

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Воронеж –2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Козлов Владимир Анатольевич**,
доктор физико-математических наук,
доцент

Официальные оппоненты: **Бондарев Борис Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Липецкий государственный
технический университет", кафедра
строительного материаловедения и
дорожных технологий, профессор.

Зубков Анатолий Федорович,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Тамбовский государственный
технический университет", кафедра
"Городское строительство и автомобильные
дороги", профессор.

Ведущая организация: Федеральное автономное учреждения
«Российский дорожный научно-
исследовательский институт» (ФАУ
«РОСДОРНИИ», Воронежский филиал)

Защита состоится «26» декабря 2022 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.02, созданного на базе Воронежского государственного технического университета, по адресу: г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, корпус 2, ауд. 2226а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного технического университета и на сайте <http://cshgeu.ru>.

Автореферат разослан «22» октября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чуйкин С. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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. 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, сокращения 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 снижение 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 грантобетонной 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 регламентируется. 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 технологию 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 для 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 со 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.

1. 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.

2. 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.

3. 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.).

Внедрение 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. Кроме того, 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. 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»

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, определены цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен анализ состояния автомобильных дорог с покрытиями нежесткого типа, рассмотрены технологии ремонта покрытий и оснований дорожных одежд.

Проводимый в настоящее время объем ремонтных работ позволяет поддерживать существующую сеть автодорог, отодвигая сроки ухудшения транспортно-эксплуатационных показателей. Но с учетом ограниченного финансирования проводимые работы не всегда бывают достаточными для доведения показателей до нормативных значений. Несвоевременность выполнения ремонтных мероприятий ведет к сокращению срока службы дорожной одежды, увеличению объема по устранению дефектов конструктивных слоев в дальнейшем, увеличению финансовых затрат, а также оказывает негативное влияние на безопасность движения транспортных средств, комфортность перевозки пассажиров и грузов.

При проведении ремонтных работ на практике часто оказывается, что конструкция дорожной одежды состоит из тонкослойного асфальтобетонного покрытия и щебеночного основания. При фрезеровании тонкослойных конструкций достаточно часто вместе с дорожной одеждой фрезеруются песчаный подстилающий слой и верхние слои земного полотна. В результате для переработки получается смесь асфальтобенного гранулята, щебня и грунта, который оказывает большое влияние на характеристики получаемого после укрепления конструктивного слоя дорожной одежды. При этом количество грунта может быть равно, а иногда и превышает количество асфальтобенного гранулята вместе со щебнем. Это объясняется тем, что при строительстве автодорог с дорожными одеждами, имеющими невысокую прочность и низкую

интенсивность движения, строятся тонкослойные покрытия на щебёночном основании. Под воздействием колесной нагрузки и атмосферных факторов происходит разрушение щебёночного основания и перемешивание его с грунтом. В результате после фрезерования визуально щебня практически не видно, а наблюдаем только небольшое содержание асфальтового гранулята (рис. 1).

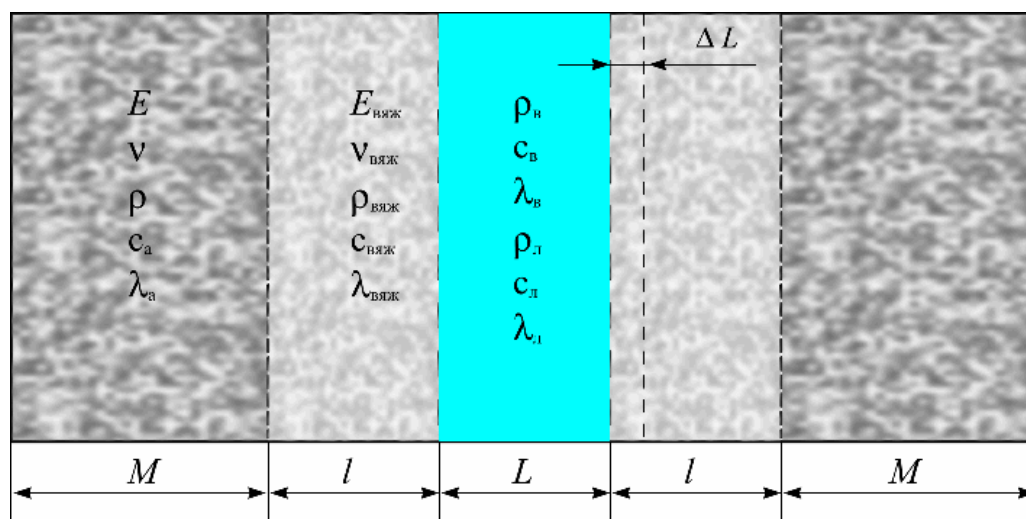


Рисунок 1

При такой ситуации необходимо в первую очередь рассматривать взаимодействие вяжущего с грунтом, содержащего асфальтовый гранулят и остатки щебёночного основания.

