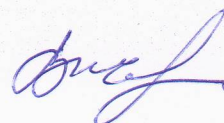


В печать  
9.02.2024

На правах рукописи

Жеванов Вячеслав Владимирович



**РЕСУРСО- И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ВЛАЖНЫЕ  
АСФАЛЬТОПОЛИМЕРШЛАКОБЕТОННЫЕ СМЕСИ  
ДЛЯ ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА НЕЖЕСТКИХ ОДЕЖД  
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

05.23.05 – строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Макеевка – 2020

Работа выполнена на кафедре «Автомобильные дороги и аэродромы» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

**Научный руководитель:** **Братчун Валерий Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры», заведующий  
кафедрой «Автомобильные дороги и аэродромы».

**Официальные оппоненты:** **Кондращенко Валерий Иванович,**  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник,  
ФГАОУ ВО «Российский университет  
транспорта», профессор кафедры  
«Строительные материалы и технологии»;

**Нагорная Нина Павловна,**  
кандидат технических наук, доцент,  
ГО ВПО «Донецкий национальный  
университет экономики и торговли  
им. Михаила Туган-Барановского»,  
доцент кафедры товароведения.

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Крымский федеральный  
университет им. В. И. Вернадского»  
г. Симферополь.

Защита состоится «15» апреля 2021 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал учёного совета. Тел. факс: +38(0623) 43-70-33, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «    »                      2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 01.006.02

Лахтарина Сергей Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В последние годы в Донецкой Народной Республике, Российской Федерации, Германии и других странах для поддержания сети автомобильных дорог в надлежащем эксплуатационном состоянии внедряется превентивная система ремонтных работ, которая заключается в использовании энергосберегающих технологий и применении эффективных материалов: качественных битумных эмульсий, модифицированных битумов, влажных и холодных асфальтобетонных смесей и др. При этом обеспечивается возможность круглогодичного проведения работ по строительству и ремонту дорожных асфальтобетонных покрытий без снижения их деформационно-прочностных характеристик.

Наиболее перспективными и экономически выгодными являются технологии, позволяющие выполнять оперативный ремонт дорожного покрытия при низких температурах окружающей среды с использованием композиционной холодной асфальтобетонной смеси, содержащей качественный минеральный материал плотного зернового состава и жидкое органическое вяжущее. Данную смесь заранее приготавливают на асфальтобетонном заводе, складывают и укладывают в холодном состоянии. Однако, жидкие органические вяжущие не обладают достаточной адгезионно-когезионной прочностью, что приводит к неудовлетворительной прочности, водостойкости и недостаточной устойчивости холодного асфальтобетона к сдвиговым деформациям при высоких положительных температурах.

**Степень разработанности темы исследования.** Основываясь на теоретических и экспериментальных исследованиях А. Н. Бачурина, В. И. Братчуна, В. А. Веренько, Л. М. Гохмана, В. А. Золотарёва, Н. Н. Иванова, С. К. Илиополова, Ю. И. Калгина, Е. Н. Козловой, И. В. Королёва, Э. В. Котлярского, В. А. Мырина, Н. П. Нагорной, В. А. Матвиенко, R. Lundberg, J. P. Walter, J. Robson, A. Dulaimi, J. Scherrockman, M. Jerome и др. можно считать, что одним из эффективных способов повышения качества влажного асфальтобетона является использование в качестве минерального материала отсева дробления отвалного мартеновского шлака с введением воды затворения, а в качестве органического вяжущего – жидкого битума, модифицированного эффективными полимерными добавками и получение, таким образом, влажного дорожного бетона с коагуляционно-кристаллизационными контактами.

Анализ литературных данных о способах улучшения свойств влажных и холодных асфальтобетонов на жидких битумных вяжущих показывает, что исследования по применению отсева дробления отвалного мартеновского шлака в качестве минерального материала для влажных асфальтобетонных смесей, приготовленных с использованием битумополимерных вяжущих, отсутствуют.

В связи с этим отсутствуют данные о физико-механических и деформационно-прочностных свойствах влажных асфальтополимершлакобетонов, что не дает возможность назначать рациональные области их применения.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Основные исследования теоретического и прикладного характера осуществлены при выполнении госбюджетной прикладной научно-исследовательской работы: К-2-10-16 «Разработка способов повышения термоокислительной стойкости ас-

фальтобетонных смесей и асфальтобетонов в процессе производства и эксплуатации в покрытиях нежестких дорожных одежд», № 0117D000266 (Министерство образования и науки Донецкой Народной Республики, 2016 – 2020 гг.).

