

**ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**На правах рукописи**



**БОРИСОВ АРТЕМ ЕВГЕНЬЕВИЧ**

**ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ОБЛЕГЧЕННОГО  
И ПЕРЕХОДНОГО ТИПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ГРУНТОБЕТОННОЙ СМЕСИ**

**Специальность 2.1.8. Проектирование и строительство дорог,  
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей**

**Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук, доцент  
В. А. Козлов**

**Воронеж 2022**

ВВЕДЕНИЕ	4
1. РЕМОНТ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ МЕСТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ	13
1.1. Оценка состояния автомобильных дорог с покрытием нежесткого типа	13
1.2. Анализ существующих технологических решений при ремонте дорожных покрытий нежесткого типа	19
1.3. Технология повторного использования материалов дорожных одежд	26
1.4. Существующие способы и методы организации технологических решений при ремонте дорожных одежд	31
1.5. Выводы по главе	34
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СЛОЁВ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ СО СЛОЕМ ИЗ УКРЕПЛЁННОГО МАТЕРИАЛА	35
2.1. Физико-математическая модель работы дорожной одежды с использованием материала с заданными свойствами	35
2.2. Анализ работы различных составов слоя в условиях циклического замораживания-оттаивания	55
2.3. Анализ процессов, происходящих при формировании материала дорожной одежды с определёнными характеристиками	59
2.4. Выводы по главе	62
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЕВ ОБЛЕГЧЕННОГО И ПЕРЕХОДНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ МЕСТНЫХ УКРЕПЛЁННЫХ МАТЕРИАЛОВ	64
3.1. Порядок подготовки образцов для проведения экспериментальных исследований	64
3.2. Определение характеристик подобранных оптимальных грунтовых смесей, укрепленных вяжущими веществами	65

3.3. Физико-механические характеристики укрепленных оснований	77
3.4. Морозостойкость укрепленных оснований и рекомендации по применению укрепленных материалов	92
3.5. Выводы по главе	99
4. ТЕХНОЛОГИЯ УСТРОЙСТВА КОНСТРУКТИВНОГО СЛОЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ИЗ ГРУНТОБЕТОННОЙ СМЕСИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ	100
4.1. Технология устройства конструктивного слоя дорожной одежды из грунтобетонной смеси	100
4.2. Особенности проведения работ при ремонте конструктивного слоя	106
4.3. Исследование кернов полученного слоя основания в лабораторных условиях на прочность и морозостойкость	113
4.4. Анализ покрытия до ремонта и после формирования дорожной конструкции	115
4.5. Техничко-экономическое обоснование технологии ремонта дорожной одежды с использованием грунтобетонной смеси	118
4.6. Выводы по главе	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	130
Приложение А. Технологическая карта по строительству конструктивного слоя из грунтобетонной смеси	144
Приложение Б. Акт строительства опытного участка	145
Приложение В. Акт внедрения результатов диссертационной работы	147

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Интенсивное развитие транспорта в настоящее время приводит к повышению грузоподъемности, скорости современных автомобилей, а также возрастанию автопарка используемых транспортных средств. Как следствие, увеличивается нагрузка на дорожную конструкцию. Совместное воздействие колесной нагрузки и природно-климатических факторов на дорожную одежду приводит к образованию дефектов на покрытии в виде выбоин, трещин, колеиности и других. Это в свою очередь снижает транспортно-эксплуатационные показатели автомобильной дороги и уменьшает среднюю скорость транспортного потока. Образовавшиеся на покрытии дефекты способствуют износу отдельных частей автомобильного транспорта и увеличивают количество дорожно-транспортных происшествий.

Одной из причин разрушения покрытий автодорог является ослабление земляного полотна в связи с поступлением влаги через образовавшиеся дефекты в слоях дорожной одежды. Отсюда возникает необходимость укрепления оснований и грунтов верха земляного полотна, с целью уменьшения их водонасыщения и, как следствие, уменьшения количества дефектов, особенно при воздействии пониженных температур.

Для преодоления негативной тенденции по снижению основных транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог приходится выполнять большой объем ремонтных работ, требующих значительных финансовых вложений. Существенное снижения стоимости при выполнении дорожных работ можно получить при использовании технологий, основанных на повторном использовании дорожно-строительных материалов, укрепленных различными вяжущими. В соответствии с нормативными документами в настоящее время используют асфальтобетонный гранулят, щебеночно-гравийно-песчаные смеси и грунты, обработанные вяжущими материалами.

Необходимо отметить, что в Распоряжении Министерства транспорта РФ Федерального дорожного агентства (Росавтодор) № 771-р от 03.03.2021 г. «Об утверждении стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021-2025 годов» в качестве одних из приоритетных научных исследований указаны исследования различных типов вяжущих с целью повышения эффективности укрепления грунтов и рыхлых каменных материалов, а также различных методов повышения морозостойкости материалов на основе минеральных вяжущих.

Данная работа посвящена разработке технологии формирования конструктивного слоя дорожной одежды облегченного или переходного типа путем укрепления вяжущими материалами грунтобетонной смеси, используемой в конструктивных слоях основания с повышением морозостойкости и прочностных характеристик. При этом решается актуальная задача по уменьшению затрат на ремонт дорожной одежды при одновременном увеличении сроков эксплуатации без появления дефектов на покрытиях автодорог.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемам повышения эффективности повторного использования материалов старой дорожной одежды посвящены труды авторов: Алиев А.М., Артюшин А.В., Бахрах Г.С., Безрук В.М., Васильев А.П., Гезенцвей Л.Б., Гоглидзе В.М., Гмыря Б.С., Калгин Ю.И., Лупанов А.П., Никишин В.Е., Подольский Вл.П., Силкин В.В., Сюньи Г.К., Тимофеев А.А., а также зарубежные исследователи: Казаль И., Розберг К., Харбер С., Харрис С. и другие. Их работы в значительной мере способствовали изучению технологии холодной регенерации. Европейские страны все активнее используют ее при ремонте и реконструкции дорог высших технических категорий.

В настоящее время в Российской Федерации большинство автомобильных дорог 4-5 категории имеют тонкослойные асфальтобетонные, щебеночные и гравийные покрытия. При проведении ремонтных работ способом холодного ресайклинга при фрезеровании тонкослойных

конструкций часто происходит перемешивание слоя покрытия с основанием и верхним слоем земляного полотна. Применение такого материала, согласно нормативным документам, в качестве конструктивного слоя дорожной одежды не регламентируются. Особенно это касается районов со значительным количеством циклов попеременного замораживания и оттаивания в течение года.

**Цель работы** заключается в разработке технологии ремонта дорожной одежды облегченного и переходного типа с использованием грунтобетонной смеси в качестве конструктивного слоя для центрально-черноземного региона Российской Федерации.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ современных технологий ремонта покрытий и оснований дорожных одежд нежесткого типа, с детальным рассмотрением вопроса использования укрепленного вторичного материала.
2. Разработать математическую модель работы дорожной конструкции при изменяющихся характеристиках используемых материалов с учетом различных эксплуатационных показателей.
3. Провести исследования влияния физико-механических характеристик укрепляемых грунтов, формируемых при ремонте конструктивных слоев дорожных одежд.
4. Разработать технология ремонта дорожной одежды облегченного и переходного типа с использованием грунтобетонной смеси, исследовать получаемые физико-механические характеристики.
5. Определить технико-экономическую эффективность предлагаемой технологии.

**Объект исследования** – дорожные одежды облегченного и переходного типа, состоящие из асфальтобетонного покрытия на модифицированном основании, полученном с помощью ресайклинга.

**Предмет исследования** – исследование физических процессов в слое основания дорожной одежды из грунтобетонной смеси при действии

отрицательных температур с целью достижения увеличенного срока ее эксплуатации.

### **Научная новизна.**

1. Разработана математическая модель, описывающая работу конструктивного слоя дорожной одежды облегченного типа, в которой учитываются возникающие внутренние напряжения в уплотненной грунтобетонной смеси для слоя основания.

2. Предложена технология ремонта конструктивных слоев дорожной одежды для центрально-черноземного региона с использованием грунтобетонной смеси, позволяющая производить ремонт дорожных одежд облегченного и переходного типа методом холодной регенерации с применением смеси фрезеруемого асфальтобетона с щебнем и грунтом.

3. Предложены различные композиционные составы укрепления грунтов с применением в качестве вяжущих веществ портландцемента, полимерных добавок, гашеной извести с использованием песка, как минерального заполнителя. Укрепленный грунт в зависимости от района применения можно использовать в качестве основания дорожной одежды переходного типа и дополнительного слоя основания дорожной одежды облегченного типа, что позволит снизить стоимость ремонта за счёт уменьшения затрат на приобретение новых дорожно-строительных материалов и транспортные расходы по их доставке.

**Теоретическая значимость** работы заключается в разработке математической модели, описывающей работу слоя основания из уплотненной грунтобетонной смеси и позволяющей произвести прогноз напряженно-деформируемого состояния слоя при воздействии транспортной нагрузки и природно-климатических факторов. При этом нахождение значения параметров модели обеспечивается решением задачи теплопроводности.

**Практическая значимость работы.** Предложены обоснованные технологические решения ремонта дорожной одежды облегченного и

переходного типа с использованием грунтобетонной смеси в качестве конструктивного слоя. Показана технико-экономическая эффективность предлагаемой технологии.

1. Разработаны различные составы укрепленных грунтов, которые можно использовать в качестве основания или дополнительного слоя основания дорожных одежд переходного и облегченного типа в зависимости от районов с различной среднемесячной температурой воздуха.

2. Выполнена научно-исследовательская работа по государственному контракту №7 – П от 30.06.2016г. по теме: «Методические рекомендации по применению на территории Воронежской области технологий производства работ и применяемых материалов при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте и ремонте автомобильных дорог регионального, межмуниципального и местного значения»

**Методология и методы исследований.** В основу диссертационных исследований положены современные положения теоретического и практического развития технологии ремонта автомобильных дорог на основе анализа работ отечественных и зарубежных ученых. Исходные положения согласуются с общеизвестными методами научных исследований в области технологии восстановления и ремонта слоев дорожной одежды. Работа выполнена с применением действующих нормативных документов и современных стандартных методов.

**Личный вклад** соискателя состоит в решении поставленных задач исследования, а именно:

- проведен анализ и обобщение теоретических данных в области ремонта покрытий нежесткого типа;
- разработана математическая модель, позволяющая произвести прогноз напряженно-деформируемого состояния слоя дорожной конструкции при воздействии транспортной нагрузки;



- получены и исследованы физико-механические характеристики укрепленных грунтов с применением в качестве вяжущих веществ портландцемента, полимерной добавки, гашеной извести и битумной эмульсии с использованием песка, как минерального заполнителя;
- разработана и апробирована технология ремонта конструктивных слоев дорожных одежд облегченного и переходного типа.
- произведен расчет экономической эффективности от применения предлагаемой технологии.

**На защиту выносятся:**

1. Математическая модель, описывающая работу конструктивного слоя дорожной одежды облегченного типа в области перепада температур с учетом внутреннего напряжения в уплотненной грунтобетонной смеси.
2. Различные композиционные составы укрепления грунтов с применением в качестве вяжущих веществ портландцемента, полимерных добавок, гашеной извести в конструкциях оснований дорожной одежды переходного типа или дополнительного слоя основания облегченного типа.
3. Технология ремонта дорожной одежды облегченного и переходного типа с использованием предложенных грунтобетонных смесей, укрепленным вяжущим материалом.

**Достоверность результатов** диссертационной работы подтверждается совпадением результатов и натурных исследований с теоретическими, полученными с помощью предложенной математической модели.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты научной работы были представлены и обсуждались на конференциях профессорско-преподавательского состава ВГТУ (Воронеж, 2014-2021 г.г.); на XVII Международной научно-практической конференции «Достижения и проблемы современной науки» (Санкт-Петербург, 2017); на заседаниях кафедры «Строительство и эксплуатация автомобильных дорог» (ВГТУ, Воронеж, 2016-2021 г.г.).

**Реализация результатов работы.** Научные результаты, полученные в диссертации, доведены до практического использования. Результаты проведенных диссертационных исследований апробированы в процессе опытно-производственного внедрения при ремонте дорог Воронежской области. Построен опытный участок с применением данной технологии на ул. Корольковой в г. Воронеже (акт строительства опытного участка прилагается).

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 11 статьях, опубликованных в научно-технических журналах, из них 6 – в изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК РФ, 2 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в систему цитирования Scopus:

- в журнале «Наука и техника в дорожной отрасли», 2016, №2, издательство «Дороги» [69]. В статье приведены сведения о способах повышения прочности и морозостойкости органоминеральных грунтов с содержанием гумуса различными вяжущими веществами; приведено обоснование возможности их использования в качестве конструктивного слоя дорожной одежды.

- в журнале «Научный журнал строительства и архитектуры», 2017, №1 (45), издательство ВГТУ [44]. В статье проведено исследование влияния модификатора «ДОРЦЕМ ДС-1» на свойства цемента и физико-механические характеристики цементогрунта.

- в журнале «Научный журнал строительства и архитектуры» 2017, №2 (46), издательство ВГТУ [71]. В статье рассмотрены три варианта восстановления конструкции дорожной одежды. Определены затраты и эффективность с учетом таких условий, как расход материалов, дальности транспортировки и прочих условий; проведен сравнительный анализ сметной стоимости работ и экономической эффективности при ремонте 1 км дороги III категории; выполнено технико-экономическое обоснование ремонта автомобильной дороги в условиях Воронежской области.

- в журнале «Научный журнал строительства и архитектуры» 2021, №1 (61), издательство ВГТУ [56]. В статье показано, что снижение аварийности может быть достигнуто только с применением комплексного подхода к обеспечению безопасности, который включает повышение уровня содержания автодорог, расширение дорожной сети, увеличение скорости движения и рациональное использование инженерного оборудования.

- в журнале «Научный журнал строительства и архитектуры», 2022, №2 (66), издательство ВГТУ [15]. В статье рассмотрены влияние минеральных добавок на физико-механические свойства укрепленных органоминеральных грунтов.

- в журнале «Строительная механика и конструкции», 2022, № 3 (34), издательство ВГТУ [116]. В статье построена математическая модель, которая позволяет учитывать влияние толщины пленки вяжущего на гранулах смеси на напряженно-деформируемое состояние сформированного слоя при замерзании-оттаивании воды в порах; показано влияние температуры хрупкости на возрастание внутренних напряжений при замерзании поровой воды в слое.

- в журнале «International Journal of Applied Engineering Research», Volume 11, 2016, N 14, Research India Publications [106]. В статье рассмотрен способ ремонта облегченных и переходных типов дорожных одежд; разработана технология ремонта с использованием в виде конструктивного слоя асфальто-щебеночно-грунтовой смеси; проведены лабораторные исследования данного материала.

- в журнале «International Journal of Applied Engineering Research», Volume 10, 2020, N 1, Research India Publications [105]. В статье рассмотрены вопросы: повторного использования асфальтобетона и других материалов, из которых состоит дорожная конструкция; использование различного вяжущего и добавок для улучшения свойств при работе методом холодной регенерации; рассмотрена технология ремонта автомобильных дорог методом холодной регенерации на тонкослойных дорожных конструкциях.

Три публикации в других изданиях:

- в журнале «Научный журнал «GLOBUS» в мультидисциплинарном сборнике научных публикаций. XVII Международная научно-практическая конференция «Достижения и проблемы современной науки». С.-Пб.: Научный журнал "Globus", 2017 [16]. В статье рассматривается состояние асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог в Российской Федерации; установлено, что объемы работ по ремонту покрытий позволяют сохранить существующую сеть дорог от разрушения, но с учетом состояния дорог, их явно недостаточно для приведения в нормативное состояние; показана необходимость в разработке новых технологий ремонта, который позволит снизить затраты на текущий ремонт.

- в журнале «Advances of science» Proceedings of articles II International scientific conference. Czech Republic, Karlovy Vary - Russia, Moscow, March 29-30, 2017 [Electronic resource]. В статье рассматриваются наиболее распространенные методы ремонта покрытий нежесткого типа, представлен анализ существующих технологических решений при ремонте дорожных покрытий [14].

- во всероссийском ежемесячном отраслевом журнале «Строительство: новые технологии - новое оборудование» 2017, №9. М.: Издательский Дом «Панорама». В статье рассматриваются технико-экономические аспекты ремонта покрытий с использованием асфальто-щебеночно-грунтовой смеси.

Так же опубликовано учебно-методическое пособие «Диагностика автомобильных дорог» // А.Н. Канищев, О.В. Рябова, А.А. Быкова, Ф.В. Матвиенко, А.Е. Борисов; ФГБОУ ВО «ВГТУ» - Воронеж: Изд. ВГТУ, 2021 - 110 с.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 116 наименований и трех приложений. Общий объем работы составляет 147 страниц, включая 26 таблицы и 35 рисунков, 2 акта внедрения результатов диссертационных исследований.

# **1. РЕМОНТ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ МЕСТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

## **1.1. Оценка состояние автомобильных дорог с покрытиями нежесткого типа**

Автомобильные дороги для нашей страны являются очень важным звеном во всех сферах деятельности человека. Они объединяют людей по всей стране, способствуют быстрому перемещению людей и грузов, связывают с другими государствами. Без хороших качественных дорог в настоящее время трудно представить жизнь в любом населенном пункте. Любая сфера деятельности человека, городов, государства невозможна без перемещения по автодорогам. Экономика, строительство и другие важные отрасли нуждаются в колоссальной транспортировке людей и грузов различной направленности.

Основанная сеть существующих автомобильных дорог в нашей стране направлена на столицу – город Москву, с явно недостающим числом вспомогательных соединительных дорог, связывающих другие регионы между собой. Такая направленность способствует перегрузки существующей транспортной сети, ее усиленному износу, а также увеличения пробега и стоимости перевозок [100]. Во многих регионах необходимо построить альтернативные пути проезда, это поможет снизить нагрузку на федеральные трассы, даст прирост экономическому развитию. Формирование основной сети дорог, позволяющей беспрепятственному передвижению между всеми регионами страны, идет медленными темпами. Транспортная связь между соседними малыми населенными пунктами происходит порой только через областные и федеральные дороги. При этом состояния существующих дорог в большинстве случаев неудовлетворительное, транспортно-эксплуатационным нормативным показателям соответствуют около 38% автомобильных дорог федерального значения. В некоторых регионах между населенными пунктами недостает

дорог с твердым покрытием. Во время дождей и распутицы многие люди остаются отрезанными от транспортного сообщения [100]. Проблема отсутствия круглогодичной связи с сетью основных дорог касается порядка 46 тыс. населенных пунктов, где проживают по разным подсчётам порядка 2600 тыс. человек [100].

Современное состояние сети автомобильных дорог и их качество не в полной мере отвечают требованиям автотранспортных перевозок, не обеспечивают необходимую пропускную способность, что приводит к превышению расчетной нагрузки на конструкцию дороги. В среднем порядка 13 тыс. км дорог эксплуатируются с превышением нормативной нагрузки, более 67% протяженности дорог имеют недостаточную прочность и более 37% имеют неудовлетворительную ровность дорожных покрытий [41]. При ускоренном росте автотранспорта, за последнее десятилетия около 75%, протяженность дорог выросла только на 15% [3, 90].

Проезд с твердым покрытием в населенных пунктах колеблется от 85-90% в Уральском и Северо-Кавказском регионах, до 60-70% в большинстве других регионах и 50-55% в Волго-Вятском, Северных, Западно-Сибирских и Восточно-Сибирских регионах [3, 80]. Отсутствие дорог препятствует освоению ресурсов этих регионов.

В настоящее время в Российской Федерации реализуется национальный проект «Безопасные и качественные дороги 2019-2024 г.» Основные цели данного проекта, следующие:

- доведение доли дорожной сети регионального и межмуниципального значения, находящейся в нормативном транспортно-эксплуатационном состоянии до уровня 50,9%;
- доведение доли дорожной сети городских агломераций, находящейся в нормативном транспортно-эксплуатационном состоянии до уровня 85 %;
- сокращение мест концентрации ДТП на автодорожной сети в 2 раза;
- снижение на 10% доли дорог, работающих в режиме перегрузки [45].

Протяженность сети дорог регионального и межмуниципального значения 83 субъектов Российской Федерации – участников национального проекта БКАД, составляет 501053,3 км, из которых по состоянию на 31 декабря 2017 г. в нормативном состоянии находилось 211 538,6 км (42,2 %). В период реализации национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» прирост протяженности дорог, находящихся в нормативном транспортно-эксплуатационном состоянии (далее – ТЭС), составит 43633,0 км, то есть по состоянию на 31 декабря 2024 г. 255171,6 км дорог будет находиться в нормативном состоянии. Таким образом, показатель «Доля автомобильных дорог регионального значения, соответствующих нормативным требованиям» на 31 декабря 2024 г. достигает установленного паспортом национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» значения 50,9% [45] (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Процентное соотношение сети дорог регионального уровня, отвечающих нормативным требованиям

На территории 83 субъектов Российской Федерации сформировано 104 городских агломераций, суммарная протяженность улично-дорожной сети которых составляет 89737,7 км. Процентное соотношение дорог, отвечающих нормативным требованиям, для этой улично-дорожной сети в соответствии с национальным проектом представлен на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Процентное соотношение сети дорог городских агломераций, отвечающих нормативным требованиям

В настоящее время развитие производства в самых разных отраслях приводит к значительному увеличению грузооборота и росту пассажирских перевозок автомобильным транспортом. Скорость доставки грузов, эффективность его работы во многом зависит от состояния автодорог. К примеру, для сельского хозяйства проезд в осенне-весенний период часто затруднён, к этому приводят выпадении осадков, и переувлажнения местных грунтов.



Во многих регионах грунтовые дороги являются порой единственными артериями, связывающими населенные пункты между собой. Летом на грунтовых дорогах образуется пыль, а при выпадении осадков проезд становится невозможным, в свою очередь, эти трудности отрицательно влияют на здоровье сельских жителей и их быт. Проезд по неблагоприятным дорогам приводит к большому перерасходу горюче-смазочных материалов и износу автотранспорта [80]. Многие сельские населенные пункты вообще не имеют местных автомобильных дорог, обеспечивающих круглогодичный выход на дороги общего пользования, что затрудняет проезд спасательных служб, обеспечение продовольствием, свободное перемещение граждан. Бездорожье значительно снижает социально-культурный уровень жизни населения.

Актуальной задачей для многих регионов нашей страны, а в частности для Центрально-черноземного региона, является соединение малых населенных пунктов с дорогами общего пользования. Например, в Воронежской области необходимо построить не менее 944 км сельских дорог с покрытием, позволяющим осуществлять движение в различных дорожно-климатических условиях. К началу третьего десятилетия XXI века планировалось ввести в эксплуатацию 4,05 тыс. километров дорог с твердым покрытием, что способствует улучшению ситуации в малых населённых пунктах и развитию в них производства [65].

Под действием ежегодно возрастающих нагрузок и влиянием погодных условий на покрытиях дорог образуются различные дефекты, что снижает скорость движения автотранспортных средств, способствует возрастанию риска возникновения дорожно-транспортных происшествий, ускоренному износу автомобильного парка. Интенсивное разрушение покрытий происходит при циклах замораживания-оттаивания асфальтобетона, которые наблюдаются не только в осенне-весенний, но и в зимний период года при наблюдающемся глобальном потеплении климата. Особенно негативное влияние на дорожное покрытие оказывают эти циклы

на асфальтобетон в водонасыщенном состоянии. Вода при замерзании увеличивается в объеме на 8-11 %, при этом соответственно происходит увеличение объема пор и некоторое нарушение структуры асфальтобетона [102]. При низких температурах в структуре асфальтобетона возникают растягивающие напряжения, способные повлечь образования трещин на поверхности [42]. При эксплуатации в летний период температура асфальтобетонного покрытия может достигать высокой температуры 60 – 70 °С, что приводит совместно с большой нагрузкой от транспорта, к образованию пластических деформаций, способствующих разрушению структуры асфальтобетона.

Для преодоления негативной тенденции по снижению основных эксплуатационных показателей приходится выполнять большой объем ремонтных работ, требующих значительных финансовых вложений. Выделяемые средства не позволяют в полной мере, как это требует нормативные документы, привести существующие дороги в соответствующее нормам транспортно-эксплуатационное состояние. Проводимый в настоящее время объем ремонтных работ позволяет поддерживать существующую сеть дорог от дальнейшей деформации, но с учетом состояния дорог, этого недостаточно для доведения показателей до нормативного значения [41]. Несвоевременность выполнения ремонтных мероприятий ведет к сокращению срока службы дорожной одежды, увеличению объема по выполнению ремонтных работ в дальнейшем, увеличению финансовых затрат, а также оказывает влияние на безопасность движения транспортных средств, комфортность перевозки пассажиров и грузов, и срок службы дорожных конструкций.

В настоящее время для обеспечения (повышения) качества и безопасности дорог, их соответствия современным требованиям, обновления существующей дорожной сети, необходимо активное внедрение передовых технологий и инноваций. С этой целью в практику ремонта дорожных покрытий необходимо внедрить новые современные способы ремонта,

которые позволят производить работы при неблагоприятных погодных условиях, своевременно ликвидировать дефекты и разрушения, и, в конечном итоге, снизить объем данных работ.

## **1.2. Анализ существующих технологических решений при ремонте дорожных покрытий нежесткого типа**

Важнейшим элементом в транспортной структуре страны является дороги. Развитая автодорожная сеть способствует росту торговли, развитию мелких и крупных населенных пунктов, обеспечивает безопасность, здоровья людей. Огромное количество природных ресурсов, их добыча, перевозка к потребителю (покупателю) в современном мире требует сокращения времени и затрат на транспортировку. Развитие государства, международного товарооборота повышает спрос на перевозки различных материалов и грузов.

Асфальтобетон – наиболее распространенный вид покрытий, используемый в дорожном строительстве, как в Российской Федерации, так и в зарубежных странах. Протяженность дорог с покрытием из асфальтобетона в нашей стране более 330 тыс.км., и ежегодно продолжает возрастает [25, 46]. Действие непрерывно возрастающих нагрузок и влияние природно-климатических факторов на асфальтобетон приводят к возникновению дефектов в виде выбоин, трещин, колеиности и других, что снижает транспортно-эксплуатационные показатели дорожных артерий. Для преодоления негативной тенденции по снижению основных эксплуатационных показателей приходится выполнять большой объем ремонтных работ, требующих значительных финансовых вложений. Проведение ремонтных работ традиционным способом в условиях недостаточного финансирования дорожной отрасли, с учетом ежегодного увеличения стоимости энергоресурсов, материалов и транспорта, идет явно замедленными темпами и не отвечает требованиям быстро растущего автомобильного парка.

Существенный резерв снижения стоимости дорожных работ, а также повышение качества используемого материала, позволяет получить применение технологий, основанных на повторном использовании дорожно-строительных материалов. Формирование сети местных автомобильных дорог с капитальной дорожной конструкцией при дефицитном финансировании весьма проблематично, что приводит к необходимости создания более дешевых, переходных дорожных конструкций.

В настоящее время в дорожной практике при ремонте покрытий нежесткого типа применяются разные материалы и технологии. Для выбора конкретной технологии нужно задаться следующими целями [41, 46]:

- участок дороги после проведения ремонтных работ должен обеспечивать безопасное и комфортабельное движения автомобилей в течение гарантийного срока эксплуатации;
- получение покрытия с нормативными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками;
- доступность необходимой дорожной техники и материалов для проведения работ;
- необходимо учитывать погодные условия при выборе конкретных способов проведения работ;
- оперативность открытия движения транспорта по месту ремонта, высокая экономичность ремонтных работ.

Из применяемых в настоящее время наибольшее распространение получили следующие технологии ремонта (рис. 1.3): использование горячего асфальтобетона (традиционный метод); применение литого асфальтобетона; технология горячей регенерации; технология холодной регенерации. Сравнительный анализ представленных методов ремонта дорожных покрытий рассмотрен в работах Зубкова А.В., Ереско С.П. и др. [38, 41, 46].

Наиболее доступным и применяемым способом восстановления покрытий до нормативных показателей является традиционная технология с использованием горячего асфальтобетона. Она представляет собой смесь

минеральных материалов и битума нефтяного, состав которого подбирается конкретно под каждый объект и согласовывается с заказчиком проведения работ.

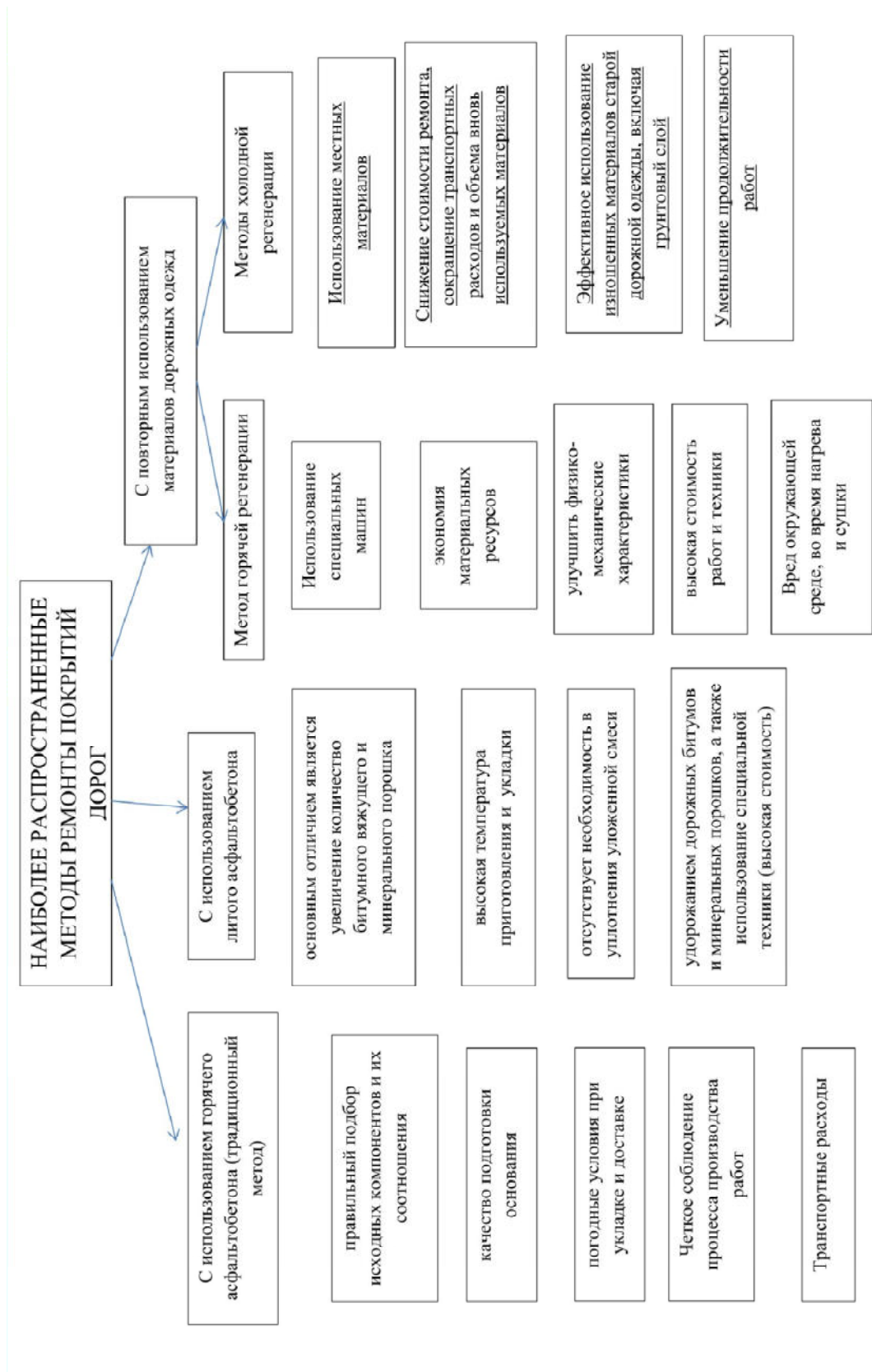


Рисунок 1.3 – Наиболее распространенные виды ремонта покрытий дорог

Важным этапом использования горячих асфальтобетонных смесей является правильный подбор исходных компонентов и их соотношения, при котором получаемая смесь будет иметь требуемые транспортно-эксплуатационные и экономические показатели. При выборе компонентов необходимо учитывать их стоимость и качество, анализировать условия производства работ, оценивать условия работ асфальтобетона в дорожной конструкции. В необходимых случаях в смесь вводят добавки ПАВ, полимеров, отсеков дробления (фрезерования) асфальтобетона, резины, серы и другие [41, 43, 78, 79].

