г/см}^3$ (крайние значения в рамках исследования).

Методика приготовления силикатизированного грунта описана ранее. Отличием для данного эксперимента является формирование образцов непосредственно в кольцевых обоймах установки (ГТ 1.1.12) методом послойного трамбования.

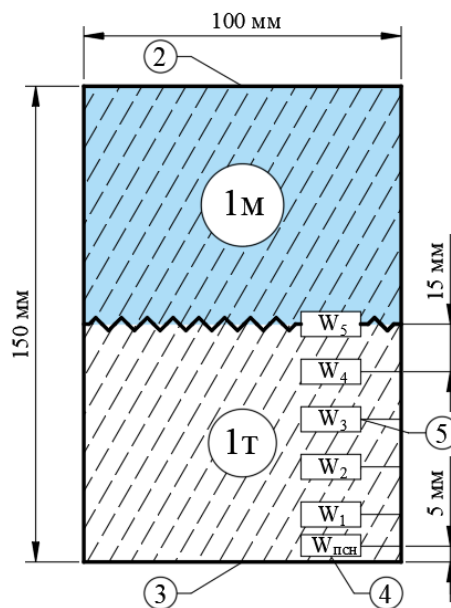
Подготовленный образец представлял собой цилиндр силикатизированного грунта диаметром 100 мм, высотой 150 мм внутри кольцевой обоймы прибора ГТ 1.1.12. Далее подготовленные образцы выдерживались в эксикаторе до оптимальной влажности.

После запуска установки, с помощью программного обеспечения, задавались температурные параметры эксперимента: на верхней плите минус $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$, на

нижней плите – плюс 0,5 °С. Образец термостатировали до установления температуры в минус 0,3 °С (температура начала замерзания) в его середине. После термостатирования открывался питающий сосуд с водой для начала процесса увлажнения образца через пористый материал.

Продолжительность этапа эксперимента после термостатирования и начала процесса увлажнения образца составляла 1 ч.

Схема к послойному определению влажности силикатизированного образца представлена на рисунке 3.12.



1м, т – образец силикатизированного грунта после завершения этапа эксперимента, соответственно в мерзлом и талом состояниях; 2 – верхний торец образца, 3 – нижний торец образца, 4 – влажность грунта у поверхности, через которую производится увлажнение ($W_{псн}$), 5 – влажность грунта в одном из сечений (W_n)

Рисунок 3.12 – Схема к послойному определению влажности силикатизированного образца

По завершении этапов эксперимента образцы силикатизированного грунта вынимались из прибора и в холодильной камере производилась их разделка. Разделка образца заключалась в послойном отборе материала в талой зоне для дальнейшего определения влажности в каждом сечении. По высоте образца сечения располагались через каждые 15 мм.

После определения влажности в каждом сечении ($W_1 - W_5$) и в точке у поверхности, через которую производится увлажнение ($W_{п.с.н}$) рассчитывалась средняя влажность силикатизированного образца грунта (\bar{W}).

Коэффициент влагопроводности силикатизированного грунта при промерзании рассчитывался по формуле 3.14 [73].

$$K_w = \frac{\pi h_{вп}^2}{4\tau} \left(\frac{\bar{W} - W_0}{W_{п.с.н} - W_0} \right)^2, \quad (3.14)$$

где $h_{вп}$ – высота впитывания (поднятия воды в образце), см; τ – время впитывания (время промораживания образца), ч; \bar{W} – средняя влажность образца, %; W_0 – начальная влажность образца (оптимальная), %; $W_{п.с.н}$ – влажность грунта у поверхности, через которую производится увлажнение, %.

Результаты определения коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов при промерзании представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты определения коэффициентов влагопроводности для исследуемых грунтов при промерзании

№ этапа	I_p	$\rho_{sal}, \text{г/см}^3$	$h_{вп}, \text{см}$	$\tau, \text{ч}$	$W_0, \%$	$\bar{W}, \%$	$W_{п.с.н}, \%$	$K_w, \text{см}^2/\text{ч}$
1	0,13	1,05	4,0	1,0	18	19,6	25	0,83
2	0,13	1,25	1,0	1,0	18	18,6	24	0,02

Проведенные дополнительные лабораторные исследования показали, что процесс промерзания для силикатизированного грунта имеет минимальные воздействия, не вызывающие кардинальные изменения влагопроводных свойств. Фактическая разность коэффициентов влагопроводности составила от 0,00 до 0,09 см²/ч.

3.3 Экспериментальное исследование коэффициентов морозного пучения силикатизированных глинистых грунтов

В рамках лабораторного эксперимента основной установкой являлся прибор для определения степени морозного пучения ГТ 1.1.12. Описание установки представлено ранее в исследовании. Установка ГТ 1.1.12 позволяет определять степень пучинистости грунта по нормативной методике [20].

В качестве исходных материалов для лабораторного эксперимента приняты три вида глинистых грунтов (супесь, суглинок легкий, суглинок тяжелый) и водный раствор метасиликата натрия марки Б по ГОСТ 13078 [16].

Физические характеристики и вид грунтов до силикатизации определены согласно методикам, описанным в [21, 15], и представлены в таблице 3.1.

Приготовление силикатизированного грунта производилось в лабораторных условиях. Изготовление лабораторных образцов из силикатизированного грунта выполнялось в кольцевой обойме прибора способом послойного трамбования до коэффициента уплотнения 0,95.

Подготовленный образец представлял собой цилиндр силикатизированного грунта диаметром 100 мм, высотой 150 мм внутри кольцевой обоймы прибора.

Предварительно перед испытанием готовые образцы выдерживались в воздушно-сухом состоянии в течение суток.

Далее подготовленные образцы помещали в камеру для термостатирования, с подключением всех необходимых датчиков и настройкой температурных условий согласно [20]. Во время эксперимента постоянно осуществлялся контроль за непрерывностью подтока воды к образцу силикатизированного грунта и поддержанием температуры «теплого» и «холодного» торцов образца.

Испытание прекращалось при промораживании образца грунта до глубины 2/3 высоты образца. Фиксирование относительной деформации морозного пучения в момент завершения испытания производилось в автоматическом режиме с помощью датчиков прибора.

Лабораторный эксперимент выполнен для каждого из намеченных видов грунта (супесь, суглинок легкий, суглинок тяжелый). Каждый эксперимент состоял из пяти опытов с различной концентрацией раствора силиката натрия. Дополнительно определены значения относительной деформации морозного пучения для исходных грунтов без силиката натрия.

Определения выполнялись на трех параллельных образцах исследуемого грунта. Значения относительной деформации морозного пучения вычислялись как среднеарифметическое результатов параллельных определений [20].

Значение переменных параметров опытов и этапов эксперимента представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Переменные параметры опытов и этапов эксперимента

№ этапа	Плотность водного раствора силиката натрия (ρ_{sal}^n), г/см ³	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
		Супесь пылеватая ($I_p=0,05$)	Суглинок легкий пылеватый ($I_p=0,09$)	Супесь тяжелый пылеватый ($I_p=0,13$)
0	1,00 (без силиката натрия)	•••••	•••••	•••••
1	1,05	•••••	•••••	•••••
2	1,10	•••••	•••••	•••••
3	1,15	•••••	•••••	•••••
4	1,20	•••••	•••••	•••••
5	1,25	•••••	•••••	•••••
Примечание: • - повторность испытания				

Последовательность и основные условия проведения лабораторного эксперимента по исследованию зависимости изменения коэффициентов морозного пучения силикатизированных грунтов от плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия представлены блок-схемой на рисунке 3.13.

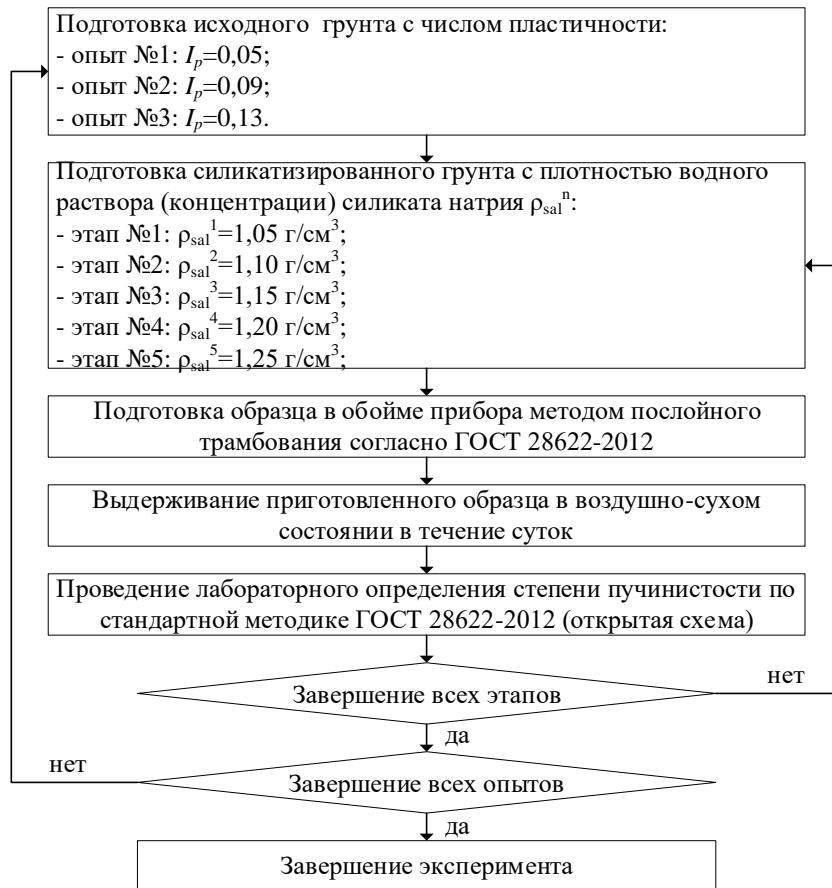


Рисунок 3.13 – Последовательность лабораторного эксперимента

Последовательность подготовки образцов из силикатизированного грунта для проведения лабораторного эксперимента представлена на рисунке 3.14 и рисунке 3.15

а)



б)

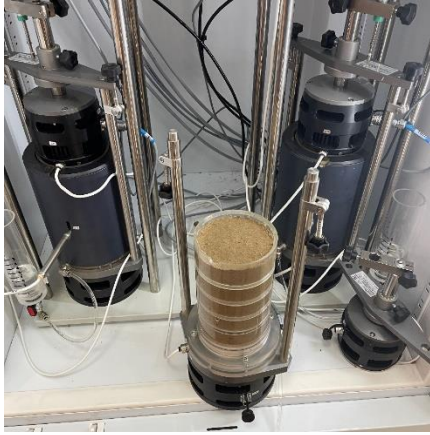


Рисунок 3.14 – Подготовка силикатизированного грунта

а – подготовка раствора силиката натрия требуемой плотности (концентрации);

б – пропитка исходного грунта раствором силиката натрия

а)



б)



Рисунок 3.15 – Подготовленные для проведения эксперимента образцы в установке ГТ 1.1.12

а – общий вид образца в кольцевой обойме; б – образцы силикатизированного грунта с установленными термоизоляцией и датчиками

По результатам проведенных опытов построены графики зависимости величин коэффициентов морозного пучения силикатизированных грунтов от плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия. Графики для исследуемых видов грунтов представлены на рисунках 3.16 – 3.18.

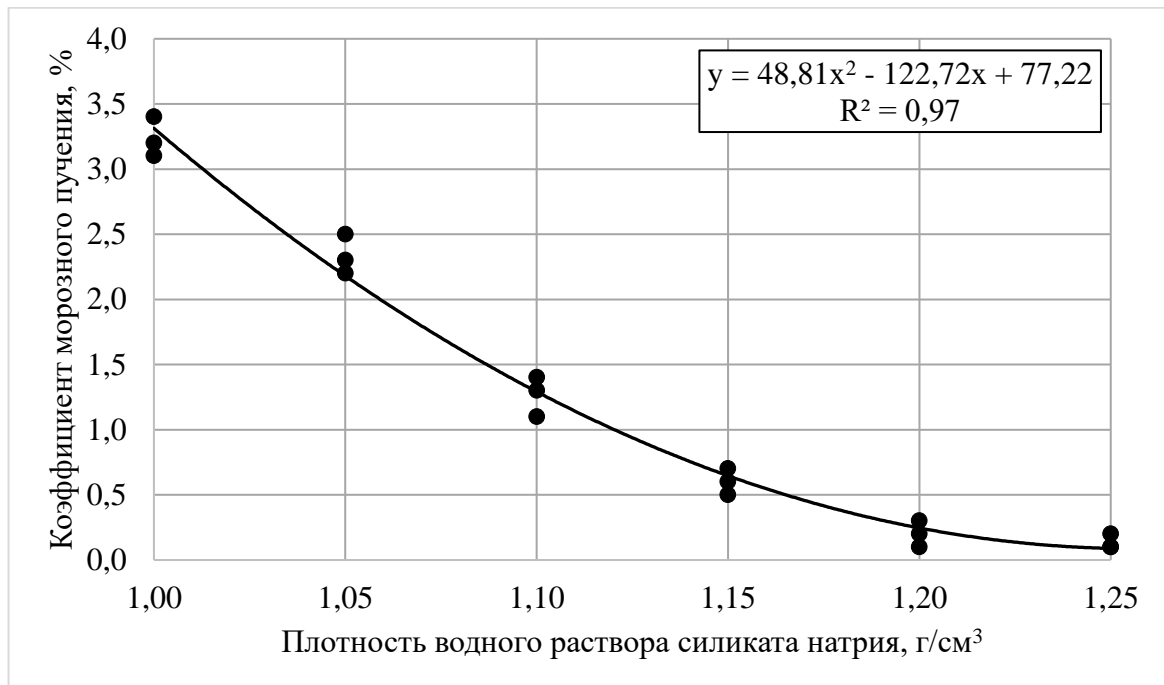


Рисунок 3.16 – График зависимости коэффициентов морозного пучения от плотности раствора силиката натрия для супеси пылевой ($I_p=0,05$)

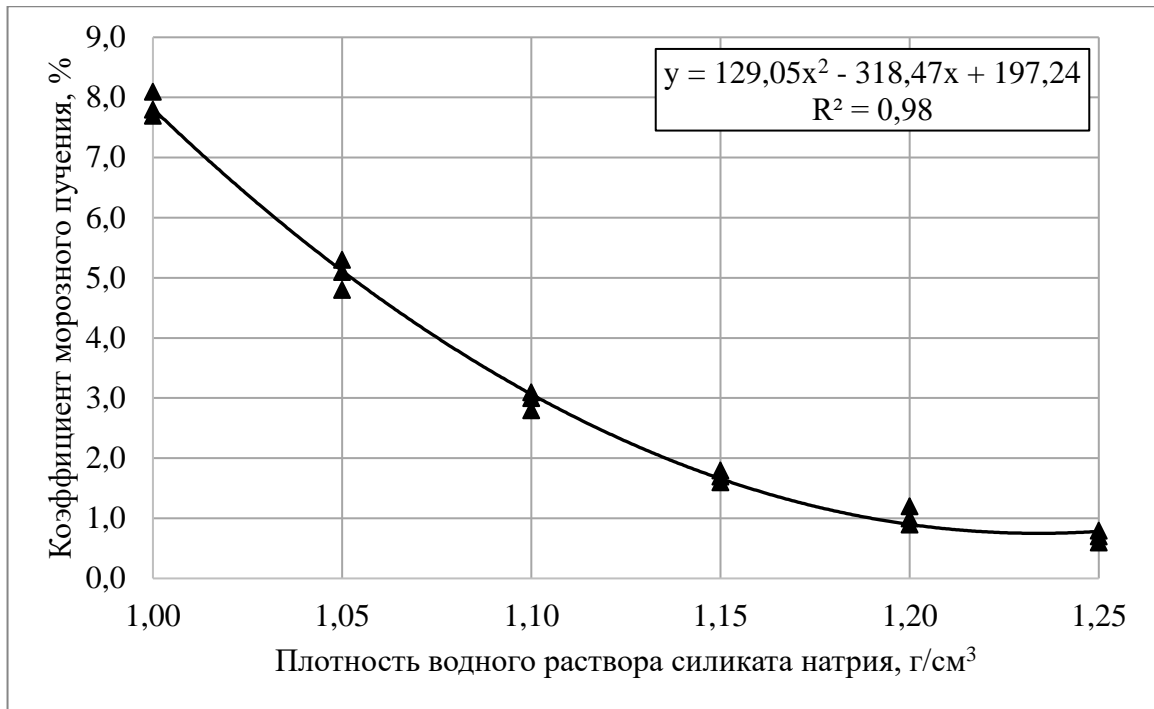


Рисунок 3.17 – График зависимости коэффициентов морозного пучения от плотности раствора силиката натрия для суглинка легкого пылеватого ($I_p=0,09$)