**Целью исследований** является теоретическое и экспериментальное установление физико-механических процессов, происходящих в системе «отсев дробления отвального мартеновского шлака – известь негашеная молотая – жидкий битум, модифицированный катионным латексом марки Butonal NS 198 – вода затворения» и разработка технологии производства оптимальных составов влажных асфальтополимершлакобетонных смесей для текущего ремонта нежестких дорожных одежд автомобильных дорог.

**Объект исследования** – влажные дорожные асфальтополимершлакобетоны с коагуляционно-кристаллизационной структурой с повышенными деформационно-прочностными показателями.

**Предмет исследования** – процессы и явления, определяющие закономерности формирования структуры во влажных асфальтополимершлакобетонах, приготовленных на разжиженных битумополимерных вяжущих и отсева дробления отвального мартеновского шлака.

#### **Задачи исследования:**

- сформулировать теоретические положения о закономерностях формирования структуры и заданных деформационно-прочностных характеристик влажных асфальтополимершлакобетонов.
- установить параметры технологических режимов производства асфальтополимершлакобетонных смесей на разжиженных битумополимерных вяжущих;
- запроектировать состав влажного асфальтополимершлакобетона, характеризующегося оптимальным сочетанием коагуляционно-кристаллизационных контактов;
- изучить технологические режимы укладки и уплотнения влажных асфальтополимершлакобетонных смесей и физико-механические свойства модифицированного асфальтополимершлакобетона;
- определить технико-экономическую эффективность использования влажных асфальтополимершлакобетонов; разработать рекомендации по производству и применению влажных асфальтополимершлакобетонных смесей для текущего ремонта нежестких дорожных одежд в неблагоприятных погодных условиях.

#### **Научная новизна полученных результатов** состоит в следующем:

- теоретически и экспериментально доказана возможность получения влажного асфальтополимершлакобетона с использованием отсева дробления отвального мартеновского шлака, негашеной молотой извести, жидкого битума, модифицированного латексом Butonal NS 198 и воды затворения;
- установлены закономерности структурообразования в системе «отсев дробления отвального мартеновского шлака – известь негашеная молотая – битумополимерное вяжущее – вода затворения»;
- с использованием экспериментально-статистического моделирования определены оптимальные концентрационные соотношения в системе: «отсев дробления

отвального мартеновского шлака (100 %) – негашеная молотая известь (2 %) – разжиженный битум, модифицированный 2,0 % мас. катионным латексом Butonal NS 198 (8 %) – вода затворения (14 %)»;

– показано, что влажные асфальтополимершлакобетоны характеризуются физико-механическими свойствами, сопоставимыми с показателями качества стандартных горячих асфальтобетонов.

#### **Теоретическое и практическое значение полученных результатов:**

– теоретически обоснована целесообразность проектирования состава влажных асфальтополимершлакобетонов, включающих отсеб дробления отвального мартеновского шлака, молотую негашеную известь, разжиженное битумополимерное вяжущее, модифицированное водной дисперсией стирол-бутадиенового каучука и воду затворения, рациональное соотношение которых позволяет сформировать в процессе структурообразования сопряженную пространственную сетку из коагуляционно-кристаллизационных микросвязей, рациональное соотношение которых и определяет эксплуатационные свойства асфальтополимершлакобетона в нежесткой конструкции дорожной одежды;

– для ПАО «Облдорремстрой» разработаны «Рекомендации по производству и применению влажных асфальтополимершлакобетонных смесей для текущего ремонта нежестких дорожных одежд в неблагоприятных погодных условиях»;

– определена предполагаемая экономическая эффективность от внедрения асфальтополимершлакобетонов для ПАО «Облдорремстрой»;

– результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» по профилю «Автомобильные дороги» в курсах «Дорожно-строительное материаловедение и технология производства дорожно-строительных материалов» и «Физико-химическая механика строительных материалов».