Технологическая последовательность устройства горячих асфальтобетонных слоев заключается в следующих операциях. Первый этап – это фрезерование материала покрытия с последующей его транспортировкой к месту складирования. Работы производятся с помощью дорожных фрез. Принцип работы фрез заключается в снятии и измельчении старого покрытия. В дальнейшем полученный материал может использоваться для укрепления обочин и т.д. Далее поверхность очищают от грязевых частиц специальными машинами. Подготовленную поверхность обрабатывают вяжущими материалами. В заводских условиях приготавливают смесь смешением в смесительных установках в нагретом состоянии минеральных материалов различной крупности и нефтяного дорожного битума в рационально подобранных соотношениях. На окончательном этапе слой покрытия из горячей асфальтобетонной смеси укладывают с последующим уплотнением. Температура смеси при приготовлении и отгрузке потребителю регламентирована действующими нормативно-техническими документами [21, 31, 32, 86].

Часто при транспортировке смесь не получает должного ухода. Например, увеличивается временной интервал от выгрузки асфальтобетонной смеси в кузов автомобиля до её укладки в покрытие, имеет место температурная сегрегация из-за усиленного теплообмена с окружающей средой и кузовом. Дальнейшая укладка смеси с неравномерно

распределенной температурой способствует образования на поверхности уложенного асфальтобетона зон, имеющих разные прочностные показатели, степень уплотнения. Недоуплотнение при проведении работ приводит к нарушению образования структуры получаемого покрытия. Также негативный эффект оказывает последующее доуплотнение асфальтобетона под действием движущегося автотранспорта. Нарушение структуры приводит к потере прочности, волнообразованию и других дефектов [26, 32, 42, 82], и в конечном итоге снижает транспортно-эксплуатационные показатели и срок службы покрытия.

Итак, при выполнении работ с использованием горячих асфальтобетонных смесей на итоговый результат оказывают влияние следующие факторы: качество подготовки покрытия; погодные условия при укладке и доставке материала покрытия; температурные режимы; точность выполнения требований нормативной документации. При производстве работ особенно важно не допускать понижения температуры смеси, так как это отрицательно влияет на теплофизические и деформационно-прочностные характеристики. Данная технология позволяет получить высокое качество, но только при четком соблюдении процесса производства работ.

Одной из часто используемых смесей при ремонте дорог является литой асфальтобетон. Состав смеси схож с горячим асфальтобетон, основным отличием является увеличение количество битумного вяжущего и минерального порошка. Существенные отличия также присутствует в технологическом процессе: высокая температура приготовления и при укладке, отсутствует необходимость в уплотнения уложенной смеси [29, 38].

Родоначальниками по применению литого асфальта являются европейские страны, где он пользуется большой популярностью. В Российской Федерации данный вид асфальта весьма ограничен в связи с удорожанием дорожных битумов и минеральных порошков, а также использованием специальной техники. Повышенное содержание битума и минерального порошка обеспечивает высокую стоимость готовой литой

асфальтобетонной смеси по сравнению с традиционными горячими асфальтобетонными смесями.

В соответствии с ГОСТ Р 54401-2020 [29] литой асфальтобетон классифицируется по типу в зависимости от максимально размера применяемого материала – таблица 1.1.

Таблица 1.1

Тип	Максимальный размер применяемого минерального заполнителя, мм
ЛА16	16,0
ЛА11	11,2
ЛА8	8,0
ЛА4	4,0

Технологически процесс заключается в следующем. Смесь приготавливают, используя минеральные компоненты и битумы (или полимерно-битумные вяжущие) с высокой степенью вязкости, что означает более высокие температуры нагрева при смешивании компонентов. Так, минеральные компоненты разогревают в интервале температур от 190 – 240<sup>0</sup>С. Битум подогревают в интервале от 160 – 180<sup>0</sup>С. Температура всей смеси при производстве, транспортировке, хранении и укладке не должна превышать 230<sup>0</sup>С (при применении вязких нефтяных дорожных битумов) и не выше 215<sup>0</sup>С при использовании полимерно-битумных вяжущих [29]. Стоит отметить, что из-за необходимости строго выдерживать температуру приготовления и перемешивания литого асфальтобетона, его производство возможно только в заводских установках, то есть исключается производство на месте укладки. Далее смесь доставляют к месту работ специальными машинами с обогреваемой емкостью (кохеры и рециклеры). В процессе транспортировки смесь непрерывно перемешивают при постоянном подогреве. Временной интервал от выгрузки смеси до укладки в



ремонтируемое покрытия должно быть не выше 12 ч [29]. Далее материал укладывают без уплотнения, при охлаждении литой асфальтобетон набирает нужную необходимую прочность. Перед выгрузкой смеси необходимо установить удерживающие бруссы, препятствующие расползанию литого асфальта.

Особенность использования данных смесей заключается в транспортировке и укладке смесей в жидком и текучем состоянии, что в свою очередь не требует уплотнения и облегчает ремонт, особенно при пониженных температурах [102]. Решающим фактором в структуре литого асфальтобетона является его микроструктура, которая определяется качеством вяжущего битума. Структура асфальтобетона не пористая, вода не попадает внутрь асфальтобетона и не разрушает его изнутри, что обеспечивает водонепроницаемость. Эти факты делают литой асфальтобетон упругим, гибким, гидрофобным.

Достоинствами технологии литого асфальтобетона являются: отсутствие отраженных трещин, водонасыщения, набухания и необходимости уплотнения; доступность ресурсов; значительное повышение срока службы покрытия (по зарубежным публикациям, долговечность покрытий из литого асфальта оценивается в 25 . . . 35 лет). Высокая невосприимчивость таких покрытий к внешним воздействиям окружающей среды объясняется их исключительно благоприятным физико-механическими свойствами (отсутствием сообщающихся пор, высокой водонепроницаемостью, малой подверженностью старению) [50, 78].

К недостаткам следует отнести невысокие сцепные показатели, что требует дополнительных расходов на повышение шероховатости (обычно распределяется и вдавливается мелкий щебень по не застывшему слою). Также применение данного метода ведет к увеличению энергопотребления, сравнительного большому воздействию на окружающую среду (процесс приготовления литой асфальтобетонной смеси 215...230 С) [29].

В последнее время все чаще прибегают к технологиям, основанным на использовании старого асфальтобетона. На сегодняшний день существует несколько способов повторного использования гранулята старого асфальтобетона. В одних случаях используется так называемое «повторное применение», в других – «регенерация». Повторное применение гранулята подразумевает под собой использование его в несвязных слоях дорожных одежд, для укрепления обочин и т.д., что не соответствует технической ценности его использования. А вот использование старого асфальтобетона для приготовления различных регенерированных асфальтобетонных смесей, напротив, позволит снизить сметную стоимость ремонта, так как исключается применение новых дорогостоящих материалов (битума), сокращаются транспортные расходы.

### **1.3. Технология повторного использования материалов дорожных одежд**

Технологии регенерации подразделяются на горячие и холодные методы, оба способа позволяют приготавливать материал как непосредственно на дороге, так и на заводе. В некоторых случаях, с целью снижения затрат на материальные ресурсы, используют метод горячей регенерации (термопрофилирования). Он заключается в разогреве покрытия, его рыхлении и измельчении на проектную глубину, добавлении нового материала с возможностью перемешивания, дальнейшей укладки и уплотнения. Учитывая конкретные условия производства работ, выбирают разновидность термопрофилирования, виды представлены в таблице 1.2 [19, 23]. Реализация данной технологии производится термопрофилировочными машинами, в состав которых входят разогреватель и профилировщик и специальное оборудование для приема, перемешивания, укладки и уплотнения смеси [19, 23].

Таблица 1.2 – Виды термопрофилирования

Вид	Технологические операции
Термопланирование	Разогрев покрытия, рыхление на глубину 2-5 см, планирование разрыхленной смеси и ее уплотнение. Сочетается с поверхностной обработкой или последующей укладкой защитного слоя.
Термогомогенизация	Разогрев покрытия, рыхление на глубину 2-5 см, регенерация асфальтобетона путем перемешивания старой асфальтобетонной смеси, планирование перемешанной разрыхленной смеси и ее уплотнение.
Термоукладка	Разогрев покрытия, рыхление на глубину 2-5 см, планирование разрыхленной смеси и ее уплотнение. Последующая укладка новой смеси в виде конструктивного слоя.
Термосмешение	Разогрев покрытия, рыхление на глубину 2-5 см, перемешивание новой добавляемой смеси со старой, укладка полученной смеси одним слоем и уплотнение.
Термопластификация	Разогрев покрытия, рыхление на глубину 2-5 см., ввод и перемешивание пластификатора со старой смесью, перемешивание новой добавляемой смеси со старой или без использования новой смеси, укладка и уплотнение.

Термопрофилирование применяется в случае, когда колеи в существующем покрытии имеют вязко-пластический характер, но состав смеси в старом слое не требует изменений, кроме свойств старого битума. Внешним проявлением такой деформации является колея без явно выделяющихся кромок шириной не менее 80 см, формировавшаяся на

протяжении многих лет. Термопрофилированию подлежат только те покрытия, у которых глубина колеи не превышает толщины слоя износа [50].

Использование новых технологий позволило сократить энергозатраты [41]. Дальнейшим развитием данного метода регенерации стал способ «Ремикс Плюс». Он состоит в том, что на регенерированный асфальтобетон сразу же укладывают новый слой той же машиной. Уплотнение обоих слоев производится одновременно.

Способ использования старого асфальтобетона обеспечивает экономию материальных ресурсов, и позволяет улучшить физико-механические характеристики (добавление новой смеси позволяет корректировать состав получаемой смеси с одновременным устранением последствий старения битума). Одной из причин крайне малой доли использования представленной технологии является высокая стоимость работ и техники. К основным недостаткам также можно отнести огромное количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу во время нагрева и сушки асфальта.

Технология холодной регенерации является одной из наиболее перспективных и современных ремонтных технологий. В основном, технология применяется для восстановления первоначальных физико-механических характеристик дорожной одежды или ее усиления. Технологический процесс заключается в снятии изношенных слоев дорожной одежды, переработке в смесителе, смешивание устаревшего материала с новыми необходимыми компонентами и укладке с последующим уплотнением. Правильный подбор необходимых компонентов позволяет направленно влиять на процессы структурообразования. Эти аспекты данной технологии являются основным отличием от горячего регенерирования, где все процессы завершаются на стадии перемешивания, в данном же методе они, напротив, только начинаются в момент объединения всех компонентов. Реализация данной технологии происходит с помощью серийно выпускаемого оборудования, машин и механизмов.

Объем ежегодного снимаемого изношенного материала, в котором содержатся каменные материалы, перемешанные с вяжущим, измеряется огромным количеством тонн. Долгое время эти материалы не получали должного внимания и не использовались [6, 23]. В начале XXI века данный метод получил признание как за рубежом (Франция, США, Германия, Великобритания и др.), так и в нашей стране. Поэтому в условиях не достаточного финансирования, необходимо стремиться максимально больше использовать эти материалы при проведении ремонтных работ.

Исследованиями в области повторного использования материалов старой дорожной одежды (регенерации) занимались отечественные ученые: Подольский Вл.П. [69, 70, 71], Безрук В.М. [9, 13], Васильев А.П. [18, 19], Гезенцевей Л.Б. [20], Сюньи Г.К. [91, 92], Алиев А.М. [5], Гоглидзе В.М. [35], Бахрах Г.С. [12], Гмыря Б.С. [22], Никишин В.Е. [61], Артюшин А.В. [8], Силкин В.В. [83], Тимофеев А.А. [95], Лупанов А.П. [51], а также зарубежные исследователи: Розберг К. [115], Харбер С. [110], Казаль И. [112], Харрис С. [111]. и др. иностранные ученые [107, 109, 113, 114]. Также были разработаны рекомендации по применению данной технологии в нашей стране [53]. Однако для более широкого внедрения технологии холодного ресайклинга данный документ нуждается в доработке [60].

Технология холодной регенерации развивается ускоренными темпами, завоевываются все новые области ее применения. Европейские страны все активнее используют ее при ремонте и реконструкции дорог высших технических категорий [17].

В настоящее время в Российской Федерации технология холодной регенерации применяется как при ремонте асфальтобетонного покрытия, так и для получения щебеночно-гравийно-песчаных смесей и грунтов, обработанных вяжущими материалами [6, 34, 89]. Однако при проведении ремонтных работ на практике часто оказывается, что конструкция дорожной одежды состоит из тонкослойного асфальтобетонного покрытия и щебеночного основания. При фрезеровании тонкослойных конструкций

происходит перемешивание снятого слоя асфальтобетона и щебня с грунтом. Существующие технологии ремонта предусматривают использование такой смеси как укрепленного грунта в качестве верхнего слоя основания или нижнего слоя покрытия. Анализируя существующие нормативно-технические документы, выявлено, что на сегодняшний день не используются и не предъявляются требования к данной смеси.

В нашей стране одной из самых серьезных проблем, с которой сталкивается дорожное строительство, является значительное количество циклов попеременного замораживания и оттаивания в течение года. Из-за недостаточной морозостойкости асфальтобетонного покрытия и щебеночно-гравийно-песчаных смесей, и грунтов, обработанных вяжущими материалами, срок службы данных конструктивов очень часто ниже нормативных значений. Из многолетнего опыта следует вывод, что необходимо изменять и дифференцировать требования к морозостойкости материалов с учетом климатических условий и местоположения конструктивного слоя из укрепленного материала в дорожной одежде.

Также при выборе технологии ремонта покрытий необходимо стремиться к обеспечению однородности конструкции дорожного слоя одежды как в продольных, так и в поперечных разрезах. Неоднородность конструкции дорожной одежды приводит к неодинаковой ее работе на разных участках, возникновению локальных неровностей в поперечном и продольном сечениях, увеличивающих эффект динамического нагружения покрытия и его разрушение [21, 50]. Важными факторами в развитии технологии дорожного строительства и ремонта являются разработка и применение таких методов использования машин и материалов, которые минимизируют ущерб окружающей среде.

В связи с изложенным, разработка технологических принципов ремонта дорожной одежды облегченного и переходного типа с использованием материалов старой дорожной одежды (асфальтобетона, щебеночного

материала и грунта) в качестве конструктивных слоев дорожной одежды, является своевременной, актуальной и весьма важной задачей.

#### **1.4. Существующие способы и методы организации технологических решений при ремонте дорожных одежд**

В области ремонта дорожных одежд нежесткого типа последнее время все чаще используют технологию холодной регенерации, которая позволяет эффективно повторно использовать изношенные материалы старой дорожной одежды. Проведение ремонтных работ данным способом имеет ряд преимуществ. Исключена необходимость вывоза старого материала и доставки нового материала для его замены, так как работы производятся за счет повторного применения существующих материалов. При использовании изношенной дорожной одежды следует стремиться максимально использовать ее оставшиеся положительные свойства. Например, не целесообразно удалять хорошо уплотненный материал, так как он вследствие доуплотнения транспортными средствами в течение многих лет достиг высокой плотности [60, 108]. Также отсутствуют потребность в разогреве старого материала, что позволяет снизить вред окружающей среде и затрат электроэнергии. К основным преимуществам данной технологии также относятся: снижение стоимости ремонта и объема вновь используемых материалов, сокращение транспортных расходов, уменьшение продолжительности работ, современные ресайклеры позволяют получать однородный материал большой толщины.

Технология применяется в следующих вариантах: фрезерование на глубину слоев покрытия; фрезерование на неполную толщину дорожной одежды, когда вместе с покрытием частично захватываются слои основания; фрезерование на полную толщину дорожной одежды (глубокий ресайклинг).

Технологический процесс заключается в снятии старого материала покрытия, при необходимости с захватом основания, добавлении

необходимого по предварительному расчету материала (таких как битум, цемент и других), смешивания всех материалов и распределения в конструктивный слой с последующим уплотнением. После проведения всех перечисленных операций укладывают замыкающий (защитный) слой или асфальтобетонное покрытие [53, 60]. Укладку верхнего или промежуточного слоя покрытия по слою из асфальтогранулобетонной смеси (АГБ), содержащего цемент, можно выполнить через 2-3 суток, а по слою из АГБ, содержащему эмульсию, после испарения влаги (обычно через 3 недели) [53, 54]. Стоит отметить, что в работе Бахраха Г.С. [11] рекомендуется выполнять укладку асфальтобетонного покрытия по слою АГБ на следующие сутки после устройства последнего.

Ремонт покрытий изложенным выше способом позволяет ликвидировать многие дефекты покрытия, такие как волны, наплывы, колеи. При введении стабилизаторов можно перевести дорожные одежды с переходными типами покрытия в дорожные одежды облегчённого типа с усовершенствованным покрытием, а последние – в капитальные дорожные одежды с асфальтобетонным покрытием [1, 60, 101].

Также технология холодной регенерации отлично подходит для ремонта старых дорог с тонким асфальтобетонным покрытием на щебеночном основании. Но при работе данным методом на тонкослойных дорожных покрытиях достаточно часто вместе с дорожной одеждой фрезеруются песчаный подстилающий слой и верхние слои земного полотна. В результате для переработки получается смесь асфальтобенного гранулянта, щебня и грунта, который оказывает достаточно серьезное влияние на характеристики получаемого после укрепления конструктивного слоя дорожной одежды. При этом количество грунта может быть равно, а иногда и превышает количество асфальтобенного гранулянта вместе со щебнем. Это объясняется тем, что при строительстве автодорог с дорожными одеждами, имеющими невысокую прочность на дорогах с невысокой интенсивностью движения, строятся тонкослойные покрытия на щебеночном основании, выполненном из щебня



марки М600 известняковых или других мало прочных пород. Под воздействием колесной нагрузки и атмосферных факторов происходит разрушение щебеночного основания и перемешивание его с грунтом. В результате после фрезерования визуально щебня практически не видно, а наблюдаем только небольшое содержание асфальтового гранулянта. При такой ситуации необходимо в первую очередь рассматривать взаимодействие вяжущего с грунтом. Можно даже более точно сказать – грунт с включением асфальто-гранулянта и остатков щебеночного основания. Основное влияние, в данном случае, на прочностные характеристики оказывает взаимодействие вяжущего с грунтом. Так как грунты, применяемые в земляном полотне, имеют различные характеристики, до выполнения работ по холодной регенерации необходимо определить с каким вяжущим и в каком соотношении надо приготовить смесь, чтобы получить показатели, соответствующие нормативным требованиям, а также определить прочностные характеристики, которые должны быть учтены при расчете конструкции дорожной одежды.

В соответствии с СП 78.13330.2012 [86] получаемая смесь классифицируется как грунтобетонная смесь, с включением щебеночного материала (в работе использованы названия грунтобетонная смесь и асфальто-щебеночно-грунтовая смесь).

На основании проведенного теоретического анализа современных технологий ремонта слоев покрытия дорожных одежд [18, 21, 46, 62], при выборе технологии ремонта надо стремиться использовать вторичные материалы существующей дорожной одежды, укрепленные вяжущими материалами, которые при правильном подборе способны достичь требуемых физико-механических показателей. Совместное использование данных материалов позволит обеспечить требуемые транспортно-эксплуатационные показатели участка автомобильной дороги после проведения ремонтных работ и в течении межремонтного срока. При выборе способа ремонта

автомобильной дороги необходимо анализировать материалы, из которых сформированы покрытия, основания и земляное полотно дороги.

### **1.5. Выводы по главе**

1. Анализ состояния сети автомобильных дорог показал, что средств, выделяемых на ремонт, а также объем ежегодно ремонтируемых участков дорог, явно недостаточно для приведения их в нормативное состояние. Для решения данных проблем необходимо увеличить объем и качество ремонтируемых дорог, а также снизить затраты на проведения работ.

2. В настоящее время при проведении ремонтных работ одной из наиболее перспективных и современных технологий является технология холодной регенерации. При проведении ремонтных работ данным способом на практике часто оказывается, что конструкция дорожной одежды состоит из тонкослойного асфальтобетонного покрытия и щебеночного основания. При фрезеровании тонкослойных конструкций происходит перемешивание снятого асфальтобетона и щебня с грунтом.

3. По имеющимся в литературных источниках данным в настоящее время при проведении ремонтных работ используют асфальтогранулобетонную смесь или укрепленный грунт по отдельности, что приводит к необходимости проведения новых исследований по данному вопросу.

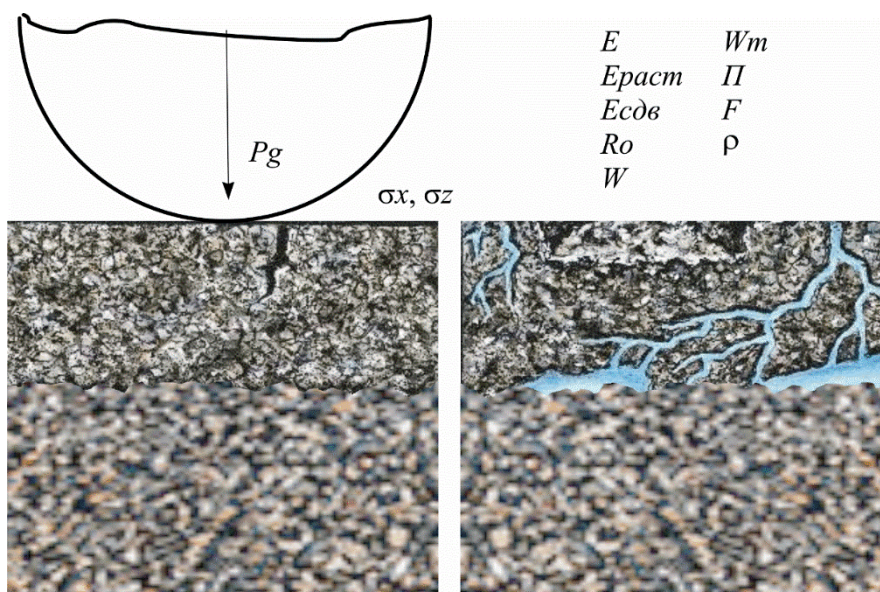
4. На основании проведенного анализа, необходимо разработать и экспериментально подтвердить возможность использования данных материалов (асфальтобетона, щебня и грунта) в качестве конструктивного слоя при ремонте покрытия и основания дорожных одежд.

## **2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СЛОЁВ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ СО СЛОЕМ ИЗ УКРЕПЛЁННОГО МАТЕРИАЛА**

### **2.1. Физико-математическая модель работы дорожной одежды с использованием материала с заданными свойствами**

Основным элементом дорожной одежды является покрытие, накрывающее несколько слоёв основания и воспринимающее нагрузку от транспортного потока. Его прочность определяется основными физико-механическими характеристиками материалов, используемых для формирования слоя. В процессе решения конструктивной задачи по подбору состава для дорожной одежды очень важно знать, какой из слоев является наиболее слабым звеном, как он будет влиять на несущие свойства дорожной одежды и соответственно на стойкость верхнего слоя дороги при транспортном воздействии. Расчет каждого конструктивного элемента связан с многими исходными параметрами, влияющими на конечный результат, при этом реологические характеристики материалов тесно связаны с технологией формирования каждого слоя.

На рис. 2.1 представлены основные физико-механические характеристики слоев дорожной одежды, в которых происходят деструктивные изменения. Анализируя данные рис. 2.1, можно отметить, что физико-механические характеристики входящих в конструкцию материалов в основном зависят от характеристик на сжатие. В меньшей степени оказывают влияние в стандартных схемах прочностные характеристики на растяжение, что является характерным для используемых материалов – грунтов различного генезиса, щебеночно-песчаных смесей и асфальтобетонных смесей. Тем не менее, если задаться вопросом о начальной прочности на разрыв или на образование трещин низ лежащих слоев можно заметить, что формирование сетки трещин приводит к снижению прочности и на сжатие. Эта сетка образуется под действием различных процессов, описанных в первой главе.



$P_g$  – нагрузка от полуоси автомобиля,  $E$  – модуль упругости каждого слоя дорожной конструкции,  $E_{раст}$  – модуль упругости при растяжении,  $E_{сдв}$  – модуль сдвига,  $Ro$  – прочность на разрыв,  $W$  – влагосодержание,  $W_m$  – предельное влагосодержание,  $\Pi$  – пористость,  $F$  – морозостойкость,  $\rho$  – плотность

Рисунок 2.1 – Основные показатели физико-механических свойств слоев дорожной конструкции

При построении модели, описывающей связь между прочностными и физическими характеристиками новых материалов слоя основания, необходимо задать граничные условия прочности на сжатие и на разрыв, толщиной слоя формируемого основания и покрытия дороги, начальные характеристики естественного грунтового основания.

Основными расчетными решениями, формирующими модель являются: уравнение неразрывности; уравнение упругой деформации многослойной среды дорожной конструкции; уравнения Ламе, для решения деформации в области контакта колеса; нестационарное уравнение теплопроводности Фурье; уравнения задачи Стефана; интегральное уравнение тепло-влаги переноса [93, 94].

В качестве гипотезы для критерия толщины конструктивных слоев дорожной одежды принято условие равновесия между эквивалентным модулем деформации многослойной одежды и модулем деформации низ

лежащего слоя при замерзании и последующим его оттаивании. В процессе расчета определялись значения требуемого модуля деформации покрытия.

Приняв за условие равновесие сил в области контакта слоев, перемещение асфальтобетонного покрытия при воздействии повторяющихся нагрузок можно записать [47],

$$W_{val} = \frac{\pi \cdot p \cdot D \cdot \nu \cdot (0,5 + 0,65 \cdot \lg N_{def})}{2 \cdot E_1 \cdot \left( 1 - \frac{2}{\pi} \left[ \frac{E_1}{E_2} \right]^{-1,4} \cdot \arctg \left( \frac{h}{D} \cdot \left( \frac{E_2}{E_1} \right)^{0,4} \right) \right)} \quad (2.1)$$

где  $E_{1,2}$  – модуль упругости первого и второго слоя;  $D$  – диаметр отпечатка колеса транспортного средства;  $p$  – величина нагрузки от колеса;  $N_{def}$  – количество приложений нагрузки.

Пластические осадки или перемещения каждого из слоев вычисляются интегрированием по глубине конструкции. В силу связи слоев прогиб на поверхности дорожного покрытия непрерывно связан с деформациями ниже лежащего слоя. В условиях, когда нижний слой может приобретать различные характеристики при изменении температуры, то необходимо определить его влияние на прочностные характеристики всей конструкции [47].

На поверхность первого слоя действует равномерная нагрузка  $p$  по кругу диаметром  $D$ , расчетная схема показана на рисунке 2.2

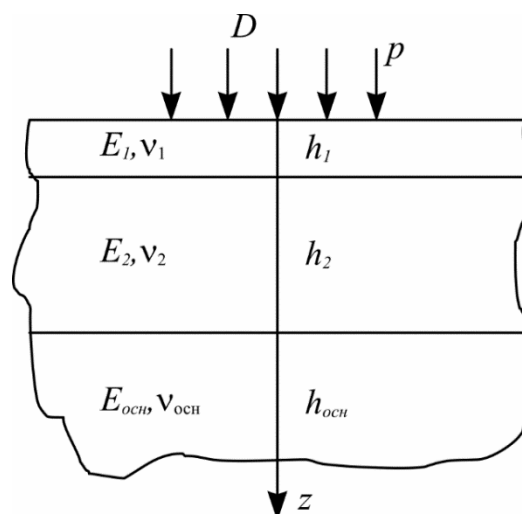


Рисунок 2.2 – Расчетная схема выбранной конструкции

На границах слоев дорожной одежды выполняются следующие условия,

$$\begin{aligned} u_i &= u_{(i+1)}, w_i = w_{(i+1)}, \\ \sigma_i &= \sigma_{(i+1)}, \tau_i = \tau_{(i+1)}, \\ i &= 1..3. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Воспользуемся известными уравнениями (2.3) для перемещений многослойной конструкции, в которой каждый слой обладает модулем упругости, коэффициентом Пуассона, прочностью на сжатие. Определяющей величиной является модуль упругости или косвенно прогиб покрытия под известной нагрузкой. Формируемая чаша прогиба наиболее полно описывает основные характеристики дорожной одежды в случае применения различных материалов.

$$U_i = \frac{1+\nu_i}{E_i} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial r \partial z}, \quad W_i = \frac{1+\nu_i}{E_i} \cdot \left[ 2 \cdot (1-\nu) \nabla^2 q - \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right], \quad (2.3)$$

где  $E_i$  – модуль упругости слоя с номером  $i$  ( $i = 1, \dots, N$ );  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $W_i$ ,  $U_i$  – вертикальные и горизонтальные перемещения;  $p$  – распределенная нагрузка;  $r$  – радиус чаши прогиба;  $z$  – толщина слоя;  $\nabla$  – оператор Лапласа.

Граничные условия на верхней границе асфальтобетонного слоя,

$$\begin{aligned} \sigma_{0z} &= p(x), 0 < x < D, \\ \sigma_{0z} &= 0, D < x < \infty, \\ \tau_{0z} &= 0. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Проскальзывание слоев конструкции не учитывается, нагрузка предполагается осесимметричной, равномерно распределенной по круговой области [96, 59].

Используя уравнения Ламе для малых перемещений в граничных условиях (2.2) и (2.4), получаем систему уравнений, решаемых численно с использованием математического пакета Comsol Multiphysics.

В таблице 2.1 показан диапазон изменения основных характеристик используемых при моделировании материалов. Следует отметить, что данные параметры соответствуют природным материалам, взятым непосредственно из грунтовых оснований ремонтируемых дорог и используемым в последующих экспериментальных исследованиях. Диапазон варьирования определяется изменением прочности из-за вводимых добавок.

Таблица 2.1 – Основные параметры материалов, использованных при моделировании стойкости конструктивного слоя к процессу замерзания воды в порах слоя из грунтобетонной смеси

№	Параметр	Мин. значение	Макс. значение	Ед. изм.
1	модуль упругости верхнего слоя покрытия	2000	3200	МПа
2	модуль упругости второго слоя конструкции	200	800	МПа
3	модуль упругости основания конструкции	50	100	МПа
4	модуль упругости при растяжении 1 слоя	800	2000	МПа
5	модуль сдвига	600	1800	МПа
6	прочность на разрыв	1,2	12	МПа
7	коэффициент Пуассона	0,1	0,38	-
8	плотность	2000	3200	кг/м <sup>3</sup>
9	пористость	0,06	0,1	

Если материал покрытия дороги достаточно прочный, но хрупкий и не обладает необходимой способностью пропускать влагу, то он будет растрескиваться. Если материал пропускает влагу чрезмерно, то это приведет к накоплению избыточного количества влаги с последующим образованием сетки трещин и, возможно, линз влаги.

Анализ возникающих напряжений и деформаций в конструкции с вновь формируемым покрытием осуществлен посредством моделирования дорожной конструкции, сечение которой показано на рис.2.3. Основные параметры материалов в ходе лабораторных исследований, а геометрические параметры в соответствии с технологической картой реконструкции

автомобильной дороги. Глубина заложения грунтового корыта 3 м, это позволяет учесть влияние свойств грунта.

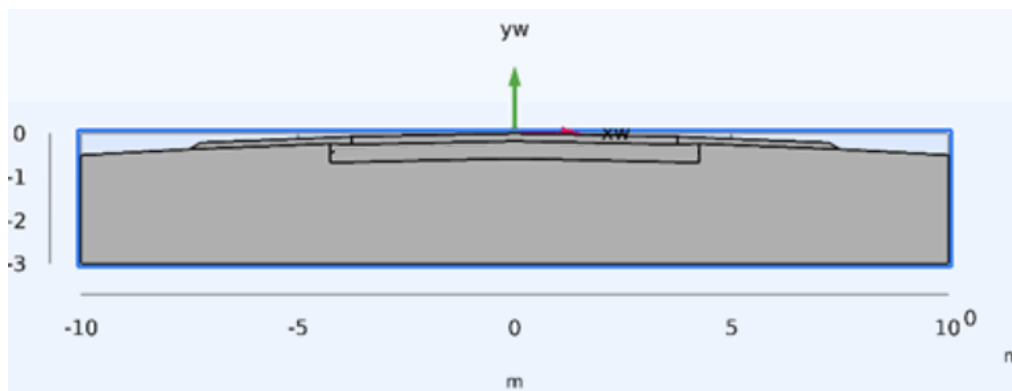


Рисунок 2.3 – Срез моделируемой дорожной конструкции со слоем из грунтобетонной смеси

Модуль упругости верхнего слоя из асфальтобетона зависит от температуры внешней среды, его влияния на величину общего прогиба весьма незначительный. Несущая способность дороги существенно зависит от величины модуля упругости нижнего слоя дорожной одежды в связи с изменением его увлажнения.

На рис. 2.4 показано изменение напряжений в слое основания в случае внесения пластичных элементов в виде тонкого слоя с коэффициентом Пуассона равным 0,31 [4].