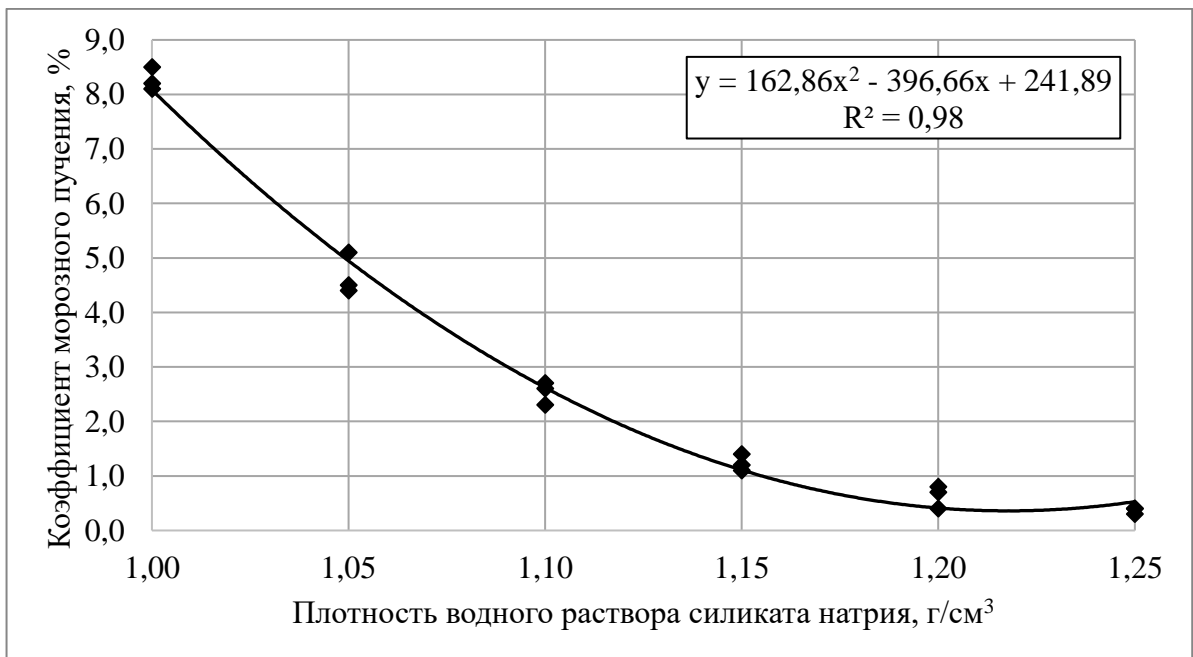


Рисунок 3.18 – График зависимости коэффициентов морозного пучения от плотности раствора силиката натрия для суглинка тяжелого пылеватого ($I_p=0,13$)

На основании статистической обработки полученных экспериментальных данных построена зависимость (в виде поверхности влияния) коэффициентов морозного пучения силикатизированного грунта от плотности водного раствора

(концентрации) силиката натрия и числа пластичности исходных грунтов (рисунок 3.19).

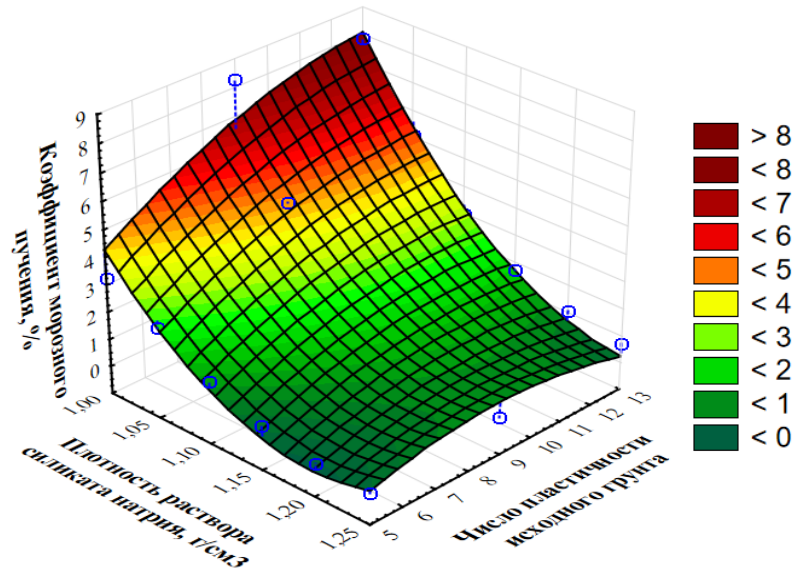


Рисунок 3.19 – Зависимость коэффициентов морозного пучения силикатизированного грунта от плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия и числа пластичности исходных грунтов

Результаты лабораторного эксперимента позволили определить функциональную зависимость изменения коэффициентов морозного пучения от плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия и числа пластичности исходного грунта, которая имеет вид:

$$K_{\text{пуч}}^{\text{sal}} = 113,62\rho_{\text{sal}}^2 - 0,04I_p^2 - 1,91\rho_{\text{sal}}I_p - 262,25\rho_{\text{sal}} + 3,16I_p + 147,68, \quad (3.15)$$

где $K_{\text{пуч}}^{\text{sal}}$ – величина коэффициента морозного пучения силикатизированного глинистого грунта при коэффициенте уплотнения 0,95; ρ_{sal} – плотность водного раствора (концентрации) силиката натрия; I_p – число пластичности исходного грунта.

Полученные результаты исследования позволяют, при известном типе грунта земляного полотна, назначить рациональную концентрацию раствора силиката натрия и рассчитать другие параметры силикатизации рабочего слоя земляного полотна при создании капиллярного барьера.

3.4 Выводы по главе 3

Проведенные экспериментальные исследования позволили получить данные и зависимости необходимые для дальнейшей разработки методики проектирования капиллярного барьера в земляном полотне автомобильных дорог, а именно:

1. Получены функциональные зависимости двухпараметрических температурных критериев начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером для грунтов с числом пластичности 0,05 (супесь пылеватая), 0,09 (суглинок легкий пылеватый) и 0,13 (суглинок тяжелый пылеватый), которые представлены в виде условий:

$$- \text{ для глинистого грунта с } I_p=0,05: \forall t - 0,05e^{1,32t} > 0;$$

$$- \text{ для глинистого грунта с } I_p=0,09: \forall t - 0,13e^{0,64t} > 0;$$

$$- \text{ для глинистого грунта с } I_p=0,13: \forall t - 0,19e^{0,73t} > 0.$$

2. Установлена зависимость коэффициента влагопроводности силикатизированного глинистого грунта (в диапазоне I_p от 0,05 до 0,13) от плотности водного раствора силиката натрия (в диапазоне от 1,05 до 1,25 г/см³), которая имеет следующий вид: $K_w = 2,69\rho_{sal}^{-20,75}$.

В том числе оценено влияние процесса промерзания на изменение влагопроводных свойств силикатизированного грунта. Проведенные дополнительные лабораторные исследования показали, что процесс промерзания для силикатизированного грунта имеет минимальные воздействия, не вызывающие кардинальные изменения влагопроводных свойств. Фактическая разность коэффициентов влагопроводности составила от 0,00 до 0,09 см²/ч.

3. Определена функциональная зависимость коэффициентов морозного пучения от плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия и числа пластичности исходного глинистого грунта, которая имеет вид:

$$K_{пуч}^{sal} = 113,62\rho_{sal}^2 - 0,04I_p^2 - 1,91\rho_{sal}I_p - 262,25\rho_{sal} + 3,16I_p + 147,68.$$

4. Получены решения, позволяющие разработать обоснованную методику проектирования капиллярного барьера в земляном полотне автомобильной дороги.

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАПИЛЛЯРНОГО БАРЬЕРА В ЗЕМЛЯНОМ ПОЛОТНЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

4.1 Алгоритм проектирования капиллярного барьера

Методика проектирования капиллярного барьера в земляном полотне автомобильных дорог составлена в виде алгоритма, который представляет последовательность связанных между собой условиями действий (рисунок 4.1).

Методика не противоречит профильным нормативным документам, таким как: СП 34.13330.2021 «СНиП 2.05.02-85* Автомобильные дороги», СП 78.13330.2012 «Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85», ПНСТ 542-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования», ГОСТ Р 59120-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования» [23, 76, 90, 91].

Перед проектированием капиллярного барьера в земляном полотне автомобильных дорог выполняется сбор исходных данных и проверочные расчеты конструкции дорожной одежды и земляного полотна по ПНСТ 542 [76]. Расчеты включают в себя проверку конструкций дорожных одежд на прочность, в том числе: по допускаемому упругому прогибу, сдвигоустойчивости рабочего слоя земляного полотна и конструктивных слоев из малосвязных материалов, сопротивлению слоев из асфальтобетона и промежуточных монолитных слоев основания усталостному разрушению от растяжения при изгибе. В случае необеспечения условий прочности конструкции дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна автомобильной дороги, выполняется проектирование необходимых мероприятий согласно действующим нормативно-техническим документам [76, 90].

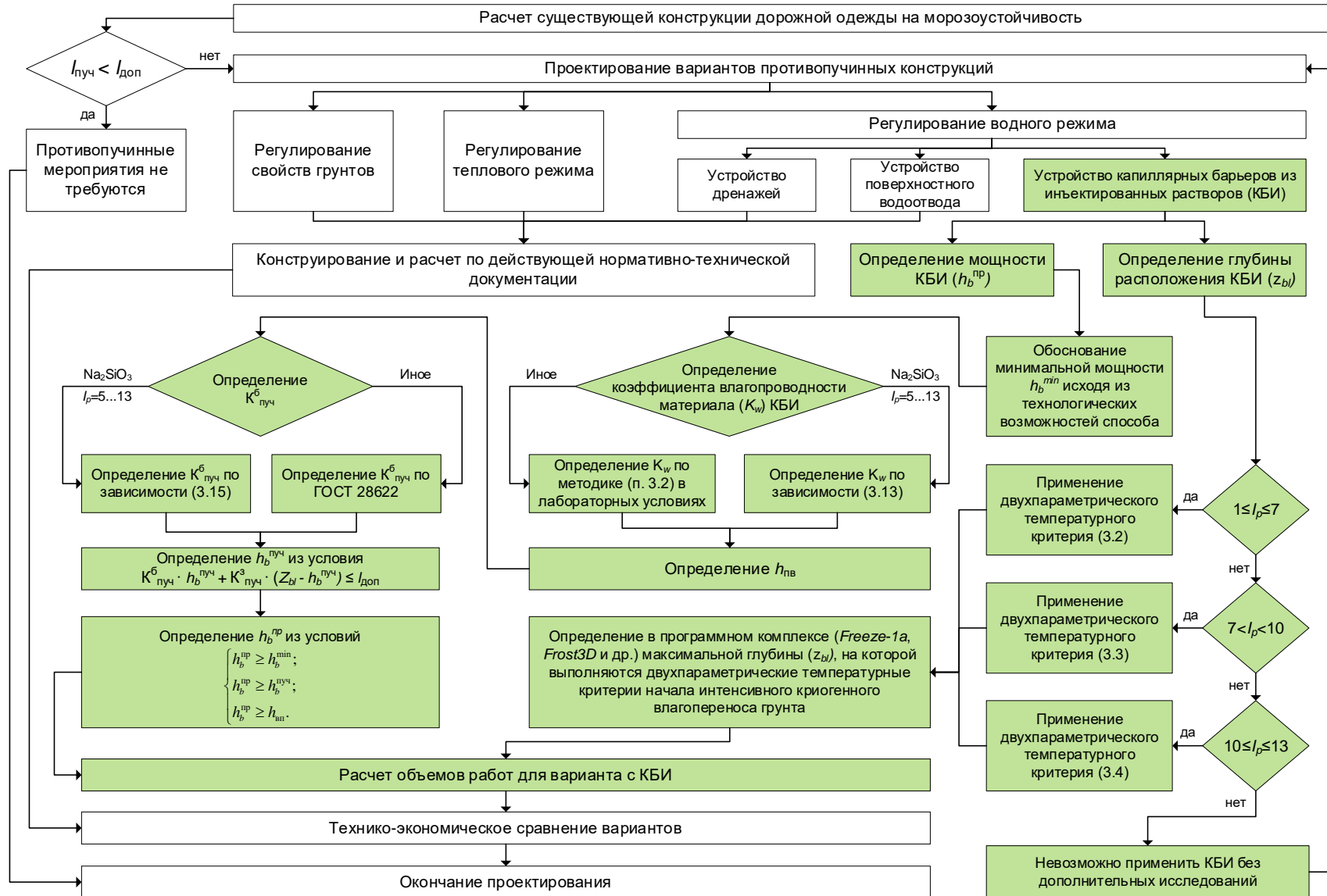


Рисунок 4.1 – Алгоритм проектирования противопучинных мероприятий с вариантом применения капиллярного барьера

При этом при сборе исходных данных необходимо уделить должное внимание установлению водно-теплового режима автомобильной дороги и грунтово-геологическим условиям. А состояние существующей конструкции дорожной одежды и земляного полотна должно быть оценено по результатам детальной технической диагностики. Таким образом, для получения качественных и полных исходных данных о фактическом состоянии существующего участка автомобильной дороги необходимо использование современных методов и средств диагностики, обследования и инженерных изысканий.

Начальный этап проектирования капиллярного барьера включает в себя проверку дорожной конструкции на морозоустойчивость по ПНСТ 542 [76]. При необходимости для решения этой задачи допускается использование специализированных методик и программных комплексов. Согласно нормативной методике изложенной в [76], конструкция считается морозоустойчивой, если величина расчетного (ожидаемого) морозного пучения на поверхности покрытия дорожной одежды ($l_{\text{пуч}}$) не превышает предельно допустимых значений пучения ($l_{\text{доп}}$) в соответствии [23, 76].

Предельно допустимое значение пучения на поверхности покрытия дорожной одежды зависит от типа дорожной одежды, вида покрытия и расчетной схемы (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Предельно допустимое значение пучения на поверхности покрытия дорожной одежды [23]

Тип дорожной одежды	Вид покрытия	Предельно допустимое значение пучения ($l_{\text{доп}}$), см
1	2	3
Капитальный	Цементобетонное (первая расчетная схема*)	3
	Из сборных покрытий из железобетонных ненапряженных плит длиной более $25h$	
	Цементобетонное (вторая расчетная схема**)	4/6***
	Из сборных покрытий из железобетонных ненапряженных плит длиной менее $25h$	
	Из сочлененных и предварительно напряженных плит	
Асфальтобетонное	4	

Окончание таблицы 4.1

1	2	3
Облегченный	Асфальтобетонное; из щебня, гравия и песка, обработанных вяжущими	6
Переходный	Переходное	10
Примечание – в таблице использованы следующие условные обозначения: - * – первую расчетную схему применяют при условии гарантированной устойчивости земляного полотна и отсутствия неравномерных осадок или выпучивания; - ** – вторую расчетную схему применяют на участках с ожидаемыми неравномерными осадками или неравномерным пучением земляного полотна; - *** – числитель – при отсутствии пучения в стыках поперечных швов, знаменатель – при наличии пучения в стыках; - h – толщина бетонной плиты, см.		