**Методология и методы исследования.** Теоретические положения сформулированы на основе положений реологии асфальтобетона, а также физической и коллоидной химии. Экспериментальные исследования выполнены с использованием стандартных и специальных методов: прибор ХАДИ для изучения уплотняемости асфальтобетонных смесей, прибор Маршалла для определения устойчивости и жесткости асфальтобетона, установка для определения усталостной долговечности, устройство для испытания асфальтобетонных балочек на растяжение при изгибе. Для обработки и анализа результатов экспериментальных исследований использованы методы математической статистики.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

– методологические принципы получения дорожных влажных асфальтополимершлакобетонных смесей для строительства и ремонта конструктивных слоев и покрытий нежестких дорожных одежд, обеспечивающих долговечность дорожных одежд асфальтобетонных автомобильных дорог II и III технических категорий, сопоставимых при строительстве и ремонте со стандартными горячими асфальтобетонными смесями, но обеспечивающих снижение энергоемкости производства асфальтобетонных смесей в два раза, техносферную безопасность, использование техногенного сырья в качестве щебня, песка и минераль-

ного порошка и экономическую эффективность 257,56 рублей на одну тонну произведенной асфальтобетонной смеси;

- закономерности формирования структуры в системе «отсев дробления отвального мартеновского шлака – известь негашеная молотая – битумополимерное вяжущее, содержащее водную дисперсию стирол-бутадиенового каучука Butonal NS 198 — вода затворения»;

- способы оптимизации состава и структуры влажного асфальтополимершлакобетона, представленного оптимальным сочетанием отсева дробления отвального мартеновского шлака, извести негашеной молотой, разжиженного битумополимерного вяжущего и воды затворения;

- результаты экспериментальных исследований параметров: технологического процесса производства влажных асфальтополимершлакобетонных смесей, укладки и уплотнения в конструктивные слои нежестких дорожных одежд; физико-механических и деформационно-прочностных свойств асфальтополимершлакобетонов;

- отраслевой нормативный документ «Рекомендации по производству и применению влажных асфальтополимершлакобетонных смесей для текущего ремонта нежестких дорожных одежд в неблагоприятных погодных условиях» (ПАО «Облдорремстрой»).

#### **Личный вклад соискателя:**

- определены оптимальные параметры технологических режимов производства влажных асфальтополимершлакобетонных смесей;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований структурообразования влажных асфальтополимершлакобетонов на битумополимерных вяжущих;

- показатели физико-механических свойств влажных асфальтополимершлакобетонов;

- разработаны «Рекомендации по производству и применению влажных асфальтополимершлакобетонных смесей для текущего ремонта нежестких дорожных одежд в неблагоприятных погодных условиях».

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: значениями экспериментальных данных, полученных с применением современных приборов; адекватностью статистических математических моделей; соответствием результатов эксперимента теоретическим предпосылкам.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы доложены на: научных чтениях памяти доцента кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Александра Дмитриевича Лазько (г. Макеевка, 27 декабря 2018 г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы экономики и управления» (г. Горловка, 29 марта 2019 г.); V международной научно-практической конференции «Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса» в рамках пятого Международного научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса: Инфраструктурное и социально-

экономическое развитие», (г. Горловка, 22 мая 2019 г.); Международной научно-практической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе», (г. Пермь, 7 – 8 ноября 2019 г.); Международной научно-практической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (г. Пермь, 5 – 6 ноября 2020 г.); XVII, XVIII, XIX международных научных конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Макеевка, ДонНАСА, апрель 2018, 2019, 2020 гг.).

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах, в том числе в 6 рецензируемых научных изданиях: 5 работ в сборниках научных конференций и семинаров.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников из 154 наименований на 18 страницах, трёх приложений на 7 страницах, содержит 116 страниц основного текста, 28 рисунков, 9 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, приведены основные научные результаты, показано их практическое значение и область реализации.

В **первом разделе** рассмотрено современное состояние вопроса по использованию в дорожном строительстве модифицированных влажных и холодных асфальтобетонных смесей, а именно: обобщение опыта применения в дорожном строительстве и ремонте влажных и холодных асфальтобетонных смесей; обоснование использования разжиженных битумополимерных вяжущих в качестве эффективного вяжущего материала для дорожных асфальтобетонов; использование отсева дробления отвалного мартеновского шлака как гидравлически активного структурообразующего компонента асфальтобетонной смеси; рассмотрены эффективные способы повышения качества влажных и холодных асфальтобетонов.

На основе анализа зарубежного и отечественного опыта применения влажных и холодных асфальтобетонов установлено, что влажные и холодные асфальтобетонные смеси находят широкое применение в дорожной отрасли. Это обусловлено значительно меньшими энергозатратами на производство данного вида асфальтобетонных смесей, возможностью сохранения готового к использованию материала в рыхлом состоянии длительное время, а также его последующей укладкой при сравнительно низких температурах ( $-20^{\circ}\text{C} \dots +5^{\circ}\text{C}$ ) при проведении экстренного текущего ремонта дорожных покрытий.