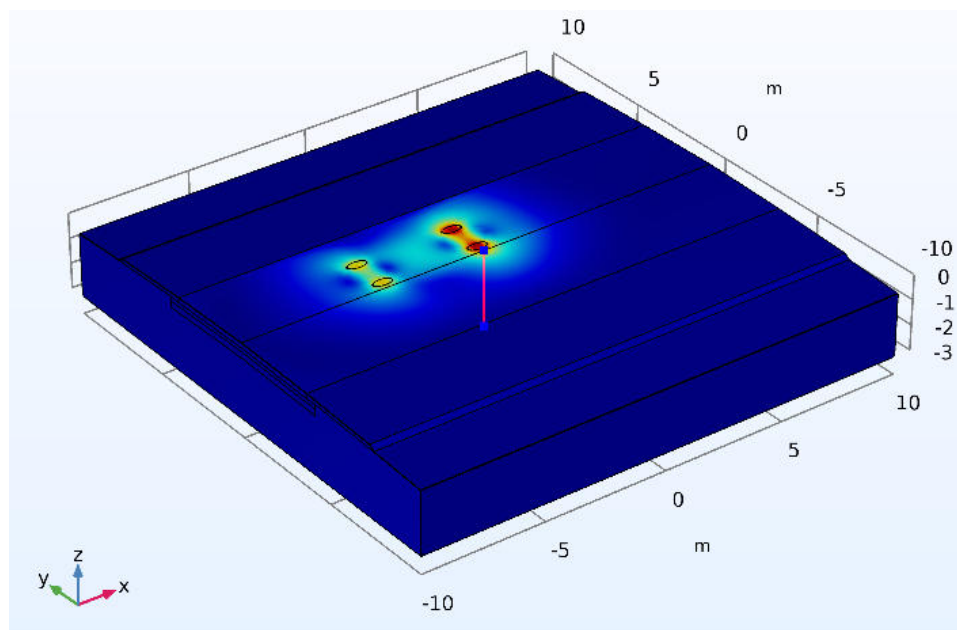


Рисунок 2.4 – Напряжения на стыке первого и второго слоя из асфальто-щебеночно-грунтовой смеси дорожной конструкции



Отмечается практически полная передача усилий от верхнего нагруженного слоя. Максимальные напряжения возникают в области контакта колес транспортного средства.

На рис. 2.5 представлены величины прогибов: пунктир – исходный прогиб, непрерывная кривая – прогиб при увеличенном значении водонасыщения моделируемого слоя.

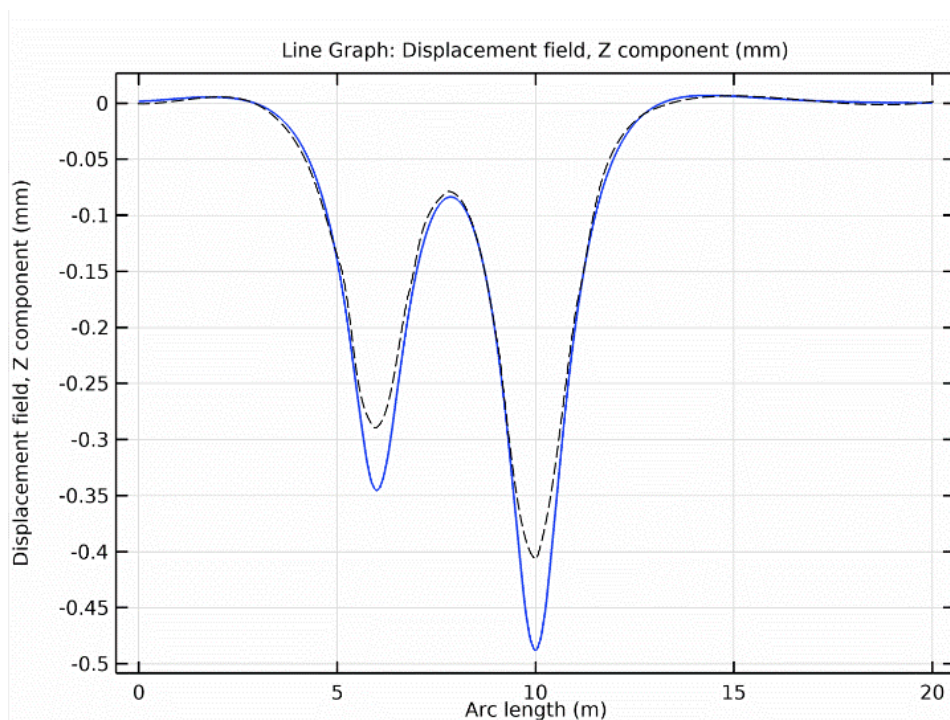


Рисунок 2.5 – Прогибы поверхности дорожной конструкции со слоем из грунтобетонной смеси.

Численное моделирование показало, что прочностные характеристики дорожной одежды в значительной степени зависят от несущих свойств искусственного слоя из грунтобетонной смеси. Начиная с величины увлажнения 15-20% несущего слоя, наблюдается уменьшение прочностных характеристик (рис. 2.5). Это связано с деформированием каркасной сетки из асфальто-щебеночно-грунтовой смеси, приводящей к появлению локальных зон напряжений. Вблизи этих зон возможно появление локальных участков повышенного увлажнения, на которых из-за перемещений материала образуются трещины. Таким образом, для формирования устойчивого к попеременным циклам замораживания-оттаивания дорожного основания желательно применять компоненты, увеличивающие как структурную

целостность (минеральный компонент – цемент, известь), так и пластичную составляющую (органический компонент – битум). Для достижения необходимых характеристик нужно получить конструкции облегченной дорожной одежды с вновь сформированным основанием заданных свойств, в которые будут внесены указанные материалы в определенных пропорциях.

Рассмотрение водонасыщенного состояния второго слоя из грунтобетонной смеси опирается на описание процесса движения воды в пористом слое на основе решения фильтрационной задачи уравнения движения флюида в пористой среде, предложенное А.И. Цаплиным и В.Н. Нечаевым [40]. Уравнение имеет вид:

$$\frac{1}{m} \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{1}{m^2} \left( u \frac{\partial V}{\partial z} + V \frac{\partial U}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - u \frac{V}{k} + VU \quad (2.5)$$

где  $U$  – проекция скорости подъема воды на ось  $z$ ;  $m$  – пористость грунта;  $k$  – проницаемость грунта;  $V$  – кинематическая вязкость воды;  $\rho$  – плотность воды.

Совместное решение уравнений (2.3) и (2.5) позволяет определить поток жидкости, инфильтруемого слоем. С учетом этих данных структуры скелета сформированного слоя из грунтобетонной смеси можно определить количество жидкости, в которой границы частиц участвуют в процессе механического взаимодействия при фазовом переходе жидкости из одного агрегатного состояния в другое [10, 81, 103].

Слой, формируемый в результате технологических операций по укладке грунтобетонной смеси, состоит из обработанных вяжущим материалом гранул. В них присутствуют как структурные элементы (минеральная компонента, вяжущие, старый материал переработки асфальтобетона), так и вода. Последняя в процессе замерзания переходит через температуру фазового перехода, причем, чем чище вода, тем более быстрый процесс перехода из жидкого состояние в твердое. Образовавшиеся крупные кристаллы, расширяясь, механически действуют на стенки капилляра (поры). Наличие растворенных солей изменяет значение температуры замерзания,

приводит к образованию более мелких кристаллов льда и формированию сгущенного рассола. Объединяясь между собой в конгломераты, мелкие ледяные кристаллы также действуют на стенки пор, вызывая их расширения [49]. Этот процесс происходит до некоторого значения температуры, при котором ледяные кристаллы начинают сжиматься с удельной величиной линейного расширения льда. На рисунке 2.6 показана температурная зависимость единицы объема воды или льда, отмечается значительное возрастание объема при замерзании льда (9,13%) [68].

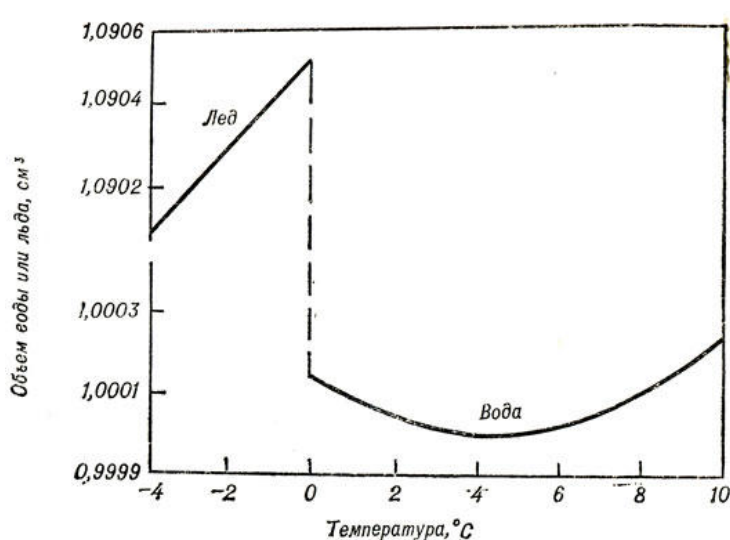
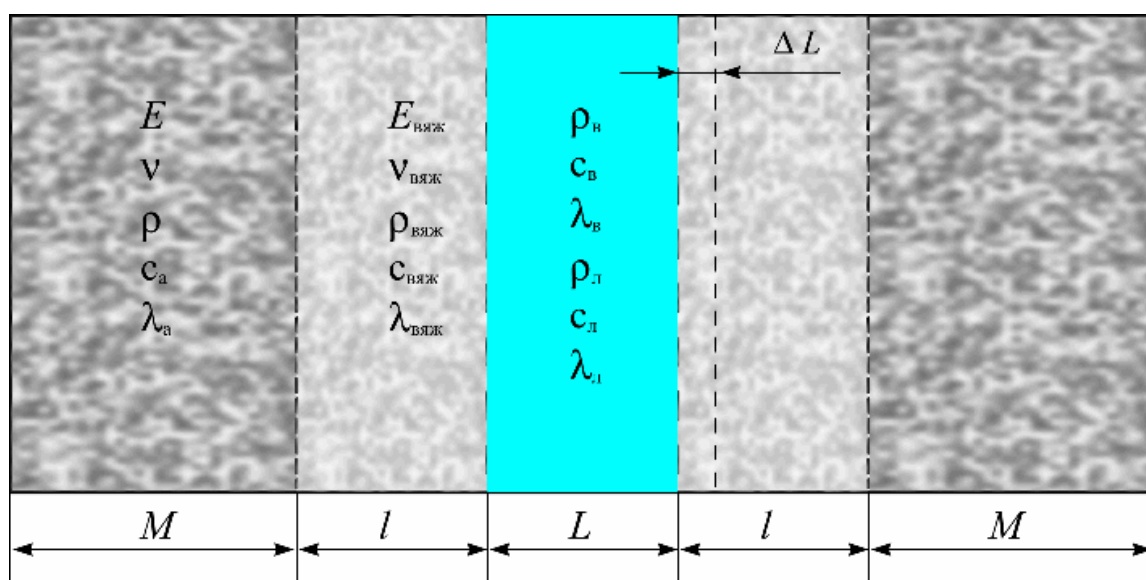


Рисунок 2.6 – Температурная зависимость единицы объема воды или льда

Физико-механические и теплофизические характеристики материалов, из которых технологически изготовлена дорожная конструкция, совместно с температурным режимом определяют как теплоинерционные свойства дорожной конструкции, так и предельные физические характеристики при механическом воздействии расширяющегося льда и при обратном процессе снятия этих напряжений. В асфальто-щебеночно-грунтовой смеси величина слоя жидкости между минеральной компонентой и стенкой поры минимальна, а удельное расширение ледяного кристалла составляет величину, превышающую иногда размеры межпорового пространства. При этом, чем больше объем поры, тем больше величина расширения данного льда по отношению к линейным размерам минеральной компоненты и

пленки вяжущего. Это приводит к формированию усилий, превышающих удельную прочность или адгезию компонентов рассматриваемого слоя. В предлагаемой технологии слой вяжущего вокруг минеральных компонентов старого асфальтобетонного покрытия – гранул становится толще. В этом случае при условиях возрастания температуры даже при наличии хрупкого вяжущего усилия от давления ледяных кристаллов могут быть значительно меньше (рис 2.7). Так как остаточная прочность слоя зависит от величины разрушающего действия воды внутри поры, то любое уменьшение давления ледяных кристаллов на стенки способствует увеличению количества циклов замораживая-оттаивания.



$E$  – модуль упругости;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\rho$  – плотность;  $c_a$  – теплоёмкость асфальтобетона;  $\lambda_a$  – теплопроводность;  $M$  – толщина минерального материала;  $l$  – толщина вяжущего;  $L$  – толщина жидкости (воды);  $\Delta L$  – приращение размера поры

Рисунок 2.7 – Физическая модель возникновения приращения поры при замерзании воды в ней

Рассматриваемая задача сводится к выбору оптимального соотношения между механическими свойствами элемента формируемого слоя, связанного адгезивными свойствами вяжущего, и величиной усилия, вызванного линейным расширением льда в данном объеме (рисунок 2.8). При этом можно сделать предположение о наличии оптимальной величины пористости

для подбираемого состава асфальто-щебеночно-грунтовой смеси с последующим её уплотнением [67], обладающей оптимальными характеристиками относительно разрушающего действия воды при замерзании.

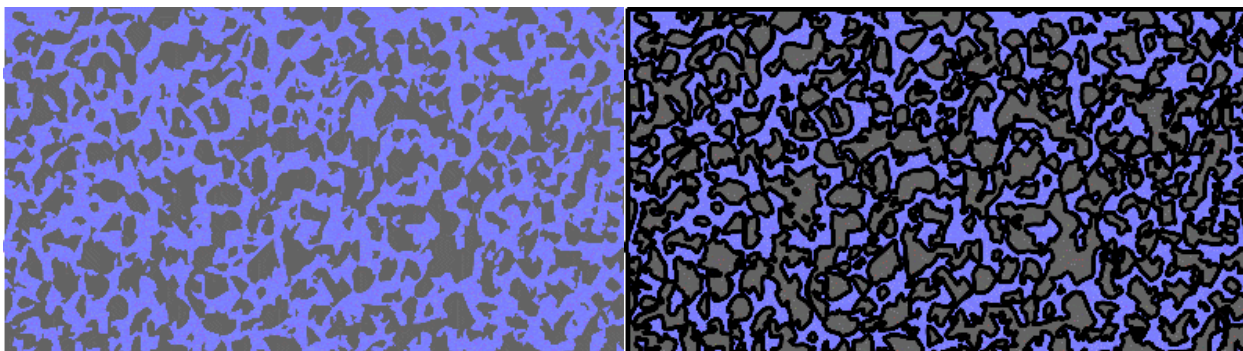


Рисунок 2.8 – Структура слоя из грунтобетонной смеси без вяжущего и с битумполимерной пленкой (темные границы частиц), голубой цвет - вода

Климатические условия - инсоляция и температура, приводят к изменению температурного режима дорожной одежды и изменению распределения потоков тепла. Конструкция аккумулирует в себе некоторое количество теплоты. При оттоке тепла в область отрицательных температур и наличии влаги начинается ее замерзание, и появляется скрытое тепло фазового перехода вода-лед. Наличие пористой структуры, в которой содержится свободная вода, приводит к источнику механических напряжений, приводящего к дальнейшему разрушению покрытия за фронтом фазового перехода вглубь материала и изменению теплофизических характеристик слоя [97].

Дорожная одежда представляет собой многослойную конструкцию с наиболее напряженным верхним слоем (слой деструкции). В зависимости от степени разрушения, могут изменяться теплопроводность ( $\lambda$ ) и удельная теплоемкость ( $c$ ), которые в общем случае, являются функциями координаты ( $x$ ), пористости ( $I$ ), времени ( $t$ ) и вариативных параметров температуры ( $T$ ), количества свободной воды ( $W_v$ ) и концентрации раствора химического реагента.

Задача содержит дифференциальные уравнения теплопроводности, начальные условия, определяющие распределение температуры на границах и толщине конструкции притоками тепла [98].

В процессе изменения внешних условий, примем за начальный момент времени  $t_0$  распределение температуры по глубине дорожной конструкции в виде условия:  $T_0 = T(x, 0)$ . В силу изменения с течением времени параметров внешней среды процесс теплопереноса в совокупности с фазовыми переходами также носит нестационарный характер. Следовательно, изменение температуры в конструкционных слоях дорожной одежды может быть описано уравнением нестационарной теплопроводности Фурье:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T), \quad (2.6)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость материалов конструкции, Дж/кгК;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/мК;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с.

Граничные условия для данной задачи и конструкции:

$$T(z, 0) = T_{0z} \quad (2.7)$$

Для соприкасающихся слоев можно записать,

$$\begin{aligned} \lambda_1 \left. \frac{\partial T_0}{\partial z} \right|_1 &= \lambda_2 \left. \frac{\partial T_1}{\partial z} \right|_1; t_1|_1 = t_2|_1, \\ c_1 \left. \frac{\partial T_0}{\partial z} \right|_1 &= c_2 \left. \frac{\partial T_1}{\partial z} \right|_1; t_1|_1 = t_2|_1, \\ \rho_1 \left. \frac{\partial T_0}{\partial z} \right|_1 &= \rho_2 \left. \frac{\partial T_1}{\partial z} \right|_1; t_1|_1 = t_2|_1. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Уравнение (2.6) описывает общий случай распределения температуры вглубь конструкции дороги. А граничные условия (2.7) и (2.8) указывают на неразрывность потоков тепла на границах слоев.

В точной постановке уравнения теплопроводности в многофазной среде с движущимися границами между различными фазами (задача Стефана) решаются численным методом [57, 99]. Для учета в модели процессов

замораживания/оттаивания слоя был использован метод учета скрытой теплоты фазового перехода воды в слое на основе эффективных теплоемкости  $C_3$  и теплопроводности  $\lambda_3$ .

В слое искусственного основания из асфальто-щебеночно-грунтовой смеси при его замерзании движение фронта фазового перехода происходит с выделением тепла. Это приводит к задаче вычисления распределения температур по толщине дорожной конструкции [104]. Уравнение Фурье перепишем с учетом эффективных теплоемкости  $C_3$  и теплопроводности  $\lambda_3$  и в соответствии с принятой расчетной схемой:

$$C_3 \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_3 \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right). \quad (2.9)$$

Условимся, что эквивалентные теплоемкость и теплопроводности связаны с фазовой зависимостью процесса замерзания-таяния поровой воды

$$C_3 = \begin{cases} (c_p)_3 + L \rho_a \frac{\partial W_m(T)}{\partial T} \\ (c_p)_ж \\ (c_p)_{сух} \end{cases}, \quad \lambda_3 = \begin{cases} \lambda_3 \\ \lambda_ж \\ \lambda_{сух} \end{cases}, \quad \begin{matrix} T \leq T_\phi \\ T > T_\phi \end{matrix}, \quad (2.10)$$

где;  $W_m(T)$  – функция, отражающая зависимость количества незамерзшей воды от температуры  $T$ ;  $L$  – удельная теплота фазового перехода вод-лед, Дж/кг индексы «з», «ж» относятся соответственно к замерзшей и жидкой фазам состояния воды, а «сух» при отсутствии влаги.

Тогда подставляя в (2.9) получим обобщенное уравнение

$$(C_3)_i \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_i \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right), \quad i = 1, 2, 3. \quad (2.11)$$

где  $c_i$  – удельная теплоемкость материалов слоя с номером  $i$ , Дж/кг $^\circ$ К;  $\rho_i$  – плотность материала  $i$ -го слоя, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности материала  $i$ -го, Вт/мК.

Тепло окружающей среды поступает через границу воздух-поверхность дороги с граничными условиями и определением условий теплообмена с окружающей средой. При температуре ниже нуля замерзает не вся влага, а та

часть, которая составляет разность между начальной влажностью  $W_m$  и влажностью при температуре  $T_\phi$ :  $W_m - W_H(T_\phi)$ . Остальная вода кристаллизуется в зоне промерзания по мере дальнейшего понижения температуры слоя [16]. С учетом вышеуказанного можно записать

$$\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda_{ж} \frac{\partial T}{\partial x} = L\rho(W_m - W_H(T_\phi)) \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad (2.12)$$

где  $\xi = \xi(t)$  – положение фронта фазового перехода.

Модель описывается множеством функциональных зависимостей: температурой, удельной теплоемкостью, теплопроводностью и плотности в каждом слое дорожной конструкции, а также функцией водонасыщения  $W_H(T)$ , связанной с количеством незамерзающей воды при заданной температуре  $T$ . Эти зависимости описывают изменение теплофизических свойств слоя при фазовом переходе содержащейся в нем воды и вызванным выделением скрытой теплоты льдообразования.

Теплофизические константы  $c$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$  определяются долевыми слагаемыми уплотненного гранулята, воды и льда. Для теплоемкости слоя используются все компоненты включая воду в замершем и жидком состоянии, содержащейся в порах:

$$c_3 = c_a + c_{вяж} + c_B W_B, \quad c_{ж} = c_a + c_{вяж} + c_B W_H(T) + c_L (W_m - W_H(T)), \quad (2.13)$$

где  $c_3$ ,  $c_{ж}$  – теплоемкости верхнего слоя дорожной конструкции в полностью замёрзшем и талом состояниях,  $kJ/kg \cdot K$ ;  $W_m$  – процентное содержание воды в порах слоя из асфальто-щебеночно-грунтовой смеси.

Коэффициент теплопроводности сформированного слоя из грунтобетонной смеси зависит от агрегатного состояния воды в порах и используемых материалов, и может быть выражен в виде:

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_a \cdot \lambda_{вяж}}{\lambda_a + \lambda_{вяж}} - S_\Pi \left( \frac{\lambda_a \cdot \lambda_{вяж}}{\lambda_a + \lambda_{вяж}} - \lambda_L \right), \quad \lambda_{ж} = \frac{\lambda_a \cdot \lambda_{вяж}}{\lambda_a + \lambda_{вяж}} - S_\Pi \left( \frac{\lambda_a \cdot \lambda_{вяж}}{\lambda_a + \lambda_{вяж}} - \lambda_B \right), \quad (2.14)$$



где  $\lambda_{3,ж}$  – коэффициент теплопроводности верхнего слоя дороги из гранулированного материала с полностью замерзшей и талой водой,  $Bm/m \cdot K$ ;  $S_{п}$  – удельная площадь пор в процентах от объема слоя.

Аналогично изменяется плотность массива слоя в зависимости от количества замерзшей воды в нем,

$$\rho_3 = \rho_a - (\rho_v - \rho_l) W_v, \quad (2.15)$$

где  $\rho_3, \rho_{ж}$  – плотность верхнего слоя с замерзшей или талой водой,  $kg/m^3$ .

Оценить оптимальное соотношение объема поры и толщины стенки можно с помощью эконометрического показателя, определяющего затраты на укладку и количество используемого вяжущего материала. Очевидно, что минимальных размер пор достичь невозможно, а получения максимальной толщины вяжущий пленки экономически невыгодно. Следовательно, для них существует определённый спектр оптимальных соотношений, который позволяет создавать стойкие материалы на основе дешевых местных компонентов для местности, в которой часто происходит замораживания и оттаивания.

В математическом виде рассматриваемая задача сводится к решению дифференциальных уравнений трех физических процессов. Первый процесс связан с действием температуры на фазовое состояния воды, которое может изменять свой фазовый состав в зависимости от концентрации солей. Второй связан с физическими процессами теплопроводности и теплоемкости, которые определяются как пористостью материала и теплопроводностью исходных компонентов, так изменяющимися фазовыми свойствами воды. При этом на начальном этапе необходимо решить задачу прохождения тепловой волны сквозь элементарный слой дорожной конструкции. Данная задача вырождается в механический эквивалент действия расширяющейся системы от теплового потока с переменными граничными условиями, зависящими от толщины начального слоя вяжущего материала, который формируется с помощью определенных технологических операций.

Экстремумами решения данной задачи будет являться оптимальное соотношение пористости получаемого материала с точки зрения его прочности на разрыв под действием внутренней влаги в слое из грунтобетонной смеси. Третий процесс должен определять механические свойства пор, сформированных стенками минеральных компонентов и слоем вяжущего материала.

Условие возникновения процесса пучения пористой структуры, опирается на критерий, при котором возрастание деформации от увеличения объема грунта  $l_{пуч}$  превышает допустимый предел,  $l_{пуч} \leq l_{доп}$  [58]. Для вычисления влияния перехода жидкой фазы воды в лед на появляющееся напряжение внутри материала на основе распределения высева использованного гранулята рассчитан объем свободной воды на метр кубический слоя (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Объем свободной воды в слое на метр кубический в зависимости от гранулометрического состава, л

Размер гранул, мм  Толщина пленки, мкм	40	20	15	10	5	2,5	0,63	По всему гран составу
20	0,210	0,629	0,758	0,777	0,952	1,653	7,160	12,139
40	0,209	0,627	0,755	0,772	0,941	1,615	6,538	11,457
60	0,209	0,625	0,752	0,768	0,930	1,577	5,985	10,846
80	0,209	0,623	0,749	0,763	0,919	1,541	5,494	10,297
100	0,209	0,621	0,746	0,759	0,908	1,505	5,054	9,802
120	0,208	0,619	0,743	0,754	0,898	1,471	4,661	9,354
140	0,208	0,618	0,740	0,750	0,887	1,438	4,307	8,947
160	0,208	0,616	0,737	0,745	0,877	1,406	3,988	8,577
180	0,207	0,614	0,734	0,741	0,867	1,375	3,700	8,238
200	0,207	0,612	0,731	0,736	0,857	1,344	3,439	7,927

В основу определения количества воды в материале слоя положено предположение о полном обволакивании ею гранулы асфальто-щебеночно-грунтовой смеси.

Гранулы без пленки воды имеют линейный размер  $R_{гр}$ , и тогда объем

$$R_{гр} = (M + l) \times 2, \quad V_{гр} = R_{гр}^3, \quad (2.16)$$

Так как размер гранул варьируется в пределах его гранулометрического состава то объем смеси равен:

$$V_{смеси} = \sum_{гр=1}^N n_{гр} \times V_{гр}, \quad (2.17)$$

где  $гр$  – номер фракции с размерами зернового состава,  $n_{гр}$  – количество гранул в данном отсеке,  $V_{гр}$  – объем каждой гранулы фракции.

Гранулы располагаются в объеме слоя неравномерно, что учитывается коэффициентом уплотнения  $k_n$ . Эта величина в исследованных кернах из покрытия составляет 0,7 – 0,83. Величина всего материала в слое на единицу площади составляет:

$$V_m = \sum V_{гр} \times n_{гр} \times k_n. \quad (2.18)$$

В случае одинаковой толщины пленки, объем воды вокруг гранулы в понимании ее симметрии равен:

$$V_b = 8 \times \left( (M + l + h_{пл})^3 - (M + l)^3 \right), \quad (2.19)$$

где  $M$  – толщина минерального материала;  $l$  – толщина вяжущего;  $L$  – толщина жидкости (воды),  $h_{пл} = L / 2$  – толщина пленки.

На основании вышеизложенного был получен расчет количества воды в кубическом метре гранулята в зависимости от гранулометрического размера и расстояния между гранулами (рис. 2.9). Увеличение размера гранул приводит к значительному увеличению количества воды в слое из грунтобетонной смеси, а возрастание расстояния между ними увеличивает количество льда при замерзании и последующее силовое воздействие на гранулы.

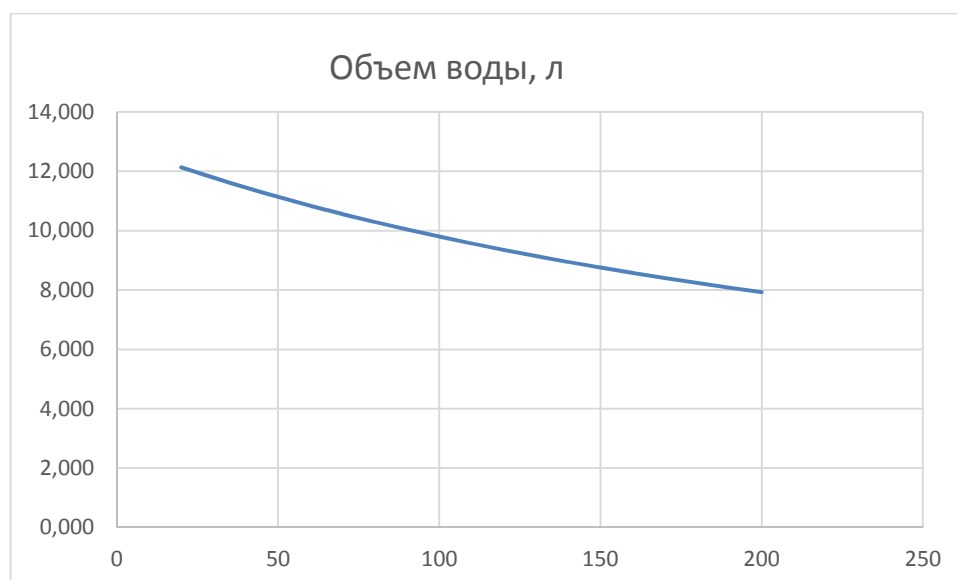


Рисунок 2.9 – Расчетное количество воды в кубическом метре слоя из грунтобетонной смеси в зависимости от толщины водной пленки, мкм

Таблица 2.3 – Морозостойкость полученных образцов

Вид применяемого вяжущего	$\rho_{\text{ср}}$ , г/см <sup>3</sup>	Водонасыщение по объему, %	Морозостойкость		
			F10	F15	F25
Цемент и специальная полимерная добавка	2,18	10,73	0,81	0,77	0,74
Цемент	2,17	11,25	0,78	0,72	0,64

Примечания:  $\rho_{\text{ср}}$  – средняя плотность образца; F10,15,20 – количество циклов попеременного замораживания-оттаивания.

В результате численного эксперимента установлено, что состояние слоя связано с распределением температур в верхнем слое покрытия. Имеет место замедление темпов образования льда на 4...6 часа в месяцы с понижением

среднемесячной температуры. В то же время, в период повышения средней температуры покрытия с деструктурированным слоем, увеличивается время размораживания на 5...7 часов по сравнению со слоем без обработки гранул. Таким образом, изменение теплофизической характеристики слоя из грунтобетонной смеси, приводит к перераспределению потоков тепла, вызывающих замерзание воды в его порах [48].

На рис. 2.10 показана зависимость усилий в слое от толщины вяжущего, полученная в результате моделирования процесса замерзания воды в порах грунтобетонной смеси. Размеры пор варьируется в диапазоне от 0,01 мм до 0,2 мм. Температура изменяется от  $-3^{\circ}\text{C}$  до  $-10^{\circ}\text{C}$ . Заметное возрастание усилия при температуре  $-8^{\circ}\text{C}$  вызвано возрастанием модуля упругости вяжущего.

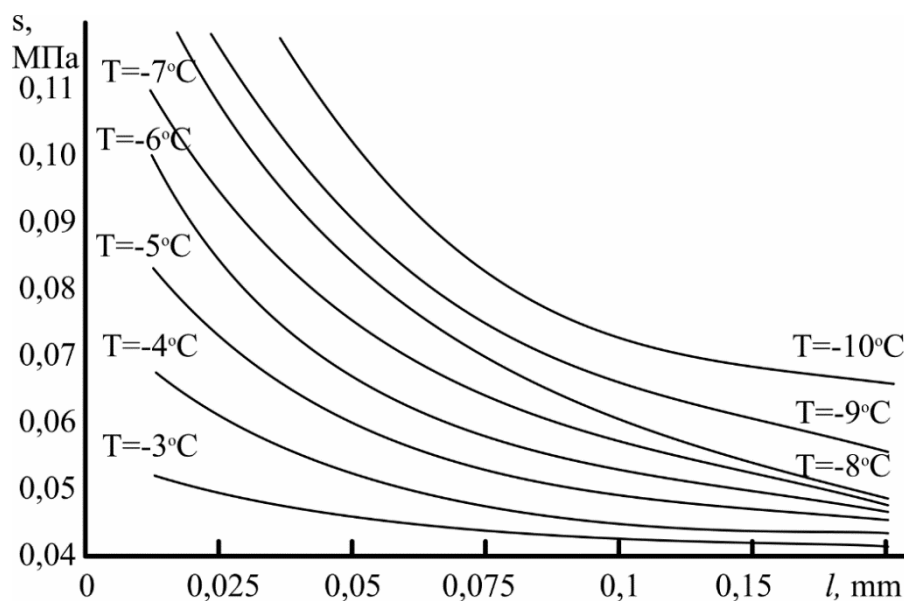


Рисунок 2.10 – Усилия, возникающие между гранулами, покрытыми органическим вяжущим при различных температурах

С увеличением толщины вяжущего воздействие расширяющегося льда уменьшается, имея перегиб в области 50 – 100 мкм (рис. 2.10). В этот момент температурная зависимость напряжений в слое изменяется с линейной на полиномиальную – квадратичную. При меньшей величине толщин действующие силы значительны, что может превысить адгезию тонкого слоя

покрытия гранул или их контакт. Следует отметить, что размер поры при этом сильно не изменяется, а толщина пленки уменьшается.