Дополнительно к вышеприведенным требованиям, при проектировании морозоустойчивых нежестких дорожных одежд на территории Западной Сибири рекомендуется учитывать решения по величине допускаемого пучения грунта ($l_{\text{доп}}$), полученные В.С. Чурилиным [112].

В случае, если конструкция является морозоустойчивой ($l_{\text{пуч}} < l_{\text{доп}}$), то противопучинные мероприятия не требуются, проектирование завершается. В противном случае выполняется проектирование вариантов противопучинных конструкций.

В качестве вариантов рассматриваются способы регулирования свойств грунтов, теплового и водного режимов земляного полотна. Регулирование водного режима земляного полотна автомобильной дороги возможно устройством дренажей, поверхностного водоотвода либо разработанным в ходе исследования способом – устройством капиллярных барьеров из инъецированных растворов (КБИ).

Для вариантов с дренажами, поверхностным водоотводом, регулированием теплового режима (устройство морозозащитных слоев и др.) и свойств грунтов (замена грунта, укрепление и др.), конструирование и расчет выполняется по действующей нормативно-технической документации. Эти варианты в дальнейшем принимаются для технико-экономического сравнения.

Для разработанного в ходе настоящей работы способа – устройства капиллярного барьера из инъектированных растворов (КБИ) – выполняется определение глубины z_{bl} расположения барьера и его проектной мощности $h_b^{пр}$.

Глубина z_{bl} расположения капиллярного барьера из инъектированных растворов (по его нижней границе) определяется по установленному ранее двухпараметрическому температурному критерию начала интенсивного криогенного влагопереноса в грунтах земляного полотна. Только в этом случае не формируются условия влагонакопления и ослабления грунтов земляного полотна под капиллярным барьером. Расположение КБИ ниже будет приводить к перерасходу материалов и увеличению трудоемкости работ, а также к превышению критического количества влаги в вышележащих грунтах. Расположение КБИ выше этого уровня приведет к влагонакоплению с ослаблением грунтов под барьером и, в самом худшем случае, льдообразованию и пучению.

На первом этапе определения глубины z_{bl} , в зависимости от числа пластичности (I_p) грунтов рабочего слоя земляного полотна применяется установленный ранее двухпараметрический критерий (3.2) – (3.4). При числе пластичности грунтов рабочего слоя земляного полотна $I_p > 0,13$ невозможно применить способ устройства КБИ без дополнительных исследований. В этом случае выполняется проектирование вариантов противопучинных конструкций без варианта с капиллярным барьером.

На втором этапе определения глубины z_{bl} , в любом из доступных программном комплексе для теплотехнических расчетов (например, *Freeze-1a*, *Frost3D* и другие аналоги) рассчитывается изменение температурного поля в рабочем слое земляного полотна в течение холодного периода года (при наличии принимаются климатические данные наиболее холодной зимы за период наблюдения, равный предполагаемому сроку службы сооружения). По полученным данным изменения температурного поля в зимний период

определяется максимальная глубина, на которой выполняется двухпараметрический критерий (3.2) – (3.4) начала интенсивного криогенного влагопереноса. Это значение принимается за глубину z_{bl} расположения капиллярного барьера из инъецированных растворов. В зависимости от глубины z_{bl} принимается проектная глубина и угол забивки инъекторов для создания капиллярного барьера из инъецированных растворов на этапе расчета объемов работ.

Проектная мощность капиллярного барьера $h_b^{пр}$ из силикатизированного грунта определяется из условий технологической возможности применяемого способа силикатизации, обеспечения закрытой системы промерзания в рабочем слое земляного полотна, а также недопущения морозного пучения зоны промерзания (рабочий слой земляного полотна с материалом капиллярного барьера) выше предельно допустимых значений деформаций пучения $l_{доп}$.

На первом этапе определения проектной мощности капиллярного барьера $h_b^{пр}$ назначается минимальная мощность барьера h_b^{min} исходя из технологических возможностей применяемого способа инъекционной силикатизации по величине минимальной длины перфорированной части инъекторов. Минимальная длина перфорированной части инъекторов назначается при силикатизации в зависимости от грунтовых условий и планируемого радиуса укрепления.

На втором этапе определяется высота поднятия воды $h_{пв}$ в капиллярном барьере в холодный период года по решению (2.14), основанной на результатах исследования И.А. Золотаря и Н.А. Пузакова [40]. Превышение проектной мощности капиллярного барьера $h_b^{пр}$ расчетной высоты сезонного поднятия (миграции) воды в нем, гарантирует выполнение условия (2.1), т.е. создание закрытой системы промерзания в рабочем слое земляного полотна. Высота поднятия воды $h_{пв}$ в капиллярном барьере главным образом зависит от коэффициента влагопроводности K_w материала КБИ. В случае создания капиллярного барьера способом силикатизации в глинистых грунтах с числом

пластичности I_p от 0,05 до 0,13 и применением водного раствора силиката натрия с плотностью от 1,05 до 1,25 г/см³, коэффициент влагопроводности K_w материала КБИ определяется по зависимости (3.13). При применении иного вяжущего для создания капиллярного барьера, а также сложении рабочего слоя земляного полотна глинистыми грунтами с числом пластичности $I_p < 0,05$ или $I_p > 0,13$, определение коэффициента влагопроводности K_w материала КБИ рекомендуется выполнять в лабораторных условиях на основании методики, приведенной в п. 3.2.

На третьем этапе определения проектной мощности капиллярного барьера $h_b^{пр}$ рассчитывается величина морозного пучения зоны промерзания (рабочего слоя земляного полотна с материалом капиллярного барьера в нижней части и исходным грунтом, промерзающим по закрытой системе, в верхней части), которая не должна превышать величину деформации морозного пучения $l_{доп}$.

Далее, из неравенства:

$$K_{пуч}^б \cdot h_b^{пуч} + K_{пуч}^з \cdot (z_{bl} - h_b^{пуч}) \leq l_{доп}, \quad (4.1)$$

подбирается минимальная мощность $h_b^{пуч}$ капиллярного барьера из условия пучения.

В неравенстве (4.1) коэффициент морозного пучения грунтов при закрытой системе промерзания $K_{пуч}^з$ определяется по результатам лабораторных исследований по ГОСТ 28622 [20], либо по одному из известных теоретических решений. Коэффициент морозного пучения материала капиллярного барьера $K_{пуч}^б$, в случае создания капиллярного барьера способом силикатизации в глинистых грунтах с числом пластичности I_p от 0,05 до 0,13 и применением водного раствора силиката натрия с плотностью от 1,05 до 1,25 г/см³, определяется по зависимости (3.15). При применении иного вяжущего для создания капиллярного барьера, а также сложении рабочего слоя земляного полотна глинистыми грунтами с числом пластичности $I_p < 0,05$ или $I_p > 0,13$,

определение коэффициента морозного пучения материала капиллярного барьера $K_{пуч}^б$, рекомендуется выполнять в лабораторных условиях по ГОСТ 28622 [20].

И наконец, проектная мощность капиллярного барьера $h_b^{пр}$ из силикатизированного грунта определяется из условий:

$$\begin{cases} h_b^{пр} \geq h_b^{min}; \\ h_b^{пр} \geq h_b^{пуч}; \\ h_b^{пр} \geq h_{вп}. \end{cases} \quad (4.2)$$

Далее по алгоритму на рисунке 4.1 выполняется расчет объемов работ для варианта с КБИ и технико-экономическое сравнение вариантов. По окончании проектирования обосновывается наиболее рациональный вариант противоположной конструкции в земляном полотне автомобильной дороги.

При проектировании и устройстве капиллярного барьера не исключено снижение расчетной влажности грунтов рабочего слоя земляного полотна, что повысит несущую способность. Для учета данного факта при расчете конструкций дорожной одежды по условиям прочности требуются дополнительные исследования и обоснования в будущем.

4.2 Описание способа создания капиллярного барьера

После принятия основных проектных решений, конструирования и расчета объемов работ по выбранному способу создания капиллярного барьера с применением инъектирования водного раствора силиката натрия выполняется проектирование технологических параметров по алгоритму, представленному на рисунке 4.2.

Состав работ при реализации способа зависит от многих факторов, например, таких как: район производства работ, свойств грунтов земляного полотна, экономические условия и т.д.

Для возможности реализации способа в условиях третьей расчетной схемы увлажнения рекомендуется предусматривать выполнение работ в периоды наименьшего обводнения грунтов земляного полотна (наименьшей отметки уровня грунтовых вод). При соответствующем технико-экономическом обосновании, на время производства работ возможно предусмотреть мероприятия по водопонижению.

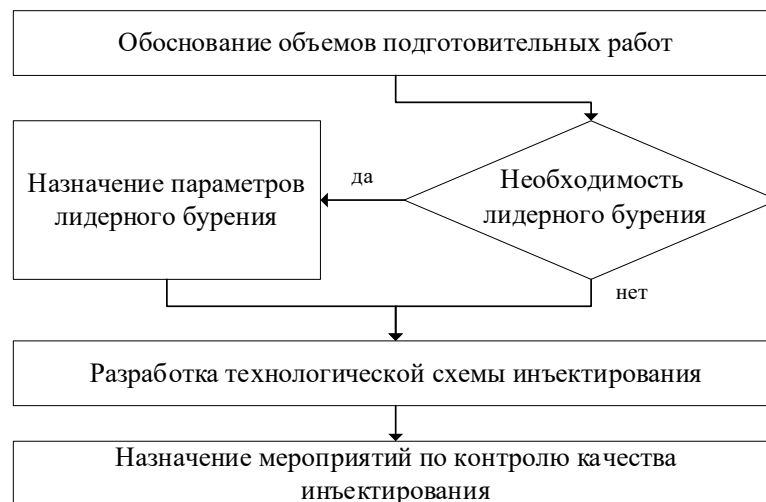


Рисунок 4.2 – Алгоритм реализации способа создания капиллярного барьера с применением инъектирования водного раствора силиката натрия

Независимо от условий силикатизации выполняется обоснование объемов подготовительных работ.

В подготовительные работы входит обустройство мест для складирования материалов, растворного узла и остального необходимого оборудования. Также производится разбивка точек установки инъекторов согласно назначенной в проектной документации схеме. Общее количество инъекций принимается по ведомости объемов работ, также, как и общий объем укрепляемого грунта.

Разработанные схемы расстановки инъекторов должны обеспечивать условие для создания замкнутого горизонтального капиллярного барьера из силикатизированных элементов грунта.

В рамках подготовительных работ осуществляется доставка исходный материалов и их входной контроль качества. Силикат натрия к месту работ доставляется в концентрированном виде. Приготовление раствора рабочей

концентрации производится непосредственно на площадке путем его разбавления водой до нужной плотности (концентрации) раствора.

Приготовление раствора рабочей концентрации производится не менее чем за два-три дня до нагнетания с целью осаждения из него возможных механических примесей.

В соответствии с алгоритмом (рисунок 4.2), далее оценивается необходимость лидерного бурения, которое может быть вызвано необходимостью прохождения конструктивных слоев дорожной одежды.

После осуществления всех необходимых подготовительных мероприятия выполняются основные работы, которые включают в себя:

- лидерное бурение скважин (при необходимости и обосновании);
- погружение (забивка иньекторов);
- нагнетание углекислого газа через иньектор для предварительной активизации грунта;
- контроль за расходом и давлением газа;
- нагнетание силиката натрия в режиме пропитки;
- контроль параметров процесса силикатизации (расход и объем силиката натрия, давление, температура);
- нагнетание углекислого газа через иньектор;
- контроль за расходом и давлением газа;
- извлечение иньекторов;
- тампонирование отверстий;
- промывка иньекторов, прочистка перфораций и т.д.;
- промывка магистралей подачи и насоса;
- профилактика оборудования (при необходимости);
- консервация оборудования (при необходимости);
- контроль качества работ.

Для исключения возможных отраженных деформаций покрытия автомобильной дороги на границе капиллярного барьера и земляного полотна в

продольном профиле, предлагается устраивать переходные участки. Переходным участком может служить участок определенной длины с постепенным уменьшением толщины капиллярного барьера или другие обоснованные конструкции.

Приемку готовых работ следует выполнять на основании данных предыдущих этапов контроля качества, а также по результатам выполнения дополнительного обследования участка устройства капиллярного барьера. С этой целью следует проводить комплекс геофизических приемочных испытаний для получения данных о капиллярном барьере из силикатизированного грунта.

В составе геофизических исследований определяются параметры однородности распределения раствора и выполняется оценка правильности размещения силикатизированных элементов. На основании этих данных определяются места контрольного вскрытия капиллярного барьера для проведения приемочных испытаний. В местах контрольного вскрытия зоны инъектирования выполняется инструментальная фиксация положения капиллярного барьера, а также отбор проб затвердевшего силикатизированного грунта.

Для корреляции геофизических данных могут выполняться, в зависимости от исходных условий, статическое зондирование, динамическое зондирование или проходка шурфов и скважин с отбором проб для лабораторных исследований.

На образцах, отобранных в местах контрольного вскрытия, проводится комплекс определений физико-механических характеристик, в том числе определения коэффициентов влагопроводности и степени пучинистости.

Для реализации устройства капиллярного барьера способом газовой силикатизации, в рамках исследования, разработаны технологическая карта (Приложение Б) и технологическая схема (Приложение В), где подробно представлена информация по технологии производства работ и особенностям назначения параметров силикатизации и их контроля.

4.3 Верификация методики определения глубины расположения капиллярного барьера

Для подтверждения адекватности методики определения глубины расположения КБИ с использованием двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса выполнена ее верификация. Верификация заключалась в сопоставлении значений расчетных границ зоны интенсивного криогенного влагопереноса в глинистых грунтах, полученных с использованием программного комплекса *Freeze-1*, и натурных замеров глубины зоны начала интенсивного криогенного влагонакопления, полученных в рамках мониторинга участка а/д Инская – Барышево – 39 км а/д «К-19р».

Подробное описание расположения участка и его технических характеристик представлено в п. 2.1.

На данном участке автомобильной дороги земляное полотно сложено суглинком легким пылеватым с числом пластичности 0,10, для которого ранее в работе не устанавливался двухпараметрический температурный критерий. Следовательно, для повышения точности верификации дополнительно проводился лабораторный эксперимент по определению двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса для суглинка с числом пластичности 0,10 по методике, представленной в п. 3.1.

По результатам дополнительно проведенного лабораторного эксперимента установлено, что двухпараметрический температурный критерий начала криогенного влагопереноса для суглинка легкого пылеватого ($I_p=0,10$) имеет вид:

$$\nabla t - 0,15e^{0,67t} > 0, \quad (4.3)$$

где ∇t – градиент температуры в зоне промерзания, °С/см, t – температура в зоне промерзания, °С.