Наиболее эффективным направлением повышения качества жидких нефтяных битумов является введение в их состав различных модификаторов, что позволяет улучшить свойства битумов в необходимом направлении для практического применения. Показано, что полимерные модификаторы нефтяных битумов в силу своей физико-химической природы оказывают различное влияние на свойства исходного битума. Наиболее эффективное влияние на весь

комплекс свойств полимер-модифицированного вяжущего оказывает модификация битумов синтетическими термоэластопластами.

Доказана целесообразность использования в качестве заполнителя и тонкодисперсного наполнителя влажных асфальтобетонных смесей отсева дробления отвального мартеновского шлака. Установлено, что мелкодисперсные частицы отсева дробления отвального мартеновского шлака обладают вяжущими свойствами, проявляющимися в процессе гидратации в течение двух лет.

Получение влажных асфальтобетонных смесей для круглогодичного ремонта покрытий с повышенными деформационно-прочностными характеристиками, высокой водостойкостью и повышенной сдвигоустойчивостью асфальтобетона может быть достигнуто с использованием жидких битумов, модифицированных стирол-бутадиеновыми полимерами и применения минеральных компонентов, обладающих гидравлической активностью, в частности, отсева дробления отвального мартеновского шлака.

В первом разделе диссертационной работы разработана блок-схема теоретических и экспериментальных исследований.

Во **втором разделе** сформулированы теоретические положения формирования структуры и свойств влажных асфальтополимершлакобетонов, приготовленных на разжиженных битумополимерных вяжущих.

Процесс производства асфальтобетонных смесей энергоемок и сопровождается значительными выбросами вредных веществ. Одним из эффективных способов снижения энергоемкости производства органоминеральных смесей, возможности использования влажных минеральных материалов и не обезвоженных маловязких органических вяжущих, улучшения условий труда при производстве, укладке и уплотнении асфальтобетонных смесей, является использование маловязких битумополимерных вяжущих, которые сорбируясь на поверхности минеральных частиц и переходя в структурированное состояние обеспечат эластичность системе и сформируют коагуляционные контакты. Тонкодисперсные частицы отсева дробления отвального мартеновского шлака при взаимодействии с водой затворения сформируют во времени кристаллогидратные новообразования. Оптимальное соотношение коагуляционно-кристаллизационных микросвязей и определит деформационно-прочностные характеристики такого композиционного материала.

Объединение отсева дробления отвального мартеновского шлака, нефтяного дорожного битума, модифицированного латексом Butonal NS 198 и щелочи (гидратированной молотой негашеной извести) при оптимальных температурах нагрева минеральных материалов и органических вяжущих необходимо вести в диапазоне температур 85 – 90 °С, так как при данных температурах вязкость среднегустеющего битумополимерного вяжущего составляет  $\eta < 0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

При ведении процесса производства следует ожидать сорбции диспергированных капелек битумополимерного вяжущего на олеофильных центрах шлаковых частиц и их коалисценции. В последующем, в процессе структурообразования после испарения влаги из системы обеспечивается высокая сорбционная способность битумополимерного вяжущего на поверхности шлаковых



частиц и достигаются необходимые показатели физико-механических свойств асфальтополимершлакобетона в короткие сроки формирования его структуры при невысокой энергоёмкости производства влажных холодных асфальтополимершлакобетонных смесей.

Частицы негашеной извести будут осаждаться на частицах шлака, создавая многочисленные центры на поверхности минеральных зерен, повысят их энергетический потенциал. При гидролизе извести образуется гидроксид кальция, который при взаимодействии, например, с асфальтогеновыми кислотами образует кальциевые мыла синтетических жирных кислот. Комплексные органоминеральные вещества должны значительно упрочнить межфазную зону, а, следовательно, и повысить прочность асфальтополимершлакобетона

Раствор гидроксида кальция создаст во влажном асфальтополимершлакобетоне щелочную среду с достаточно высоким pH. Шлак будет диспергироваться в результате разрыва ковалентных связей  $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$  и  $\text{Al} - \text{O} - \text{Si}$ . Катионы  $\text{Ca}^{2+}$  разрушат оболочку из  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и  $\text{Si}(\text{OH})_4$  на гидратированных зернах мартеновского шлака. Образуются низкоосновные гидросиликаты и гидроалюминаты кальция. Это приведет к выкристаллизовыванию новообразований с формированием во времени кристаллизационной микроструктуры асфальтополимершлакобетона. Адсорбционно-сольватные слои битумополимерного вяжущего будут структурироваться продуктами гидратации шлака.