При анализе величин возникающих усилий можно сделать вывод о том, что целесообразно было бы заменить битумные вяжущие более прочными полимерно-битумными вяжущими или вяжущими, имеющими в своей основе структурообразующие минеральные компоненты, способствующие упрочнению стенки данной поры.

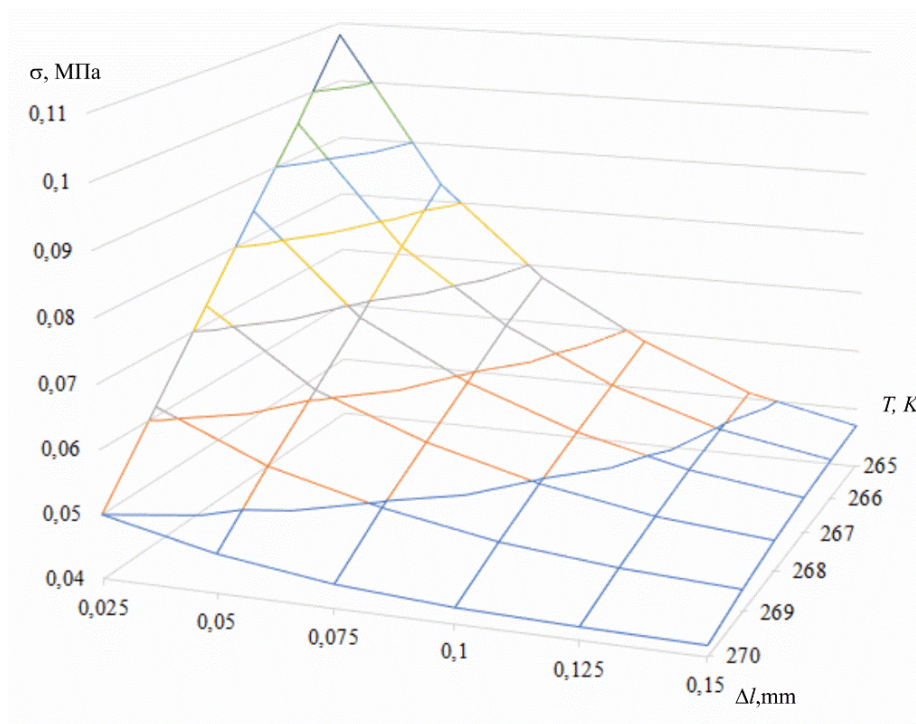


Рисунок 2.11 – Температурная зависимость усилий, возникающие между гранулами, покрытыми органическим вяжущим при различных размерах пор

На рисунке 2.11 показана температурная зависимость усилий, возникающие между гранулами, покрытыми органическим вяжущим при различных размерах пор грунтобетонной смеси. Это позволяет говорить о необходимости более тщательного контроля при технологических операциях. Можно сделать частный вывод о том, что увеличение прочности (уменьшение коэффициента Пуассона) вяжущего требует более точного соблюдения технологических операций, так как увеличение размера пор приводит к увеличению давления воды на стенки гранул. При выполнении

технологических операций необходимо добиваться однородности материала по размерам частиц, а при его укладке контролировать пористость.

## 2.2. Анализ работы различных составов слоя в условиях циклического замораживания-оттаивания

Для обеспечения длительной службы покрытия дороги необходимо подобрать оптимальный состав материала, соблюдать соответствующую технологию, вовремя проводить эксплуатационные мероприятия по содержанию дороги в рабочем состоянии. Для тонких покрытий облегчённых дорог глубина промерзания превышает величину создаваемого слоя. В этом случае следует предусмотреть специальный переходный слой, который уменьшает негативное воздействие от кристаллизации воды при фазовом переходе из жидкого состояния в твердое, либо применять технологию с аналогичными характерными свойствами. Для предлагаемой смеси опытным путем определили зерновой состав, который представлен табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Зерновой состав рассматриваемой смеси

Тип смеси	Зерновой состав, в процентах по массе								
	40	20	15	10	5	2,5	0,63	0,31	0,16
Грунтобетонная смесь	14	21	19	13	8	7	8	3	2



Рисунок 2.12 – Зерновой состав используемой смеси

В табл. 2.5 приведены основные теплофизические характеристики используемых материалов при строительстве дорог, а также воды и льда. Эти данные являются усредненными значениями встречающиеся на практике

указанных параметров. Для анализа скорости проникновения тепловой волны при охлаждении или нагревании единицы слоя очень важен параметр теплопроводности среды, на которую оказывается теплофизическое воздействия. Очевидно, что бетон обладает большой теплопроводностью из-за наличия как натуральных природных материалов в виде гравия, так и минеральной компоненты [36]. Органические вяжущие уменьшают теплопроводность материала. При формировании слоя из асфальто-щебеночно-грунтовой смеси тепловая волна вызывает расширение (сжатие) монолитных материалов, или расширение (сжатие) пространства между ними (трещины, щели, зазоры).

Таблица 2.5 – Теплофизические характеристики используемых материалов

Материал	Теплопроводность, <i>Вт/(м·град)</i>	Теплоемкость, <i>Дж/(кг·град)</i>	Температурный коэффициент линейного расширения, <i>мкм/м·С°</i>
Асфальтобетон	1,05	1680	200
Песок и грунт	0,35	840	7-12
Раствор цементно- песчаный	0,6...1.2	840	10-12
Бетон на гравии или щебне из природного камня	1,51	840	10-14
Битумы нефтяные строительные	0,17...0,27	1680	900
Портландцемент	0,47	-	14
Вода	0,556	4200	130-200
Лед	2,33	2100	51

Наличие теплоемкости в материалах табл. 2.5 приводит к смещению фазы образования льда при воздействии холода и, наоборот, фазы оттаивания при воздействии тепла. Это приводит к тому, что минеральные компоненты могут продолжать изменять свои размеры. При этом вода, не перешедшая в



фазовое состояние, получает дополнительный объем, занимающий пространство между формирующимся ледяным слоем и вновь образующейся трещиной. Расчеты показывают, что запаздывание фазы замерзания воды приводит к дополнительному росту ее объема в порах и трещинах на 5-7 %, а при нагреве лед, не успевая перейти в состояния водной пленки, деформирует нижние части гранул. Если при этом полимерная пленка тоньше необходимого размера, возможно разрушение данного слоя с оголением минеральных компонент, что приводит к дальнейшей деструкции покрытия. Анализ показывает, что в нижних слоях до глубины 5-6 см следовало бы увеличить количество полимерного вяжущего, но в силу технологических ограничений данную процедуру выполнить проблематично.

В зимний период при чередовании процесса замораживания-оттаивания происходит накопления влаги под дорожным покрытием. Это является одной из причин ослабления основания дороги, а также накопления влаги непосредственно в самом покрытии.

При известном для данной местности среднем значении отрицательной температуры можно рассчитать формируемый объем пор в данном материале при замерзании воды, а также механическое давление льда на компоненты слоя из асфальто-щебеночно-грунтовой смеси. Из анализа расчета следует, что величина линейного расширения льда по отношению к битумной пленке составляет 10-кратную величину. Следовательно, для компенсации возникающих напряжений необходимо, чтобы толщина битумной плёнки примерно соответствовала этой же величине. Расчеты показывают, что для фракций рассматриваемых составов, используемых при устройстве основания, оптимальная толщина пленки должна составлять не менее 50-150 мкм. Так как в среднем в асфальто-щебеночно-грунтовой смеси содержится приблизительно 4-6% битума, то для формирования поверхностной пленки необходимо добавить порядка 5-6% полимерно-битумной добавки, что приблизительно составляет 8-12 л/м<sup>3</sup>.

Были проведены экспериментальные исследования по определению оптимальных соотношений компонентов асфальто-щебеночно-грунтовой смеси, укрепленной цементом (табл. 2.6).

Таблица 2.6 – Оптимальные соотношения компонентов грунтобетонной смеси, укрепленной цементом

Добавка		Добавка 1	Добавка 2
Содержание компонентов укрепленной смеси	Гранулят+щебень, %	41	41
	Грунт +цемент, %	59	59
	Полимер	-	10 л на 1 м <sup>3</sup>
$q_{\text{ср}}$ , г/см <sup>3</sup>		2,17	2,18
Водонасыщение, % по объему		11,25	10,73
Предел прочности при сжатии на 7 сутки	R <sub>20сух</sub> , МПа	3,82	4,19
	R <sub>20вод</sub> , МПа	3,67	4,07
	R <sub>50</sub> , МПа	2,07	2,11
Предел прочности при сжатии на 28 сутки (R <sub>20</sub> )		4,13	4,85
Коэффициент морозостойкости	F10	0,78	0,81
	F15	0,72	0,77
	F25	0,64	0,74
Коэффициент водостойкости		0,96	0,97

Примечания: Добавка 1 – цемент, Добавка 2 – полимерная добавка

Из анализа данных таблицы следует, что составы, содержащие близкие к расчетному значению компонент, имеют более высокую морозостойкость, при сравнимых характеристиках по водонасыщению и прочности. Варьирования количества полимера в результате отбора и определения характеристик образцов показало, что экстремум находится в районе 10-11 литров. При этом материал начинает приобретать необходимые свойства от 6 л/м<sup>3</sup>, переходя в трудно формируемый слой при 15 л/м<sup>3</sup>. В первом случае толщина пленки, покрывающей гранулы, недостаточна, и возникающие деформации при замораживании образцов приводят к разрушению этих

пленок. В то же время значительное увеличение количество полимера также негативно сказывается на характеристиках, в первую очередь на прочности данного слоя.

### **2.3. Анализ процессов, происходящих при формировании материала дорожной одежды с определенными характеристиками**

Для теоретического обоснования эффективности технологии восстановления асфальтобетонных покрытий методом холодной регенерации с использованием грунтобетонной смеси, укрепленной вяжущим материалом, использованы научные положения, сформулированные в фундаментальных работах: Г.С. Бахраха [12], В.М. Безрука [13], Г.К. Сюньи [92], А.М. Алиева [5], В.М. Гоглидзе [35], Г.С. Гмыря [22], др. В публикациях Г.С. Бахраха и В.М. Безрука отражены результаты изучения свойств регенерированных материалов с использованием различных видов вяжущих веществ.

При фрезеровании тонкослойных конструкций происходит перемешивание удаленного асфальтобетона и щебня с грунтом. Исходные материалы получаемой смеси имеют разный гранулометрический состав, различную крупность минеральной части. Данная смесь может содержать в том или ином соотношении: гранулят старого асфальтобетона, которые покрыты полностью, частично или не покрытые вяжущим и песком; отдельные минеральные зерна основания – щебень различной крупности и грунтовая смесь различного состава.

Грунтобетонная смесь – это материал, созданный из нескольких составляющих. В нем крупный наполнитель представлен частицами гранулята старого асфальтобетона и щебёночного материала (получаемый из основания), а дисперсная среда – вяжущим веществом (минеральным, органическим или комплексным) и грунтом. Представленная смесь состоит из дисперсных материалов, для которых характерна развитая межфазовая поверхность и высокая концентрация дисперсной фазы в жидкой дисперсной среде.

В процессе химических реакций формируется пространственная структура, свойства которой определяются поверхностными явлениями на межфазовых границах материалов. Тип такой структуры определяется видом контактов между частицами дисперсных фаз [74, 75, 76, 77, 101]. Кратко рассмотрим виды контактов.

Атомный вид контакта образуется при непосредственном взаимодействии частиц друг с другом. В асфальто-щебеночно-грунтовой смеси они возможны при неполном обволакивании вяжущим материалом минеральных заполнителей или дробленых зерен.

Коагуляционный вид контакта образуется между частицами твердой фазы, разделенными прослойками дисперсионной среды. Она характерна для неорганических, органических вяжущих, а также композиционных материалов на основе вяжущих (асфальтогранулобетона, асфальтобетона, укрепленных грунтов).

Образованный прочный фазовый контакт конденсационно-кристаллизационной структуры образовался в результате химических фазовых превращений возникающих при гидратационном твердении минеральных вяжущих и завершении полимеризации жидкого связующего в наполненном полимере. Контакт разрушается необратимо и не восстанавливается после механического разрушения [101]. В указанной асфальто-щебеночно-грунтовой смеси за образование такого контакта ответственен цемент в качестве вяжущего материала.

В результате исследований получен новый материал, структура которого состоит из нескольких типов пространственных структур, которые связаны между собой.

Грунтобетонная смесь после уплотнения в конструктивном слое должна показывать результаты не ниже нормативных значений по прочности, морозостойкости, не мало важную роль играет устойчивость к образованию отраженных трещин и деформаций. Для получения такой смеси нужно использовать комплексное вяжущее, состоящее из минеральной

составляющий и поверхностно активной добавки. За счет содержания органического вяжущего структура получаемого материала будет обладать достаточно высокой водостойкостью и морозостойкостью, а за счет минерального вяжущего (цемента) иметь прочностные и деформативные свойства.

При объединении асфальтогранулята, зернистого материала – щебня и грунта с компонентами вяжущего (цемент и полимер), протекают физико-химические процессы, формирующие дисперсную структуру смешанного типа, обусловленной кинетикой гидратации и твердения вяжущих веществ, а также взаимодействием материалов старой дорожной одежды, минерального вяжущего и полимерной добавки. При уплотнении такой структуры происходит геометрическое перераспределение частиц, уменьшение пористости. Этому также способствует более тесный контакт новообразований, возникающих при гидратации и более совершенному действию полимерной добавки. В результате асфальто-щебеночно-грунтовая смесь приобретает прочность, водо- и морозостойкость.

Рассмотрим особенности формирования структуры асфальто-щебеночно-грунтовой смеси (грунтобетонная смесь). В ней используется комплексное вяжущее: минеральное вяжущее (цемент) и полимерная добавка, включая органическое вяжущее, содержащееся в грануляте старого асфальтобетона. В смеси на комплексном вяжущем возникают коагуляционные связи между частицами (гранулятом старого асфальтобетона, щебеночным материалом и продуктами гидратации минерального вяжущего).

Рассмотрим процессы, происходящие при смешивании вяжущих материалов с обрабатываемым гранулятом старого асфальтобетона, щебеночным материалом и грунтом. Минеральное вяжущее дозируется в виде сухой смеси, полимерная добавка в виде тонкодисперсной жидкости. В начале смешивания цемент равномерно распределяется между зернами гранулята старого асфальтобетона, щебня и грунта. Далее во вращающийся

барабан подается вода с полимерной добавкой (или без нее), где происходит перемешивание всех представленных материалов. При дальнейшем интенсивном перемешивании полимерная добавка обеспечивает и улучшает гидратацию минерального вяжущего – цемента. Также полимерная добавка, используемая в качестве компонента комплексного вяжущего, создает полимермодифицированный стабилизированный материал, который обладает повышенной прочностью и морозостойкостью. Вода, содержащаяся в смеси, растворяет продукты гидратации и последующем происходит адсорбция их на поверхности минеральных зерен. Это приводит к возникновению новых прочных гидратных связей между минеральным камнем и зернами получаемой асфальто-щебеночно-грунтовой смеси.

Органическое вяжущее в структуре асфальто-щебеночно-грунтовой смеси находится в виде пленок на поверхности гранул (зерен) гранулята старого асфальтобетона. Особенностью представленной смеси является образование прочных конденсационно-кристаллизационных связей при твердении минерального вяжущего, а также наличие коагуляционных связей в структуре представленного материала. Данные особенности обеспечивают деформативные свойства, прочность, водостойкость и морозостойкость асфальто-щебеночно-грунтовой смеси на минеральном вяжущем с использованием полимерной добавки.

## **2.4 Выводы по главе**

1. Для описания работы конструктивного слоя дорожной одежды облегченного типа при различных модулях морозостойкости построена математическая модель, которая позволяет учитывать влияние толщины пленки вяжущего на гранулах смеси на напряженно-деформируемое состояние сформированного слоя при замерзании-оттаивании воды в порах. При этом оптимальная толщина пленки стандартного вяжущего составляет 50-150 мкм при условиях стандартного фракционного состава.

2. Получено, что уменьшение зазоров между частицами грунтобетонной смеси уменьшает количество накопленной воды, но одновременно увеличивает величину внутренних напряжений внутри материала при замораживании. Наличие пленки полимерного вяжущего на гранулах снижает внутренние напряжения в структуре материала.

3. Показано влияние температуры хрупкости на возрастание внутренних напряжений при замерзании поровой воды в слое. Прочность слоя уменьшается при положительном градиенте температур фазового состояния льда в порах слоя (таянии).

### **3. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЕВ ОБЛЕГЧЕННОГО И ПЕРЕХОДНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ МЕСТНЫХ УКРЕЛЁННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

#### **3.1. Порядок подготовки образцов для проведения экспериментальных исследований**

Для проведения лабораторных исследований были отобраны образцы различных материалов в Воронежской области, относящейся к III дорожно-климатической зоне. Лабораторные исследования проводились в сертифицированной дорожно-строительной лаборатории ВГТУ в соответствии с требованиями ГОСТ 25100-2020 [25], ГОСТ 12536-2014 [26], ГОСТ 5180-2015 [27], ГОСТ 25584-2016 [28].

Для проведения исследования были изготовлены различные смеси из отобранных грунтов, обработанных вяжущими веществами и полимерными добавками, по следующей методике. Воздушно-сухой грунт просеивают через сито с отверстиями 5 мм. В просеянный грунт (в некоторых рецептах перемешанный с песком) вначале добавляют вяжущие вещества, а затем полимерные добавки. Смесь перемешивали, добавляя воду так, чтобы влажность грунта была оптимальной. При этой влажности из полученной смеси формовали образцы цилиндрической формы диаметром 10 см, высотой 12,7 см (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Образцы из суглинка тяжелого с примесью мела, обработанного цементом и полимерной добавкой



При изготовлении образцов применялся прибор для стандартного уплотнения грунта ПСУ-ПА2. Уплотнение материала проводилось при оптимальной влажности до максимальной плотности с послойным заполнением форм. Изготовленные образцы помещались в специальные формы, покрытые влажной тканью, и хранились там до проведения испытаний. Испытания проводились через 7 и 28 суток.

### **3.2. Определение характеристик подобранных оптимальных грунтовых смесей, укрепленных вяжущими веществами**

Одной из основных характеристик образца является его гранулометрический состав, на основе которого грунты относят к тому или иному типу, в соответствии с принятой классификацией [7, 25]. Зерновой состав отобранных материалов представлен в таблице 3.1.

Образец 1 классифицируется по ГОСТ 25100-2020 как суглинок тяжелый пылеватый твердый с примесью мела. Основные физико-механические характеристики: естественная влажность грунта 10,88 %; влажность на границе текучести 37,54%; влажность на границе раскатывания 23,93%; число пластичности ( $I_p$ ) 13,62; показатель текучести ( $IL$ ) -0,95. Образец 2 классифицируется по ГОСТ 25100-2020 как суглинок легкий пылеватый твердый. Основные физико-механические характеристики: естественная влажность грунта 18,78 %; влажность на границе текучести 47,98%; влажность на границе раскатывания 38,30%; число пластичности ( $I_p$ ) 9,69; показатель текучести ( $IL$ ) -2,01. Образец 3 классифицируется по ГОСТ 25100-2020 как песок мелкий. Основные физико-механические характеристики: модуль крупности составил 1,64; содержание пылевидных и глинистых частиц (мокрое просеивание) 5,79 %. Образец 4 классифицируется по ГОСТ 25100-2020 как органоминеральный грунт. Основные физико-механические характеристики: содержание гумусовых веществ 11%; влажность на границе текучести 35,61%; влажность на границе раскатывания 25,00%; число пластичности ( $I_p$ ) 10,61; кислотность (pH) 8,0.

Таблица 3.1

№ обра- зца	Гранулометрический состав										Классификация грунта по ГОСТ 25100- 2020
1	Отвер- стия в сите, мм	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	0,05	< 0,005	суглинок тяжелый пылеватый твердый
	Частные остатки, %	0	0	0	0,94	2,41	6,27	10,8	3,64	75,92	
	Полные остатки, %	0	0	0	0,94	3,35	9,62	20,4	24,1	100	
	Полные проходы , %	10 0	10 0	100	99,1	96,6	90,4	79,6	75,9	-	
2	Отвер- стия в сите, мм	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	0,05	< 0,005	суглинок легкий пылеватый твердый
	Частные остатки, %	0	0	0	0,2	0,73	1,74	3,38	1,64	92,31	
	Полные остатки, %	0	0	0	0,2	0,93	2,67	6,05	7,69	100	
	Полные проходы , %	10 0	10 0	100	0,8	99,1	97,3	93,9	92,3	-	
3	Отвер- стия в сите, мм	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	0,05	< 0,005	Песок мелкий
	Частные остатки, %	0	0	0	1,7	13,2	38,8	40,0	3,65	2,61	
	Полные остатки, %	0	0	0	1,7	14,9	53,8	93,7	97,4	100	
	Полные проходы , %	10 0	10 0	100	98,3	85,1	46,2	6,26	2,61	-	
4	Отвер- стия в сите, мм	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	0,05	< 0,005	суглинок легкий пылеватый
	Частные остатки, %	0	0	0	0,44	1,35	2,82	3,37	0,91	91,11	
	Полные остатки, %	0	0	0	0,44	1,79	4,61	7,98	7,98	100	
	Полные проходы , %	10 0	10 0	100	99,6	98,2	95,4	92,0	92,0	-	

Максимальная плотность и оптимальная влажность материалов, представленных в табл. 3.1, приведены ниже:

- для суглинка тяжелого пылеватого твердого с примесью мела в табл. 3.2 и на рис. 3.2;
- для суглинка легкого пылеватого твердого в табл. 3.3 и на рис. 3.3;
- для песка мелкого в табл. 3.4 и на рис. 3.4;
- для органоминерального грунта в табл. 3.5 и на рис. 3.5.

В табл. 3.2 - 3.5:  $m$  – масса пустого стаканчика с крышкой;  $m_0$  – масса высушенного грунта со стаканчиком и крышкой;  $m_1$  – масса влажного грунта со стаканчиком и крышкой;  $w$  – влажность грунта;  $\rho_d$  – плотность сухого грунта;  $\rho$  – плотность грунта;  $w_i$  – влажность грунта в %.

Таблица 3.2

Определение оптимальной влажности и максимальной плотности суглинка тяжелого пылеватого твердого

$w_i$		$w$			$w$	$\rho_d$	Масса цилиндрической части формы с уплотненным грунтом		$\rho$
		$m$	$m_0$	$m_1$					
$W_1$	16	13,89	39,84	42,82	16,24	1,59	$m_1$	7475	1,85
$W_2$	18	13,75	38,75	43,23	17,92	1,61	$m_2$	7530	1,90
$W_3$	20	14,74	46,17	52,13	18,98	1,62	$m_3$	7557	1,93
$W_4$	22	19,43	44,85	50,51	22,27	1,64	$m_4$	7635	2,01
$W_5$	24	19,57	46,25	52,46	23,28	1,61	$m_5$	7620	1,99
$W_6$	26	19,73	48,33	53,78	24,20	1,60	$m_6$	7680	1,89

Для суглинка тяжелого пылеватого твердого максимальная плотность составила 1,64г/см<sup>3</sup>, оптимальная влажность – 22,27%.

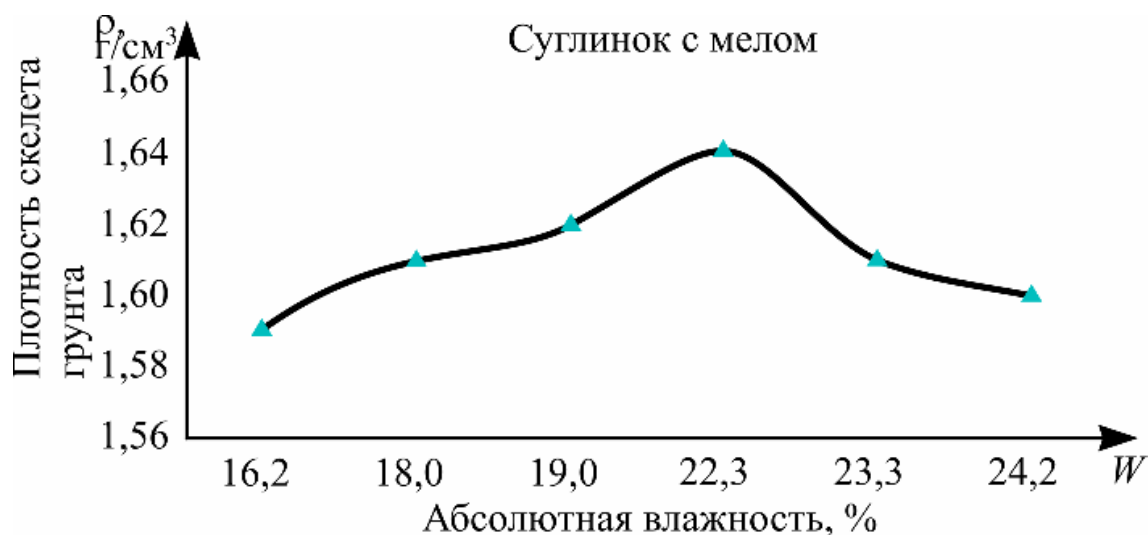


Рисунок 3.2 – Определение оптимальной влажности и максимальной плотности

Таблица 3.3

Определение оптимальной влажности и максимальной плотности суглинка легкого пылеватого твердого

$w_i$		$w$			$w$	$\rho_d$	Масса цилиндрической части формы с уплотненным грунтом		$\rho$
		$m$	$m_0$	$m_1$					
$W_1$	18	19,00	41,53	46,49	18,01	1,39	$m_1$	7305	1,64
$W_2$	20	18,40	44,85	50,29	20,57	1,40	$m_2$	7346	1,69
$W_3$	22	19,68	41,94	47,38	23,44	1,41	$m_3$	7420	1,76
$W_4$	24	14,02	44,36	52,17	25,74	1,41	$m_4$	7428	1,77
$W_5$	26	14,68	36,19	42,13	26,62	1,41	$m_5$	7455	1,79
$W_6$	28	19,13	45,70	53,09	27,81	1,42	$m_6$	7480	1,82
$W_7$	30	19,79	50,78	59,76	28,97	1,43	$m_7$	7502	1,84
$W_8$	32	19,24	56,65	67,40	32,14	1,38	$m_8$	7480	1,82
$W_9$	34	19,62	58,23	69,10	34,12	1,37	$m_9$	7520	1,80

Для суглинка легкого пылеватого твердого максимальная плотность составила 1,43г/см<sup>3</sup>, оптимальная влажность – 28,97%.

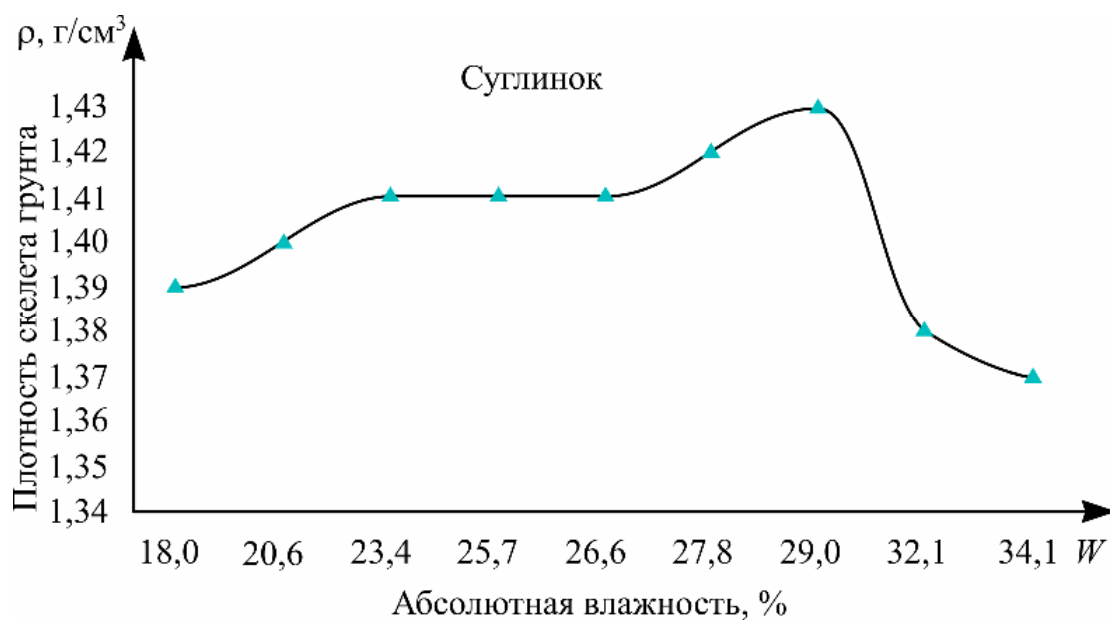


Рисунок 3.3 – Определение оптимальной влажности и максимальной плотности

Таблица 3.4  
Определение оптимальной влажности и максимальной плотности песка  
мелкого

$w_i$		$w$			$w$	$\rho_d$	Масса цилиндрической части формы с уплотненным грунтом		$\rho$
		$m$	$m_0$	$m_1$					
$W_1$	2	14,72	50,61	51,26	1,81	1,77	$m_1$	7462	1,80
$W_2$	4	19,41	52,33	53,70	4,16	1,77	$m_2$	7505	1,84
$W_3$	6	14,52	50,69	52,92	6,17	1,79	$m_3$	7560	1,90
$W_4$	8	19,43	49,67	52,04	7,84	1,81	$m_4$	7610	1,95
$W_5$	10	18,99	56,10	59,66	9,60	1,82	$m_5$	7645	1,99
$W_6$	12	19,55	52,86	56,63	11,32	1,81	$m_6$	7675	2,01
$W_7$	14	19,79	53,24	57,15	12,26	1,80	$m_7$	7693	2,00

Для песка мелкого максимальная плотность составила 1,82г/см<sup>3</sup>, оптимальная влажность – 9,60%.

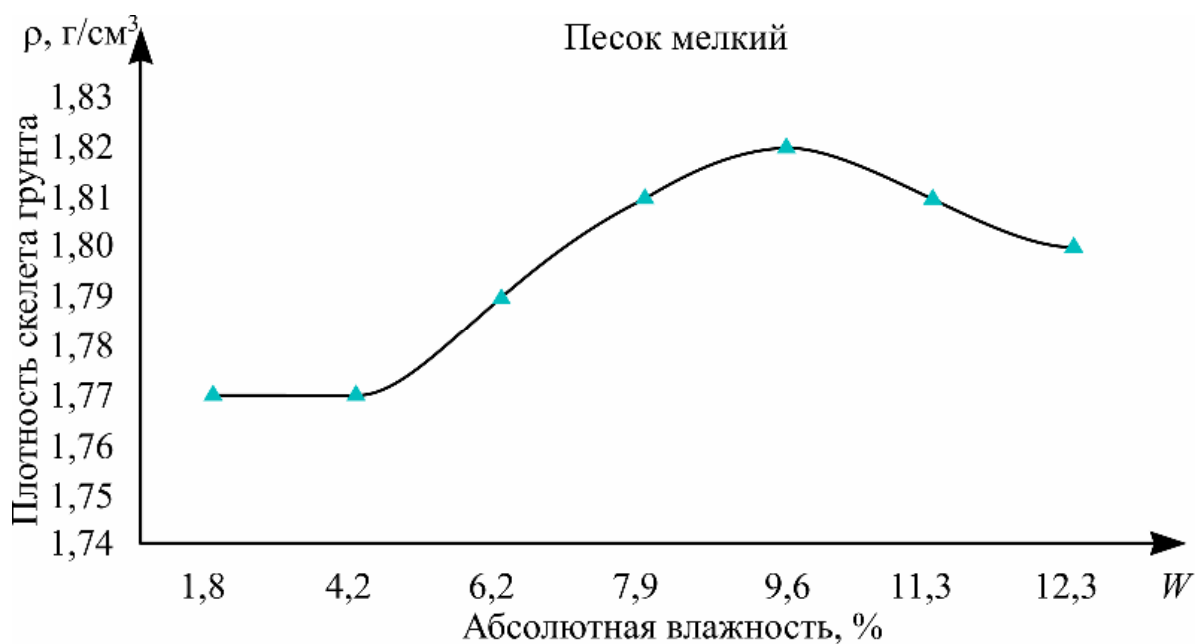


Рисунок 3.4 – Определение оптимальной влажности и максимальной плотности

Таблица 3.5

Определение оптимальной влажности и максимальной плотности органоминерального грунта

$W_i$		$w$			$w$	$\rho_d$	Масса цилиндрической части формы с уплотненным грунтом		$\rho$
		$m$	$m_0$	$m_1$					
$W_1$	18	19,66	34,61	37,25	19,66	1,40	$m_1$	7307	1,65
$W_2$	20	19,12	39,87	44,12	20,48	1,43	$m_2$	7383	1,72
$W_3$	22	19,85	44,63	50,16	22,32	1,44	$m_3$	7420	1,76
$W_4$	24	19,26	50,19	57,59	23,92	1,46	$m_4$	7470	1,81
$W_5$	26	15,75	57,63	68,39	25,69	1,48	$m_5$	7520	1,86
$W_6$	28	17,86	51,17	60,38	27,65	1,45	$m_6$	7510	1,85
$W_7$	30	18,02	52,89	61,12	29,12	1,43	$m_7$	7595	1,84

Для органоминерального грунта максимальная плотность составила 1,48 г/см<sup>3</sup>, оптимальная влажность – 25,69%.