В связи с изложенным, разработка технологии ремонта дорожной одежды облегченного и переходного типа с использованием материалов старой дорожной одежды (асфальтобетона, щебёночного материала и грунта) в качестве конструктивных слоев дорожной одежды, является своевременной, актуальной и весьма важной задачей.

Во второй главе изложены результаты математического моделирования работы слоев дорожной одежды со слоем из укрепленного материала (рис. 2). В предлагаемой математической модели принимается, что слой вяжущего вокруг минеральных компонентов старого асфальтобетонного покрытия при замерзании воды становится тоньше на ΔL .



E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность; c_a – теплоёмкость асфальтобетона; λ_a – теплопроводность; M – толщина минерального материала; l – толщина вяжущего; L – толщина жидкости (воды); ΔL – приращение размера поры

Рисунок 2 – Физическая модель возникновения приращения поры при замерзании воды в ней

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. При этом можно сделать предположение о наличии оптимальной величины пористости для подбираемого состава грунтобетонной смеси с последующим её уплотнением, обладающей устойчивостью к разрушающему действию воды при замерзании. Последнее способствует увеличению количества циклов замораживания-оттаивания и стойкости формируемого конструктивного слоя к неблагоприятным погодным факторам.

Изменение температуры T в конструкционных слоях дорожной одежды в общем случае может быть описано уравнением нестационарной теплопроводности Фурье

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T), \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость материалов конструкции, $\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$; λ – коэффициент теплопроводности материала, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$; ρ – плотность материала, кг/м^3 ; t – время, с .

В слое деструкции дорожной конструкции движение фронта фазового перехода происходит с поглощением или выделением тепла. Это приводит к расчету задачи распределения (спектре) температур по толщине конструкции. Для решения поставленной задачи введем понятия эффективных теплоемкости C_3 и теплопроводности λ_3 , уравнение (1) принимает вид:

$$C_3 \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_3 \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right). \quad (2)$$

Примем, что эквивалентные теплоемкость и теплопроводности связаны с фазовой зависимостью процесса замерзания-таяния воды, заполняющей поры:

$$C_3 = \begin{cases} (c\rho)_3 + L\rho_a \frac{\partial W_m(T)}{\partial T} \\ (c\rho)_ж \\ (c\rho)_{\text{сух}} \end{cases}, \quad \lambda_3 = \begin{cases} \lambda_3 \\ \lambda_ж \\ \lambda_{\text{сух}} \end{cases}, \quad \begin{matrix} T \leq T_\phi \\ T > T_\phi \end{matrix}, \quad (3)$$

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.

С учетом (2) из (3) получим обобщенное уравнение

$$(C_3)_i \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right), \quad i = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Здесь $(C_3)_i$ – удельная теплоемкость материалов слоя с номером i , $\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$, где ρ_i – плотность материала i -го слоя, кг/м^3 ; λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$.

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_ϕ : $W_m - W_H(T_\phi)$. Остальная вода кристаллизуется в зоне промерзания по мере дальнейшего понижения температуры слоя. С учетом выше указанного можно записать

$$\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda_{ж} \frac{\partial T}{\partial x} = L\rho(W_m - W_H(T_\phi)) \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad (5)$$

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

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

$$c_3 = c_a + c_{вяж} + c_b W_b, \quad c_{ж} = c_a + c_{вяж} + c_b W_H(T) + c_l (W_m - W_H(T)), \quad (6)$$

где c_3 , $c_{ж}$ – теплоемкости слоя дорожной конструкции в полностью замёрзшем и талом состояниях, $кДж/кг \cdot K$; W_m – процентное содержание воды в порах слоя из грунтобетонной смеси.