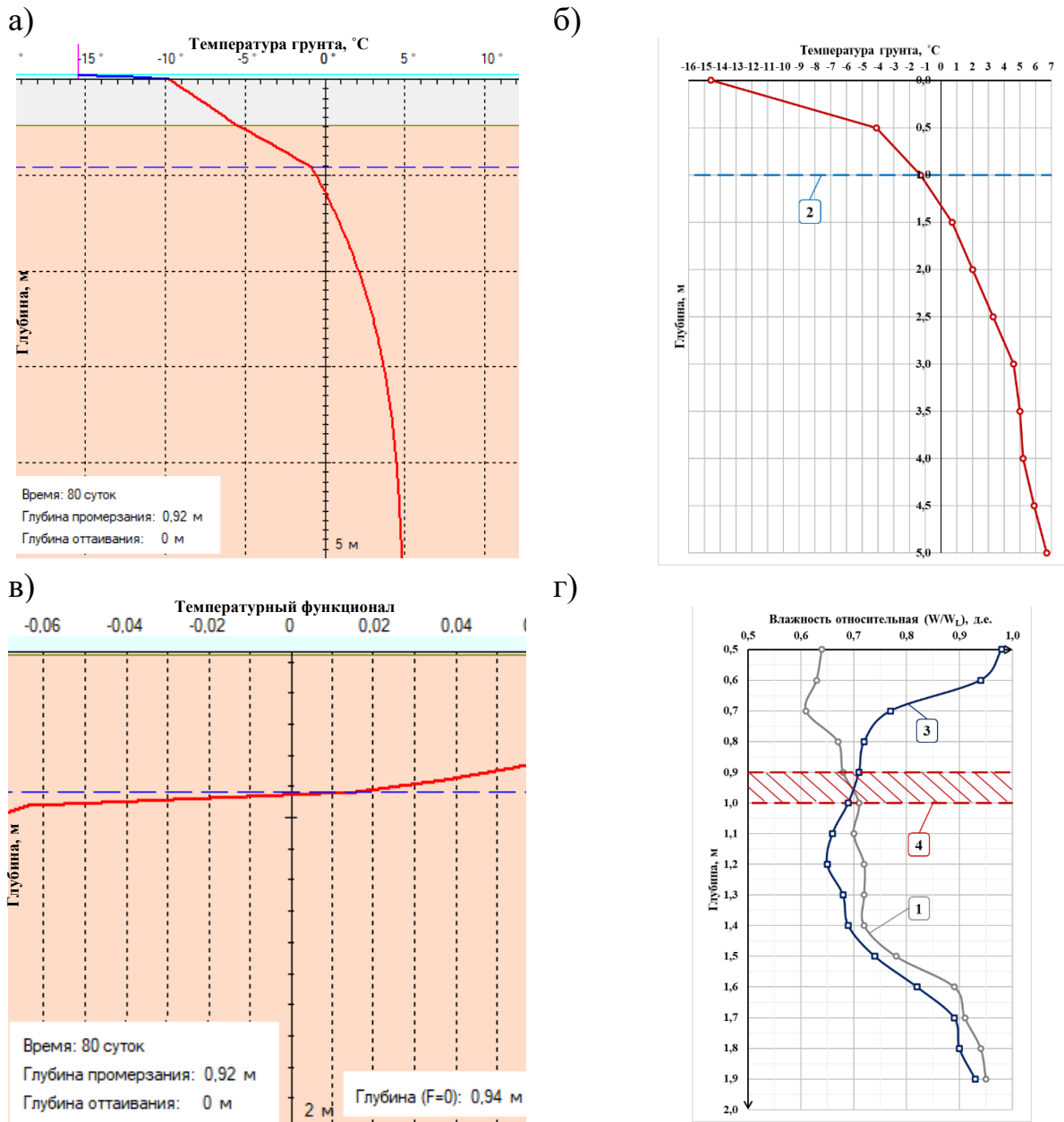
Дальнейшие расчеты по определению границ зон интенсивного криогенного влагопереноса, удовлетворяющих условию 4.3, выполнялись с помощью программного комплекса *Freeze-1* (разработан проф. А.Л. Исаковым, СГУПС).

В качестве выходных данных, необходимых для дальнейшей верификации, программный комплекс позволяет выводить график изменения температуры грунта по глубине, и график температурного функционала. При этом точка, где функционал равен нулю, называется критической. Эта точка соответствует глубине расположения границы, с которой начинается процесс интенсивного криогенного влагопереноса в грунте земляного полотна. При нахождении границы расположения КБИ, расчетом необходимо подбирать критическую точку в момент максимального промерзания.

Для выбранного участка автомобильной дороги расчет в программном комплексе производился при начальной стадии промерзания грунта – 8 декада (13.12.2021), промежуточной – 12 декада (25.01.2022) и заключительной – 16 декада (05.03.2022). Данные по натурным замерам на объекте были получены в рамках мониторинга водно-теплового режима земляного полотна (п. 2.1). Для верификации расчеты производились в те же периоды, что и натурные замеры.

Последовательность и методика проведения полевых измерений в рамках мониторинга подробно описана во второй главе.

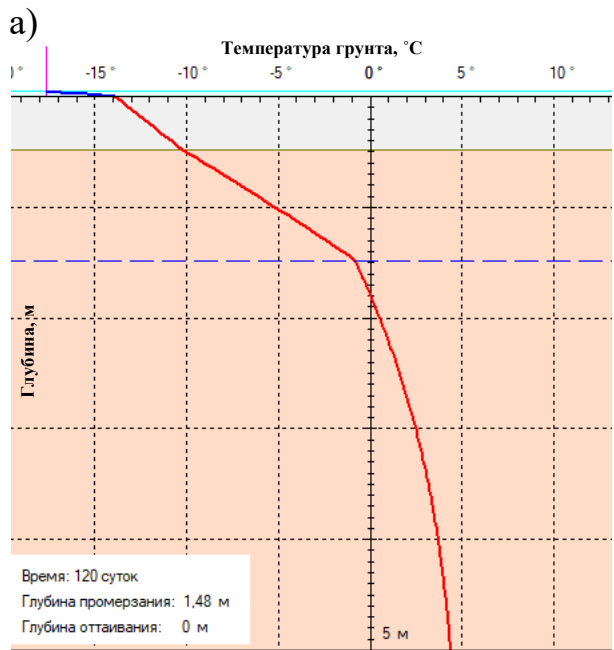
По результатам натурных измерений построены графики изменения температуры грунта от глубины и графики относительной влажности грунта от глубины в различные периоды времени (рисунки 4.3 – 4.5). Глубину зоны начала интенсивного криогенного влагонакопления по построенным графикам возможно определить по резкому увеличению относительной влажности грунтового массива относительно исходного значения в предзимний период. За нулевую глубину на всех графиках (рисунки 4.3 – 4.5) принята поверхность покрытия обочины.



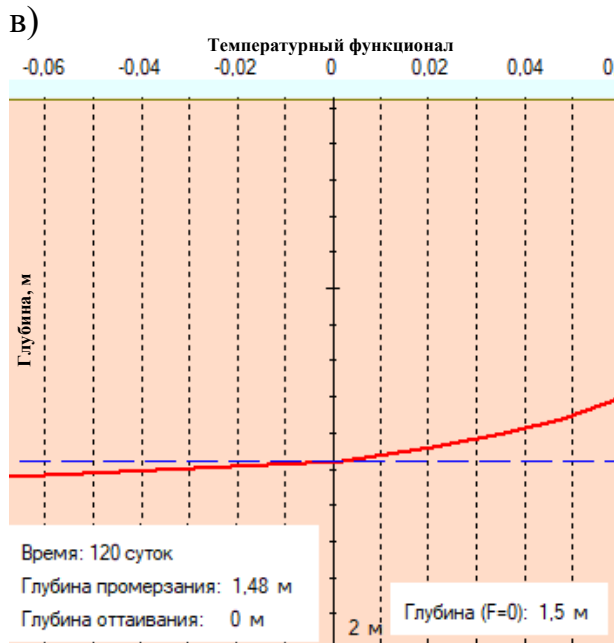
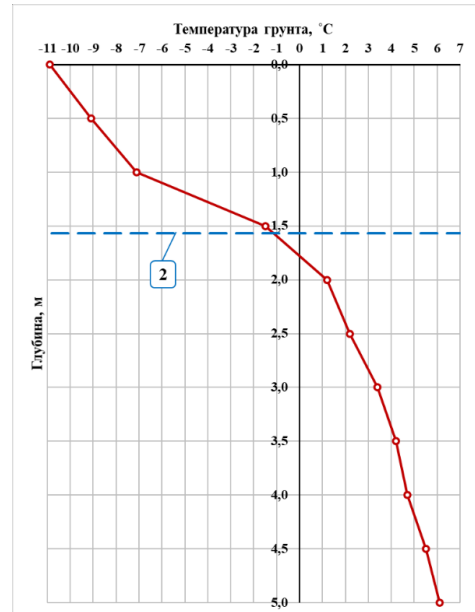
1 – исходное распределение относительной влажности грунта в предзимний период (ноябрь); 2 – глубина промерзания по полевым замерам; 3 – распределение относительной влажности грунта на период 8 декады (13.12.2021); 4 – зона начала интенсивного криогенного влагонакопления

Рисунок 4.3 – Расчетные и натурные данные для 8 декады (13.12.2021)

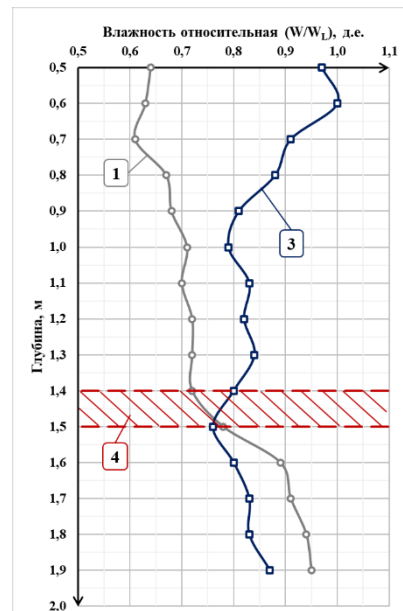
а – график изменения расчетной температуры грунта по глубине (*Freeze-1a*); б – график изменения температуры грунта от глубины по натурным замерам; в – график температурного функционала (*Freeze-1a*); г – графики относительной влажности грунта от глубины



б)

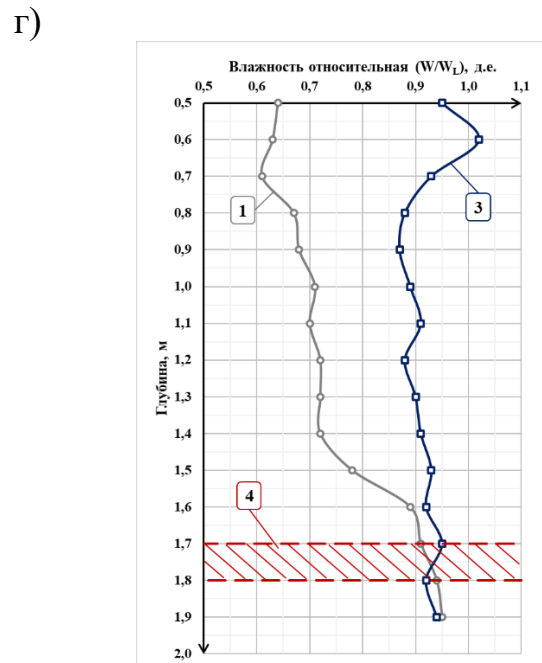
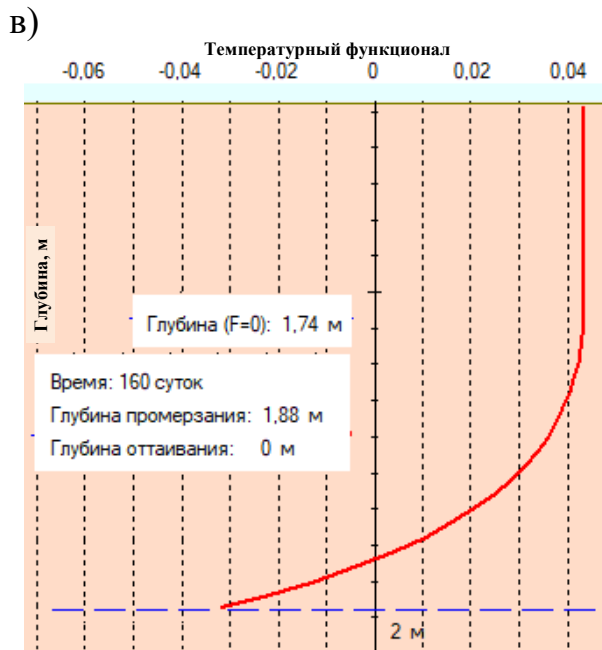
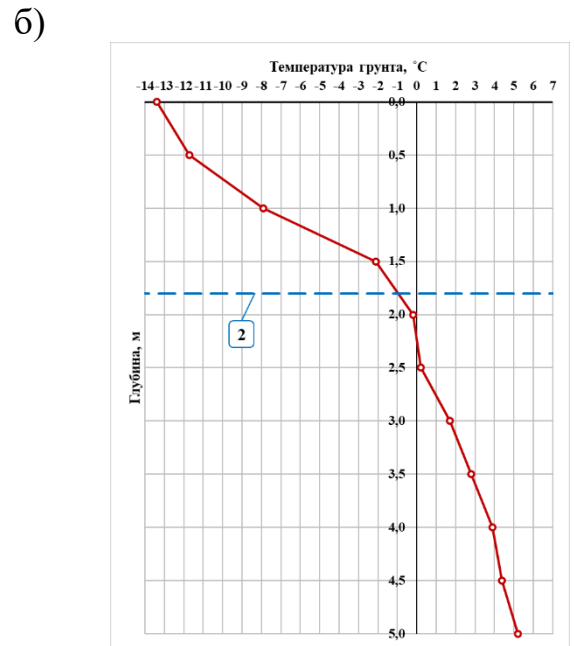
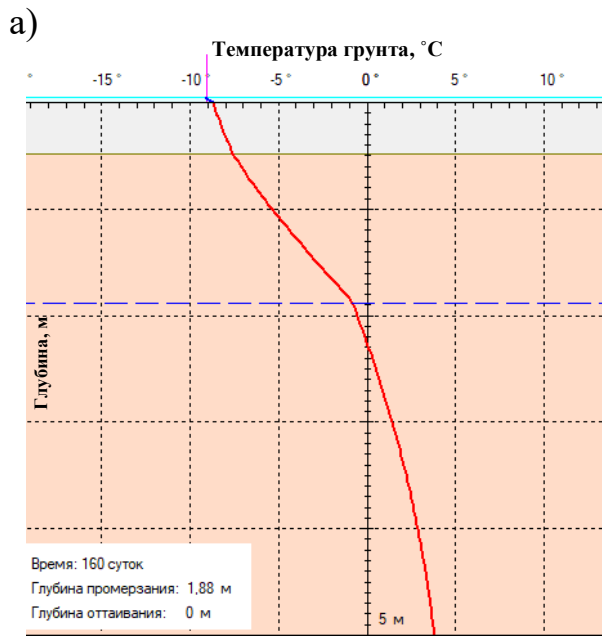


г)



1 – исходное распределение относительной влажности грунта в предзимний период (ноябрь); 2 – глубина промерзания по полевым замерам; 3 – распределение относительной влажности грунта в период 12 декады (25.01.2022).

Рисунок 4.4 – Расчетные и натурные данные для 12 декады (25.01.2022)
 а – график изменения расчетной температуры грунта по глубине (*Freeze-1a*); б – график изменения температуры грунта от глубины по натурным замерам; в – график температурного функционала (*Freeze-1a*); г – графики относительной влажности грунта от глубины



1 – исходное распределение относительной влажности грунта в предзимний период (ноябрь); 2 – глубина промерзания по полевым замерам; 3 – распределение относительной влажности грунта в период 16 декады (05.03.2022).

Рисунок 4.5 – Расчетные и натурные данные для 16 декады (05.03.2022)
 а – график изменения расчетной температуры грунта по глубине (*Freeze-1a*); б – график изменения температуры грунта от глубины по натурным замерам; в – график температурного функционала (*Freeze-1a*); г – графики относительной влажности грунта от глубины

Сравнительный анализ графиков изменения температуры грунта по глубине, выведенных из программного комплекса *Freeze-1* и построенных по данным натурных замеров показал их сходимость, что свидетельствует об адекватности модели одномерного температурного поля, формируемого программой.