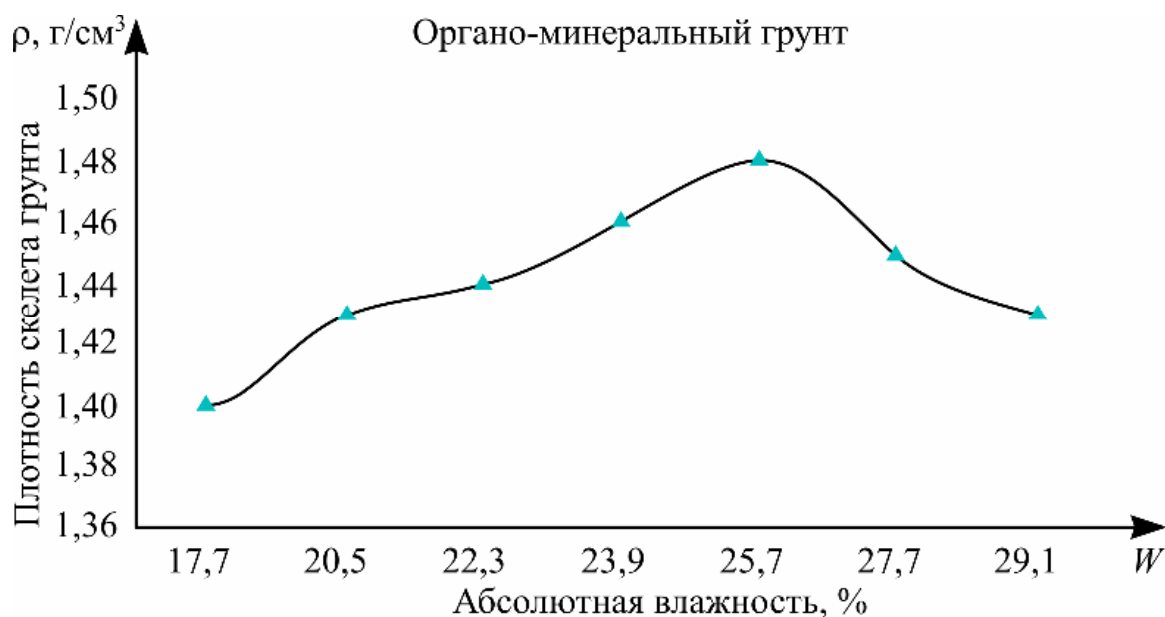


Рисунок 3.5 – Определение оптимальной влажности и максимальной плотности

В соответствии с ГОСТ 23558-94 [34], ПНСТ 322-2019 [73], для устройства дорожных оснований и покрытий из укрепленных грунтов, применяют крупнообломочные и песчаные грунты, супеси всех разновидностей, суглинки с числом пластичности не более 12. Допускается применение глинистых грунтов с числом пластичности от 12 до 17 при условии добавления природного песка по ГОСТ 32824, дробленого песка по ГОСТ 32730 или песчаного грунта по ГОСТ 33063 и доведения числа пластичности до значения, не превышающего 12 [2].

Не допускается применение грунтов, содержащих гумусовые вещества в количестве более 2% по массе в I и II дорожно-климатических зонах и более 4% – в III-V зонах, а также с содержанием примеси гипса в количестве 10% и более по массе [34, 73]. После проведения анализа отобранных грунтов сделан вывод, что некоторые образцы не удовлетворяют требованиям ГОСТА. Так для образца 1 (суглинок тяжелый пылеватый твердый с примесью мела) число пластичности ( $I_p$ ) составляет 13,62, а образец 4 содержит гумусовые вещества в количестве 11%.

Обширная территория Воронежской области характеризуется залеганием наиболее неблагоприятных для дорожного строительства

органоминеральных грунтов с высоким содержанием гумуса. Но существующая обоснованная технико-экономическая необходимость требует вовлечения подобных грунтов в процесс строительства местных дорог, а также временных дорог.

Суглинистые грунты с примесью мела, имеющие число пластичности более 12, также распространены в Воронежской области. Их использование при строительстве местных дорог может дать определенный экономический эффект.

Для укрепления указанных типов грунтов применялись следующие материалы:

- ✓ портландцемент М400;
- ✓ гашеная известь;
- ✓ различные полимерные добавки;
- ✓ битумная эмульсия ЭБК-2.

В табл. 3.6 представлены варианты укрепления грунтов, которые могут быть использованы в конструктивных слоях дорожной одежды.

Таблица 3.6

#### Варианты укрепления

№ смеси	Исходные материалы (процентное содержание вяжущих веществ взяты от суммарной массы грунтов 100%)				
1	Органо-минеральный грунт 30%	Песок 70%	Портландцемент 8,70%	Вода 14,00%	
			7,80%		
			6,90%		
2	Органо-минеральный грунт 30%	Песок 70%	Полимерная добавка 0,90% (от массы ОМГ+Песок)	Портланд-цемент 8,70%	Вода 14,00%
3	Органо-минеральный грунт 100%	Гашеная известь 4%	Портландцемент 10,00%	Вода 26,00%	
			9,00%		
			6,80%		



№ смеси	Исходные материалы (процентное содержание вяжущих веществ взяты от суммарной массы грунтов 100%)				
4	Органо-минеральный грунт 50%	Песок 50%	Портландцемент 9,00%	Вода 17,00%	
			8,00%		
			7,00%		
5	Органо-минеральный грунт 50%	Песок 50%	Полимерная добавка 0,90%	Портланд-цемент 9,00%	Вода 14,00%
			0,60%	9,00%	
			0,70%	8,00%	
			0,70%	7,00%	
6	Органо-минеральный грунт 50%	Песок 50%	Гашеная известь 4%	Портланд-цемент 9,00% + 5% воды	Вода 17,00%
				9,00%	
				8,00%	
				7,00%	
7	Органо-минеральный грунт 50%	Песок 50%	Битумная эмульсия 5%	Портланд-цемент 9,00%	Вода 17,00%
8	Органо-минеральный грунт 50%	Песок 50%	Битумная эмульсия 5%	Гашеная известь 12% Портландцемент 9,00%	Вода 17,00%
9	Органо-минеральный грунт 100%	Полимерная добавка 1,00%	Портландцемент 10,00%	Вода 26,00%	
		0,70%	10,00%		
		0,80%	9,00%		
		0,80%	8,00%		
10	Суглинок с мелом 100%	Портландцемент 4,00 %	Полимерная добавка 0,50 %	Вода 22,00%	
		5,00%	0,60%		
		5,00%	0,50%		

№ смеси	Исходные материалы (процентное содержание вяжущих веществ взяты от суммарной массы грунтов 100%)				
		6,00%	0,60%		
		6,00%	0,70%		
11	Органо-минеральный грунт 75%	Песок 25%	Портландцемент 9,50%	Полимерная добавка 0,95%	Вода 21,00%
			9,50%	0,60%	
			8,50%	0,80%	
			7,50%	0,80%	
12	Органо-минеральный грунт 50%	Суглинок с мелом 50%	Портландцемент 9,60%	Полимерная добавка 0,95%	Вода 24,00%
			9,60%	0,60%	
			8,50%	0,80%	
			7,50%	0,80%	
13	Органо-минеральный грунт 75%	Суглинок с мелом 25%	Портландцемент 9,90%	Полимерная добавка 0,95%	Вода 25,00%
			9,90%	0,65%	
			8,80%	0,80%	
			7,70%	0,80%	
14	Суглинок легкий пылеватый тугопластичный 100%	Портландцемент 7,00%	Полимерная добавка 0,80%	Вода 29,00%	
15	Песок 100%	Портландцемент 5,5%	Полимерная добавка 0,55%	Вода 9,6%	
16	Песок 100%	Портландцемент 5,5%	Вода 9,6%		
17	Песок 100%	Портландцемент 5,5%	Полимерная добавка(2) 0,55%	Вода 9,5%	
18	Песок 100%	Портландцемент 5,5%	Полимерная добавка (3) 0,55%	Вода 9,5%	
19	Органо-минеральный грунт 100%	Портландцемент 9,0%	Полимерная добавка (2) 0,8%	Вода 26,00%	

№ смеси	Исходные материалы (процентное содержание вяжущих веществ взяты от суммарной массы грунтов 100%)				
20	Органо-минеральный грунт 100%	Портландцемент 9,0%	Полимерная добавка (2) 1,0%	Вода 26,00%	
21	Органо-минеральный грунт 100%	Портландцемент 9,0%	Полимерная добавка (3) 0,8%	Вода 26,00%	
22	Органо-минеральный грунт 100%	Портландцемент 9,0%	Полимерная добавка (3) 1,0%	Вода 26,00%	
23	Органо-минеральный грунт 75%	Песок 25%	Портландцемент 8,5%	Полимерная добавка (2) 0,80%	Вода 21,00%
24	Органо-минеральный грунт 75%	Песок 25%	Портландцемент 8,5%	Полимерная добавка(2) 0,95%	Вода 21,00%
25	Органо-минеральный грунт 75%	Песок 25%	Портландцемент 8,5%	Полимерная добавка (3) 0,80%	Вода 21,00%
26	Органо-минеральный грунт 75%	Песок 25%	Портландцемент 8,5%	Полимерная добавка (3) 0,95%	Вода 21,00%
27	Органо-минеральный грунт 50%	Песок 50%	Портландцемент 8,00%	Полимерная добавка (2) 0,70%	Вода 17,00%
28	Органо-минеральный грунт 50%	Песок 50%	Портландцемент 8,00%	Полимерная добавка (2) 0,90%	Вода 17,00%
29	Органо-минеральный грунт 50%	Песок 50%	Портландцемент 8,00%	Полимерная добавка (3) 0,70%	Вода 17,00%
30	Органо-минеральный грунт 50%	Песок 50%	Портландцемент 8,00%	Полимерная добавка (3) 0,90%	Вода 17,00%
31	Суглинок с мелом 100%	Портландцемент 6,00%	Полимерная добавка (2) 0,60%	Вода 22,00%	

№ смеси	Исходные материалы (процентное содержание вяжущих веществ взяты от суммарной массы грунтов 100%)				
32	Суглинок с мелом 100%	Портландцемент 6,00%	Полимерная добавка (2) 0,50%	Вода 22,00%	
33	Суглинок с мелом 100%	Портландцемент 6,00%	Полимерная добавка (3) 0,50%	Вода 22,00%	
34	Суглинок с мелом 100%	Портландцемент 6,00%	Полимерная добавка (3) 0,60%	Вода 22,00%	
35	Суглинок с мелом 100%	Портландцемент 6,00%	Вода 22,00%		
36	Суглинок с мелом 100%	Портландцемент 6,00%	Полимерная добавка 0,60%	Вода 22,00%	
37	Органо- минеральный грунт 50%	Суглинок с мелом 50%	Портландцемент 9,5%	Полимерная добавка (2) 0,95%	Вода 24,00%
38	Органо- минеральный грунт 50%	Суглинок с мелом 50%	Портландцемент 9,5%	Полимерная добавка (3) 0,95%	Вода 24,00%

При выборе способа укрепления грунта необходимо учитывать его минералогический и химический состав [1].

В органоминеральных грунтах преобладают вторичные слоистые алюмосиликаты, представленные в виде различных тонкодисперсных частиц грунта, для которых характерна значительная гидрофильность (способность хорошо впитывать воду), высокая поглотительная (обменная) способность и возможность нести электрический заряд [9, 13, 55]. Для решения задачи по повышению прочности, водостойкости и морозостойкости органоминеральных грунтов необходимо воздействовать на тонкодисперсную часть грунта.

Для достижения поставленной цели необходима разработка методики укрепления грунта, которая позволяет при оптимальной дозировке вяжущего вещества регулировать его физико-химическую активность, а также

обеспечивает формирование прочной, монолитной структуры стабилизированного грунта [64].

Содержание вяжущих веществ для укрепления грунта было выбрано подбором с учетом экономической целесообразности расхода вяжущих, а расход полимерных добавок принят согласно рекомендации производителя.

### 3.3. Физико-механические характеристики укрепленных оснований

Прочность образцов определялась путем определения предела прочности на сжатие в соответствии с требованиями ГОСТ 23558-94 [34] и ГОСТ 10180-2012 [24].

У образцов (смеси №1 – №11) прочность на сжатие определялась в промежуточном (7 суток) и проектном (28 суток) возрасте. Результаты испытаний приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

#### Результаты испытаний

Исходный материал	№ смеси	Состав смеси	Масса образца, кг	Прочность образца	
				Отдельного, МПа	Среднее, МПа
Органоминеральный грунт 30% + Песок 70%	1	7 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 8,70%	2,024	2,41	2,4
			2,055	2,38	
		Рецепт №2			
		Портландцемент 7,80%	2,027	2,08	2,07
			1,955	2,06	
		Рецепт №3			
		Портландцемент 6,90%	2,048	1,64	1,66
			2,037	1,67	
		28 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 8,70%	2,026	2,27	2,28
			1,995	2,29	
		Рецепт №2			
		Портландцемент 7,80%	2,03	1,79	1,8
			2,057	1,8	
		Рецепт №3			

Исходный материал	№ смеси	Состав смеси	Масса образца, кг	Прочность образца	
				Отдельного, МПА	Среднее, МПА
		Портландцемент 6,90%	2,06 1,99	1,43 1,43	1,43
Органоминеральный грунт 30% + Песок 70%	2	7 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 8,70%	2,004	2,31	2,32
		Полимерная добавка 0,90%	1,993	2,33	
		28 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 8,70%	2,052	2,83	2,84
		Полимерная добавка 0,90%	2,039	2,85	
Органоминеральный грунт 100% + Гашенная известь 4%	3	7 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 10,00%	1,5	0,5	0,51
			1,504	0,51	
		Рецепт №2			
		Портландцемент 9,00%	1,744	0,47	0,48
			1,736	0,49	
		Рецепт №3			
		Портландцемент 6,80%	1,544	0,46	0,45
			1,599	0,44	
		28 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 10,00%	1,693	0,85	0,84
			1,688	0,83	
		Рецепт №2			
		Портландцемент 9,00%	1,803	0,15	0,16
1,792	0,17				
Рецепт №3					
Портландцемент 6,80%	1,624	0,42	0,42		
	1,613	0,42			
Органоминеральный грунт 50% + Песок 50%	4	7 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 9,00%	1,973	1,04	1,04
			1,922	1,04	
		Рецепт №2			
		Портландцемент 8,00%	1,889	1,03	1,03
			1,692	1,02	
		Рецепт №3			
Портландцемент	1,992	1,03	1,03		

Исходный материал	№ смеси	Состав смеси	Масса образца, кг	Прочность образца	
			Отдельного, МПА	Среднее, МПА	
		7,00%	1,916	1,02	
28 суток					
Рецепт №1					
Портландцемент 9,00%	1,94	2,19	2,2		
	1,979	2,2			
Рецепт №2					
Портландцемент 8,00%	1,948	2,42	2,42		
	1,991	2,41			
Рецепт №3					
Портландцемент 7,00%	1,965	2,15	2,16		
	1,997	2,17			
Органоминеральный грунт 50% + Песок 50%	5	7 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 9,00%	1,962	1,92	1,92
		Полимерная добавка 0,90%	1,958	1,91	
		Рецепт №2			
		Портландцемент 9,00%	1,949	1,86	1,85
		Полимерная добавка 0,60%	1,953	1,83	
		Рецепт №3			
		Портландцемент 8,00%	1,954	1,87	1,86
		Полимерная добавка 0,70%	1,953	1,85	
		Рецепт №4			
		Портландцемент 7,00%	1,932	1,48	1,5
		Полимерная добавка 0,70%	1,937	1,51	
		28 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 9,00%	1,911	2,01	2,02
		Полимерная добавка 0,90%	1,885	2,03	
		Рецепт №2			
		Портландцемент 9,00%	1,894	2	2

Исходный материал	№ смеси	Состав смеси	Масса образца, кг	Прочность образца	
				Отдельного, МПА	Среднее, МПА
		Полимерная добавка 0,60%	1,906	1,99	
		Рецепт №3			
		Портландцемент 8,00%	1,88	1,97	1,97
		Полимерная добавка 0,70%	1,891	1,97	
		Рецепт №4			
		Портландцемент 7,00%	1,943	1,64	1,65
		Полимерная добавка 0,70%	1,971	1,65	
Органо-минеральный грунт 50% + Песок 50% + Гашенная известь 4%	6	7 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 9,00%	1,887	1,1	1,11
			1,919	1,11	
		Рецепт № 1,1			
		Портландцемент 9,00%+5% воды	1,893	0,98	0,99
			1,915	1	
		Рецепт №2			
		Портландцемент 8,00%	1,955	0,98	0,98
			1,921	0,97	
		Рецепт №3			
		Портландцемент 7,00%	1,955	0,85	0,86
			1,921	0,86	
		28 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 9,00%	1,948	1,22	1,22
			1,892	1,21	
		Рецепт № 1,1			
		Портландцемент 9,00%+5% воды	1,978	1,48	1,49
			1,95	1,5	
		Рецепт №2			
		Портландцемент 8,00%	1,98	1,17	1,18
			1,917	1,19	
		Рецепт №3			
		Портландцемент 7,00%	1,965	0,97	0,97
			1,948	0,96	
		Органо-	7	7 суток	



Исходный материал	№ смеси	Состав смеси	Масса образца, кг	Прочность образца	
				Отдельного, МПА	Среднее, МПА
минеральный грунт 50% + Песок 50% + Битумная эмульсия 5%		Рецепт №1			
		Портландцемент 9,00%	1,964	0,92	0,92
			1,936	0,91	
		28 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 9,00%	1,978	1,33	1,33
			1,968	1,33	
Органо-минеральный грунт 50% + Песок 50% + Битумная эмульсия 5% + Гашенная известь12%	8	7 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 9,00%	1,94	1,19	1,18
			1,972	1,17	
		28 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 9,00%	1,955	1,38	1,37
1,967	1,36				
Органо-минеральный грунт 100%	9	7 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 10,00%	1,993	0,94	0,94
		Полимерная добавка 1,00%	1,987	0,94	
		рецепт №2			
		Портландцемент 10,0%	1,983	0,9	0,89
		Полимерная добавка 0,70%	1,991	0,88	
		рецепт №3			
		Портландцемент 9,00%	1,971	1,08	1,08
		Полимерная добавка 0,80%	1,979	1,08	
		рецепт №4			
		Портландцемент 8,00%	1,964	0,81	0,82
		Полимерная добавка 0,80%	1,967	0,83	
		28 суток			
		рецепт №1			
		Портландцемент 10,00%	1,815	1,22	1,21
		Полимерная добавка 1,00%	1,821	1,19	
		рецепт №2			

Исходный материал	№ смеси	Состав смеси	Масса образца, кг	Прочность образца	
				Отдельного, МПА	Среднее, МПА
		Портландцемент 10,00%	1,751	1,08	1,09
		Полимерная добавка 0,70%	1,777	1,1	
		рецепт №3			
		Портландцемент 9,00%	1,816	1,24	1,24
		Полимерная добавка 0,80%	1,811	1,23	
		рецепт №4			
		Портландцемент 8,00%	1,829	0,99	1
		Полимерная добавка 0,80%	1,832	1,01	
		Суглинок с мелом 100%	10	7 суток	
Рецепт №1					
Портландцемент 6,00%	1,939			1,18	1,24
Полимерная добавка 0,70%	1,954			1,3	
Рецепт №2					
Портландцемент 6,00%	1,948			1,09	1,06
Полимерная добавка 0,60%	1,92			1,03	
Рецепт №3					
Портландцемент 5,00%	1,889			1,07	1,06
Полимерная добавка 0,60%	1,869			1,05	
Рецепт №4					
Портландцемент 5,00%	1,878			0,95	0,96
Полимерная добавка 0,50%	1,793			0,97	
Рецепт №5					
Портландцемент 4,00%	1,887			0,63	0,64
Полимерная добавка 0,50%	1,897			0,64	
28 суток					
Рецепт №1					

Исходный материал	№ смеси	Состав смеси	Масса образца, кг	Прочность образца	
				Отдельного, МПА	Среднее, МПА
		Портландцемент 6,00%	1,987	2,16	2,19
		Полимерная добавка 0,70%	1,991	2,21	
		Рецепт №2			
		Портландцемент 6,00%	1,963	1,98	2,01
		Полимерная добавка 0,60%	1,949	2,04	
		Рецепт №3			
		Портландцемент 5,00%	2,029	1,72	1,76
		Полимерная добавка 0,60%	2,008	1,79	
		Рецепт №4			
		Портландцемент 5,00%	1,978	1,47	1,45
		Полимерная добавка 0,50%	1,989	1,42	
		Рецепт №5			
		Портландцемент 4,00%	1,996	1,26	1,28
		Полимерная добавка 0,50%	1,999	1,29	
Органоминеральный грунт 75% + Песок 25%	11	7 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 9,58%	1,983	1,02	1,01
		Полимерная добавка 0,96%	1,979	1	
		Рецепт №2			
		Портландцемент 9,50%	1,971	0,99	0,99
		Полимерная добавка 0,60%	1,974	0,98	
		Рецепт №3			
		Портландцемент 8,50%	1,955	1,24	1,25
		Полимерная добавка 0,80%	1,961	1,26	
		Рецепт №4			
		Портландцемент 7,5%	1,921	0,81	0,83
		Полимерная добавка	1,963	0,84	

Исходный материал	№ смеси	Состав смеси	Масса образца, кг	Прочность образца	
				Отдельного, МПА	Среднее, МПА
		0,80%			
		28 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 9,50%	1,843	1,7	1,7
		Полимерная добавка 0,95%	1,813	1,69	
		Рецепт №2			
		Портландцемент 9,50%	1,827	1,83	1,83
		Полимерная добавка 0,60%	1,796	1,83	
		Рецепт №3			
		Портландцемент 8,50%	1,873	1,64	1,66
		Полимерная добавка 0,75%	1,841	1,67	
		Рецепт №4			
		Портландцемент 7,50%	1,907	1,44	1,45
		Полимерная добавка 0,75%	1,874	1,46	

Кинетика твердения образцов на 7 и 28 сутки приведена на рисунке 3.6.

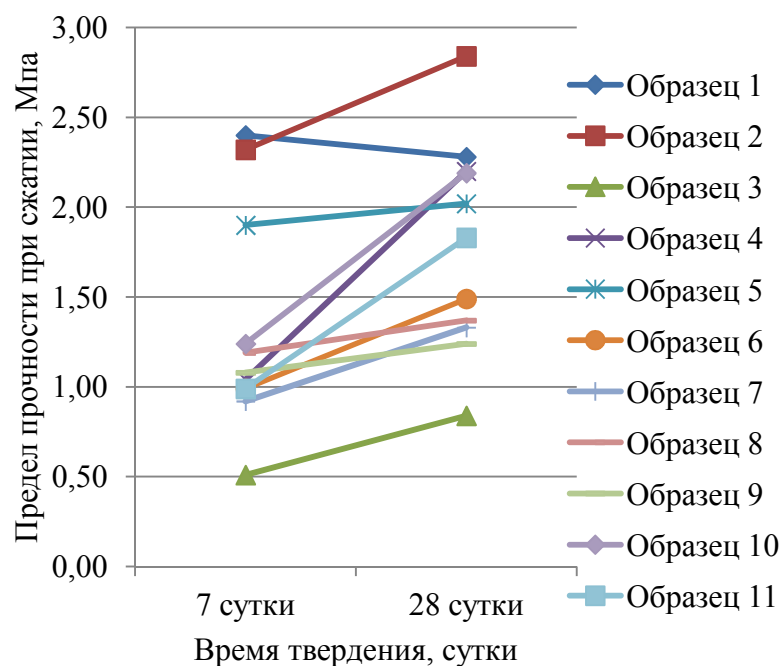


Рисунок 3.6 – Кинетика твердения образцов

По результатам проведенного исследования получены характеристики предела прочности водонасыщенных образцов при сжатии в возрасте 28 суток:

- Образцы 1, 2, 4, 5, 10 показали на 28 сутки предел прочности при сжатии более 2,0 МПа, что в соответствии с требованием ГОСТ 23558-94 [34] соответствует марке по прочности М20. Данный материал может быть использован для устройства оснований дорог с переходным типом дорожной одежды.
- Образцы 6, 7, 8, 9, 11 показали на 28 сутки предел прочности при сжатии более 1,0 МПа, что в соответствии с требованием ГОСТ 23558-94 [34] соответствует марки по прочности М10. Данный материал может быть использован в качестве дополнительного слоя основания дорог с облегченным типом дорожной одежды.
- У образца 3 показания на 28 сутки ниже 1 МПа.

Наиболее высокие результаты проанализированы детально. Рассмотрим зависимость предела прочности при сжатии от содержания цемента для образцов 1, 2, 4, 5, 10. Результаты представлены на рисунке 3.7.

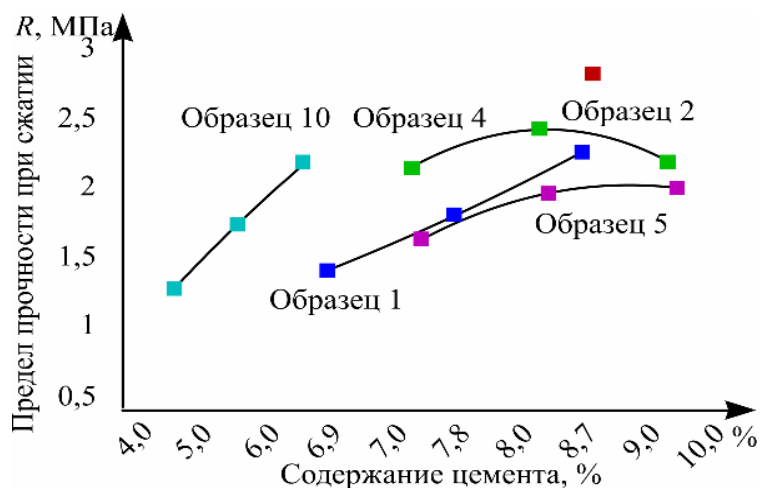


Рисунок 3.7 – Зависимость предела прочности при сжатии от содержания цемента

Результаты проведенных испытаний показали следующее.

- У образца 1 введение цемента в объеме 8,70% от массы образца увеличивает прочность образца на 59,44% по сравнению с образцом с

минимальным подобранным количеством вводимого цемента (6,90% от массы образца).

– У образца 4 введение наибольшего выбранного количества цемента (9,00%) не позволяет добиться максимальной прочности. Уменьшая количество вносимого цемента на 11,2% (8,00% от массы образца), прочность увеличивается на 10%.

– У образца 5 введение наибольшего выбранного количества цемента (9,00%) совместно с наибольшим количеством полимерной добавки (0,90%), обеспечило наибольшую прочность образцов.

Также стоит отметить, что снижение количества вносимой полимерной добавки на 33% при одинаковом количестве цемента значительно не повлияло на прочность (потеря прочности составила 1%).

– У образца 10 введение наибольшего выбранного количества цемента (6,00%) совместно с наибольшим количеством полимерной добавки (0,70%) обеспечило наибольшую прочность образцов. Снижение количества вносимой полимерной добавки на 16% при одинаковом количестве цемента снизило прочность образца на 8%.

Зависимость предела прочности при сжатии от содержания цемента для образцов 6, 7, 8, 9, 11 приведена на рисунке 3.8.

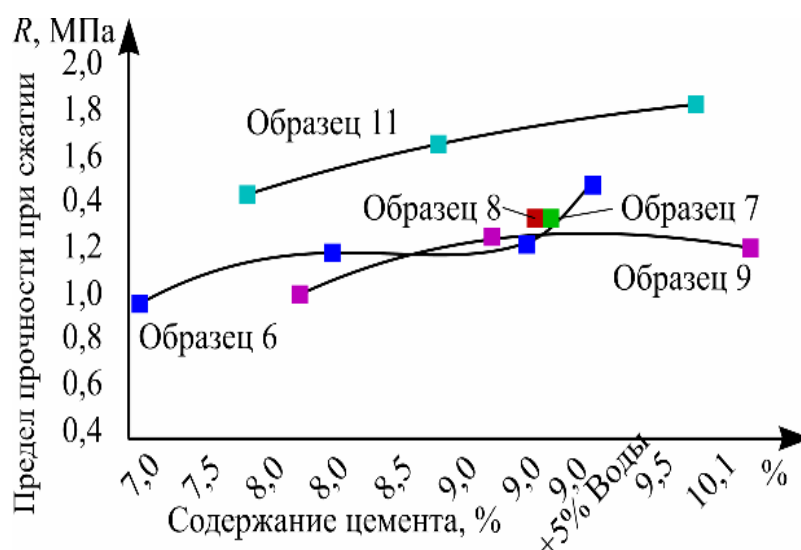


Рисунок 3.8 – Зависимость предела прочности при сжатии от содержания цемента

Результаты проведенных испытаний показали:

- У образца 6 введение наибольшего подобранного количества цемента (9,00%) совместно с добавлением 5% воды обеспечило прирост прочности образцов на 22% по сравнению с образцами с тем же содержанием цемента без добавления воды. Снижение количества вносимого цемента на 11% приводит к снижению прочности на 20%.
- У образца 7 и 8 введение цемента в количестве 9,00% обеспечило необходимый предел прочности при сжатии для марки М10.
- У образца 9 введение наибольшего подобранного количества цемента (10,00%) совместно с наибольшим количеством полимерной добавки (1,00%) не обеспечило наибольшую прочность (1,21 МПа). Уменьшение количества вносимого цемента на 10,8% и полимерной добавки на 19,8% увеличило прочность образцов на 2,48% (1,24 МПа).
- У образца 11 введение наибольшего подобранного количества цемента (9,50%) совместно с наибольшим количеством полимерной добавки (0,95%) не обеспечило наибольшую прочность (1,7 МПа). Уменьшение количества вносимой полимерной добавки на 33% при том же содержании цемента увеличило прочность образцов на 7,64% (1,83 МПа).

У образцов смеси №12 – №14 прочность на сжатие определяли на 7 суток. Результаты приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Результаты испытаний

Исходный материал	№ смеси	Состав смеси	Масса образца, кг	Прочность образца	
				Отдельного, МПА	Среднее, МПА
Органо-минеральный грунт 50% + Суглинок с мелом 50%	12	7 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 9,60%	1,785	0,95	0,98
		Полимерная добавка 0,95%	1,786	1	
		Рецепт №2			
		Портландцемент 9,60%	1,794	0,88	0,88

Исходный материал	№ смеси	Состав смеси	Масса образца, кг	Прочность образца	
				Отдельного, МПА	Среднее, МПА
		Полимерная добавка 0,60%	1,754	0,87	
Рецепт №3					
Портландцемент 8,50%	1,834	0,72	0,75		
Полимерная добавка 0,80%	1,846	0,77			
Рецепт №4					
Портландцемент 7,50%	1,782	0,66	0,68		
Полимерная добавка 0,80%	1,769	0,7			
Органоминеральный грунт 75% + Суглинок с мелом 25%	13	7 суток			
		рецепт №1			
		Портландцемент 9,90%	1,633	0,67	0,63
		Полимерная добавка 0,95%	1,707	0,59	
		рецепт №2			
		Портландцемент 9,90%	1,752	0,7	0,71
		Полимерная добавка 0,65%	1,743	0,72	
		рецепт №3			
		Портландцемент 8,80%	1,696	0,67	0,67
		Полимерная добавка 0,80%	1,706	0,66	
		рецепт №4			
		Портландцемент 7,70%	1,789	0,78	0,76
		Полимерная добавка 0,80%	1,748	0,74	
Суглинок темный 100%	14	7 суток			
		Рецепт №1			
		Портландцемент 7,00%	1,671	2,09	2,11
		Полимерная добавка 0.80%	1,677	2,13	

Рассмотрим зависимость предела прочности при сжатии на 7 сутки от содержания цемента для образцов 12, 13, 14. Результаты приведены на рисунке 3.9.