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

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_a \cdot \lambda_{вяж}}{\lambda_a + \lambda_{вяж}} - S_{п} \left(\frac{\lambda_a \cdot \lambda_{вяж}}{\lambda_a + \lambda_{вяж}} - \lambda_{л} \right), \quad \lambda_{ж} = \frac{\lambda_a \cdot \lambda_{вяж}}{\lambda_a + \lambda_{вяж}} - S_{п} \left(\frac{\lambda_a \cdot \lambda_{вяж}}{\lambda_a + \lambda_{вяж}} - \lambda_b \right), \quad (7)$$

где λ_3 , $\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности конструктивного слоя из гранулированного материала с замерзающей и талой водой, $Вт/м \cdot K$; $S_{п}$ – удельная площадь пор и трещин в процентах от площади конструктивного слоя.

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

$$\rho_3 = \rho_a - (\rho_b - \rho_l) W_b, \quad (8)$$

где ρ_3 , $\rho_{ж}$ – плотность слоя с замерзшей или талой водой, $кг/м^3$.

В математическом виде рассматриваемая задача сводится к решению дифференциальных уравнений трех физических процессов. Первый процесс связан с действием температуры на фазовое состояние 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.

В основу определения количества воды в материале слоя положено предположение о полном обволакивании ею гранулы грунтобетонной смеси. Гранулы без пленки воды имеют линейный размер $R_{гр}$, и тогда объем

$$R_{гр} = (M + l) \times 2, \quad V_{гр} = R_{гр}^3. \quad (9)$$

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

$$V_{смеси} = \sum_{гр=1}^N n_{гр} \times V_{гр}, \quad (10)$$

где индекс «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:

$$V_m = \sum V_{гр} \times n_{гр} \times k_n. \quad (11)$$

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

$$V_v = 8 \times \left((M + l + h_{пл})^3 - (M + l)^3 \right), \quad (12)$$

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

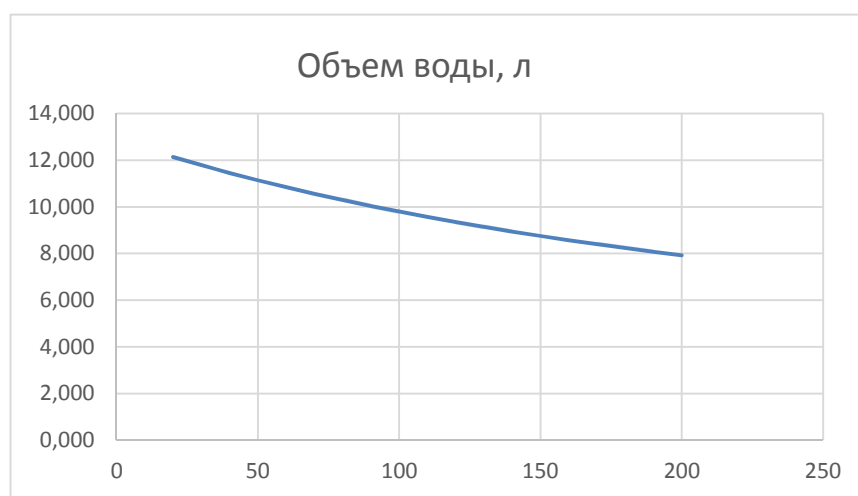


Рисунок 3 – Расчетное количество воды в кубическом метре слоя из грунтобетонной смеси в зависимости от толщины водной пленки, мкм

На основании выше изложенного был получен расчет количества воды в кубическом метре гранулята в зависимости от гранулометрического размера и расстояния между гранулами (рис. 3). 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.

На рис. 4 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°C до -10°C . Заметное возрастание усилия при температуре -8°C вызвано возрастанием модуля упругости вяжущего.