Результаты сопоставления расчетных значений границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса в глинистых грунтах с использованием программного комплекса *Freeze-1*, и натурных замеров глубины зоны начала интенсивного криогенного влагонакопления сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты сопоставления расчетных и натурных данных

Декада	Дата	Расчетная граница зоны интенсивного криогенного влагопереноса в суглинке с $I_p=0,10$	Фактическая глубина зоны начала интенсивного криогенного влагонакопления
8	13.12.2021	0,94 м	0,90 – 1,00 м
12	25.01.2022	1,50 м	1,40 – 1,50 м
16	05.03.2022	1,74 м	1,70 – 1,80 м

Полученные расчетным способом глубины зоны интенсивного криогенного влагопереноса соотносятся с выявленными в результате натурных измерений зонами начала интенсивного криогенного влагонакопления, что говорит о качественной сходимости расчетных и натурных данных и адекватности методики расчета. Анализируя полученные результаты верификации, можно сделать вывод о возможности применения методики определения глубины расположения КБИ с использованием двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса при проектировании противопучинных мероприятий на автомобильных дорогах.

Необходимо отметить, что верифицированная методика определения глубины расположения капиллярного барьера, может применяться и для решения других инженерных задач, связанных с регулированием влагонакопления в грунтовых массивах, как на стадии эксплуатации, так и на стадии проектирования автомобильных дорог.

4.4 Оценка экономической эффективности применения обоснованной конструкции капиллярного барьера

Оценка экономической эффективности применения обоснованной конструкции капиллярного барьера определялась на основе сопоставления стоимости затрат на реализацию способов. При этом рассматривалось три способа борьбы с пучинами на эксплуатируемом участке автомобильной дороге:

1 способ: устройство морозозащитного слоя из песка с полным переустройством существующей конструкции дорожной одежды. Данный способ относится к классическим, является эффективным и часто применяемым при устранении причин пучинообразования.

2 способ: устройство капиллярного барьера из инъецированного раствора (полимерные составы типа *МС-Montan Injekt LE*) в теле земляного полотна без разбора существующей конструкции дорожной одежды.

3 способ: устройство капиллярного барьера из инъецированного раствора (водный раствор силиката натрия) в теле земляного полотна без разбора существующей конструкции дорожной одежды.

В рамках расчета экономической эффективности рассмотрен существующий участок автомобильной дороги Инская – Барышево – 39 км а/д «К-19р» (в гр. района) в Новосибирской области. Участок представляет собой двухполосную автомобильную дорогу IV категории с капитальным типом конструкции дорожной одежды. Земляное полотно выполнено в виде насыпи из суглинка легкого пылеватого. Подробное описание участка представлено в разделе 2.1.1.

Расчет существующей дорожной одежды (таблица 4.3) по методике [76] показал, что на рассматриваемом участке автомобильной дороги морозоустойчивость конструкция дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна не обеспечена. При этом, прочность конструкции обеспечена.

Таблица 4.3 – Существующая конструкция дорожной одежды на участке

Наименование конструктивного слоя	Материал конструктивного слоя	Толщина, см
Покрытие	Асфальтобетон плотный горячий, Тип А, Марка I	6,0
Верхний слой основания	Асфальтобетон пористый горячий, крупнозернистый, Марка II	15,0
Нижний слой основания	Щебеночно-песчаная смесь С4 (ЩПС С4)	25,0
Рабочий слой земляного полотна	Суглинок легкий пылеватый	-

Далее, для объективности оценки экономической эффективности выбранных способов борьбы с морозным пучением, сравниваемые конструкции дорожной одежды приведены к равноморозоустойчивым. Приведение выполнено методом подбора с помощью проверки на морозоустойчивость по методике [76]. При этом, материалы и толщины существующих конструктивных слоев принципиально не изменялись.

По результатам произведенных расчетов к дальнейшей оценке экономической эффективности выбраны три капитальные равноморозоустойчивые конструкции, представленные в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Конструкции дорожной одежды для сравнения

Наименование конструктивного слоя	Материал конструктивного слоя	Толщина конструктивного слоя, см		
		1 способ	2 способ	3 способ
		Устройство морозозащитного слоя	Устройство КБИ	
Полимерный состав	Силикат натрия			
Покрытие	Асфальтобетон плотный горячий, Тип А, Марка I	6,0 (П)	6,0 (С)	6,0 (С)
Верхний слой основания	Асфальтобетон пористый горячий, крупнозернистый, Марка II	15,0 (П)	15,0 (С)	15,0 (С)
Нижний слой основания	Щебеночно-песчаная смесь С4 (ЩПС С4)	25,0 (П)	25,0 (С)	25,0 (С)
Морозозащитный слой	Песок средней крупности	57,0 (Н)	-	-
Капиллярный барьер (КБИ)	Силикатизированный грунт	-	-	50,0
	Полимеризированный грунт	-	50,0	-
Примечание – в таблице использованы следующие условные обозначения: П – переустроенный конструктивный слой; Н – новый конструктивный слой; С – существующий конструктивный слой.				

Далее приведены основные укрупненные технологические процессы реализации способов, которые учитывались при расчете экономической эффективности.

Классический способ (устройство морозозащитного слоя) укрупненно включает в себя следующие технологические процессы:

1) срезка почвенно-растительного слоя (ПРС) с откосов насыпи. Складирование ПРС производится в валиках в непосредственной близости от объекта;

2) полный демонтаж существующей конструкции дорожной одежды проезжей части и обочин. Демонтаж производится до верха рабочего слоя земляного полотна. Включает в себя фрезерование асфальтобетонных слоев, разборку слоя основания и обочин из щебеночно-песчаной смеси;

3) срезка грунта рабочего слоя земляного полотна мощностью 57 см. Толщина среза соответствует, рассчитанной ранее (таблица 4.4) толщине морозозащитного слоя.

4) доуплотнение получившегося верхнего слоя земляного полотна после среза грунта;

5) устройство морозозащитного слоя из песка средней крупности толщиной 57 см;

6) устройство прослойки из геосинтетического материала. Основной функцией данной прослойки является разделение морозозащитного слоя из песка и нижнего слоя основания из ЩПС С4.

7) устройство нижнего слоя основания из щебеночно-песчаной смеси С4 толщиной 25 см и присыпных обочин;

8) устройство верхнего слоя основания из пористого асфальтобетона толщиной 15 см;

9) устройство покрытия из плотного асфальтобетона толщиной 6 см;

10) устройство покрытия обочин из щебеночно-песчаной смеси С1;

11) надвигка ранее снятого ПРС на откосы насыпи.

Способы устройства капиллярного барьера из инъецированного раствора в теле земляного полотна укрупненно включают в себя следующие технологические процессы:

- 1) плановая разметка участка под расстановку инъекторов, которая должна обеспечить условие для создания замкнутого горизонтального капиллярного барьера при инъецировании;
- 2) забивка инъекторов до расчетной глубины;
- 3) приготовление водного раствора силиката натрия рабочей концентрации (либо использование готового полимерного состава);
- 4) нагнетание через инъекторы водный раствор силиката натрия рабочей концентрации (либо готового полимерного состава);
- 5) извлечение инъекторов и смена точек. Далее операции 2 – 4 повторяются;
- 6) переустройство слоя покрытия толщиной 6 см. В данную операцию включены фрезерование существующего слоя покрытия (6 см) и устройство нового. Переустройство покрытия производится только при соответствующем обосновании.

При расчете стоимости реализации способов принят единичный объем в 10 погонных метров дороги. Единичный объем принят исходя из характера образования пучин – локальный и относительно непротяженный.

Определение стоимости каждого способа выполнялся с помощью составления локальных сметных расчетов ресурсно-индексным методом. Данный метод предусматривается методикой определения сметной стоимости строительства на территории Российской Федерации, утвержденной приказом Министра России № 421/пр от 4 августа 2020 года (в редакции приказа № 557/пр от 7 июля 2022 года).

Ресурсно-индексный метод, реализуется на основании сметных норм и текущих сметных цен на соответствующие ресурсы, размещенных в федеральной государственной информационной системе ценообразования в строительстве (ФГИС ЦС).

Составления смет ресурсно-индексным методом выполнены в программе «ГРАНД-Смета».

Результаты расчетов стоимости реализации выбранных способов устранения причин пучинообразования для 10 п.м. рассматриваемого участка автомобильной дороги представлены в таблицах 4.5 – 4.7.

Таблица 4.5 – Стоимость реализации устройства морозозащитного слоя

Наименование работ	Ед. изм.	Количество	Всего в текущем уровне цен, руб.
1. Срезка почвенно-растительного слоя (ПРС) с откосов насыпи.	1000 м ³	0,0098	1058,24
2. Полный демонтаж существующей конструкции дорожной одежды проезжей части и обочин	100 м ² / 100 м ³	0,7/0,3475	58188,82
3. Срезка грунта рабочего слоя земляного полотна мощностью 57 см.	1000 м ³	0,08248	21148,89
4. Доуплотнение получившегося верхнего слоя земляного полотна после срезки грунта	1000 м ³	0,04046	1843,76
5. Устройство морозозащитного слоя из песка средней крупности толщиной 57 см	100 м ³	0,8248	155174,96
6. Устройство прослойки из геосинтетического материала	1000 м ²	0,1378	26176,52
7. Устройство нижнего слоя основания из щебеночно-песчаной смеси С4 толщиной 25 см и присыпных обочин	1000 м ²	0,07976	46708,93
8. Устройство верхнего слоя основания из пористого асфальтобетона толщиной 15 см	1000 м ²	0,07	148426,64
9. Устройство покрытия из плотного асфальтобетона толщиной 6 см	1000 м ²	0,07	65125,21
10. Устройство покрытия обочин из щебеночно-песчаной смеси С1	1000 м ²	0,0322	91611,37
11. Надвижка ранее снятого ПРС на откосы насыпи	1000 м ³	0,0098	1058,24
ИТОГО (1 способ)			616521,58

Таблица 4.6 – Стоимость реализации устройства КБИ (полимерный состав)

Наименование работ	Ед. изм.	Количество	Всего в текущем уровне цен, руб.
1. Забивка инъекторов до расчетной глубины, извлечение инъекторов (в том числе разметка)	100 м	1,409	227088,64
2. Полимеризация (комплекс работ, в том числе, материалы)	м ³	11,4	482368,45
3. Переустройство слоя покрытия толщиной 6 см (фрезерование существующего слоя покрытия (6 см) и устройство нового)	1000 м ²	0,07	78965,88
ИТОГО (2 способ)			788422,97

Таблица 4.7 – Стоимость реализации устройства КБИ (силикат натрия)

Наименование работ	Ед. изм.	Количество	Всего в текущем уровне цен, руб.
1. Забивка инъекторов до расчетной глубины, извлечение инъекторов (в том числе разметка)	100 м	1,409	227088,64
2. Силикатизация (комплекс работ, в том числе, материалы)	м ³	11,4	118264,33
3. Переустройство слоя покрытия толщиной 6 см (фрезерование существующего слоя покрытия (6 см) и устройство нового)	1000 м ²	0,07	78965,88
ИТОГО (3 способ)			424318,85

По результатам расчета для 10 п. м. автомобильной дороги, сметная стоимость реализации устройства морозозащитного слоя из песка, с полным переустройством существующей конструкции дорожной одежды (1 способ), составила 616521,58 рублей. Стоимость реализации устройства КБИ с помощью полимерного состава (2 способ) составила 788422,97 рублей. Стоимость реализации устройства КБИ с помощью водного раствора силиката натрия (3 способ) составила 424318,85 рублей.

Сравнение результатов показало, что реализация способа устройства КБИ из силикатизированного грунта (способ №3) обладает наименьшей стоимостью. В то же время, устройство морозозащитного слоя (способ №1) и устройство капиллярного барьера с применением полимерного состава (способ №2) обходятся дороже на 31% и 46% соответственно.

Необходимо также отметить, что реализация способа с КБИ возможна без переустройства верхнего слоя покрытия из асфальтобетона. Исключив данную статью затрат, получим стоимость устройства КБИ для 10 п. м. 345 352,97 рублей, что уже на 44% меньше стоимости устройства морозозащитного слоя.

Все вышесказанное свидетельствует о целесообразности применения конструкции капиллярного барьера из силикатизированного грунта в качестве способа борьбы с причинами пучинообразования на эксплуатируемом участке автомобильной дороге.

4.5 Выводы по главе 4

1. Разработана методика проектирования капиллярного барьера из инъецированного раствора в грунтах земляного полотна эксплуатируемых участков автомобильных дорог, основанная на ранее полученных результатах расчетно-теоретических и экспериментальных исследований. Методика включена в общий алгоритм проектирования противопучинных мероприятий и не противоречит профильным нормативным документам.

2. Выполнена верификация методики определения глубины расположения капиллярного барьера с использованием двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса, определенного для суглинка с числом пластичности 0,10 (4.3) по методике, представленной в п. 3.1.

Результаты сопоставления значений расчетной границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса в земляном полотне, определенной с использованием программного комплекса *Freeze-1*, и натурных замеров глубины зоны начала интенсивного криогенного влагонакопления, показали качественную сходимость, что указывает на адекватность методики.

3. Оценка экономической эффективности показала, что реализация способа устройства капиллярного барьера из силикатизированного грунта обладает наименьшей стоимостью в сравнении с устройством морозозащитного слоя (дороже на 31%) и устройством капиллярного барьера с применением полимерного состава (дороже на 46%). Это свидетельствует о целесообразности применения способа устройства капиллярного барьера из силикатизированного грунта для борьбы с морозным пучением на эксплуатируемых участках автомобильных дорог.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен подход к переводу открытой системы промерзания в закрытую путем создания капиллярного барьера в земляном полотне из силикатизированных грунтов. Разработан и обоснован способ снижения величины морозного пучения земляного полотна эксплуатируемых автомобильных дорог в районах с глубоким промерзанием и близким залеганием грунтовых вод (3 расчетная схема увлажнения).

2. Обосновано применение двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса для определения глубины расположения капиллярного барьера в земляном полотне. Для грунтов с числом пластичности 0,05 (супесь пылеватая), 0,09 (суглинок легкий пылеватый) и 0,13 (суглинок тяжелый пылеватый) получены функциональные зависимости двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса.

3. Установлена зависимость (3.13) коэффициента влагопроводности силикатизированного глинистого грунта (в диапазоне числа пластичности от 0,01 до 0,13) от плотности водного раствора силиката натрия (в диапазоне от 1,05 до 1,25 г/см³), в том числе оценено влияние процесса промерзания на изменение влагопроводных свойств силикатизированного грунта. Определена функциональная зависимость (3.15) изменения коэффициентов морозного пучения от плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия и числа пластичности исходного глинистого грунта.

4. Разработана методика проектирования капиллярного барьера из инъецированного раствора в грунтах земляного полотна эксплуатируемых участков автомобильных дорог в Западной Сибири, основанная, на ранее полученных, результатах расчетно-теоретических и экспериментальных исследований. Методика включена в общий алгоритм проектирования

противопучинных мероприятий и не противоречит профильным нормативным документам.

Для разработанной методики выполнена верификация и произведена оценка ее экономической эффективности.

Перспективой дальнейших исследований является развитие методики проектирования капиллярных барьеров на эксплуатируемых участках автомобильных дорог Западной Сибири, в том числе совершенствование конструкций, технологических решений, а также расширение списка ряда применяемых материалов.

Список литературы

1. Абрамова Т. Т. Возможность применения метода силикатизации в дорожном строительстве // Томск. Вестник ТГАСУ, 2001, №2.- С. 56-61.
2. Адамович, А. Н. Закрепление грунтов и противодиффузионная завеса / А. Н. Адамович. – М. : Энергия, 1980. – 320 с.
3. Ананян, А. А. Исследование процессов перемещения влаги и образование сегрегационного льда в замерзающих и мерзлых горных породах. – Труды Гидропроекта, сб.3. М., 1960.
4. Архипов, А. И. Повышение несущей способности земляного полотна методом силикатизации // Вопросы земляного полотна и геотехники на железнодорожном транспорте. Межвуз. сб. трудов ДИИТ. Вып. 201/27. Днепропетровск, 1978.- С. 33-35.
5. Бредюк, Г. П. Результаты исследования процессов пучения связных грунтов при замерзании. Докл. VII междувед. совещ. по мерзлотоведению. – В кн.: «Материалы по физ. и мех. Мерзлых грунтах». Изд. АН СССР, 1959.
6. Бройд, И. И. Струйная технология. М., 2004. - 442 с. – ISBN 5-93093-258-1 (В пер.).
7. Васильев, А. П. Теория эксплуатации автомобильных дорог : учебное пособие / А. П. Васильев, В. К. Апестин, Г. С. Бахрах [и др.] ; под ред. А. П. Васильева. — Москва : КноРус, 2022. — 592 с. — ISBN 978-5-406-09994-0.
8. Васильев, Ю. М. Оценка пучинистости грунтов при замерзании / Ю.М. Васильев // Труды Союздорнии. – 1970. – Вып. 37. – С. 147–155.
9. Волоцкий, Д. В. Основы глубинного закрепления грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1978. - 120 с.
10. Волоцкий, Д. В. О надежности химического закрепления грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Д. В. Волоцкий // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. –1975. – № 5. – С. 152–157.