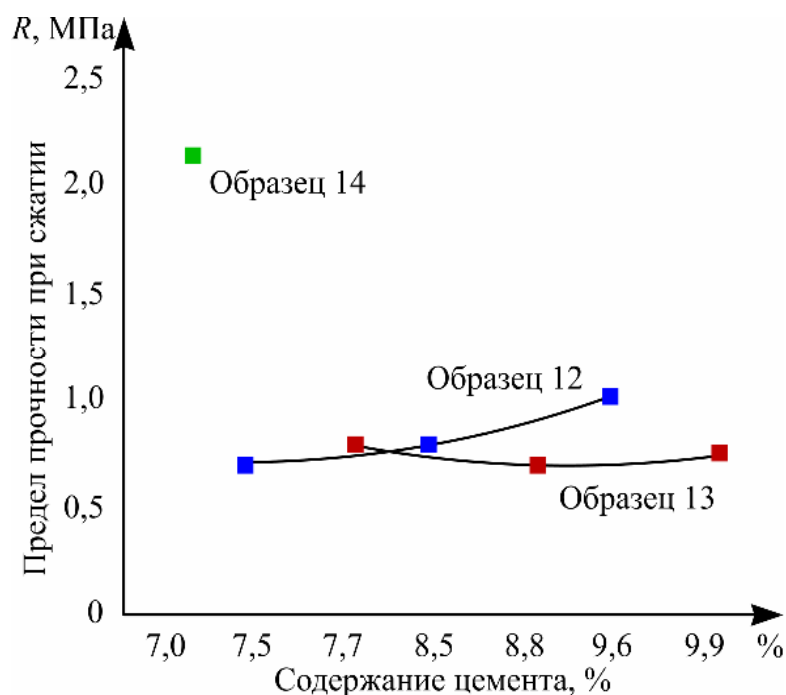


Рисунок 3.9 – Зависимость предела прочности при сжатии от содержания цемента

Результаты проведенных испытаний показали:

- У образца 12 введение наибольшего подобранного количества цемента (9,60%) совместно с наибольшим количеством полимерной добавки (0,95%) обеспечило наибольшую прочность (0,98 МПа). Уменьшение количества вносимой полимерной добавки на 8,33% при том же содержании цемента снизило прочность образцов на 10,20% (0,88).
- У образца 13, напротив, введение наименьшего подобранного количества цемента (7,70%) совместно со средним количеством полимерной добавки (0,80%) обеспечило наибольшую прочность (0,76 МПа). Увеличение количества вносимого цемента привело к снижению прочности образцов.
- У образца 14 подобранный цемент (7,00%) совместно с полимерной добавкой (0,80%) обеспечили предел прочности при сжатии более 2,0 МПа, что является высоким результатом и соответствует марки М20 уже на 7 сутки.

У образцов (смеси №15 – №38) прочность на сжатие определяли на 28 сутки. Результаты приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

## Результаты испытаний

Исходный материал	№ смеси	Состав смеси	Масса образца, кг	Разрушающая нагрузка, МПА	Среднее, МПА
Песок 100%	15	Портландцемент 5.5%	2,133	2,05	2,06
		Полимерная добавка 0.50%	2,128	2,07	
	16	Вода 9,5%	2,067	1,69	1,70
			2,058	1,70	
Песок 100%	17	Портландцемент 5.5%	2,126	1,96	1,97
		Полимерная добавка(2) 0.50%	2,129	1,97	
	18	Вода 9,5%	2,114	1,59	1,60
			2,120	1,61	
Органо-минеральный грунт 100%	19	Портландцемент 9%	1,781	0,44	0,44
		Полимерная добавка(2) 0.8%	1,784	0,44	
	20	Вода 26,00%	1,751	0,73	0,73
			1,756	0,72	
Органо-минеральный грунт 100%	21	Портландцемент 9%	1,752	0,55	0,56
		Полимерная добавка(3) 0.8%	1,694	0,56	
	22	Вода 26,00%	1,714	0,48	0,48
			1,631	0,47	
Органо-минеральный грунт 75% + Песок 25%	23	Портландцемент 8,5%	1,835	1,06	1,06
		Полимерная добавка(2) 0.80%	1,855	1,06	
	24	Вода 21%	1,896	0,93	0,93
			1,812	0,93	

Исходный материал	№ смеси	Состав смеси	Масса образца, кг	Разрушающая нагрузка, МПА	Среднее, МПА
Органо-минеральный грунт 75% + Песок 25%	25	Портландцемент 8,5%	1,878	0,74	0,74
		Полимерная добавка(3) 0,80% Вода 21%	1,891	0,73	
	26	Портландцемент 8,5%	1,887	0,96	0,96
		Полимерная добавка(3) 0,95% Вода 21%	1,896	0,96	
Органо-минеральный грунт 50% + Песок 50%	27	Портландцемент 8,00%	2,023	1,16	1,18
		Полимерная добавка(2) 0,70% Вода 17,00%	2,020	1,19	
	28	Портландцемент 8,00%	1,959	1,38	1,39
		Полимерная добавка(2) 0,90% Вода 17,00%	2,005	1,40	
Органо-минеральный грунт 50% + Песок 50%	29	Портландцемент 8,00%	1,994	1,12	1,10
		Полимерная добавка(3) 0,70% Вода 17,00%	1,984	1,07	
	30	Портландцемент 8,00%	1,966	1,70	1,71
		Полимерная добавка(3) 0,90% Вода 17,00%	2,007	1,72	
Суглинок 100%	31	Портландцемент 6,00%	1,961	2,04	2,03
		Полимерная добавка(2) 0,60% Вода 22,0%	1,951	2,01	
	32	Портландцемент 6,00%	1,943	1,14	1,13
		Полимерная добавка(2) 0,50% Вода 22,0%	1,949	1,11	
Суглинок 100%	33	Портландцемент 5,00%	1,641	1,87	1,89
		Полимерная добавка(3) 0,50% Вода 22,0%	1,628	1,90	
	34	Портландцемент 6,00% Полимерная	1,642	1,44	1,45

Исходный материал	№ смеси	Состав смеси	Масса образца, кг	Разрушающая нагрузка, МПа	Среднее, МПа
		добавка(3) 0,60% Вода 22,0%	1,639	1,46	
Суглинок 100%	35	Портландцемент 6,00% Вода 22,0%	2,023	1,72	1,75
			2,019	1,78	
	36	Портландцемент 6,00% Полимерная добавка 0,60% Вода 22,0%	1,993	2,33	2,32
			1,997	2,30	
Органо- минеральный грунт 50% + Суглинок 50%	37	Портландцемент 9,5% Полимерная добавка(2) 0,95% Вода 24,00%	1,902	1,55	1,55
			1,899	1,54	
	38	Портландцемент 9,5% Полимерная добавка(3) 0,95% Вода 24,00%	1,874	1,35	1,33
			1,871	1,31	

Результаты проведенных испытаний показали следующее.

- Образцы 15, 31, 36 имели на 28 сутки предел прочности при сжатии более 2,0 МПа, что в соответствии с требованием ГОСТ 23558-94 [34] соответствует марке по прочности М20.
- Образцы 16, 17, 18, 23, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 37, 38 имели на 28 сутки предел прочности при сжатии более 1,0 МПа, что в соответствии с требованием ГОСТ 23558-94 [34] соответствует марки по прочности М10.
- У образцов 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26 прочность на 28 сутки ниже 1,0 МПа.

#### **3.4. Морозостойкость укрепленных оснований и рекомендации по применению укрепленных материалов**

Важнейшим нормативным показателем является морозостойкость. Данный показатель особенно актуален для укрепленных грунтов при их применении в условиях частых переходов температуры через 0<sup>0</sup>С. Одной из задач экспериментальных исследований было определение морозостойкости

грунтов, укрепленных цементом и полимерной добавкой. Были подобраны несколько вариантов смесей с оптимальным, не оптимальным, а также близкие к предельно допустимым значениям по содержанию входящих компонентов. Процесс изготовления образцов описан в разделе 3.1 данной работы.

Испытания на морозостойкость производили на двух образцах для каждого состава. Морозостойкость укрепленных грунтов определялась после твердения образцов в течение 28 суток (во влажном месте производилось полное водонасыщение). Затем образцы подвергались замораживанию-оттаиванию. Для получения более полной информации количество циклов попеременного замораживания-оттаивания назначалось 5, 10, 15, 25. Продолжительность одного цикла составляла 8 часов (4 часа в морозильной камере, затем 4 часа в воде при комнатной температуре).

Испытания проводились с учетом требований ГОСТ 10180-2014 [24] и других нормативно-технических документов. Испытания на прочность проводилось на прессе испытательном ДТС-0,6-50/100. Далее рассчитывали коэффициент морозостойкости. Результаты проведенных исследований образцов (1 – 9) приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Результаты по морозостойкости

№ смеси	Состав смеси	5 циклов	10 циклов	15 циклов	25 циклов
Смесь 1	Портландцемент 8,70%	0,80	0,64	-	-
	Портландцемент 7,80%	1,27	0,84	0,61	-
	Портландцемент 6,90%	1,18	0,75	0,59	-
Смесь 2	Портландцемент 8,70% Полимерная добавка 0,90%	0,82	0,80	0,65	-
Смесь 3	Портландцемент 10,00 %	1,05	0,98	0,40	-
	Портландцемент 9,0%	0,50	-	-	-
	Портландцемент 6,80%	0,47	-	-	-
Смесь 4	Портландцемент 9,00%	0,45	-	-	-
	Портландцемент 8,00%	0,44	-	-	-
	Портландцемент 7,00%	0,69	0,43	-	-

№ смеси	Состав смеси	5 циклов	10 циклов	15 циклов	25 циклов
Смесь 5	Портландцемент 9,0% Полимерная добавка 0,90%	0,72	0,69	0,58	-
	Портландцемент 9,00% Полимерная добавка 0,60%	0,66	0,54	-	-
	Портландцемент 8,00% Полимерная добавка 0,70%	0,82	0,78	0,60	-
	Портландцемент 7,00% Полимерная добавка 0,70%	0,99	0,73	0,53	-
Смесь 6	Портландцемент 9,00%	0,91	0,83	0,68	0,51
	Портландцемент 9,00%+5% воды	1,26	0,85	0,72	-
	Портландцемент 8,00%	0,60	-	-	-
	Портландцемент 7,00%	1,15	0,61	-	-
Смесь 7	Портландцемент 9,00%	-	0,82	1,00	1,03
Смесь 8	Портландцемент 9,0%	-	0,99	0,60	-
Смесь 9	Портландцемент 10,00% Полимерная добавка 1,00%	0,94	0,72	0,67	0,51
	Портландцемент 10,00% Полимерная добавка 0,70%	0,99	0,83	0,72	0,62
	Портландцемент 9,00% Полимерная добавка 0,80%	0,62	-	-	-
	Портландцемент 8,00% Полимерная добавка 0,80%	0,70	0,66	0,51	-

У образца 10 в рамках данного исследования испытания на морозостойкость не проводилось. У образца (11) результаты приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Результаты по морозостойкости

№ смеси	Состав смеси	5 циклов	10 циклов	15 циклов	25 циклов
Смесь 11	Портландцемент 9,50% Полимерная добавка 0,95%	0,93	0,80	0,64	-
	Портландцемент 9,50% Полимерная добавка 0,60%	0,91	0,78	0,61	-
	Портландцемент 8,50% Полимерная добавка 0,80%	0,62	-	-	-
	Портландцемент 7,50% Полимерная добавка 0,80%	0,87	0,59	-	-

У образцов (12 – 14) в рамках данного исследования испытания на морозостойкость не проводились. У образцов (15 – 38) результаты приведены в табл. 3.12.

Таблица 3.12

Результаты по морозостойкости

№ смеси	Состав смеси	5 циклов	10 циклов	15 циклов	25 циклов
Смесь 15	Портландцемент 5.5% Полимерная добавка 0.50% Вода 9,5%	1,18	1,01	1,19	1,25
Смесь 16	Портландцемент 5.5% Вода 9,5%	0,84	1,01	1,07	-
Смесь 17	Портландцемент 5.5% Полимерная добавка(2) 0.50% Вода 9,5%	0,97	0,93	0,73	1,07
Смесь 18	Портландцемент 5.5% Полимерная добавка(3) 0.55% Вода 9,5%	1,03	1,06	1,03	1,18
Смесь 19	Портландцемент 9% Полимерная добавка(2) 0.8% Вода 26,00%	1,14	1,18	-	-
Смесь 20	Портландцемент 9% Полимерная добавка(2) 1,0% Вода 26,00%	0,74	0,41	-	-
Смесь 21	Портландцемент 9% Полимерная добавка(3) 0.8% Вода 26,00%	1,13	0,71	1,02	0,84
Смесь 22	Портландцемент 9% Полимерная добавка(3) 1,0% Вода 26,00%	1,10	1,02	1,15	-
Смесь 23	Портландцемент 8,5% Полимерная добавка(2) 0.80% Вода 21%	1,13	0,87	0,78	0,68
Смесь 24	Портландцемент 8.5% Полимерная добавка(2) 0,95% Вода 21%	0,72	0,76	1,12	0,58
Смесь 25	Портландцемент 8.5% Полимерная добавка(3) 0.80% Вода 21%	1,47	0,69	0,80	0,65
Смесь 26	Портландцемент 8.5% Полимерная добавка(3) 0,95% Вода 21%	1,05	0,73	0,99	0,64
Смесь 27	Портландцемент 8,00% Полимерная добавка(2) 0,70% Вода 17,00%	1,50	1,42	1,52	0,60
Смесь 28	Портландцемент 8,00% Полимерная добавка(2) 0,90% Вода 17,00%	1,04	0,94	0,76	0,68

№ смеси	Состав смеси	5 циклов	10 циклов	15 циклов	25 циклов
Смесь 29	Портландцемент 8,00% Полимерная добавка(3) 0,70% Вода 17,00%	1,34	1,16	1,08	нет
Смесь 30	Портландцемент 8,00% Полимерная добавка(3) 0,90% Вода 17,00%	0,95	1,03	0,65	-
Смесь 31	Портландцемент 6,00% Полимерная добавка(2) 0,60% Вода 22,0%	1,00	0,80	0,76	-
Смесь 32	Портландцемент 6,00% Полимерная добавка(2) 0,50% Вода 22,0%	1,54	2,37	0,65	-
Смесь 33	Портландцемент 6,00 % Полимерная добавка(3) 0,50% Вода 22,0%	0,87	0,69	0,80	-
Смесь 34	Портландцемент 6,00% Полимерная добавка(3) 0,600% Вода 22,0%	1,22	1,06	0,60	-
Смесь 35	Портландцемент 6,00% Вода 22,0%	0,95	0,94	0,75	-
Смесь 36	Портландцемент 6,00% Полимерная добавка 0,60% Вода 22,0%	0,78	0,50	-	-
Смесь 37	Портландцемент 9,5% Полимерная добавка(2) 0,95% Вода 24,00%	1,05	0,63	-	-
Смесь 38	Портландцемент 9,5% Полимерная добавка(3) 0,95% Вода 24,00%	1,20	0,95	0,70	-

Анализ полученных результатов позволяет определить возможности использования укрепленных грунтов в соответствии с требованиями ГОСТ 23558-94 [34]. Получены следующие выводы.

– Для районов с температурой от 0<sup>0</sup>С до -5<sup>0</sup>С требуемая марка по морозостойкости для основания переходного типа дорожной одежды не менее F5. Образцы 1 (с содержанием цемента 8,70%, 7,80%, 6,90%), 2 (с содержанием цемента 8,70%), 5 (с содержанием цемента 8,00%, 7,00%), 6 (с содержанием цемента 9,00%, 7,00%), 9 (с содержанием цемента 10,00%), 11 (с содержанием цемента 9,50%, 7,50%) выдержали требуемое число циклов попеременного замораживания и оттаивания при допустимом снижении



прочности не более чем на 25% в проектном возрасте. Образцы 15, 16, 17, 18, 23, 27-38 (содержание цемента смотреть табл. 3.12) также выдержали требуемое число циклов попеременного замораживания и оттаивания при допустимом снижении прочности не более чем на 25% в проектном возрасте.

– Для районов с температурой от  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $-15^{\circ}\text{C}$  требуемая марка по морозостойкости для основания переходного типа дорожной одежды не менее F10. Образцы 1 (с содержанием цемента 7,80%, 6,90%), 2 (с содержанием цемента 8,70%), 5 (с содержанием цемента 8,00%), 6 (с содержанием цемента 9,00%), 7 и 8 (с содержанием цемента 9,00%), 9 (с содержанием цемента 10,00%), 11 (с содержанием цемента 9,50%) выдержали требуемое число циклов попеременного замораживания и оттаивания при допустимом снижении прочности не более чем на 25% в проектном возрасте. Образцы 15-18, 23, 27-32, 34, 35, 38 (содержание цемента смотреть табл. 3.12) также выдержали требуемое число циклов попеременного замораживания и оттаивания при допустимом снижении прочности не более чем на 25% в проектном возрасте. Данные образцы также можно использовать для дополнительного слоя основания облегченного типа дорожной одежды (требуемая марка по морозостойкости не менее F10) только для районов с температурой от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-5^{\circ}\text{C}$ .

– Для районов с температурой от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $-30^{\circ}\text{C}$  требуемая марка по морозостойкости для основания переходного типа дорожной одежды не менее F15. Образец 7 (с содержанием цемента 9,00%) выдержал требуемое число циклов попеременного замораживания и оттаивания при допустимом снижении прочности не более чем на 25% в проектном возрасте. Образцы 15-16, 18, 23, 27-29, 31, 33, 35 (содержание цемента смотреть табл. 3.12) также выдержали требуемое число циклов попеременного замораживания и оттаивания при допустимом снижении прочности не более чем на 25% в проектном возрасте. Данные образцы, также можно использовать для дополнительного слоя основания облегченного типа дорожной одежды

(требуемая марка по морозостойкости не менее F15) только для районов с температурой от -5<sup>0</sup>С до -15<sup>0</sup>С.

Так как у образцов 3, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26 предел прочности при сжатии на 28 суток показал невысокие результаты (предел прочности при сжатии менее 1,0 МПа), дальнейшей анализ данных образцов не проводился.

Полученные результаты с рекомендациями по применению в качестве дополнительного и конструктивного слоя основания сведены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

Тип дорожной одежды	Конструктивный слой дорожной одежды	Район применение в зависимости от среднемесячной температуры воздуха.			
		от 0 <sup>0</sup> С до -5 <sup>0</sup> С		от -5 <sup>0</sup> С до -15 <sup>0</sup> С	
Переходный	Основание	№ образца	Содержание цемента, %	№ образца	Содержание цемента, %
		1	8,70 7,80 6,90	2	8,70
		2	8,70	15	5,50
		15	5,5		
		31	6,00	31	6,00
		36	6,00		
Облегчённый	Дополнительный слой основания	1	7,80, 6,90	7	9,00
		5	8,00		
		6, 7, 8	9,00		
		9	10,00		
		11	9,50		
Облегчённый	Дополнительный слой основания	16,17,18	5,5	16,18	5,5
		23	8,5	23	8,5
		27-30	8,00	27-29	8,00
		32,34,35	6,00	33	5,00
		38	9,5	35	6,0

### **3.5. Выводы по главе**

1. Разработаны и апробированы различные составы для укрепления грунтов с применением в качестве вяжущих веществ портландцемента, полимерной добавки, гашеной извести и битумной эмульсии с использованием песка как минерального заполнителя. Составы с использованием данных материалов имеют положительные результаты по прочности и морозостойкости.

2. Полученные результаты по исследованию влияния различных вяжущих веществ на физико-механические свойства укрепленного грунта показали, что применение полимерной добавки совместно с использованием песка в качестве минерального заполнителя помогает сформировать наиболее прочную структуру грунта.

3. Укрепленный грунт в зависимости от района применения можно использовать в качестве основания переходного типа дорожной одежды и дополнительного слоя основания облегченного типа дорожной одежды, что позволит снизить транспортные расходы на доставку и оплату дорожно-строительных материалов.

#### **4. ТЕХНОЛОГИЯ УСТРОЙСТВА КОНСТРУКТИВНОГО СЛОЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ИЗ ГРУНТОБЕТОННОЙ СМЕСИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ**

##### **4.1. Технология устройства конструктивного слоя дорожной одежды из грунтобетонной смеси**

Предлагается проводить ремонт автомобильной дороги по нетрадиционной технологии с использованием вяжущих материалов поточным методом. Технологическая схема заключается в следующем. Перед фрезерованием производят очистку поверхности поливомоечными машинами или другим схожим оборудованием. Фрезерование, измельчение, перемешивание существующей дорожной одежды производится за один проход с помощью ведущей машины – ресайклера. Получаемая смесь является материалом для дальнейшей обработки. При фрезеровании в рабочую камеру ресайклера впрыскивается вода с полимерной добавкой (или без нее), подаваемая из поливомоечной машины по гибкому шлангу. Жидкость распределяется равномерно по камере в процессе перемешивания. Технологические операции производятся способом холодной регенерации – смешением на месте звеном специализированных машин. Перемешивание материала осуществляется фрезерным барабаном с большим количеством специальных резцов. Вращаясь, барабан измельчает и смешивает тонкослойное асфальтобетонное (щебеночное, щебеночно-гравийное) покрытие, щебеночное основание, природный грунт и минеральные вяжущие (цемент). Вращающийся барабан смешивает воду с регенерируемым материалом до получения однородной смеси. Расход подаваемой воды регулируется так, чтобы влажность этой смеси была достаточной для ее требуемого уплотнения [21, 53, 108].

Далее на покрытие равномерно в сухом виде распределяется портландцемент марки не ниже М400. Расход минерального вяжущего подбирается при подборе состава получаемой смеси. Важными этапами в

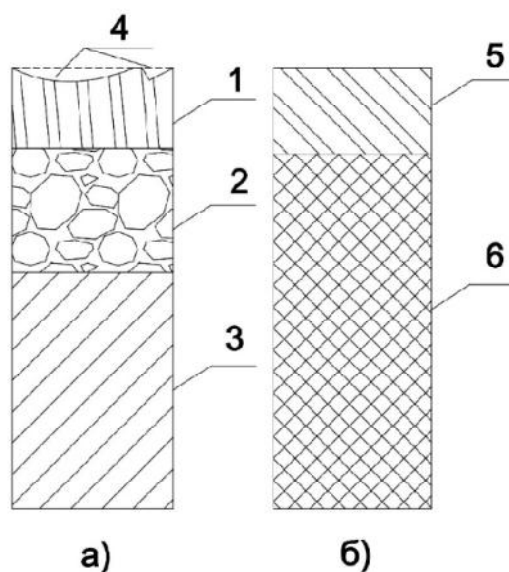
применении данной технологии является подбор количества добавляемого вяжущего, полимерной добавки и типа грунта. Количество вносимого минерального материала подбирают с расчетом получить максимально высокие физико-механические характеристики укрепленного материала (прочность, морозостойкость, водостойкость). Одновременно количество полимерной добавки зависит от естественной влажности грунта.

Крупность измельчаемого фрезерованием материала регулируется скоростью движения ресайклера, скоростью вращения фрезерно-смешивающего барабана ведущей машины, глубиной фрезерования, положениями задней щели под кожухом барабана. Если после фрезерования наблюдаются грунтовые комья размером более 50 мм, то осуществляется повторный проход ресайклера, без подачи воды. Стоит учитывать, что ресайклер не является дробильной машиной, он не предназначен для получения зерен меньшего размера, чем имеющиеся в грануляте старого асфальтобетона и щебеночного основания. В процессе работ должна контролироваться и, при необходимости, меняться скорость работы ведущей машины, она выбирается с учетом глубины, на которую заглубляется рабочей орган машины, и от гранулометрического состава представленных материалов.

После ресайклинга слой из полученной асфальто-щебеночно-грунтовой смеси предварительно уплотняют средним или тяжелым виброкатком, затем слой профилируется автогрейдером с заданием необходимых уклонов, далее выполняется окончательное уплотнение. Уплотнение смеси должно быть закончено до конца схватывания цемента [21, 86].

Укладку замыкающего слоя производят сразу или в течение суток после ресайклинга. Данный слой необходим, поскольку сопротивление износу у отремонтированного покрытия при непосредственном соприкосновении с колесами автомобильного транспорта меньше, чем у слоя из горячей асфальтобетонной смеси. Также, при необходимости перед устройством замыкающего слоя, для устранения неровностей, используется фреза.

Длительность технологических процессов по перемешиванию, укладке и уплотнению получаемой смеси с минеральными вяжущими ограничивается по времени сроком их схватывания, то есть периодом образования и существования структуры вяжущих материалов. Применение полимерной добавки позволяет сохранять в течение более длительного времени данную структуру. Это приводит к более качественному соблюдению технологических параметров при производстве работ на ранней стадии твердения материала.



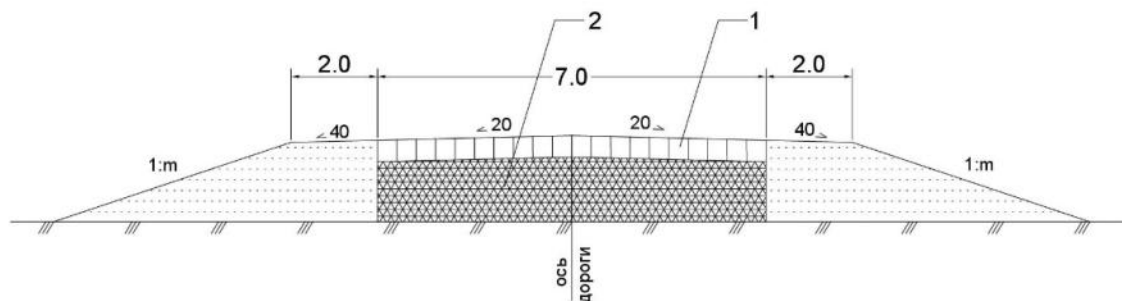
*1 – слой покрытия (асфальтобетон), 2 – щебеночное основания, 3 – грунт, 4 – дефекты покрытия (колеи, ямы, трещины и др.), 5 – замыкающий слой (асфальтобетон), 6 – грунтобетонная смесь*

Рисунок 4.1 – Конструкция восстанавливаемой дорожной одежды  
а) - типовая, б) - предлагаемая

На рис. 4.1 представлена типовая конструкция дорожной одежды, на примере которой разработана технология устройства конструктивного слоя дорожной одежды из грунтобетонной смеси. Для обеспечения качества восстанавливаемого слоя покрытия дороги был рассмотрен вариант, опирающийся на построенную математическую модель и разработанные на её основе составы с заданными характеристиками. На рис. 4.1 а) дорожная конструкция до проведения ремонтных работ содержала достаточно большое количество дефектов, для устранения которых необходимо было заменить

основания. На рис. 4.1 б) показана разработанная технология с использованием в основании асфальтобетонного гранулята, щебня и грунта. Данная технология позволяет создать морозостойкое и прочное основание, которое можно эксплуатировать в различных дорожно-климатических зонах. При этом вновь формируемый слой устраняет дефекты покрытия и одновременно приводит к экономии финансовых средств, так как используются материалы существующей конструкции, не требующих транспортных затрат (срезка и укладка слоя происходит на месте за один проход машины).

Используя разработанную технологию, для ремонта участка дороги 4 технической категория шириной поверхности асфальтобетона 7 м, имеющей до проведения ремонтных работ стандартную дорожную конструкцию из тонкослойного асфальтобетонного покрытия, щебеночного основания и грунта, предлагается применить новую двухслойную конструкцию, показанную на рис. 4.2.



*1 – асфальтобетонная смесь - 0,05 см, 2 – грунтобетонная смесь - 0,30 см*

Рисунок 4.2 – Поперечный профиль участка дороги

В предлагаемом варианте основания состоит из материалов, ранее составляющих конструкция ремонтного участка, а именно: асфальтобетонного гранулята, щебня и грунта. Покрытие – замыкающий слой выполняется из горячего асфальтобетона.

В приложении А представлена технологическая карта по строительству основания из асфальто-щебеночно-грунтовой (грунтобетонной) смеси,

укреплённого цементом с полимерной добавкой или без нее. В качестве ведущей машины используют ресайклер Wirtgen WR 240, ориентировочная длина сменной захватки 250 - 500 м. В состав работ входят: распределение цемента по поверхности покрытия; фрезерования, перемешивания, добавление воды с полимерной добавкой или без нее и укладка нового слоя; уплотнение полученной смеси; профилировка автогрейдером; окончательное уплотнение. Рекомендуемые составы механизированных звеньев по ремонту облегченных и переходных типов дорожной одежды с использованием нового материала из асфальто-щебеночно-грунтовой смеси приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Составы специализированных звеньев

Наименование машин	Количество
Распределитель цемента	1
Поливомоечная машина	1
Фреза Wirtgen WR 240	1
Каток	1
Автогрейдер	1

В процессе производства работ необходимо контролировать качество устраиваемого основания. Схема операционного контроля качества при устройстве слоя основания из грунтобетонной смеси согласно СП 78.13330.2012 представлена в табл. 4.2 [86, 87].

Таблица 4.2

Наименование контролируемого параметра	Допуски по параметрам	Режим и объем контроля	Приборы и оборудование
Высотные отметки по оси	Не более 10 % результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах	Не реже чем через 100 м	Нивелир, рейка



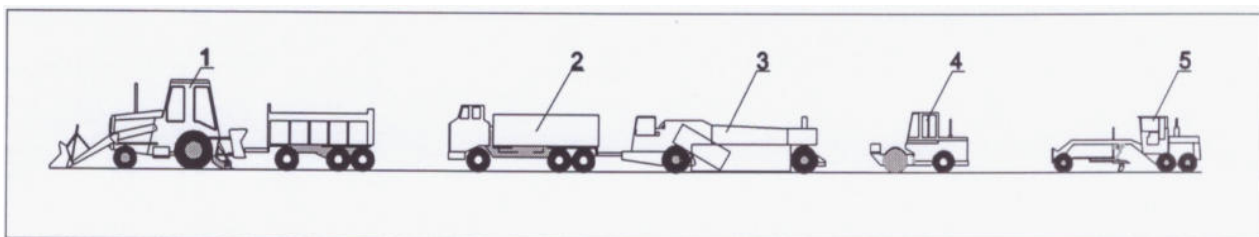
Наименование контролируемого параметра	Допуски по параметрам	Режим и объем контроля	Приборы и оборудование
	до $\pm 20$ мм ( $\pm 50$ мм), остальные – до $\pm 10$ мм ( $\pm 25$ мм)		
Ширина слоя	Не более 10 % результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах до $\pm 10$ см, остальные – от минус 5 см до плюс 10 см	Не реже чем через 100 м	Линейка, мерник
Толщина слоя:	Не более 10 % результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до $\pm 10\%$ , остальные до $\pm 7\%$ ( $\pm 10\%$ )	Не реже чем через 100 м	Линейка, мерник
Поперечные уклоны	Не более 10 % результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 0,010 до 0,015, остальные – до $\pm 0,005$ ( $\pm 0,010$ )	Не реже чем через 100 м	Рейка длиной 3 м
Ровность (просвет под рейкой длиной 3 м)	Не более 5 % результатов определений могут иметь значения просветов в пределах до 10 мм, остальные – до 5 мм	Не реже чем через 100 м	Рейка длиной 3 м, клин измерительный
Примечания: Значения, приведенные в скобках, относятся к видам работ, выполняемым без автоматических систем выдерживания заданных высотных отметок и уклона для дорог категорий IV и V общего пользования и ведомственных.			

#### 4.2. Особенности проведения работ при ремонте конструктивного слоя

Рассмотрение различных видов добавок ставит вопрос о сравнении показателей получаемых материалов при использовании разнообразных вяжущих, а также стоимостных показателей. После проведения лабораторных испытаний был построен опытный участок с применением в качестве вяжущего цемента, а также введении вместе с цементом добавки специального полимера.

Производственная проверка технологических процессов по фрезерованию, приготовлению, укладке и уплотнению грунтобетонной смеси осуществлялась на участке территории Воронежской области, где интенсивность движения соответствует III технической категории, а дорога построена в соответствии с требованиями IV технической категории. Существующая конструкция дорожной одежды состоит из тонкослойного асфальтобетонного покрытия, щебеночного основания и грунта. Ширина существующей поверхности 7,0 м. Транспортно-эксплуатационные показатели данного участка автомобильной дороги не соответствуют нормативным документам.

В соответствии с актом строительства опытного участка (приложение Б) был построен опытный участок общей площадью 700 м<sup>2</sup>. Последовательность производства механизированных работ представлена на рисунке 4.3.



*1 – распределитель цемента; 2 – поливомоечная машина; 3 – Фреза Wirtgen WR 240;  
4 – каток; 5 – автогрейдер*

Рисунок 4.3 – Технологическая схема холодной регенерации

Перед началом производства работ устанавливались технические средства организации дорожного движения. Работы производились методом

холодного ресайклинга, технологические операции производились на «месте». Работы выполнялись в дневное время.

Для устройства основания на опытном участке применялся ресайклер, который фрезеровал асфальтобетон, захватывая щебеночное основание и грунт с одновременным перемешиванием цемента и добавлением воды с полимерной добавкой из расчета 1 л/м<sup>2</sup>. Уплотнение выполняли комбинированным 15 т катком. Устройство замыкающего слоя производилось на следующий день после укладки грунтобетонной смеси. Движение автотранспорта по участку было открыто сразу же после окончания строительства.