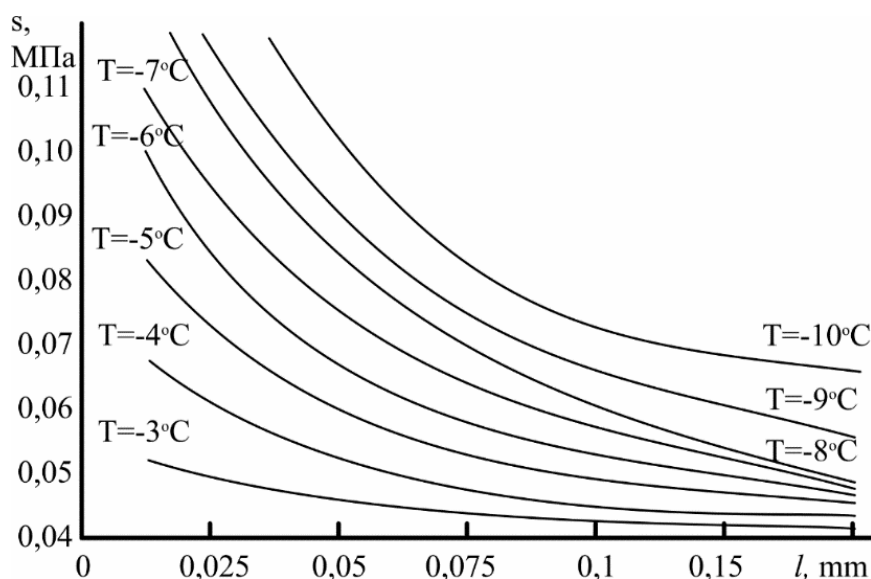


Рисунок 4 – Усилия, возникающие между гранулами, покрытыми органическим вяжущим при различных температурах

С увеличением толщины вяжущего воздействие расширяющегося льда уменьшается, имея перегиб в области 50 – 100 мкм (рис. 4). 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.

Представленная графическая зависимость подтверждает необходимость 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.

Наличие теплоемкости в материалах 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.

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 грунтобетонной 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 грунтобетонной 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/м³.

Были проведены экспериментальные исследования по определению оптимальных соотношений компонентов грунтобетонной смеси, укрепленной цементом (табл. 1).

Таблица 1 – оптимальных соотношений 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 ³
$q_{ср}$, г/см ³		2,17	2,18
Водонасыщение, % по объему		11,25	10,73
Предел прочности при сжатии на 7 сутки	R _{20сух} , МПа	3,82	4,19
	R _{20вод} , МПа	3,67	4,07
	R ₅₀ , МПа	2,07	2,11
Предел прочности при сжатии на 28 сутки (R ₂₀)		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

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/м³, переходя в трудно формируемый слой при 15 л/м³. 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.

В третьей главе приведены результаты исследования физико-механических характеристик различных грунтов, укрепленных вяжущими веществами. Определен гранулометрический состав, физико-механические характеристики представленных материалов.

Обширная территория Российской Федерации характеризуются 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 с интенсивностью движения до 100 авт./сутки, 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.

Были разработаны и испытаны различные варианты укрепления грунтов, с применением в качестве вяжущих веществ портландцемента, полимерных добавок, гашеной извести с использованием песка, как минерального заполнителя. 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 (Ip) составляет 13,62, а образец 4 содержит гумусовые вещества в количестве 11%.

Полученные результаты с рекомендациями по применению в качестве дополнительного и конструктивного слоя основания сведены в таблице 2. В результате проведенных лабораторных исследований установлено, что 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 транспортные расходы на доставку и оплату дорожно-строительных материалов.