При рациональном соотношении компонентов в системе «отсев дробления отвального мартеновского шлака – известь негашеная молотая – битумополимерное вяжущее – вода затворения» (удельное число конденсационно-кристаллизационных контактов 0,4 – 0,6) сформируется комбинированная микроструктура влажного асфальтополимершлакобетона. Коагуляционная обеспечивает релаксацию внутренних напряжений от механических и температурных воздействий, а конденсационно-кристаллизационная – сдвигоустойчивость дорожного покрытия в области положительных температур.

**В третьем разделе** приведены характеристики объектов и методов исследования.

В качестве вяжущего материала принят нефтяной дорожный битум марки СГ 70/130 со следующими характеристиками: условная вязкость по вискозиметру с отверстием 5 мм при 60 °С – 97 с; количество выпаренного разжижителя – 10,1 %; температура размягчения остатка после определения количества выпаренного разжижителя – 41 °С. Разжиженный битум СГ 70/130 получен из битума БНД 60/90 Павлодарского НПЗ (100%) и технического керосина (8 – 10 %).

В качестве полимерных модификаторов органического вяжущего были использованы:

1. Стирол-бутадиеновая высококонцентрированная водная дисперсия (латекс) марки Butonal NS 198. Содержание твердых веществ – 63 – 65 %; pH – 5 – 6,5 %; вязкость – 250 – 2000 мПа·с.

2. Блок-сополимер на основе стирола и полибутадиена марки Kraton D 1101: диаметр гранул  $(0,1 - 1) \cdot 10^{-3}$  м.; содержание стирола – 31 % мас.; удель-

ная плотность – 0,94 г/см<sup>3</sup>; модуль упругости – 2,9 МПа; удлинение на разрыв – 880 %.

Полимерные модификаторы совмещали с вязким битумом марки БНД 60/90 согласно принятым методикам приготовления битумополимерного вяжущего. Для получения разжиженного модифицированного битума марки СГ 70/130 в полимер-модифицированные вяжущие вводился разжижитель (керосин 8 – 10 %).

В качестве минеральных материалов приняты:

1. Отсев дробления отвального мартеновского шлака Енакиевского металлургического завода (ЕМЗ). Химический состав (усредненные значения): CaO = 24 – 38 %, SiO<sub>2</sub> = 18 – 34 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 3 – 5 %, MgO = 6 – 12 %, MnO = 6 – 10 %, FeO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 11 – 13 %, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,98 %. Химический состав шлаков ЕМЗ отличается непостоянством, так как зависит от выплавляемых марок стали и содержит до 30 химических элементов, среди которых сумма основных четырех оксидов (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO) составляет до 98 %. Истинная плотность – 3225 кг/м<sup>3</sup>; насыпная плотность 1675 кг/м<sup>3</sup>; марка по дробимости в стальном цилиндре – «1200»; морозостойкость – более 200 циклов; активность 1 МПа; модуль основности 1,9.

2. Доменный гранулированный шлак Донецкого металлургического завода (ДМЗ). Химический состав: CaO – 46 %, SiO<sub>2</sub> – 38, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 6 %, MgO – 6 %, FeO – 2 % и др.

Зерновой состав минеральной части исследуемых влажных асфальтошлакобетонов приведен в таблице 1.

Таблица 1

Зерновой состав минеральной части влажных асфальтошлакобетонов

Тип асфальтобетона	Содержание по массе, % минеральных зерен, которые меньше данного размера, мм									Оптимальное содержание орг. вяжущего
	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
Влажный асфальтошлакобетон (отсев дробления отвального мартеновского шлака), содержание воды в смеси – 14 %	100	93,0	82,7	70,4	57,1	46,8	35,1	20,8	2,8	7 – 8 %
Влажный асфальтошлакобетон (доменный гранулированный шлак), содержание воды в смеси – 14 %	100	99,5	98,3	92,3	64,8	45,3	24,3	9,3	4,3	6,5 – 7 %

Процесс производства асфальтошлакобетонной смеси включает следующие операции: подогрев шлака до температуры 80 °С, смешение с жидким битумом (битумополимерным вяжущим), подогретым до температуры 80 – 90 °С, введение 14 %

мас. воды и перемешивание смеси. Уплотнение асфальтошлакобетонной смеси выполнено при давлении 30 МПа.