В качестве ведущий машины использован ресайклер Wirtgen WR 240, который производил фрезерование на глубину 30 см. С учетом отечественного и зарубежного опыта рабочая скорость в среднем составляет 5 - 7 м/мин. За каждый проход фрезерование производилось на ширину 2,4 м. Длина пробного участка составляет 100 м.

Производство работ начиналось с распределения цемента перед ресайклером в сухом виде непосредственно на существующее покрытие из расчета 30 кг на 1 м<sup>2</sup>, используя распределитель цемента (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 – Распределение цемента перед ресайклером в сухом виде непосредственно на существующее покрытие из расчета 30 кг на 1 м<sup>2</sup>

В бункере данной машины установлены разгрузочные шнеки, подающие цемент в дозирующее устройство. Для дозировки и обеспечения необходимого расхода цемента необходимо установить и контролировать скорость передвижения машины с бункером и подачу шнеков. Распределение производилось за один проход по одному следу.

Далее двигалась поливомоечная машина, которая работает совместно с ресайклером. В процессе фрезерования материалы старой дорожной одежды (асфальтобетон, щебень и грунт) измельчаются с помощью основного рабочего органа ресайклера – фрезерного барабана с большим числом резцов и подаются вверх в смесительную камеру, где происходит перемешивание и добавление воды с полимерной добавкой. Количество жидкости (добавление воды с полимерной добавкой из расчета  $1 \text{ л/м}^2$ ) дозируется насосом, управляемым микропроцессорной системой, чтобы после смешивания с измельченным материалом влажность полученной смеси была оптимальной для уплотнения. Вращающийся барабан смешивает воду с регенерируемым материалом до получения однородной смеси. Направление вращения фрезерно-смешивающего барабана осуществляется «снизу – вверх».

Полученную асфальто-щебеночно-грунтовую смесь выкладывают на полосу, при этом разравнивая задней стенкой смесительной камеры (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Регенерируемый слой из асфальто-щебеночно-грунтовой смеси

Следом за ресайклером проходит комбинированный 15 т катком «Hamm», который уплотняет смесь (рис. 4.6). Выравнивает слой основания до необходимых высотных отметок автогрейдер.

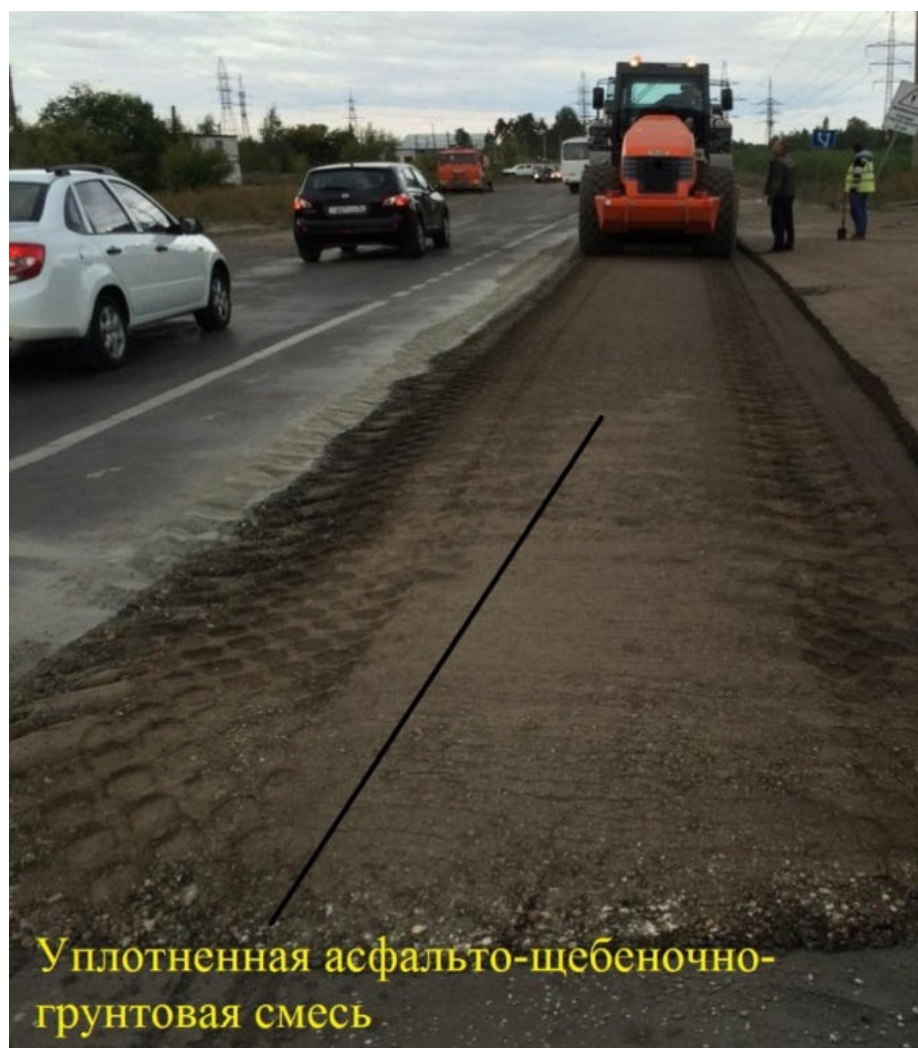


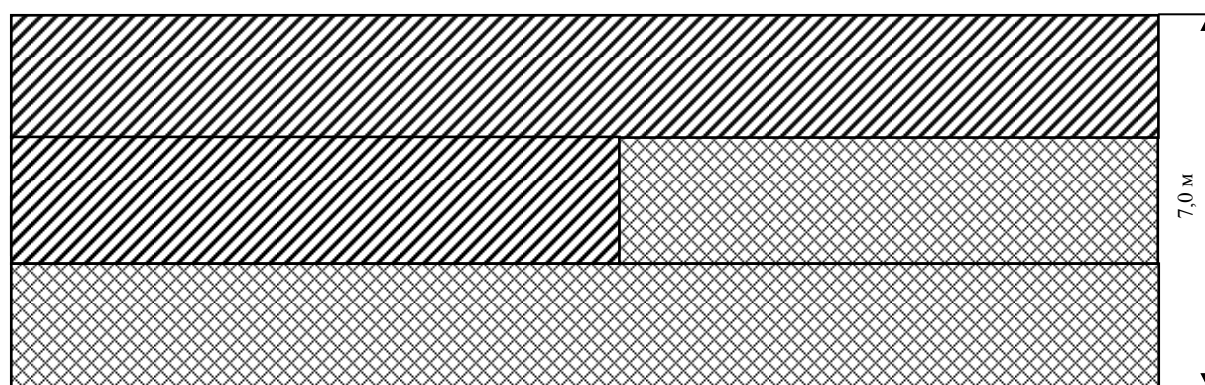
Рисунок 4.6 – Уплотнение комбинированным 15 т катком

Для улучшения физико-механических показателей (таких как прочность, морозостойкость и др.) приготавливаемой смеси, применялась полимерная добавка. Данная добавка показала наиболее высокие результаты в ходе лабораторных исследований. Дозировка полимера осуществлялась с помощью поливомоечной машины. Расход полимерной добавки принят согласно рекомендации производителя. Работы производились от кромки асфальтобетонного покрытия к оси проезжей части дороги.

Для устройства замыкающего слоя использовался щебеночно-мастичный асфальтобетон с наибольшим размером зерен до 15 мм (ЩМАС-15),

толщиной 5 см. В состав щебечно-мастичного асфальтобетона входили: щебень гранитный фракции 10-15 мм – 51 %, щебень гранитный фракции 5-10 мм – 21 %, песок из отсева дробления гранитов – 14 %, минеральный порошок МП-1 – 14 %, ПБВ «Полибит-N» 60 + 0,8% ДАД-1 – 6,0 %, стабилизирующая добавка «VIATOR 66» – 0,4 %. Состав подобран в соответствии с ГОСТ 31015-2002 [31]. Смесь доставлялась автосамосвалами КАМАЗ с асфальтобетонного завода. Время перевозки составило 20-30 минут. Укладка производилась асфальтоукладчиком «Vogele Super», уплотнение проводилось комбинированным катком «Hamm» и тяжелого катка «Bomag». Температура смеси при укладке составила не менее 145<sup>0</sup>С.

Для сравнения воздействия полимерной добавки экспериментальный участок разделили на две части согласно схеме ремонта, представленной на рисунке 4.7.



Условные обозначения:



-  - Проход ресайклера с использованием цемента и специальной полимерной добавки
-  - Проход ресайклера с использованием цемента

Рисунок 4.7 – Схема ремонта дороги

На одной половине в качестве вяжущего используется цемент с добавкой, на другой – цемент без добавки. Физико-механические характеристики материала в зависимости от применяемых вяжущих веществ представлены в главе 3.

Непосредственно после фрезерования до начала уплотнения отбирались смеси и доставлялись в сертифицированную дорожно-строительную лабораторию, где из них готовили образцы. Время с начала фрезерования покрытия до момента изготовления образцов не превышало времени начала схватывания цемента. В предлагаемой технологии конструктивный слой дорожной одежды состоит из смеси асфальтобетонного гранулята, щебня и дополнительного материала – грунта, который оказывает достаточно серьезное влияние на характеристики получаемого после укрепления конструктивного слоя дорожной одежды. При этом количество грунта может быть равно, а иногда и превышает количество асфальтобетонного гранулята вместе со щебнем.

Открытие движения с ограничением скорости по уложенному конструктивному слою возможно сразу после окончательного уплотнения фрезерованного слоя, а перекрытие слоем асфальтобетона необходимо выполнить не в течение смены, а в течение суток. Опишем данный вопрос более детально.

При применении в качестве вяжущего цемента необходимо закончить весь комплекс работ до момента его схватывания или, в крайнем случае, в ту же смену. То есть после фрезерования и перемешивания цемента с фрезерованными материалами и последующим добавлением воды необходимо выполнить следующие технологические операции: подкатку фрезерованного материала, выравнивание с заданием необходимых уклонов, окончательное уплотнение, укладку асфальтобетонной смеси с последующим уплотнением. Как видим, весь этот комплекс работ выполнить и уложиться в указанное время будет затруднительно. И в этом случае необходимо применение добавок, позволяющих замедлить процесс схватывания цемента. В качестве такой добавки можно использовать известь, которая не только на начальной стадии замедлит набор прочности, но в дальнейшем приведет к улучшению свойства получаемого материала, выступая совместно с цементом в качестве вяжущего.



Второй способ заключается в следующем. В фрезерованный материал добавляется цемент и вода, производится предварительное уплотнение, выравнивание и окончательное уплотнение. Делают технологический перерыв на семь суток, за которые цемент набирает не менее 70% прочности, а затем укладывают покрытие. Но в этом случае необходимо полностью перекрыть движение на автодороге на семь суток, что возможно только при наличии альтернативных автодорог, которых для дорог районного значения практически не бывает, или строительство объездной дороги, что приведет к многократному увеличению стоимости ремонтных работ. При перекрытии движения по полосам поочередно получаем шов сопряжения, который приводит к образованию продольной трещины и не обеспечивает качества выполняемых работ.

При выполнении работ по двум рассмотренным технологическим решениям соблюдение всех норм не всегда возможно, а не соблюдение приведет к разрушению только сформировавшихся связей цемента, что приводит к уменьшению ожидаемой прочности конструктивного слоя дорожной одежды. Решить данную проблему можно весьма простым способом, увеличив количество цемента, вводимого в фрезерованный материал. При этом движение с ограничением скорости можно открывать практически после окончательного уплотнения фрезерованного слоя, а перекрытие слоем асфальтобетона необходимо выполнить не в течение смены, а в течение суток.

Увеличенное количество цемента компенсирует разрушение связей, образующихся в начале набора прочности, и позволит получить заданные прочностные характеристики при более простой технологии производства работ. Такой метод достаточно хорошо зарекомендовал при работе с автодорогами, имеющими тонкослойные дорожные покрытия. Срок службы отремонтированных данным способом автодорог составляет три года и более.

#### **4.3. Исследование кернов полученного слоя основания в лабораторных условиях на прочность и морозостойкость**



При проведении ремонтных работ получили смеси, которые состоят из асфальтобетонного гранулята, щебня и природного грунта. Из полученных смесей изготавливали образцы, на которых определялись следующие физико-механические характеристики: предел прочности при сжатии, средняя плотность, водонасыщение по объему, морозостойкость, коэффициент водостойкости. Формование образцов производили в цилиндрической форме диаметром 70 мм, высота образцов 70 мм, при температуре 20° С. Образцы изготавливались прессованием под давлением 7 МПа. Время выдерживания образца при заданном давлении – 3 мин. Изготовленные образцы хранили в помещении при температуре 20°С до проведения испытаний.

Характеристики переформованных образцов в зависимости от применяемых вяжущих веществ представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Характеристики образцов

Вид применяемого вяжущего	Образцы	Переформованные образцы					
		m <sub>с</sub> г	m <sub>воз</sub> г	m <sub>вод</sub> г	M г	q <sub>ср</sub> , г/см <sup>3</sup>	Водонасыщение, % по объему
Цемент и специальная полимерная добавка	Образец 1	630,47	641,07	350,70	661,75	2,17	10,77
	Образец 2	632,18	640,16	350,26	663,16	2,18	10,69
	Среднее значение					2,18	10,73
Цемент	Образец 3	619,87	629,78	343,60	651,79	2,17	11,15
	Образец 4	624,19	634,09	346,77	656,79	2,17	11,35
	Среднее значение					2,17	11,25

В табл. 4.3: m<sub>с</sub> – масса сухого образца на воздухе; m<sub>воз</sub> – масса образца на воздухе после выдерживания 30 мин. в воде; m<sub>вод</sub> – масса образца в воде после выдерживания 30 мин. в воде; m – масса водонасыщенных образцов на воздухе; q<sub>ср</sub> – средняя плотность а/б;

Прочность образцов определялась путем определения предела прочности на сжатие на 7 и 28 сутки. Образцы испытывали на

испытательном прессе ДТС-0,6-50/100. Морозостойкость определяли на 28 суток. Результаты испытаний приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Результаты испытаний

Вид применяемого вяжущего	Предел прочности при сжатии				Морозостойкость			Требование ГОСТ 23558-94
	на 7 суток			на 28 суток				
	R <sub>20вод</sub>	R <sub>20сух</sub>	R <sub>50</sub>	R <sub>20вод</sub>	F10	F15	F25	
Цемент и специальная полимерная добавка	4,08	4,18	2,12	4,85	0,81	0,77	0,74	Предел прочности не менее, 4,0 МПа (М40), Коэффициент морозостойкости не менее 0,75
	4,06	4,2	2,11					
	4,07	4,19	2,12					
Цемент	3,68	3,84	2,06	4,13	0,78	0,72	0,64	
	3,66	3,81	2,09					
	3,67	3,83	2,08					

В табл. 4.4: R<sub>20сух</sub> – предел прочности при сжатии при температуре 20<sup>0</sup>С; R<sub>20вод</sub> – предел прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии при температуре 20<sup>0</sup>С; R<sub>50</sub> – предел прочности при сжатии при температуре 50<sup>0</sup>С.

Анализ полученных данных показывает, что оба состава показали на 7 суток предел прочности при сжатии при температуре 20<sup>0</sup>С более 3,6 МПа, а при температуре 50<sup>0</sup>С более 2 МПа, что соответствует предъявляемым требованиям (1,2 МПа при температуре 20<sup>0</sup>С и 0,8 МПа при температуре 50<sup>0</sup>С [53]). На 28 суток предел прочности при сжатии составляет более 4,0 МПа, что согласно [34] соответствует марке по прочности М40.

Полученные результаты морозостойкости показывают, что без применения полимерной добавки исследуемый материал выдерживает только 10 циклов попеременного замораживания и оттаивания. В связи с

этим его применение становится значительно ограниченным. Применяемые полимерные добавки при правильном их подборе способны не только увеличить морозостойкость и тем самым расширить спектр использования асфальто-щебеночно-грунтовой смеси, но и дать повышение прочности на 15-20%.

Коэффициент водостойкости при использовании вяжущего цемента и специальной полимерной добавки составил 0,97 при использовании только цемента – 0,96. Нормативное значение согласно методическим рекомендациям [33, 53] должно быть не менее 0,6.

В результате выполненного исследования к грунтобетонной смеси применяются следующие требования и ограничения.

- Смеси и грунты, укрепленные органическими вяжущими, должны соответствовать требованиям ГОСТ 30491, а укрепленные минеральными или комплексными вяжущими - ГОСТ 23558 [86] .

- Коэффициент уплотнения укрепленного материала должен быть не менее 0,98 [86].

- Устройство оснований и покрытий следует проводить при температуре не ниже 5 °С [86].

- Зерновые составы минеральной части грунтобетонных смесей определяют в соответствии с СП 78.13330.2012, ГОСТ 23558-94 (актуализированная версия).

#### **4.4. Анализ покрытия до ремонта и после формирования дорожной конструкции**

Первоначальное состояние дороги в 2016 г. показано на рис. 4.8, 4.9.

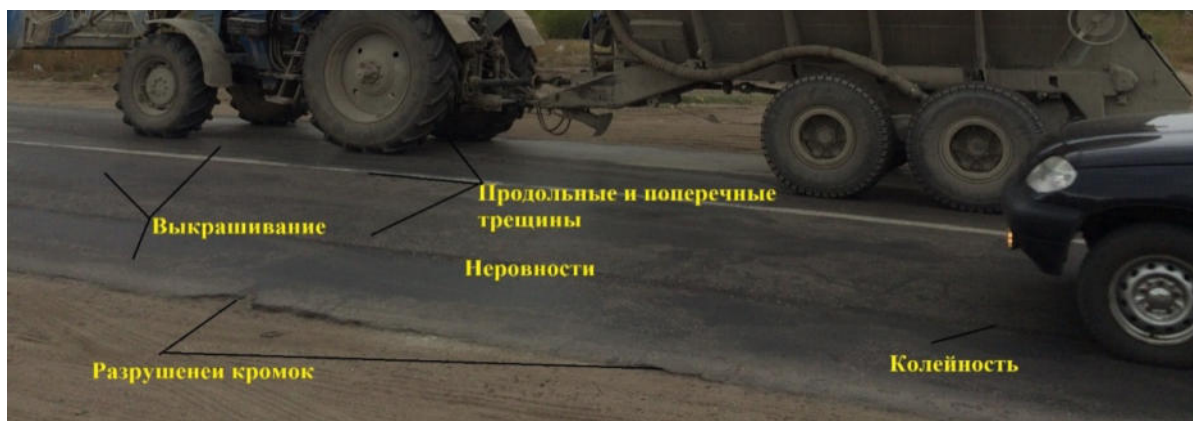


Рисунок 4.8 – Состояние покрытия до проведения ремонта

Существующее состояние асфальтобетонного покрытия на участке автомобильной дороги в целом неудовлетворительное и не отвечающие требованиям безопасности движения: множественные продольные и поперечные трещины, неровности, выкрашивание, колеечность, отдельные выбоины, ремонтные карты, неровности покрытия, связанные с ямочным ремонтом [30] .



Рисунок 4.9 – Состояние покрытия до проведения ремонта

После выполнения ремонтных работ, за этим участком было установлено наблюдение в течение 5 лет. (рис. 4.10).

Разрушения появились на 4 год эксплуатации. При этом интенсивность движения на данном участке соответствует III технической категории, а дорога построена в соответствии с требованиями IV технической категории. Несмотря на то, что одна полоса движения построена с применением полимерной добавки, а другая без неё, характер разрушений и виды дефектов на двух полосах приблизительно одинаковые. Преимущества, полученные в лабораторных условиях при испытании образцов, отобранных

непосредственно при производстве работ на практике при эксплуатации экспериментального участка дороги, не дали каких-либо значительных результатов.

Рисунок 4.10 – Изменения на участке в течение 5 лет



2017 год— дефекты покрытия отсутствуют



2018 год – дефекты покрытия отсутствуют



2020 год



2020 год

Наблюдается образование трещин покрытия без разрушения основания

#### **4.5. Технико-экономическое обоснование технологии ремонта дорожной одежды с использованием грунтобетонной смеси**

На основании лабораторных исследований и опытного их внедрения, отраженных в работах [69, 71, 106], могут быть предложены технологические решения, основанные на использовании грунтобетонной смеси при ремонте дорог. Основным конструктивно-техническим решением являются повторное применение тонкослойного асфальтобетонного (щебеночного, щебеночно-гравийного) покрытия, щебеночного основания, различного грунта, формируемого в процессе эксплуатации автодорог в основании дорожных одежд, устройство оснований облегченного типа, устройства дорожных одежд переходного типа.

Экономическая эффективность данных решений состоит в том, что использование данных материалов позволяет снизить расход материалов, энергетических и трудовых ресурсов по сравнению с традиционными методами ремонта, а также предотвратить экологический ущерб, который причиняется транспортировкой материала.





Предлагаемое решение характеризуется различными вариантами использования, которые в конкретных ситуациях могут выражаться следующими параметрами:

- ✓ расходом вяжущих материалов и различных добавок;
- ✓ выбором конструкции для применения;
- ✓ способами организации строительства и технологии производства дорожно-строительных работ.

Технико-экономическое обоснование ремонта дорожной одежды методом холодного ресайклинга выполнено применительно к ремонту дорог с асфальтобетонным покрытием в условиях Воронежской области. Предлагается три варианта (табл. 4.5) технологии восстановления конструкции дорожной одежды для местных дорог из местных материалов.



## Методы ремонта асфальтобетонного покрытия нежесткого типа

Состояние покрытия до ремонта		
 <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-end; margin-left: 10px;"> <div>Асфальтобетон</div> <div>Щебеночное основание</div> <div>Грунт</div> </div>		
Методы ремонта		
Вариант 1 (холодная регенерация с применением цемента)	Вариант 2 (холодная регенерация с применением цемента и полимерной добавки)	Вариант 3 (традиционный способ)
 <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-end; margin-left: 10px;"> <div>ЩМА-15</div> <div>Слой из асфальто-щебеночно- грунтовой смеси</div> </div>	 <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-end; margin-left: 10px;"> <div>ЩМА-15</div> <div>Слой из асфальто-щебеночно- грунтовой смеси</div> </div>	 <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-end; margin-left: 10px;"> <div>ЩМА-15</div> <div>Основание из щебня</div> <div>Грунт</div> </div>

В качестве сравниваемых вариантов предложены следующие конструкции:

Вариант 1. Устройства конструктивного слоя дорожной одежды из асфальто-щебеночно-грунтовой смеси с добавлением минерального вяжущего (цемента) и нанесение замыкающего слоя.

Покрывтие – щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА-15), толщиной 5 см. Основание – слой из асфальто-щебеночно-грунтовой смеси, обработанный цементом марки М400 с применением ресайклера, толщиной 30 см. Расход цемента 30 кг на 1 м<sup>2</sup>.

Вариант 2. Устройство конструктивного слоя дорожной одежды из асфальто-щебеночно-грунтовой смеси с добавлением минерального вяжущего(цемента), полимерной добавки и нанесение замыкающего слоя.

Покрытие – щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА-15), толщиной 5 см. Основание – слой из асфальто-щебеночно-грунтовой смеси, обработанный цементом марки М400 и полимерной добавкой с применением ресайклера, толщиной 30 см. Расход цемента 30 кг на 1 м<sup>2</sup>.

Вариант 3. Традиционный способ ремонта.

Покрытие – щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА-15), толщиной 5 см. Основание – устройство основания из щебня М600 фр. 40-70 мм, толщиной 30 см.

В каждом варианте при технико-экономическом обосновании внедрения разработанной технологии необходимо рассчитывать затраты и эффективность с учётом таких условий, как расход материалов, дальности транспортировки и других. При определении экономической эффективности необходимо учитывать выгоды и удорожания, образующиеся в сфере дорожно-строительных организаций, заказчика, производителей материалов [60, 72, 84, 85].

Основные статьи экономии по предлагаемой технологии:

1. Отсутствуют затраты по вывозу материалов старых дорожных одежд.
2. Затраты по транспортировке новых материалов существенно сокращаются.
3. Отсутствует затраты на создание площадок и мест хранения материалов.
4. Трафик движения большегрузных автомобилей по местным дорогам минимален.
5. Уменьшение сметной стоимости работ по сравнению с традиционной технологией ремонта.



6. Работы выполняются быстрыми темпами с минимальным количеством техники, что позволяет избежать закрытия автомобильной дороги на время проведения работ.

7. Оперативное выполнение работ сокращает ремонтные сроки.

В данной работе по трем рассматриваемым вариантам использовался один из наиболее часто используемых при составлении смет базисно-индексный метод расчета сметной стоимости, при котором применяют текущие и прогнозные индексы по отношению к стоимости, определенной в базисном уровне цен. Данный метод определения сметной стоимости даёт возможность получать наиболее актуальные стоимостные показатели по отношению к дате составления сметы. При расчете сметной стоимости СМР базисно-индексным методом прямые затраты определяются с помощью единичных расценок – стоимости прямых затрат на измеритель работы. Единичные расценки приводятся в Территориальных единичных расценках (ТЕР) и Федеральных единичных расценках (ФЕР) [72, 84, 85].

Для оценки целесообразности ремонта по предлагаемой технологии необходимо посчитать сметную стоимость выполнения работ. Для этого воспользуемся известной формулой расчета, которая состоит из прямых затрат (ПЗ), накладных расходов (НР) и сметной прибыли (ПС). Сметная стоимость определяется по формуле [57, 72]:

$$\text{См.Ст.} = \text{ПЗ} + \text{НР} + \text{СП} \quad (4.1)$$

Прямые затраты являются самыми существенными при производстве работ, они складываются из следующих составляющих: оплата труда рабочих, расходы по эксплуатации строительных машин и механизмов, стоимость материалов, деталей и конструкций. Прямые затраты (ПЗ) определяется по известной формуле [37, 57, 72]:

$$\text{ПЗ} = (\text{ЗП}_{(\text{ед})} + \text{ЭМ}_{(\text{ед})} + \text{Мат}_{(\text{ед})}) \times V \times И, \quad (4.2)$$

где  $\text{ЗП}_{(\text{ед})}$  – заработная плата рабочих по единичной расценке;  $\text{ЭМ}_{(\text{ед})}$  – стоимость эксплуатации машин по единичной расценке;  $\text{Мат}_{(\text{ед})}$  – стоимость материалов по единичной расценке, в которую входят: оплата стоимости

строительных материалов; расходы на транспортировку от поставщика до покупателя; наценки снабженческих и сбытовых организаций; затраты на тару и реквизит; заготовительно-складские расходы; И – индекс изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ; V – объем работ по расценке.

Расходы, связанные с организацией, управлением строительного производства называются накладными. Обычно к ним относят административно-хозяйственную деятельность организации. В качестве базы для исчисления накладных расходов принимают величину средств на оплату труда рабочих-строителей и рабочих, обслуживающих машины. Нормы накладных расходов определяются в соответствии с Методическими указаниями по определению величины накладных расходов в строительстве МДС 81-35.2004 [52,57, 72].

Сметная прибыль в составе сметной стоимости строительной продукции – это средства, предназначенные для покрытия расходов подрядных организаций на развитие производства и материальное стимулирование работников. Сметная прибыль является нормативной частью стоимости строительной продукции и не относится к себестоимости работ. В качестве базы для исчисления сметной прибыли принимают величину средств на оплату труда рабочих строителей и рабочих, обслуживающих машины [72].

Индексы изменения стоимости (цен, затрат) в строительстве – это отношение текущих (прогнозных) стоимостных показателей к базисным на сопоставляемые по номенклатуре и структуре ресурсы, наборы ресурсов или ресурсно-технологические модели строительной продукции, а также ее отдельных калькуляционных составляющих [57, 72].

Также при определении сметной стоимости работ по ремонту асфальтобетонного покрытия нежесткого типа к нормативам сметной прибыли к расценкам ФЕР-2001 был применен коэффициент 0,85, так как работы аналогичны технологическим процессам в новом строительстве (в

том числе возведение новых конструктивных элементов в ремонтируемом здании, ремонт автомобильных дорог и искусственных сооружений).

Накладные расходы и сметная прибыль косвенно считаются в процентах от фонда оплаты труда рабочих, который считается по формуле:

$$\text{ФОТ} = 3\Pi_{\text{раб}} + 3\Pi_{\text{маш}} \quad (4.3)$$

В расчете стоимости работ использовался Сборник №27 федеральных единичных расценок на строительные работы Автомобильные дороги ФЕР-27. Расчет производился в программном комплексе «Гранд-Смета 2021», которая позволяет составлять сметную документацию и определять стоимость строительства.

Расчеты выполнялись в базисных ценах 2000 года, с пересчетом в текущий уровень с помощью индексов изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ по объектам строительства, определяемых с применением федеральных единичных расценок: на 2 квартал 2022 (СМР=9,38), Письмо Минстроя России от 27.06.2022 г. №29698-ИФ/09, прил.5 [63].

В таблице 4.6 приведены сравнительный расчет стоимости работ по ремонту 1 км дороги методом холодной регенерации (варианты 1 и 2) и традиционным методом ремонта (вариант 3). Выполняемые технологические процессы приведены к 1000 м<sup>2</sup> слоя дорожной конструкции.

Как видно из расчетов, стоимость работ для холодного ресайклинга с добавлением цемента (вариант 1) на 1 км дороги составляет 7196946,00 руб. Стоимость работ для холодного ресайклинга с добавлением цемента и полимерной добавки (вариант 2) на 1 км дороги составляет 9495046,00 руб. Стоимость работ традиционным способом (вариант 3) составила 10456102,00 руб.

В работе использована классификация асфальто-щебеночно-грунтовая смесь – грунтобетонная смесь.

Таблица 4.6

## Сравнительные стоимости работ по ремонту 1 км дороги

№ пп	Обоснование	Наименование работ	Ед. изм.	Кол-во	Стоимость в ценах 2000 г., руб		Стоимость на 2 квартал 2022 г., руб	
					ед. работ	Всего	ед. работ	Всего
1	ФЕР27-06-047-01	Устройство основания дорожного полотна методом холодного ресайклинга толщиной от 15 до 25 см с применением регенератора-смесителя с шириной реза 2,5 м с добавлением: минеральных добавок	м2	7 000	24,90	174 267	233,52	1 634 624
2	ФЕР27-06-029-01; ФЕР27-06-030-01	Смеси асфальтобетонные щебеночно-мастичные ЩМА-15, толщиной 5 см	м2	7 000	84,71	592 998	794,62	5 562 321
		Итого по 1 варианту:				<b>767 265</b>		<b>7 196 946</b>
3	ФЕР27-06-047-01	Устройство основания дорожного полотна методом холодного ресайклинга толщиной от 15 до 25 см с применением регенератора-смесителя с шириной реза 2,5 м с добавлением: минеральных добавок	м2	7 000	24,90	174 267	233,52	1 634 624
4	ФССЦ-01.7.08.05-0006	Полимерная добавка	кг	17 500	14,00	245 000	131,32	2 298 100
5	ФЕР27-06-029-01; ФЕР27-06-030-01	Смеси асфальтобетонные щебеночно-мастичные ЩМА-15, толщиной 5 см	м2	7 000	84,71	592 998	794,62	5 562 321
		Итого по 2 варианту:				<b>1 012 265</b>		<b>9 495 046</b>
6	ФЕР27-03-011-01	Срезка поверхностного слоя асфальтобетонных дорожных покрытий с применением фрез при ширине фрезерования до 1300 мм,	м2	7 000	4,65	32 572	43,65	305 525

№ пп	Обоснование	Наименование работ	Ед. изм.	Кол-во	Стоимость в ценах 2000 г., руб		Стоимость на 2 квартал 2022 г., руб	
					ед. работ	Всего	ед. работ	Всего
		толщина слоя: до 5 см						
7	ФССЦпг-03-21-01-010	Транспортировка материала от фрезерования (асфальтогранулята) на ТБО на 10 км	т	805,00	11,42	9 193,00	107,12	86 230
7	ФЕР27-03-008-02	Разборка покрытий и оснований: щебеночных	м3	2 100	9,42	19 779	88,35	185 527
8	ФССЦпг-03-21-01-010	Транспортировка материалов от разборки существующей дорожной одежды на ТБО на 10 км	т	3 360,00	14,70	49 392,00	137,89	463 297
9	ФЕР27-04-007-03	Устройство оснований толщиной 15 см из щебня М600 фракции 40-70 мм): нижнего слоя двухслойных	м2	7 000	26,23	183 626	246,06	1 722 412
10	ФЕР27-04-007-02	Устройство оснований толщиной 15 см из щебня М600 фракции 40-70 мм: верхнего слоя двухслойных	м5	7 000	32,45	227 163	304,40	2 130 789
11	ФЕР27-06-029-01; ФЕР27-06-030-01	Смеси асфальтобетонные щебеночно-мастичные ЩМА-15, толщиной 5 см	м2	7 000	84,71	592 998	794,62	5 562 321
		Итого по 3 варианту:				<b>1 114 723</b>		<b>10 456 102</b>

#### **4.6. Выводы по главе**

1. В целом, описываемая технология ремонта слоев покрытия и основания дорожной одежды позволяет кондиционировать материалы несущего слоя и грунта так, чтобы они становились исходным сырьём для разнообразного применения в процессе ремонтных работ, а также строительства дорог и инженерных сооружений.