Таблица 2 – варианты грунтов апробированных рецептур укрепления слоя

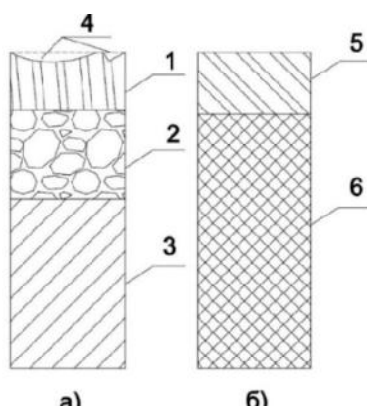
Применение в зависимости от среднемесячной температуры воздуха района			
от 0 ⁰ С до -5 ⁰ С		от -5 ⁰ С до -15 ⁰ С	
Тип дорожной одежды – переходный ; конструктивный слой – основание			
Исходные материалы	Содержание цемента, %	Исходные материалы	Содержание цемента, %
ОМГ 30%, песок 70%	8,7; 7,8; 6,9	ОМГ 30%, песок 70%, ПД 0,90%	8,7
ОМГ 30%, песок 70%, ПД 0,90%	8,7	Песок 100%, ПД 0,55%	5,5
Песок 100%, ПД 0,55%	5,5		
Суглинок с мелом 100%, ПД 0,60%	6,0	Суглинок с мелом 100%, ПД 0,60%	6,0
Суглинок с мелом 100%, ПД 0,60%	6,0		
Тип дорожной одежды – облегченный ; конструктивный слой – дополнительный слой основания			
ОМГ 30%, песок 70%	7,8; 6,9	ОМГ 50%, песок 50 %, БЭ 5%	9,0
ОМГ 50%, песок 50%, ПД 0,90%	8,0		
ОМГ 50%, песок 50%, ГИ 4%	9,0		
ОМГ 50%, песок 50%, БЭ 5%	9,0		
ОМГ 50%, песок 50%, БЭ 5%, ГИ 12%	9,0		
ОМГ 100%, ПД 1,0%	10,0		
ОМГ 75%, песок 25%, ПД 0,95%	9,5		
Песок 100%, ПД 0,55%	5,5	Песок 100%, ПД 0,55%	5,5
Песок 100%	5,5	Песок 100%, ПД 0,55%	5,5
Песок 100%, ПД(2) 0,55%	5,5	ОМГ 75%, песок 25%, ПД(2) 0,80%	8,5
ОМГ 75%, песок 25%, ПД(2) 0,80%	8,5	ОМГ 50%, песок 50%, ПД(2) 0,70%	8,0
ОМГ 50%, песок 50%, ПД(2) 0,70%	8,0	ОМГ 50%, песок 50 %, ПД(2) 0,90%	8,0
ОМГ 50%, песок 50 %, ПД(2) 0,90%	8,0		
ОМГ 50%, песок 50%, ПД(3) 0,70%	8,0	ОМГ 50%, песок 50%, ПД(3) 0,70%	8,0
ОМГ 50%, песок 50%, ПД(3) 0,90%	8,0		
Суглинок с мелом 100%, ПД(2) 0,50%	6,0	Суглинок с мелом 100%, ПД(3) 0,50%	5,0
Суглинок с мелом 100%, ПД(3) 0,60%	6,0		
Суглинок с мелом 100%	6,0		
ОМГ 50%, суглинок с мелом 50%, ПД(3) 0,95%	9,5	Суглинок с мелом 100%	6,0

Примечания: процентное содержание вяжущих веществ взяты от суммарной массы грунтов 100%. ОМГ – органо-минеральный грунт; ПД – полимерная добавка; ГИ – гашеная известь; БЭ – битумная эмульсия.

Четвёртая глава посвящена технологии устройства основания дорожной одежды из грунтобетонной смеси и технико-экономическому обоснованию эффективности ее применения.

На рис. 5 представлена типовая конструкция дорожной одежды, на примере которой разработана технология устройства конструктивного слоя 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. 5,а) дорожная конструкция до проведения ремонтных работ содержала достаточно большое количество дефектов, для устранения которых необходимо было заменить основания. На рис. 5,б) показана разработанная технология с использованием в основании

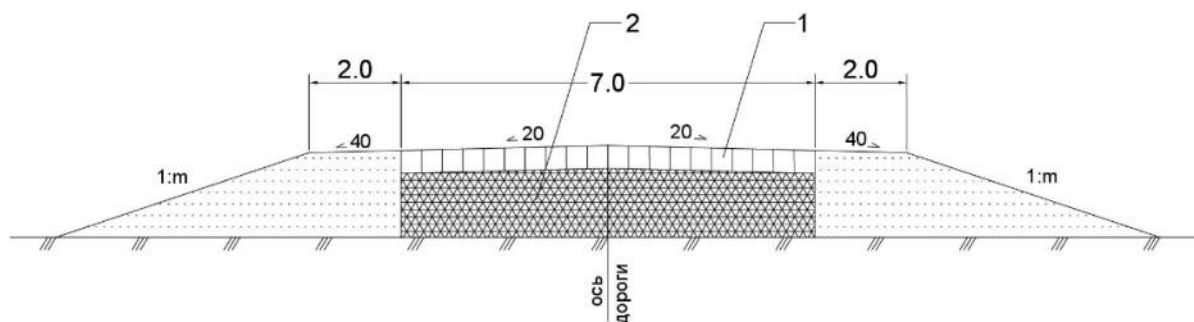
асфальтобетонного гранулята, щебня и грунта. Данная технология позволяет создать морозостойкое и прочное основание, которое можно эксплуатировать в различных дорожно-климатических зонах. При этом вновь формируемый слой устраняет дефекты покрытия и одновременно приводит к экономии финансовых средств, так как используются материалы существующей конструкции, не требующих транспортных затрат (срезка и укладка слоя происходит на месте за один проход машины). Важными этапами в применении данной технологии является подбор количества добавляемого вяжущего и полимерной добавки. Количество вносимого минерального материала подбирают с расчетом получить максимально высокие физико-механические характеристики укрепленного материала (прочность, морозостойкость, водостойкость).