11. Воронкевич, С. Д. Геолого-минералогические основы инъекционного закрепления пород : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 04.00.07 / Воронкевич Сергей Дмитриевич. – М. : 1976. – 32 с.
12. Глобус, А. М. Экспериментальная гидрофизика почв / А.М. Глобус. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – 355 с.
13. Гончарова, Л. В., Баранова В.И. Комплексная цементация дисперсных грунтов, // Инженерная геология сегодня: теория, практика, проблемы: Под ред. Е.М. Сергеева, В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 1988. С. 282 – 292.
14. Гончарова, Л. В. Основы искусственного улучшения грунтов (Техническая мелиорация грунтов) : научное издание / Л. В. Гончарова ; под ред. В. М. Безрука. - М. : МГУ, 1973. - 376 с.
15. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.
16. ГОСТ 13078-2021. Стекло натриевое жидкое. Технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 20 с.
17. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – Введ. 29.10.2012.– М.: Стандартинформ, 2013. – 19 с.
18. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. – 41 с.
19. ГОСТ 25358-2020. Грунты. Метод полевого определения температуры (с Поправкой). М.: Стандартинформ, 2021. – 11 с.
20. ГОСТ 28622-2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (с Поправкой, с Изменением N 1). Москва: Стандартинформ, 2019. 8 с.
21. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Москва : Стандартинформ, 2019. 20 с.
22. ГОСТ Р 50597-2017. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения

безопасности дорожного движения. Методы контроля (с Поправками). Москва : Стандартиформ, 2019. 28 с.

23. ГОСТ Р 59120-2021 Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования. М.: Стандартиформ, 2021. – 23 с.

24. Государственное казенное учреждение Новосибирской области «Территориальное управление автомобильных дорог Новосибирской области» : официальный сайт. – Новосибирск. – URL: <http://www.tuad.nsk.ru> (дата обращения 19.01.2023).

25. Гребенников, И. О. Особенности проектирования усиления грунтовых оснований зданий и сооружений армированием грунтоцементными колоннами / И. О. Гребенников // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2(61). – С. 123-130. – DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_123.

26. Грицык, В. И. Противодеформационные конструкции земляного полотна (железных дорог) : учеб. иллюстр. пособие для студентов вузов, техникумов и колледжей ж.-д. трансп. – М. : Маршрут, 2003. – 96 с.

27. Дерягин, Б. В. Об отталкивающих силах между заряженными коллоидными частицами и теории медленной коагуляции и устойчивости лиофобных золь. – «Коллоидный журнал», 1940, № 6.

28. Ефименко, В. Н., Чарыков Ю.М., Кадесников А.П., Гончарова Л.В. и др. Новые метода и геотехнологии преобразования грунтов энергией плазмы и СВЧ-поля в строительстве. Томск, 2003.- 246 с.

29. Ефименко, В. Н. Назначение расчетной влажности глинистых грунтов земляного полотна для проектирования дорожных одежд на территории Западной Сибири / В. Н. Ефименко, С. В. Ефименко, А. Д. Бердников // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 1(34). – С. 160-168. – EDN OUYJLL.

30. Ефименко, В. Н. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог при глубоком промерзании грунтов (На примере Юго-

Востока Западной Сибири)/ В.Н. Ефименко// Дис. ... канд. техн. наук. М., 1978. – 216 с.

31. Ефименко, В. Н. Термоукрепление связных грунтов в дорожном строительстве. – Томск: Изд-во Том. Ун-та, 1994. – 130 с. – ISBN 5-7511-0685-7.

32. Ефименко, С. В. Дорожное районирование территории Западной Сибири : Монография / С. В. Ефименко, М. В. Бадина. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2014. – 244 с. – ISBN 978-5-93057-613-9. – EDN TUKYDD.

33. Ефименко, С. В. Развитие теоретических положений учёта особенностей признаков геокомплекса при формировании региональных норм проектирования автомобильных дорог : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.23.11 / Ефименко С.В. – Новоси-бирск, 2016. – 462 с.

34. Ефименко, С. В. Теоретические аспекты водно-теплового режима земляного полотна и дорожных одежд при глубоком сезонном промерзании грунтов : учебное пособие / С.В. Ефименко, В.Н. Ефименко. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2022. – 224 с. – ISBN 978-5-6049093-0-0

35. Зеге, С. О. Концепции физических основ струйного закрепления грунтов / С. О. Зеге, И. И. Бройд // Основания и фундаменты. – 2004. – № 2. – С. 17–20.

36. Золотарь, И. А. Методика прогнозирования прочностных характеристик земляного полотна из пылеватых грунтов в районах I и II дорожно-климатических зон с помощью ЭВМ / И.А. Золотарь // Труды V совещания–семинара по обмену опытом строительства в суровых климатических условиях. – Тюмень, 1968. – С. 21–38.

37. Золотарь, И. А. Основы расчета водно-тепловых процессов в земляном полотне автомобильных дорог в районах распространения многолетнемерзлых горных пород / И.А. Золотарь // Материалы VIII Всесоюзного междуведомственного совещания по геокриологии (мерзлотоведению). – Якутск: Якутское книжное изд-во, 1966. – Вып. 8. – С. 95–107.

38. Золотарь, И. А. Прогноз величины и скорости пучения на автомобильных дорогах / И.А. Золотарь // Борьба с пучинами на железных и автомобильных дорогах. – М.: Транспорт, 1965. – С. 109–121.

39. Золотарь, И. А. Расчет испарения с поверхности грунтовых оснований в связи с прогнозом их влажностного состояния / И.А. Золотарь // Экспериментальные исследования процессов теплообмена в мерзлых горных породах. – Новосибирск: Наука, 1972. – С. 119–137.

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

41. Исаков, А. Л. К оценке коэффициента морозного пучения глинистых грунтов земляного полотна при закрытой системе промерзания / А.Л. Исаков, С.И. Бухов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (56). – С. 92–98.

42. Исаков, А.Л. Критерии применимости противопучинных мероприятий на транспортных магистралях / «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна и искусственных сооружений»: Труды X научно-технической конференции. – М., 2013, С. 97-99.

43. Калачук, Т. Г. Химическое закрепление лессовых грунтов силикатизацией / Т. Г. Калачук // Новая наука: Опыт, традиции, инновации. – 2015. – № 4-2. – С. 143-147.

44. Калинин, М. Ю. Анализ существующих методов определения коэффициента влагопроводности грунтов / М. Ю. Калинин, М. В. Бадина, А. В. Сухоруков // Избранные доклады 62-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 26 апреля 2016 года / Томский государственный архитектурно-строительный университет. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. – С. 277-280. – EDN WYWMFT.

45. Камбефор, А. Инъекция грунтов. Принципы и методы / А. Камбефор. – М.: Энергия, 1971. – 336 с.
46. Крицкий, М. Я. Лечение болезней земляного полотна с использованием современных технологий / М. Я. Крицкий [и др.] // Тр. междунар. науч.-практ. конф. по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. – Пермь : Изд-во ПГТУ, 2004. – Т. 2. – С. 47–53.
47. Кудрявцев, В. А. Мерзлотоведение / В.А. Кудрявцев, Н.Ф. Полтев, Н.Н. Романовский, К.А. Кондратьева, В.Г. Меламед, Л.С. Гарагуля. – Под редакцией В.А. Кудрявцева. – М., Изд-во Моск. ун-та, 1981. – 240 с.
48. Кудрявцев, В. А. Общее мерзлотоведение (геокриология) / В. А. Кудрявцев, Б. Н. Достовалов, Н. Н. Романовский, К. А. Кондратьева, В. Г. Меламед. – Под ред. В. А. Кудрявцева. – М., Изд-во МГУ, 1978. – 464 с.
49. Кудрявцев, С. А. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечноэлементные расчеты) / С.А. Кудрявцев, И.И. Сахаров, В.Н. Парамонов. – Санкт-Петербург, 2014. – 262 с.
50. Кудрявцев, С. А. Промерзание и оттаивание грунтов : практические примеры и конечноэлементные расчеты / С. А. Кудрявцев, И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов. – Санкт-Петербург : Общество с ограниченной ответственностью "Институт строительного проектирования "Геореконструкция", 2014. – 248 с. – ISBN 978-5-9904956-3-0. – EDN ХСҮНХҒ.
51. Кудрявцев, С. А. Расчетно-теоретическое обоснование проектирования и строительства сооружений в условиях промерзающих пучинистых грунтов : специальность 05.23.02 "Основания и фундаменты, подземные сооружения" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Кудрявцев Сергей Анатольевич. – Санкт-Петербург, 2004. – 344 с. – EDN NNEKOZ.
52. Кудрявцев, С. А. Численное моделирование процесса морозного пучения и оттаивания в зависимости от скорости промерзания грунтов /

С. А. Кудрявцев, А. В. Кажарский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 2(34). – С. 105-110. – EDN PCGRPJ.

53. Ланис, А. Л. Использование метода напорной инъекции при усилении земляного полотна железных дорог : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11 / Ланис Алексей Леонидович. – М., 2009. – 155 с.

54. Ланис, А. Л. Способы усиления земляного полотна инъектированием / А. Л. Ланис // Известия Транссиба. – 2016. – № 3 (27). – С. 117–124.

55. Ланис, А. Л. Армирование основной площадки высокой насыпи с инъектированием твердеющих растворов / А. Л. Ланис // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 3 (50). – С. 38–46.

56. Ланис, А. Л. Влияние оттаивания сезонно-мерзлых грунтов на деформации земляного полотна / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев, Д. А. Усов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3(58). – С. 104-111. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_58_104.

57. Ломов, П. О. Совершенствование метода устройства основания путем усиления грунтов раскаткой скважин : специальность 05.23.02 "Основания и фундаменты, подземные сооружения" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ломов Петр Олегович. – Москва, 2017. – 153 с. – EDN PKANTR.

58. Лунев, А. А. Прогнозирование величины морозного пучения золошлаковых смесей для проектирования автомобильных дорог / А. А. Лунев, Д. А. Разуваев, В. В. Голубенко, М. Г. Чахлов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2020. – Т. 17, № 5 (75). – С. 624-635. – DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-5-624-635. – EDN IOSYVO.

59. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М : Стройиздат, 1963. – 332 с.

60. Макаренко, Н. А., Субботина Н.Н. Закрепление силикатом натрия насыпных грунтов // Механика земляного полотна и основания. Сборник трудов ДИИТа. Днепропетровск, 1986.- С. 72-77.

61. Малинин, А. Г. Струйная цементация грунтов / А. Г. Малинин. – М.: Стройиздат, 2010. – 237 с.
62. Методические рекомендации по проектированию и устройству теплоизолирующих слоев на пучиноопасных участках автомобильных дорог. М.: Минтрансстрой, 1976.- 97 с.
63. Нерсесова, З. А. Влияние обменных катионов на фазовый состав воды в мерзлых грунтах. М.: Издательство АН СССР, 1957.
64. Общество с ограниченной ответственностью «Расписание погоды» : официальный сайт. – Санкт-Петербург. – URL: <http://www.rp5.ru> (дата обращения 15.11.2022).
65. Орлов, В. О. К теории морозного пучения грунтов. – В кн. : «Исследование противопучинных мероприятий на железных дорогах», вып. 408. «Транспорт», 1970 (ЦНИИ МПС).
66. Орлов, В. О. Классификация морозоопасных грунтов по степени пучинистости. Вопросы инженерной геокриологии (мерзлотоведения). – Труды ПНИИИС, т. 13, 1972.
67. Орлов, В. О. Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов. М.: Издательство АН СССР, 1962.
68. Орлов, В.О. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений/ В.О. Орлов, Ю.Д. Дубнов, Н.Д. Меренков.- Л. : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1977. – 184с.
69. Осипов, В. И. Принципы создания структур геотехногенных массивов / В. И. Осипов // Инженерная геология. – 1989. – № 3. – С. 3– 6.
70. Основы геокриологии (мерзлотоведения), ч. I и II. М.: изд-во АН СССР, 1959.
71. Парамонов, В. Н. Особенности конечноэлементного моделирования деформаций морозного пучения и оттаивания грунтов : статья / В. Н. Парамонов, А. В. Набоков // Взаимодействие оснований и сооружений. Подземные сооружения и подпорные стены : труды Международной конференции по

геотехнике Технического Комитета 207 ISSMGE (16-18 июня 2014 г.; Россия, Санкт-Петербург), Санкт-Петербург, 16–18 июня 2014 года / Под ред.: В. М. Улицкого, М. Б. Лисюка, А. Г. Шашкина. Том 2. – Санкт-Петербург: Институт "Геореконструкция", 2014. – С. 65-69. – EDN TASMWX.

72. Патент 2790090 Российская Федерация, МПК E02D 3/12. Способ предотвращения образования пучин в земляном полотне эксплуатируемых автомобильных и железных дорог на сезоннопромерзающих грунтах / Разуваев Д.А., Чахлов М.Г., Ланис А.Л., Гребенников И.О.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2022105783; заявл. 03.03.2022; опубл. 14.02.2023, Бюл. № 5. – 9 с.

73. Патент 6627:21.0421.04 Российская Федерация. Прибор для определения коэффициента влагопроводности талых связных грунтов нарушенной структуры нестационарным методом / Золотарь И.А., Собко Г.И., Лазарев Ю. Г. ; заявитель и патентообладатель Золотарь Израиль Абрамович, Собко Геннадий Иванович, Лазарев Юрий Георгиевич. – № 97106667/20 ; опубл. 21.04.1997.

74. Патент на полезную модель № 219160 U1 Российская Федерация, МПК E02D 3/12. Инъектор для упрочнения и закрепления грунтов : № 2023102285 : заявл. 01.02.2023 : опубл. 30.06.2023 / Д. А. Разуваев, Е. И. Нагаев, М. Г. Чахлов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет путей сообщения". – EDN DIMBWA.

75. Писаренко, А. П., Пospelова К. А., Яковлев А. Г. Курс коллоидной химии. М.: «Высшая школа», 1964.

76. ПНСТ 542-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования (с Поправками). М.: Стандартиформ, 2021. – 151 с.

77. Пособие по химическому закреплению грунтов инъекцией в промышленном и гражданском строительстве (к СНиП 3.02.01-88). - М.: Стройиздат, 1986.- 129 с.

78. Пузаков, Н. А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. – М :, 1960. – 169 с.

79. Пчелинцев, А. М. Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов. М.: «Наука», 1964.

80. Разуваев, Д. А. Коэффициенты морозного пучения силикатизированных глинистых грунтов / Д. А. Разуваев, А. Л. Ланис, М. Г. Чахлов, Р. С. Печенкин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2(65). – С. 91-98. – DOI 10.52170/1815-9265_2023_65_91. – EDN QCSJMCX.

81. Разуваев, Д. А. Обоснование границ капиллярного барьера из инъецированного раствора для предотвращения морозного пучения земляного полотна / Д. А. Разуваев, М. Г. Чахлов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 197-207. – DOI 10.31675/1607-1859-2023-25-3-197-207. – EDN NILPUA.