2. Использование материалов старой дорожной одежды (гранулята старого асфальтобетона, щебня и грунта) совместно с их укреплением вяжущими материалом – цементом и (при необходимости) полимерной добавкой, позволяет получить однородный укрепленный слой основания с нормативными физико-механическими характеристиками. Это позволяет производить ремонт обычно непригодных для использования типов грунта, слоев основания и их совместного использования. В результате эта технология становится строительно-технической, экономической и экологической альтернативой современным методам ремонта.

3. В ходе опытного строительства проверена возможность применения грунтобетонной смеси в различных конструктивных элементах: основании дорожных одежд, покрытии переходного и низшего типов. Наиболее эффективным является укрепление цементом совместно с полимерной добавкой.

4. Смесь асфальтобетонного гранулята щебня и грунта укрепленного цементом позволяет выполнить ремонтные работы с облегченными и переходными типами покрытий с минимальными затратами, обеспечивая качество выполняемых работ.

5. Для повышения морозостойкости необходимо использовать различные виды добавок, которые должны подбираться в зависимости от грунтов, которые используются в грунтобетонной смеси. Также при подборе добавки необходимо учитывать темпы строительства и условия производства работ.

6. Разработанная технология ремонта, данные лабораторных испытаний, наблюдений за опытным участком и за соседними участками в течение зимнего периода позволяют сделать следующий вывод. Повторное использование асфальтобетонного гранулята, щебеночного материала, а также грунта в качестве смеси позволяет ремонтировать дорожную одежду, получая при этом безопасную, ровную автомобильную дорогу, затрачивая при этом минимальные финансовые средства по сравнению с традиционными методами.

7. Использование вяжущего и добавок, применяемых при укреплении грунтов методом холодной регенерации на тонкослойных дорожных одеждах, где после фрезерования появляется грунт, перемешанный с асфальтогранулятом и остатками щебня, позволит повторно использовать материалы существующих дорожных конструкций, уменьшит использование нового материала, что даст существенную экономию при проведении ремонтных работ.

8. Техничко-экономические расчеты, проведенные с учетом фактических производственных затрат предлагаемой технологии, показали её эффективность. Технология ремонта дорожной одежды облегченного и переходного типа с использованием материала из грунтобетонной смеси, укрепленного только цементом, позволяет выполнять работы по ремонту 1 км дороги, на 32 % дешевле, чем традиционная технология ремонта. При использовании, помимо цемента, полимерных добавок, экономия составила 10 % на 1 км дороги.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Выполненный анализ показал, что при проведении ремонтных работ способом холодного ресайклинга при фрезеровании тонкослойных конструкций часто происходит перемешивание слоя покрытия с основанием и верхним слоем земляного полотна. Применение такого материала, согласно нормативным документам, в качестве конструктивного слоя дорожной одежды не регламентируются.

2. Построена математическая модель, описывающая работу облегченного конструктивного слоя дорожной одежды при различных модулях морозостойкости, в которой учитывается влияние пленки вяжущего вокруг гранул смеси на напряженно-деформируемое состояние сформированного слоя при замерзании-оттаивании воды в порах. Моделирование показало, что оптимальная толщина пленки стандартного вяжущего составляет 50-200 мкм при условиях стандартного фракционного состава. Показано влияние температуры хрупкости на возрастание внутренних напряжений в слое при замерзании воды в порах. Прочность слоя уменьшается при положительном градиенте температур фазового состояния льда в порах слоя (таянии).

3. Разработаны и апробированы различные составы для укрепления грунтов с применением в качестве вяжущих веществ портландцемента, полимерной добавки, гашеной извести и битумной эмульсии с использованием песка как минерального заполнителя. Предлагаемые составы имеют повышенные значения прочности и морозостойкости, что позволяет в зависимости от района применения использовать их в качестве основания переходного типа дорожной одежды и дополнительного слоя основания облегченного типа дорожной одежды. Это позволяет производить ремонт слоев основания с использованием обычно непригодных к применению типов грунта.

4. Разработана технология ремонта дорожной одежды, опирающаяся на повторное использование асфальтобетонного гранулята,



щебеночного материала, а также грунта в качестве смеси. Эта технология позволяет ремонтировать дорожную одежду, получая при этом безопасную, ровную автомобильную дорогу с увеличением срока эксплуатации между плановыми ремонтами. Разработанный состав характеризуется достаточными физико-механическими характеристиками. Предлагаемая технология по сравнению с традиционными методами ремонта является более экологической и экономичной.

5. Экономическая эффективность данных решений состоит в том, что использование данных материалов позволяет снизить расход материалов, энергетических и трудовых ресурсов по сравнению с традиционными методами ремонта, а также предотвратить экологический ущерб, который причиняется транспортировкой материала. Предлагаемое решение характеризуется различными вариантами использования, которые в конкретных ситуациях могут выражаться следующими параметрами: расходом вяжущих материалов и различных добавок; выбором конструкции для применения; способами организации строительства и технологии.

Применение данной технологии позволит обеспечить многим сельским поселениям в Российской Федерации круглогодичный выход на дороги общего пользования, что в свою очередь приведет к свободному перемещению граждан, обеспечит проезд различных служб и техники, своевременную доставку продовольствие и других ресурсов. Дальнейшая модификация составов позволит производить дорожно-строительные работы с минимальными затратами и обеспечить качество выполняемых дорожно-строительных работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамова Т.Т. Стабилизаторы грунтов в дорожном и аэродромном строительстве / Т.Т. Абрамова, А.И. Босов, К.Э. Валиева // Дороги и мосты. – 2013. – № 2(30). – С. 25.
2. Автомобильные дороги и мосты. Строительство конструктивных слоев дорожных одежд из грунтов, укрепленных вяжущими материалами. Обзорная информация. Выпуск 3 / Обзор подготовил С.Г. Фурсов. – М.: Информавтодор, 2007. – 42 с.
3. Автомобильные дороги общего пользования Российской Федерации (справочник о наличии и протяженности по состоянию на 1 января 2003 года, Дата актуализации: 01.01.2021). – М.: ФГУП "Информавтодор", 01.01.2003. – 60 с.
4. Александрова Н.П. Модификация критериев прочности и условий пластичности при расчетах дорожных одежд / Н.П. Александрова , А.С. Александров, В В, Чусов // Вестник СибАДИ. – 2015. – № 1 (41). – С. 47-54.
5. Алиев А.М. Основы регенерации асфальтобетона: специальность 05.23.05: Строительные материалы и изделия: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Алиев Али Муса оглы. – Баку, 1981. – 338 с.
6. Аль-Карагули Мустафа Мохаммед Джалил Устройство дорожных покрытий и оснований с применением холодной регенерации асфальтобетона в установке: специальность 05.23.11: Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аль-Карагули Устройство дорожных покрытий и оснований с применением холодной регенерации асфальтобетона в установке. – М., 2021. – 179 с.

7. Ананьев В.П. Инженерная Геология. Издание второе. / В.П. Ананьев, А.Д. Потапов – М. : Высшая школа, 2002. – 575 с.
8. Артюшин А.В. Обоснование параметров, режима работы и конструкции регенерационной асфальтосмесительной установки: специальность 05.05.04 - Дорожные и строительные машины: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Артюшин Алексей Владимирович. – Воронеж, 1998. – 169 с.
9. Бабков В.Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов / В.Ф. Бабков, В.М. Безрук. – М.: Высшая школа, 1986. – 239 с.
10. Бавбель Е.И. Конструирование и методика расчета дорожных одежд из укрепленных грунтов / Е.И. Бавбель, В.В. Игнатенко, А.И. Науменко // Труды БГТУ. – 2. – № 2016. – С. 58-60.
11. Бахрах Г.С. Влияние движения автомобильного транспорта на выносимость свежееуложенного асфальтогранулобетонного слоя / Г.С. Бахрах // Дороги и мосты. – 2011. – № 25. – С. 151-159.
12. Бахрах Г.С. Регенерация покрытий и одежд нежесткого типа / Г.С. Бахрах // Наука и техника в дорожной отрасли. – 1998. – № 3. – С. 18-21.
13. Безрук В.М. Укрепленные грунты / В.М. Безрук. – М.: Транспорт, 1982. – 231 с.
14. Борисов А.Е. Анализ существующих технологических решений при ремонте дорожных покрытий / А.Е. Борисов // Advances of science [Электронный ресурс]: II международная научная конференция. – Чехия, Карловы Вары - Россия, Москва: 2017. – С. 29-30.
15. Борисов А.Е. Влияние минеральных добавок на физико-механические свойства укрепленных органоминеральных грунтов / А.Е. Борисов, А.Н. Канищев, В.А. Козлов // Научный журнал строительства и архитектуры. - 2022. - № 2 (66). - С. 87-93
16. Борисов А.Е. Состояние автомобильных дорог с покрытиями нежесткого типа / А.Е. Борисов // «Научный журнал «GLOBUS» Мультидисциплинарный сборник научных публикаций. XVII

Международная научно-практическая конференция. Достижения и проблемы современной науки. – С-П.: , 2017. – С. 50-54.

17. Бусел А.В. Ремонт автомобильных дорог: учебное / А.В. Бусел. – Мн : Арт Дизайн, 2004. – 208 с.

18. Васильев А.П. Ремонт и содержание автомобильных дорог: справочник инженера-дорожника / А.П. Васильев, М.Б. Баловнев, [и др.] – М.: Транспорт, 1989. – 287 с.

19. Васильев А.П. Справочная энциклопедия дорожника. Т. II: Ремонт и содержание автомобильных дорог / А.П. Васильев, [и др.] – М.: Информавтодор, 2004. – 505 с.

20. Гезенцевей Л.Б. Технология производства асфальтового бетона / Л.Б. Гезенцевей. – М.: МХК РСФСР, 1953. – 236 с.

21. Горелышев Н.В. Технология и организация строительства автомобильных дорог / Н.В. Горелышев, [и др.] – М.: Транспорт, 1991. – 551 с.

22. Гмыря Г.С. Асфальтобетонные смеси из старого асфальтобетона / Г.С. Гмыря // VII Всесоюзное совещание дорожников. Ремонт и содержание дорог», тезисы докладов и сообщений. – С-П.: , 1981. – С. 78-79.

23. Гладышев Н.В. Совершенствование технологии приготовления и укладки асфальтобетонных смесей с добавлением гранулята старого асфальтобетона: специальность 05.23.11: Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гладышев Николай Викторович. – М., 2015. – 140 с.

24. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: дата введения 01 июля 2013. – М.: Стандартинформ, 2018. – 32 с.

25. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация: дата введения 01.01.2021. – М.: Стандартинформ, 2020. – 38 с.

26. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава: дата введения 01.03.2019. – М.: Стандартиформ, 2019. – 20 с.
27. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик: дата введения 25.02.2019. – М.: Стандартиформ, 2019. – 20 с.
28. ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации: дата введения 22.02.2019. – М.: Стандартиформ, 2019. – 19 с.
29. ГОСТ Р 54401-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси литые асфальтобетонные дорожные горячие и асфальтобетон литой дорожный. Технические условия: дата введения 15.04.2020. – М.: Стандартиформ, 2020. – 20 с.
30. ГОСТ Р 50597-2017. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля: дата введения 18.10.2017. – М.: Стандартиформ, 2017. – 4 с.
31. ГОСТ 31015-2002. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия: дата введения 01.05.2003. – М.: МНТКС, 2003. – 26 с.
32. ГОСТ 9128-2013. Смеси асфальтобетонные, оплимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия: дата введения 13.03.2019. – М.: Стандартиформ, 2013. – 50 с.
33. ГОСТ 30491-2012. Смеси органоминеральные и грунты, укрепленные органическими вяжущими, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия: дата введения 17.09.2019. – М.: Стандартиформ, 2019. – 16 с.
34. ГОСТ 23558-94. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и

аэродромного строительства. Технические условия: дата введения 2005. – М.: Стандартиформ, 2005. – 8 с.

35. Гоглидзе В.М. Использование материалов из старых асфальтобетонных покрытий / В.М. Гоглидзе // Автомобильные дороги. – 1982. – № 12. – С. 17-19.

36. Дудзинский В. Обзор экспериментальных данных о характере и условиях формирования давления морозного пучения / В. Дудзинский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 9. – С. 400-402.

37. Ермолаев Е.Е. Основы ценообразования и сметного дела в строительстве: учебник для вузов / Е.Е. Ермолаев, Н.М. Шумейко, С.Б. Сборщиков. – М.: АСТ, 2009. – 200 с.

38. Ереско С.П. Технология ремонта асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / С.П. Ереско, С.Ф. Зяблов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 1. – С. 28-30.

39. Ермолаев Е.Е. Особенности определения затрат в локальных сметных расчетах (сметах): Практическое / Е.Е. Ермолаев, П.А. Журавлев, В.М. Симанович. – М.: Стройинформиздат, 2015. – 288 с.

40. Жалко М.Е. Влияние водно-теплового режима основания автомобильной дороги на состояние дорожной одежды / М.Е. Жалко, К.А. Черный // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 97-103.

41. Зубков А.Ф. Технология строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / А.Ф. Зубков, – М. : Машиностроение, 2009. – 224 с.

42. Зубков А.Ф. Технология устройства покрытий нежесткого типа из асфальтобетонных горячих смесей : учебное / А.Ф. Зубков. – Тамбов: ТГТУ, 2009. – 80 с.

43. Инструкция по строительству дорожных асфальтобетонных покрытий. – М.: Департамент строительства Мосстройлицензия, 1995. – 42 с.

44. Исследование влияния модификатора «ДОРЦЕМ ДС-1» на свойства цемента и физико-механические характеристики цементогрунта / Вл.П. Подольский, Ф.В. Матвиенко, А.С. Строкин, А.Е. Борисов // Научный журнал строительства и архитектуры. – Воронеж: ВГТУ, 2017. – С. 84-92.
45. Итоги деятельности Федерального дорожного агентства в 2018 году и планы на 2019-2024 гг. // ФДА "РОСАВТОДОР": сайт. – URL: <https://rosavtodor.ru/docs/osnovnye-pokazатели-prognozy/295191> (дата обращения: 13.03.2020)
46. Ищенко И.С. Технология устройства и ремонта асфальтобетонных покрытий / И.С. Ищенко, [и др.] – М.: Аир –АРТ, 2001. – 169 с.
47. Кузин Н.В. Анализ методов расчета дорожных одежд с асфальтобетонными покрытиями / Н.В. Кузин, А.С. АЛЕКСАНДРОВ // СиБАДИ. – Омск:, 2008. – С. 36-46.
48. Кушнир С.Я. Влияние морозного пучения основания на напряженное состояние насыпи дороги / С.Я. Кушнир, А.И. Горковенко, Н. В. Казакова // Нефть и газ. – 2000. – № 6. – С. 79-82.
49. Леонович И.И. Применение упруговязкой модели к расчету конструкций дорожных одежд нежесткого типа / И.И. Леонович, А.П. Лашенко // Труды БГТУ. – 2016. – № 2. – С. 105-108.
50. Леонович И.И. Содержание и ремонт автомобильных дорог: учебное / И.И. Леонович. – Минск : БНТУ, 2003. – 470 с.
51. Лупанов А.П. Применение гранулята старого асфальтобетона при производстве асфальтобетонных смесей / А.П. Лупанов, [и др.] Строительство и эксплуатация дорог: научные исследования и их практическое применение», научные труды МАДИ. – СПб: , 2006. – С. 165-170.
52. Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской федерации (МДС 81-35.2004) – М.: Госстрой России, 2004. – 65 с.

53. Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации. – М.: Росавтодор, 2021. – 25 с.
54. Методические рекомендации по ремонту и содержанию автомобильных дорог общего пользования. – М.: РОСДОРНИИ, 2004. – 30 с.
55. Методические рекомендации по укреплению обочин земляного полотна с применением стабилизаторов грунтов. – М.: ФГУП Информавтодор, 2003. – 28 с.
56. Методы снижения количество дорожно-транспортных происшествий за счет комплексного подхода к обеспечению безопасности / А.Н. Канищев, А.Е. Борисов, А.А. Быкова, Т.В. Мордовцева // Научный журнал строительства и архитектуры. – Издательство ВГТУ. – 2021. – № 1 (61). – С. 86-95.
57. Моделирование теплового режима термоскважин геотермальных теплонасосных систем теплоснабжения / Г.П. Васильев, Н.В. Песков, В.А. Личман [и др.] // Теплоэнергетика. – 2015. – № 8. – С. 11-16.
58. Моисеенко Р.П., Пушкарёва Г.В., Куция И.З. Надёжность нежёстких дорожных одежд по морозоустойчивости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 192–200.
59. Немчинов М.В. Дорожная одежда с асфальтобетонным покрытием. Физика работы. Методология проектирования и расчета. Прочность и долговечность: Монография / М.В. Немчинов, А.С. Холин, А.В. Корочкин. – М.: Издательство АСВ, 2019. – 292 с.
60. Никишин В.Е. Ресурсосберегающая технология холодной регенерации асфальтобетона / В.Е. Никишин // Издательство «Стройматериалы». – 2010. – № 5. – С. 10-11.
61. Никишин В.Е. Технология регенерированного асфальта с дисперсным битумом: специальность 05.23.05: Строительные материалы и



изделия: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Никишин Вадим Евгеньевич. – Саратов, 2000. – 182 с.

62. Носов В.П. Зарубежный опыт прогнозирования состояния дорожных одежд / В.П. Носов // Повышение долговечности транспортных сооружений и безопасности дорожного движения: сб. научных трудов. – Казань: КГАСУ, 2008. – С. 8-12.

63. Об индексах изменения сметной стоимости строительства в I квартале 2022 года (вместе с "Индексами изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ по объектам строительства). – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2022. – 6 с.

64. ОДМ 218.3.076-2016. Методические рекомендации по подбору стабилизаторов грунтов и грунтовых смесей для дорожного строительства. – М.: Росавтодор, 2017. – 36 с.

65. О внесении изменений в Государственную программу развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы (с изменениями на 2 сентября 2021 года): Постановление Правительства РФ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2017. – № 52 (ч.1). – Ст. 8126.

66. О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения: Постановление Правительства РФ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2017. – № 23. – Ст. 3354.

67. Оценка с помощью математического моделирования основания дорожных одежд из гранулированного грунта / М.Ч. Апсеметов, А.А. Приходько, А.А. Молдоболотов, А.А. Адысатаров // Наука и инновационные технологии. – 2020. – № 4 (17). – С. 17-23.

68. Павлов А.Р. Численное моделирование динамики морозного пучения грунта / А.Р. Павлов, М.В. Матвеева // Вестник Поморского университета. серия: естественные и точные науки. – 2008. – № 4. – С. 79-84.
69. Подольский Вл.П. Применение укрепленного органоминерального грунта в дорожном строительстве / Вл.П. Подольский, А. Н. Канищев, А.Е. Борисов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2016. – № 2. – С. 10-13.
70. Подольский Вл.П. Технология и организация строительства автомобильных дорог: учебное / Вл.П. Подольский, А.В. Глагольев, П.И. Поспелов. – Воронеж: ВГУ, 2005. – 528 с.
71. Подольский Вл.П. Техничко-экономические аспекты ремонта покрытий с использованием асфальто-щебеночно-грунтовой смеси / Вл.П. Подольский, А.Н. Канищев, А.Е. Борисов // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2017. – № №2 (46). – С. 97-104.
72. Полякова О.П. Базисно-индексный метод определения сметной стоимости строительно- монтажных работ с использованием программного комплекса «Гранд-смета» : методические указания к лабораторным работам и практическим занятиям / О.П. Полякова, О.М. Шинковская. – Томск: ТГАСУ, 2014. – 34 с.
73. Предварительный национальный стандарт 322-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Технические условия: дата введения 01 июля 2019. – М.: Стандартиформ, 2019. – 24 с.
74. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах / П.А. Ребиндер. – М.: Наука, 1978. – 368 с.
75. Ребиндер П.А. Современные проблемы физической химии. Том 3. / П.А. Ребиндер. – М.: Наука, 1958.
76. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика / П.А. Ребиндер. – М.: Наука, 1958. – 64 с.

77. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур / П.А. Ребиндер. – М.: Наука, 1966.
78. Руководство по производству работ дорожным мастером (при содержании и ремонте автомобильных дорог). – М.: 28. Государственная служба дорожного хозяйства министерства транспорта РФ, 2001. – 48 с.
79. Современные методы и средства ямочного ремонта дорожных покрытий // Еженедельник «Стройка»: информационно-строительный портал: сайт. – URL: <http://library.stroit.ru/articles/jamremont> (дата обращения: 19.06.2021).
80. Садило М.В. Автомобильные дороги: строительство и эксплуатация: учебное пособие / М.В. Садило, Р.М. Садило. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2011. – 367 с.
81. Сергеев А.С. О промерзании глинистого грунта и миграции воды в конструкции дорожной одежды / А.С. Сергеев, Б.С. Юшков // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 1-14.
82. Силкин В.В. Асфальтобетонные заводы: учебное / В.В. Силкин, А.П. Лупанов. – М.: Экон-Информ, 2008. – 266 с.
83. Силкин В.В. Технология и организация работ на производственных предприятиях дорожного строительства: учебное / В.В. Силкин. – М.: Ассоциации строительных вузов, 2005. – 208 с.
84. Симанович В.М. Особенности определения затрат в локальных сметных расчетах (сметах) на основе сметно-нормативной базы ценообразования 2001 года: Практическое / В.М. Симанович, Е.Е. Ермолаев. – М.: Стройинформиздат, 2009. – 269 с.
85. Симанович В.М. Поправочные коэффициенты к сметным нормативам (нормам и расценкам). Значения и условия их применения при составлении локальных смет / В.М. Симанович. – М.: Стройинформиздат, 2004. – 96 с.

86. СП 78.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85 Автомобильные дороги: дата введения Дата введения 2013-07-01. – М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2013. – 89 с.
87. СП 34.13330. 2012. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85\*. Автомобильные дороги: дата введения Дата введения 2013-07-01. – М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2012. – 107 с.
88. Справочная энциклопедия дорожника. Том I. Строительство и реконструкция автомобильных дорог / под ред. проф. А.П. Васильева. – М.: Информавтодор, 2015. – 1519 с.
89. СТО НОСТРОЙ 2.25.159-2014. Автомобильные дороги. Холодная регенерация конструктивных слоев для устройства оснований дорожных одежд. Правила, контроль выполнения и требования к результатам работ. – М.: НП МОД СОЮЗДОРСТРОЙ, 2016. – 51 с.
90. Строительство автомобильных дорог: учебник / под ред. В. В. Ушакова и В. М. Ольховикова. – М.: Кнорус, 2013. – 576 с.
91. Сюньи Г.К. Использование старого асфальтобетона / Г.К. Сюньи, Л.В. Билай // Автомобильные дороги. – 1969. – № 8. – С. 12-14.
92. Сюньи Г.К. Регенерированный дорожный асфальтобетон / Г.К. Сюньи, К.Х. Усманов, Э.С. Файнберг. – М.: Транспорт, 1984. – 118 с.
93. Тайлакова А.А. Оптимизационные модели расчета конструкции нежестких дорожных одежд / А.А. Тайлакова, А.Г. Пимонов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 3 (109). – С. 149-156.
94. Теплотермодинамические аспекты дорожных одежд / Б.М. Хрусталева, Лю Тингуо, Ю.Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 1. – С. 28-35.
95. Тимофеев А.А. Использование и переработка старого асфальтобетона / А.А. Тимофеев. – М.: Стройиздат, 1976. – 80 с.

96. Торская Е.В. Анализ напряженно-деформированного состояния многослойных дорожных одежд / Е.В. Торская, Н.А. Лушников, П.А. Лушников // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 2. – С. 204-210.
97. Третьякова О.В. Нормальные напряжения морозного пучения как функция избыточной влажности / О.В. Третьякова // Инженерно-строительный журнал. – 2017. – № 8. – С. 130-139.
98. Ухин Д.В. Математическая модель расчета температуры многослойной конструкции дорожной одежды в условиях перемены температур / Д.В. Ухин // Вестник ВолгГАСУ. – 2010. – № 17 (36). – С. 66-69.
99. Ухин Д.В. Моделирование теплопереноса в дорожной конструкции, оборудованной системой снеготаяния / Д.В. Ухин, Вл.П. Подольский // Научный Вестник ВГАСУ. – 2008. – № 3. – С. 144-151.
100. Федеральная целевая программа «Развитие транспортной системы России (2010-2020)» Подпрограмма «Автомобильные дороги». – М.: Министерство транспорта РФ, 2013. – 139 с.
101. Филатов С.Ф. Восстановление асфальтобетонных покрытий методом холодного ресайклинга: учебное / С.Ф. Филатов. – Омск: СибАДИ, 2009. – 71 с.
102. Филатов С.Ф. Ремонт дорожных покрытий в зимних условиях гранулированными асфальтобетонными смесями / С.Ф. Филатов, О.А. Рычкова. – Омск: СибАДИ, 2011. – 78 с.
103. Цаплин А.И. Расчетный анализ переноса влаги грунтовых вод в основании дорожной одежды и прогнозирование параметров дренажной системы / А.И. Цаплин, М.Е. Жалко // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2018. – № 4 (52). – С. 68-73.
104. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния трубопровода при пучении грунта / М.П. Лебедев, П.П. Пермяков, Дж.С. Иванов, Ю.А. Яковлев // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2018. – Т. 25, № 3. – С. 114-120.

105. Application of New Technological Decisions While Working by the Method of Cold Regeneration / A.N. Kanichshev, A.E. Borisov, A.A. Bykova [и др.] // International Journal of Civil Engineering and Applications. ISSN 2249-426X Volume 10. – 2020. – № 1. – P. 1-7.
106. Borisov A.E. Repair Technology Development of Non-Rigid and Intermediate Types of Road Structure with Application of New Material from Asphalt-Road Stone-Soil Mix as Structural Layer / A.E. Borisov, A.N. Kanischev, F.V. Matvienko // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11. – 2016. – № 14 . – P. 8226-8228.
107. Chen Xiaotong. Construction of road surfaces on the bases of reinforced soils / Chen Xiaotong, Chao Jiexian, Zhang Jun, Chen Rongsheng // Doughan daxue xuebao. Ziran kexue ban. J. Southeast Univ. Natur. Sci. Ed. – 2001. – №3. – P. 7-10.
108. Cold recycling. Wirtgen cold recycling technology. – Gmbh: Winghagen, 2012. – 367 P.
109. Construction Processes. State of the Art Report / J. Chu, S. Varaksin, U. Klotz, P. Mengé // Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. – Alexandria, Egypt, 2009. – P. 14–28.
110. Harber C New ideas for recycled pavement / C Harber // Recycl. Today. – 1995. – № 11. – P. 70-74.
111. Harris C. D. Cutler repave a new concept in pavement Rtsur fasing / C. D. Harris // Highway engineering. – 1983. – № 6. – P. 29-39.
112. Kasal J. Baustoff-Recycling in der CSFR / J. Kasal // Baust. Re-cycl.+Deponietechn. 1992. – 6. – № 8. – P. 12-13, 15-16.
113. Lau, C. K. Slope Stability Analysis and Stabilization: New Methods and Insight. / C. K. Lau, Y. M. Cheng Hardcover. 1st Edition. – 2008. – 241 P.
114. Reuben H. Karol. Chemical Grounding And Soil Stabilization, Revised And Expanded / Reuben H. Karol. New Jersey, USA. – 2003. – 584 P.

115. Rosberg K. Untersuchung zur verdichtung von emulsions gebundener / K. Rosberg, L.Langhammer // Asphalt – Schotter – Gemischen im Kaltrecycling. – 1994. – №2. – P. 54-61.

116. Козлов В. А. Моделирование работы дорожной конструкции со слоем из укрепленного материала / В. А. Козлов, В. В. Волков, А. Е. Борисов // Строительная механика и конструкции. - 2022. - № 3 (34). - С. 7-19.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Технологическая карта по строительству конструктивного слоя дорожной одежды из грунтобетонной смеси

Длина заготовки	500 м	
Наименование работ и операций	5. Профилировка автогрейдером с заданием необходимых уклонов 6. Окончательное уплотнение	
Машины и механизмы	5. Автогрейдер 6. Каток	
Материалы	1. Портландцемент марки не ниже М400 2. Вода с полимерной добавкой или без нее	
<p>План потока</p>		



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Акт строительства опытного участка

Акт  
строительства опытного участка на ул. Корольковой в г. Воронеже.

Мы нижеподписавшиеся, заместитель руководителя департамента транспорта и автомобильных дорог Воронежской области Дудин А.М., директор ООО «РесайклерДорСтрой» Мироненко О.А., генеральный директор ООО «ВЭЛТ» Канищев А.Н., аспирант кафедры строительства и эксплуатации автомобильных дорог ФГБОУ ВО «ВГТУ» Борисов А.Е., составили настоящий акт о том, что 15 сентября 2015 г. на объекте: «Автомобильная дорога в г. Воронеже по улице Корольковой в направлении ж/д переезда» был построен опытный участок общей площадью 700 м<sup>2</sup>.

При строительстве опытного участка в качестве слоя основания применялась асфальто-щебеночно-грунтовая смесь, укрепленная цементом. Работы производились методом холодного ресайклинга, технологические операции выполнялись на «месте».

Производство работ начиналось с распределения цемента при помощи цементораспределителя в сухом виде непосредственно на существующее покрытие из расчета 30 кг на 1 м<sup>2</sup>. В качестве ведущей машины использовался ресайклер Wirtgen WR 240, который фрезеровал асфальтобетон, захватывая щебеночное основание и грунт на глубину 30 см с одновременным перемешиванием цемента и добавлением воды с полимерной добавкой из расчета 1 л/м<sup>2</sup>. Рабочая скорость составляла 5 - 7 м/мин. Каждый проход фрезерования выполнялся на ширину 2,4 м. Длина опытного участка составляет 100 м.

Для определения эффекта, получаемого от применения полимерной добавки, экспериментальный участок разделили на две части. На одной половине в качестве вяжущего используется цемент с добавкой, на другой цемент без добавки. Для определения характеристик полученного материала непосредственно после работы ресайклера, отбирались образцы смесей, доставлялись и испытывались в сертифицированной дорожно-строительной лаборатории.

Для устройства замыкающего слоя использовался щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-15 толщиной 5 см. Смесь доставлялась автосамосвалами КАМАЗ с асфальтобетонного завода. Время перевозки составляло 20-30 минут. Укладка производилась асфальтоукладчиком «Vogele Super», уплотнение комбинированным катком «Hampt» и тяжелым катком «Bomag». Температура при укладке составила не менее 145 °С.

Движение по участку было открыто сразу же после окончания выполнения работ.

По результатам многолетних наблюдений основание, выполненное по вышеуказанной технологии, находится в работоспособном состоянии и обеспечивает требуемую несущую способность дорожной конструкции.

Заместитель руководителя департамента транспорта  
и автомобильных дорог Воронежской области

Дудин А.М.

Генеральный директор  
ООО «ВЭЛТ» д.т.н., проф.

Канищев А.Н.

Директор ООО «РесайклерДорСтрой»

Мироненко О.А.

Аспирант кафедры строительства и  
эксплуатации автомобильных дорог  
ФГБОУ ВО «ВГТУ»

Борисов А.Е.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Акт внедрения результатов диссертационной работы

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Воронежский государственный технический университет»  
(ВГТУ)

В диссертационный совет 24.2.286.02 (Д 212.037.11 переименован с 03.06.2021г.  
приказом Минобрнауки России от 03.06.2021г. N 561/нк)

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

#### результатов диссертационной работы

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Борисова Артема Евгеньевича на тему: «Технология ремонта облегченных и переходных типов дорожной одежды с использованием асфальто-щебеночно-грунтовой смеси» использованы в научно-исследовательской работе по государственному контракту №7 – П от 30.06.2016г. по теме: «Методические рекомендации по применению на территории Воронежской области технологий производства работ и применяемых материалов при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте и ремонте автомобильных дорог регионального, межмуниципального и местного значения» и внедрены в учебный процесс на кафедре строительства и эксплуатации автомобильных дорог ВГТУ для студентов по направлению подготовки: бакалавриат 08.03.01 Строительство. Профиль: Автомобильные дороги; специалитет 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений. Специализация: Строительство автомагистралей, аэродромов и специальных сооружений.

Заведующей кафедрой строительства  
и эксплуатации автомобильных дорог

ФГБОУ ВО «ВГТУ»,

д.т.н., профессор

Первый проректор-

проректор по науке

ФГБОУ ВО «ВГТУ»,

д.т.н., профессор



Подольский Вл. П.



Дроздов И. Г.