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

Рисунок 5 – Конструкция восстанавливаемой дорожной одежды
а) - типовая, б) - предлагаемая

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. 6.



1 – асфальтобетонная смесь - 0,05 см, 2 – грунтбетонная смесь - 0,30 см

Рисунок 6 – Поперечный профиль участка дороги

В предлагаемом варианте основания состоит из материалов, ранее составляющих конструкцию ремонтного участка, а именно: асфальтобетонного гранулята, щебня и грунта, который оказывает достаточно серьезное влияние на характеристики получаемого после укрепления конструктивного слоя дорожной одежды. Покрытие – замыкающий слой, выполняется из горячего асфальтобетона.

После проведения лабораторных испытаний был построен опытный участок с применением в качестве вяжущего цемента, а также введении вместе с цементом добавки специального полимера. Открытие движения с ограничением скорости по уложенному конструктивному слою возможно сразу после окончательного уплотнения фрезерованного слоя, а перекрытие слоем асфальтобетона необходимо выполнить в течение суток.

Основные статьи экономии по предлагаемой технологии:

- отсутствуют затраты по вывозу материалов старых дорожных одежд;
- затраты по транспортировке новых материалов существенно сокращаются;
- отсутствуют затраты на создание площадок и мест хранения материалов;
- трафик движения большегрузных автомобилей по местным дорогам минимален;
- уменьшение сметной стоимости работ по сравнению с традиционной технологией ремонта;
- работы выполняются быстрыми темпами с минимальным количеством техники, что позволяет избежать закрытия автомобильной дороги на время проведения работ;
- оперативное выполнение работ сокращает ремонтные сроки.

Технико-экономические расчеты, проведенные с учетом фактических производственных затрат предлагаемой технологии, показали её эффективность. Предлагаемая технология ремонта дорожной одежды облегченного и переходного типа с использованием материала из грантобетонной 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 регламентируется.

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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. **Борисов А. Е.** 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.
2. **Борисов А. Е.** 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. – 2017. – №1(45). – С. 84-92.
3. **Борисов А. Е.** 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.
4. **Борисов А. Е.** Методы снижения количество дорожно-транспортных происшествий за счет комплексного подхода к обеспечению безопасности / А. Н. Канищев, А. Е. Борисов, Т. В. Каратаева // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2021. – №1(61). – С. 86 - 95.
5. **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.
6. **Борисов А. Е.** 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.

Статьи в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus:

7. **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.
8. **Alexandr N. Kanichshev, Artoym E. Borisov, Albina A. Bykova, Yana A. Bykova, Tatiana V. Mordovtseva.** Application of New Technological Decisions While Working by the Method of Cold Regeneration // International Journal of Civil Engineering and Applications. ISSN 2249-426X Volume 10, Number 1 (2020), pp. 1-7. © Research India Publications [http:// www.ripublication.com](http://www.ripublication.com)

Статьи в других изданиях:

9. **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 (04.03.2017 г.)». Часть 1, г. Санкт-Петербург. – 2017. – С. 50-54.

10. **Борисов А. Е.** Анализ существующих технологических решений при ремонте дорожных покрытий // ADVANCES OF SCIENCE Proceedings of articles II International scientific conference [Electronic resource]. Editors K.N. Vojnov, I.V. Vagner, A.S. Tihon. Karlovy Vary–Moscow, 29-30 марта 2017 года. – Киров: Международный центр научно-исследовательских проектов. – 2017. – С. 351-356.
11. **Борисов А. Е.** Техничко-экономические аспекты ремонта покрытий с использованием асфальто-щебеночно-грунтовой смеси / Вл. П. Подольский, А. Н. Канищев, А. Е. Борисов // Всероссийский ежемесячный отраслевой журнал «Строительство: новые технологии - новое оборудование. – 2017. – №9. – С. 8-13.

БОРИСОВ АРТЕМ ЕВГЕНЬЕВИЧ

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 19.10.2022 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага писчая. Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № 365.

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии
Воронежского государственного технического университета
394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84