82. Разуваев, Д. А. Обоснование создания капиллярного барьера в земляном полотне путем инъецирования гидроизолирующих составов / Д.А. Разуваев, А.Л. Ланис, М.Г. Чахлов, Ю.А. Цибариус // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца, Москва, 27–28 октября 2021 года. – Москва: Российский университет транспорта, 2021. – С. 75-78. – EDN: DGRCGQ.

83. Разуваев, Д. А. Оценка коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов при промерзании / Д. А. Разуваев, М. Г. Чахлов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2024. № 1 (68). С. 83–92. DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_83.

84. Разуваев, Д. А. Температурные критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса в грунтах земляного полотна / Д. А. Разуваев, М. Г. Чахлов // TRANSOILCOLD 2023 : Материалы 6-го Международного Симпозиума по строительному инжинирингу грунтовых сооружений на транспорте в холодных регионах, Москва, 02–05 октября 2023 года / Под общей редакцией Т.В. Шепитько. – Москва: Издательско-торговая корпорация "Дашков и К", 2023. – С. 155-157. – EDN YYSXKO.

85. Разуваев, Д. А. Экспериментальное определение двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса в различных видах глинистых грунтов / Д. А. Разуваев, М. Г. Чахлов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 35–44. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_35.

86. Ребиндер, П. А. Физический словарь, т. 4. М.: изд. ОНТИ, 1938.

87. Ржаницын, Б. А. Химическое закрепление грунтов в строительстве / Б. А. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1986. – 264 с.

88. Сергеев, В. И. Инженерно-геологические основы оптимизации инъекционного закрепления грунтов : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук : 04.00.07 / Сергеев Валерий Иванович. – М., 1985. – 32 с.

89. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах СНиП 2.02.04-88 (с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2021. – 74 с.

90. СП 34.13330.2021. СНиП 2.05.02-85* Автомобильные дороги. – М., 2021. – 97 с.

91. СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85 (с Изменениями N 1, 2). – М.: ФГБУ "РСТ", 2021.–67 с.

92. Стоянович, Г. М. Закрепление грунтов с помощью криотропного гелеобразования в дорожном строительстве / Г. М. Стоянович, Р. Г. Шипарев // Изв. Петербургского ун-та путей сообщения. – 2017. – Т. 14, № 4. – С. 759–767.

93. СТП – ТУАД 32–03–2000. Расчётные значения глинистых грунтов земляного полотна для проектирования по условиям морозоустойчивости и прочности нежестких дорожных одежд автомобильных дорог Новосибирской области. – Новосибирск, 2000. – 32 с.

94. Сумгин, М. И., Качурин С. П., Толстихин Н. И., Тумель В. Ф. Общее мерзлотоведение. М.: Издательство АН СССР, 1940.

95. Сухоруков, А. В. Обоснование региональных расчётных значений характеристик глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд в условиях Западной Сибири : специальность 05.23.11 "Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сухоруков Алексей Владимирович. – Новосибирск, 2017. – 166 с. – EDN YPGKXA.

96. Сухоруков, А. В. Экспериментальные исследования коэффициента влагопроводности глинистых грунтов / А. В. Сухоруков, М. Ю. Калинин // Перспективы развития фундаментальных наук : Сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 томах, Томск, 26–29 апреля 2016 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет; под ред. И. А. Курзиной, Г. А. Вороновой. Том 6. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. – С. 58-60. – EDN WKINXD.

97. Титов, В. П. Усиление земляного полотна длительно эксплуатируемых железных дорог. – М. : Стройиздат, 1980. – 272 с.

98. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. – URL: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda> (дата обращения 20.01.2023).

99. Тулаев, А. Я. Обзор литературных работ, посвященных изучению пучин и мерам борьбы с ними, опубликованных в 1938 г. – Труды Союздорнии, вып. 11. М.: Дориздат, 1941.
100. Тютюнов, И. А. Введение в теорию формирования мерзлых пород. М.: Издательство АН СССР, 1963.
101. Тютюнов, И. А. Миграция воды в торфяно-глеевой почве в периоды замерзания и замерзшего состояния в условиях неглубокого залегания вечной мерзлоты. М.: Издательство АН СССР, 1951.
102. Тютюнов, И. А., Нерсесова З. А. Природа миграции воды в грунтах при промерзании и основы физико-механических приемов борьбы с пучением. М.: Издательство АН СССР, 1963.
103. Усиление грунтов основания фундаментов методом инъекционной силикатизации / А. А. Михайлов, Е. Ю. Евлахова, А. В. Иванова, М. С. Матвеев // Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 7. – № 1. – С. 5- 9. – DOI 10.29039/article_5c646f166c48d2.74103573.
104. Федосов, А. Е. Физико-механические процессы в грунтах при их промерзании и оттаивании. М.: Трансжелдориздат, 1935.
105. Физико-химические процессы в промерзающих грунтах и способы управления ими. – Труды ПНИИИС, вып. 64. М.: Стройиздат, 1964.
106. Хакимов, Х. Р. Замораживание грунтов в строительных целях. М.: Госстройиздат, 1962. – 187 с.
107. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов. М.: «Высшая школа», 1973.
108. Чеверев, В. Г. Анализ представлений о механизме криогенной миграции воды в промерзающих грунтах / В.Г. Чеверев, А.В. Брушков, С.А. Половков [и др.] // Криосфера Земли. – 2021. – Т. 25, № 5. – С. 3-12. – DOI 10.15372/KZ20210501. – EDN QYBQDP.

109. Чеверев, В. Г. Физико-химическая теория формирования массообменных и тепловых свойств криогенных грунтов : дис. ... докт. геол.-мин. наук / В.Г. Чеверев. – М, 1999. – 305 с.

110. Чистотинов, Л. В. Криогенная миграция влаги и пучение горных пород. – «Обзор., Сер. гидрогеол. и инж. геол.». М.: 1974 (ВИЭМС).

111. Чистотинов, Л. В. Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах. М. : «Наука», 1973.

112. Чурилин, В. С. Обоснование величины допускаемого пучения грунта для проектирования морозоустойчивых нежестких дорожных одежд (на примере районов Западной Сибири) : специальность 05.23.11 "Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чурилин Владимир Сергеевич, 2019. – 165 с. – EDN DRWXCO.

113. Швецов, П. Ф. Пучение пылевато-глинистых пород при промерзании в свете термодинамики необратимых процессов. Материалы VIII Всесоюз. междувед. совещ. по геокриологии (мерзловедению) вып. 1. Якутск, 1967.

114. Шеслер, А. И. Неравномерность деформации нежестких дорожных одежд под воздействием пучения-осадки грунтов; автореферат канд. техн. наук : 440 / А. И. Шеслер; науч. рук. проф. Н. А. Пузаков; МАДИ. - М., 1968. - 25с.

115. Шипарев, Р. Г. Повышение прочностных характеристик песчаного грунта криотропным гелеобразованием / Р. Г. Шипарев, Г. М. Стоянович, А. С. Макаренко // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2018. – № 1 (14). – С. 6–9.

116. Шумский, П. А. Основы структурного льдоведения. М.: Издательство АН СССР, 1955.

117. Ярмолинский, А. И. Исследование влияния источников увлажнения на влагонакопление грунта земляного полотна / А.И. Ярмолинский, В. А. Ярмолинский, И. С. Украинский // Дальний Восток. Автомобильные дороги

и безопасность движения: международный сборник научных трудов. – Хабаровск: Издательство ТОГУ, 2014. – № 14. – С. 14–19.

118. Abdalla B., Fan C., Mckinnon C. et al. Extended porosity rate function for frost heave // 33rd Intern. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 10: Polar and Arctic Science and Technology (San Francisco, California, USA, June 8-13, 2014). New York, Publ. ASME, 2014, V010T07A046, DOI:10.1115/OMAE2014-24221.

119. Boynton, R. S. Lime Sluruy Pressure Injection Bulletin. Bulletin 331 / R. S. Boynton and J. R. Blacklock ; National Lime Association. – Arlington, Va. – 43 p.

120. Bronfenbrener L., Bronfenbrener R. Modeling frost heave in freezing soils // Cold Reg. Sci. and Technol., 2010, vol. 61, p. 43-64.

121. Designing and Explanation of Reinforcement of Operated High Fills with the Injection of Solidifying Solutions / E. S. Ashpiz, A. L. Lanis, D. A. Razuvaev, P. O. Lomov // Transportation Research Procedia : 12, Irkutsk-Krasnoyarsk, 06–08 октября 2021 года. – Irkutsk-Krasnoyarsk, 2022. – P. 614-620. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.01.099. – EDN MLIIZB.

122. Isakov A. Modeling the operation of road pavement during the thawing of soil in the subgrade of highways / A. Isakov, D. Razuvaev, I. Gudkova, M. Chakhlov // MATEC Web of Conferences, Novosibirsk, 16–19 мая 2018 года. Vol. 239. – Novosibirsk: EDP Sciences, 2018. – P. 05008. – DOI 10.1051/matecconf/201823905008. – EDN WTVMML.

123. Lanis A. Results of modeling the behavior of the subgrade with pressure injection of solidifying solutions // MATEC Web of Conferences. Siberian Transport Forum – TransSiberia. – 2018. – Volume 239. – 05006. – DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823905006>.

124. Levenberg, E Validation of NCAT Structural Test Track Experiment Using INDOT APT Facility: Final Report / Eyal Levenberg, Rebecca S. McDaniel, Jan Olek // Joint Transportation Research Program (JTRP), Report FHWA/IN/JTRP-2008. – 2009. – T. 26. – 174 p.

125. Lomov P. Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions / P. Lomov, A. Lanis, D. Razuvaev, M. Kavardakov // *Sciences in Cold and Arid Regions*, – Volume 13, Issue 5, October, 2021. – P. 357-365. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.21040 (WoS).

126. Metcalf, J.B. Application of Full-Scale Accelerated Pavement Testing / Metcalf John B. // *Transportation Research Board*. – 1996. – Vol. 235. – 11 p.

127. Mitchell, T.M. WesTrack: Performance Testing for Quality Roads / T.M. Mitchell // *Publication No.* – FHWA-SA-97-038, Washington, DC. – 1997.

128. Norrish K., Raussel J. *Clay Min. Bull.* 1962, N 5.

129. Powell R.B. As-Built Properties of Experimental Sections on the 2000 NCAT Pavement Test Track / Powell R. Buzz // *NCAT Report*. – 2001.

130. Qiao Y. Examining Effects of Climatic Factors on Flexible Pavement Performance and Service Life / Qiao Y., Flintsch G. // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2013. – №. 2349. – Pp. 100–107.

131. Razuvaev D. A. Injection Compositions for Creating Impervious Screen for Roadbed Foundation / D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov, V. Y. Soloviova, G. V. Karpachevsky // *Transportation Research Procedia* : 12, Irkutsk-Krasnoyarsk, 06–08 октября 2021 года. – Irkutsk-Krasnoyarsk, 2022. – P. 621-626. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.01.100. – EDN DBNLAS.

132. Razuvaev D.A. Determination of the two-parameter temperature criterion for the start of the intensive cryogenic moisture transfer process in clay soils of the subgrade / D.A. Razuvaev, M.G. Chakhlov // *E3S Web of Conferences* 402 (5) – 2023. – 12022. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340212022>.

133. Razuvaev D.A. Principles for positioning a capillary barrier made of injected mortar in the earth bed / D.A. Razuvaev, A.L. Lanis, M.G. Chakhlov and E.I. Nagaev // *E3S Web of Conferences* 402 (5) – 2023. – 12010. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340212010>.

134. Razuvaev, D. A. Rationale for creation of capillary breaking layers in cold regions subgrade by pressure injection of waterproofing compounds / D. A. Razuvaev,

A. L. Lanis, M. G. Chakhlov // Sciences in Cold and Arid Regions. – 2021. – Vol. 13, No. 5. – P. 366-371. – DOI 10.3724/SP.J.1226.2021.21029. – EDN OIFUTM.

135. Razuvaev, D. Dynamic effects of vehicles on the elements of bridge structures due to deformation of the approach slabs / D. Razuvaev, M. Chakhlov, R. Pechenkin // E3S Web of Conferences : Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019, Divnomorskoe Village, 09–14 сентября 2019 года. Vol. 135. – Divnomorskoe Village: EDP Sciences, 2019. – P. 02007. – DOI 10.1051/e3sconf/201913502007. – EDN DHDDIA.

136. Richards, L.A. Physical Processes Determining Water Loss from Soil / Richards L.A., Gardner W.R., Gen Ogata // Sci. Soc. Am. Proc. – Vol. 20 – No 3. – Pp. 310–314.

137. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen: RStO 01. – Köln.: FGSV-Verlag, 2001.

138. Special report 61-G: The AASHO Road Test, Report 7, Summary Report. Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1962.

139. Tompkins, D. MnROAD Lessons Learned / Derek Tompkins, Lev Khazanovich // Research Reports. – No. MN/RC-2007-06. – 2007. – 63 p.

140. Williams, R. Comparison of Laboratory Wheel-Tracking Test Results With Wes Track Performance / Williams, R., Brian Prowell // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 1999. – № 1681. – P. 121–128.

141. Youngs, E.G. Moisture Profile During Vertical Infiltration / E.G. Youngs // Soil Science. – 1957. – Vol. 84 (4). – Pp. 283–290.

142. Zapata, C.E. Calibration and Validation of the Enhanced Integrated Climatic Model for Pavement Design / Claudia E. Zapata, William N. Houston // Transportation Research Board. – 2008. – T. 602. – 73 p.

143. Zapata, C.E. Uncertainty in Soil-Water Characteristic Curve and Impacts on Unsaturated Shear Strength Predictions : Ph.D. Dissertation : Claudia E. Zapata. – United States, Arizona State University, 1999.

Приложение А

Акты о внедрении результатов исследований



ФЕДЕРАЛЬНОЕ КАЗЕННОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФЕДЕРАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ «СИБИРЬ»
ФЕДЕРАЛЬНОГО ДОРОЖНОГО
АГЕНТСТВА»
(ФКУ «Сибуправтодор»)

Добролюбова ул., д. 111, г. Новосибирск, 630008
Телефон: (383) 262-62-92, факс (383) 262-59-35
E-mail: press@fuadsib.ru, <http://www.sibupravtodor.ru>
01.04.2024 № 1336

На № _____ от _____

О внедрении результатов

АКТ

о внедрении результатов научных исследований, выполненных аспирантом Чахловым Михаилом Геннадьевичем в диссертационной работе:

«Совершенствование противопучинной защиты дорожных конструкций с применением капиллярного барьера в эксплуатируемом земляном полотне», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Настоящим актом подтверждается, что результаты выполненных исследований и отдельные положения диссертационной работы, внедрены при ремонте объекта Федерального управления автомобильных дорог «Сибирь» (ФКУ «Сибуправтодор»).

Применение результатов диссертационного исследования позволило подобрать оптимальные параметры (глубина, мощность) силикатизации подходной насыпи на объекте: «Ремонт моста через оз. Старица на км. 34+367 автомобильной дороги Р-254 «Иртыш» Челябинск – Курган – Омск – Новосибирск. Северный обход г. Новосибирска, Новосибирская область».

Первый заместитель начальника

Д.А. Батурин



ООО "РосИнсталПроект", Россия, 630005, г. Новосибирск, ул. Ипподромская, 21
тел./факс (383) 201-54-80, info@rinsp.ru

АКТ

о внедрении результатов научных исследований, выполненных аспирантом Чахловым Михаилом Геннадьевичем в диссертационной работе: «Совершенствование противопучинной защиты дорожных конструкций с применением капиллярного барьера в эксплуатируемом земляном полотне», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящим актом подтверждается, что результаты выполненных исследований и отдельные положения диссертационной работы Чахлова Михаила Геннадьевича имеют практическое внедрение в проектной организации ООО «РосИнсталПроект» при лабораторных испытаниях грунтов земляного полотна автомобильных дорог на следующих объектах:

- «Строительство и реконструкция участков автомобильной дороги Р-256 "Чуйский тракт" Новосибирск – Барнаул – Горно-Алтайск – граница с Монголией. Строительство автомобильной дороги Р-256 "Чуйский тракт" Новосибирск – Барнаул – Горно-Алтайск - граница с Монголией на участке Новосибирск – Линево, Новосибирская область»;

- «Капитальный ремонт автомобильной дороги Р-256 «Чуйский тракт» Новосибирск – Барнаул – Горно-Алтайск – граница с Монголией на участке км 102+000 - км 135+277, Новосибирская область»;

- «Реконструкция объекта капитального строительства "Автомобильная дорога Красноярск – Енисейск на участке км 28+500 – км 44+000 в Емельяновском районе Красноярского края».

Применение отдельных результатов диссертационной работы позволило корректно определить специфические свойства исследуемых грунтов при промерзании. Полученные данные представляют интерес с точки зрения практического применения при вариантном проектировании морозоустойчивых конструкций дорожных одежд автомобильных дорог.

С уважением,
Заместитель генерального директора



Ахметов С.А.

Приложение Б

Технологическая карта на устройство капиллярного барьера способом газовой силикатизации

Разбивка мест установки инъекторов осуществляется инструментальным способом согласно назначенной в проектной документации схеме расположения точек инъектирования. Общее количество инъекций принимается согласно ведомости объемов работ, также как и общий объем укрепляемого грунта. Глубина погружения инъектора в грунт принимается по результатам расчетов. Плотность раствора назначается по результатам расчетов.

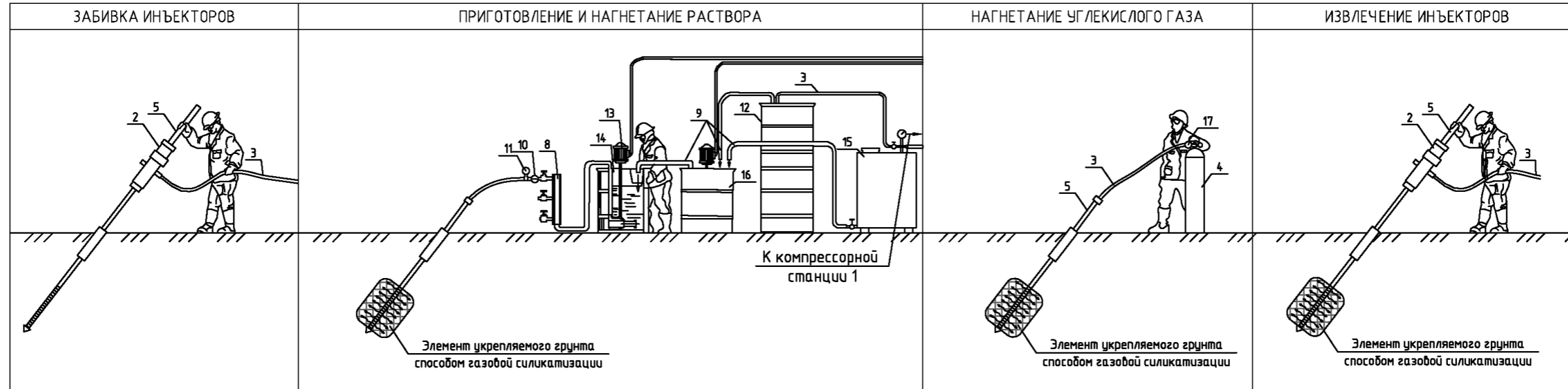
№ п/п	Наименование работ	Оборудование и материалы	Примечания	№ п/п	1	2	3
					1	2	3
Подготовительные работы							
1	Разметка мест погружения инъекторов	Рулетка, мел, краска, колья	Производится в соответствии с проектной документацией, допускается корректировка «по местности». Разбивку мест размещения инъекторов, инъекционных и контрольных скважин следует производить от основных осей сооружения с допустимыми отклонениями ± 5 см.	9	Контроль за расходом и давлением газа	Весы для определения расхода газа с пределом взвешивания до 150 кг и с точностью не менее 0.1 кг, манометры высокого и низкого давления (цена деления не более 0.01 МПа)	– Контроль производится во время производства работ. – Баллон с углекислым газом, оборудованный редуктором, устанавливается на бесах. По разнице массы баллона до и после нагнетания определяется расход газа. – Давление газа контролируется с помощью манометров.
2	Подготовка площадки	Лопаты	Расчистка производится по мере необходимости	10	Нагнетание силиката натрия в режиме пропитки	Насос, пневматические баки, либо установки, смонтированные на базе дозирочных агрегатов, шланги для подачи раствора (0.6–1.0 МПа и условный проход не менее 20–25 мм)	– Необходимый объем раствора силиката натрия определяется по формуле (7) Пособия [1]. – Сплошность барьера достигается поглощением грунтом расчетного объема раствора силиката натрия (Рисунок 1, тех. схема). – Нагнетание раствора через инъектор производится в объеме и технологической последовательности, предусмотренной проектом. – Давление при нагнетании раствора устанавливается проектом, но не более 0.5 МПа. – Температура силиката натрия не менее 10 °С.
3	Доставка растворов исходных концентраций и приготовление раствора рабочей концентрации	– Шланги, емкости для приема концентрата, компрессор, емкости для приготовления раствора объемом 100...200 л с мерными делениями, насос, фильтр. – силикат натрия по ГОСТ 13078–2021: жидкое стекло марки Б (метасиликат)	– Слив может осуществляться как с «с колес», так и с разгрузкой транспортной емкости. – Емкости для приготовления растворов при силикатизации грунтов следует изготавливать с таким расчетом, чтобы их количество и объемы обеспечивали бесперебойную работу участка. Емкости должны быть оборудованы устройствами для подогрева и перемешивания раствора. – Растворы рабочих концентраций изготавливаются разведением растворов исходных концентраций чистой водой до плотности, указанной в проектной документации. – Приготовленные растворы целесообразно отстаивать в течение 1–3 ч до их перекачки в рабочую емкость.	11	Контроль параметров процесса: а) расход и объем силиката натрия б) давление силиката натрия в) температура силиката натрия	Расходомеры Манометры Термометр	– Величина расхода раствора контролируется в процессе нагнетания по расходомерной шкале (или счетчику-расходомеру) – Давление контролируется с помощью манометров – Температура раствора контролируется с помощью термометра.
4	Контроль качества приготовляемых растворов рабочих концентраций	Термометры с градуировкой шкалы 0–100 °С и ценой деления в 1 °С, стеклянные мерные цилиндры для отбора проб раствора объемом 250–500 мл, ареометры для определения плотности растворов с диапазоном измерений 1.01–1.50 г/см ³ и ценой деления 0.001 г/см ³ .	– Входной контроль каждой партии силиката натрия осуществляется по документам о качестве; – Контроль температуры и плотности осуществляется для каждой партии раствора непосредственно на рабочей площадке.	12	Нагнетание углекислого газа через инъектор	См. п. 8	– Необходимый объем углекислого газа для отверждения раствора в порах грунта определяется по формуле (9) Пособия [1]. – Давление при нагнетании газа для отверждения раствора находится в пределах от 0.4 до 0.5 МПа. Нагнетание углекислого газа производится плавно. Сбрасывание давления в нагнетательных системах при окончании нагнетания должно производиться постепенно и медленно.
Основные работы							
6	Лидерное бурение (при необходимости)	Буровое оборудование	Лидерное бурение производится при необходимости. Это может быть вызвано неоднородностью инженерно-геологического строения и необходимостью прохождения конструктивных слоев дорожной одежды. В случае положительного решения выполняется назначение параметров лидерного бурения, в том числе используемая установка, буровое оборудование, глубина, диаметр, вид бурения.	13	Контроль за расходом и давлением газа	См. п. 9	См. п. 9
7	Погружение инъекторов	Дистанционный захват, ПУМ–35 или ручной копр, наголовники (или другое подходящее оборудование)	– Уровень погружения инъекторов рассчитывается по методике определения глубины расположения капиллярного барьера. – Радиус укрепления от одной инъекции назначается по Пособию [1]. – Для рассчитанного уровня погружения инъекторов по принятому радиусу определяются расстояние между рядами инъекторов (1) и расстояние между инъекторами в ряду (2) согласно Пособию [1]. – Геометрически вычисляется необходимый угол наклона инъектора для обеспечения шага инъектор в уровне капиллярного барьера. – Толщина капиллярного барьера достигается высотой перфорированной части инъектора. – Погружение инъектор производится согласно проектной разметке. – При погружении следует принимать меры, предупреждающие отклонение инъектор путем установки кондукторов. Максимальные отклонения не должны превышать 1%. – Погружение инъектор в грунт может производиться забивкой, задавливанием и установкой в предварительно пробуренные инъекционные скважины (назначается проектом)	14	Извлечение инъектор бурную	Рычаг-захват, упор, наголовник	Заходками, с разборкой звеньев
				15	Тампонирующее отверстие	Подвижный цементный раствор	
				16	Промывка инъектор, прочистка перфорации, смазка резьбовых соединений	Насос, шланги, шильце, металлическая щетка, консистентная смазка с добавкой графита	После каждой инъекции, с полной или частичной разборкой инъектора
				17	Промывка магистралей подачи и насоса	То же, за исключением смазки	В конце каждой смены
				18	Профилактика оборудования	То же и специальный инструмент	По мере необходимости, но не реже чем 1 раз на 30 инъекций
				19	Консервация оборудования	–	При вынужденных перерывах в работе на срок более 2 недель
				20	Контроль качества	Лопаты, ножи, буровая установка, геотехническая лаборатория	Согласно проектной документации
8	Нагнетание углекислого газа через инъектор для предварительной активизации грунта	Баллоны для газа, углекислотные редукторы, оборудованные электрообогревательным элементом, напорные шланги, понижающий трансформатор и др.	– Необходимый объем углекислого газа для предварительной активизации грунта рассчитывается по формуле (8) Пособия [1]. – Давление при нагнетании газа для активизации грунта не должно превышать 0.15–0.20 МПа. Нагнетание углекислого газа в грунт производится плавно. Сбрасывание давления в нагнетательных системах при окончании нагнетания должно производиться постепенно и медленно.	21	Документирование	Журнал работ Акт	Заполняется производителем работ Составляется комиссией из представителей «заказчика» и «исполнителя»

Список литературы

1. Пособие по химическому закреплению грунтов инъекцией в промышленном и гражданском строительстве (с СНиП 3.02.01–88). – М.: Стройиздат, 1986. – 129 с.

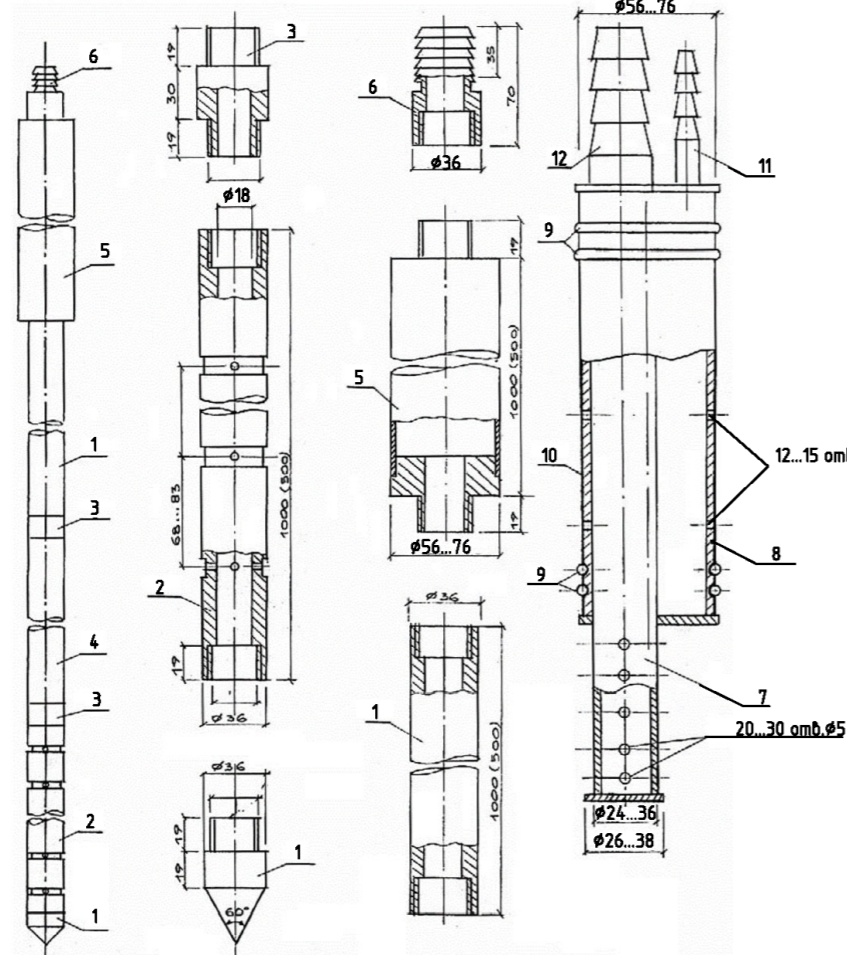
Приложение В

Технологическая схема на устройство капиллярного барьера способом газовой силикатизации



Забивной иньектор

Детали забивного иньектора



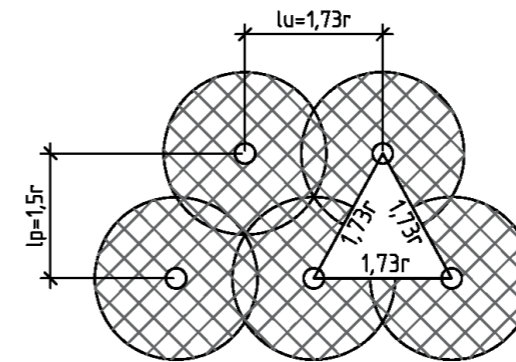
СПЕЦИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ				
Поз.	Наименование	Марка	Ед. изм.	Кол-во
1	Компрессорная станция	ЗИФ-ПВ-5М	шт.	1
2	Пнеумодарная машина	ПУМ 65	шт.	2
3	Воздушные шланги	-	м. п.	100
4	Баллон с углекислым газом	-	шт.	1
5	Иньектор	Конструкции СГУПС	шт.	20
6	Электрокабель	-	м. п.	40
7	Универсальный электроагрегат	ТС300SC/EL	шт.	1
8	Гребенка	-	шт.	1
9	Напорные шланги	-	м. п.	100
10	Расходомеры	-	шт.	3
11	Манометры	-	шт.	4
12	Емкость для воды	ЦВ-1,2	шт.	1
13	Насосы шестеренчатые	-	шт.	2
14	Накопительная емкость	-	шт.	1
15	Емкость для силиката натрия	-	шт.	1
16	Емкость для приготовления раствора	-	шт.	1
17	Редуктор баллонный	БКО	шт.	1

ПРИМЕЧАНИЯ

1. Данная схема является общей для выполнения газовой силикатизации и не отражает специфику конструкций.
2. На схеме не показан процесс подготовительных работ, предварительное нагнетание углекислого газа и тампонирующее скважин.
3. После извлечения иньекторов их необходимо прочистить и промыть.
4. Конструкция укрепляемого земляного полотна показана условно.

Конструкция иньектора

Поз.	Наименование
1	Наконечник
2	Звено перфорированное
3	Ниппель
4	Звено дистанционное
5	Звено запирающее
6	Штуцер
7	Канал подачи раствора
8	Канал подачи сжатого газа
9	Хомуты
10	Резиновый чулок
11	Штуцер подачи сжатого газа
12	Штуцер подачи силиката натрия



Примечание

- l_p - расстояние между рядами иньекторов (скважин), м;
- l_i - расстояние между иньекторами (скважинами) в ряду, м;
- $г$ - расчетный радиус закрепления от единичной иньекции, м

Рисунок 1 - Расчетная схема расположения иньекторов при сплошной силикатизации [1]