Для сопоставительного анализа свойств влажных асфальтополимершлакобетонов с традиционными горячими асфальтобетонами, отвечающих ГОСТ 9128-2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия», принят асфальтобетон мелкозернистый типа «Б».

Для приготовления щебня и искусственного песка использован гранит Каранского месторождения со следующими свойствами: дробимость в водонасыщенном состоянии – 6,2 %; марка гранита – 1200; износ в полочном барабане – 2,3 %; насыпная плотность – 1410 кг/м<sup>3</sup>; истинная плотность – 2670 кг/м<sup>3</sup>; морозостойкость более 200 циклов; содержание зерен лещадной и игловатой формы – 6 %.

Минеральный порошок использовался известняковый. Содержание CaCO<sub>3</sub> – 96 %; удельная поверхность  $S_{1,2} = 400$  м<sup>2</sup>/кг; средняя плотность – 2715 кг/м<sup>3</sup>; средняя плотность под нагрузкой 40 МПа – 1880 кг/м<sup>3</sup>; пустотность – 31,8 %; битумоемкость – 60,5 %.

В диссертационной работе, кроме стандартных свойств определен ряд специальных показателей качества асфальтополимершлакобетонных смесей и асфальтополимершлакобетонов с использованием аттестованных приборов и оборудования по ГОСТ Р 58406.6-20, ОДМ 218.3.096-2017, ГОСТ Р 58401.11-2019, ОДМ 218.3.020-2012 и др.

В **четвертом разделе** приведены результаты исследований процессов формирования структуры влажных асфальтополимершлакобетонных смесей и асфальтополимершлакобетонов.

Установлены режимы производства влажных асфальтополимершлакобетонных смесей, а именно: порядок введения в асфальтосмеситель компонентов асфальтополимершлакобетонных смесей следующий: предварительное сухое перемешивание отсева дробления отвального мартеновского шлака и извести негашеной молотой при температуре 85 °С в течении 15 с; введение на минеральные материалы разжиженного битумополимерного вяжущего и перемешивание органо-минеральной смеси 30 – 45 с; введение воды затворения и перемешивание 30 – 45 с. При таком порядке ведения процесса производства влажных асфальтополимершлакобетонных смесей под действием нескомпенсированных молекулярных и ионных сил на поверхности частиц шлака формируются адсорбционно-сольватные слои органического вяжущего, которые переходят в структурированное состояние и обеспечивают прочность межфазного компонента.

К тому же, за это время происходит равномерное распределение компонентов в единице объема смеси и, как следствие, достигается минимальная межзерновая пустотность минерального остова асфальтошлакобетона (коэффициент вариации содержания ключевого компонента, фракции  $d = 2,5 - 1,25$  мм стабилизируется и составляет  $K_v = 4,4$  %).

Оптимальное содержание жидкого битума в асфальтополимершлакобетоне равно 8 – 8,5 % сверх 100 % массы отсева дробления отвального мартеновского шлака.

В диссертационном исследовании в качестве активатора вяжущих свойств принята известь негашеная молотая, так как она значительно быстрее гидратируется, чем портландский цемент (таблица 2) и характеризуется большей вододерживающей способностью. Это обеспечивает благоприятные условия гидратации отсева дробления отвального мартеновского шлака.

Таблица 2

Физико-механические свойства шлакобетона с использованием отсева дробления отвального мартеновского шлака в возрасте 28 суток

№ п/п/	Состав бетона в массовых частях компонентов	Средняя плотность, $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа, при		
			0°C	20°C	50°C
1	Отсев дробления отвального мартеновского шлака – 100 %, вода – 20 %	2280	0,8	0,7	0,7
2	Отсев дробления отвального мартеновского шлака – 100 %, вода – 20 %, портландцемент М 500 – 3 %	2285	2,0	1,9	1,9
3	Отсев дробления отвального мартеновского шлака – 100 %, вода – 20 %, известь негашеная молотая – 3 %	2290	2,2	2,1	2,1

Характерно, что прочность образцов влажных асфальтошлакобетонов с течением времени растет. Водный раствор гидроксида кальция, образующийся в процессе гидратации металлургического шлака позволяет создать во влажном асфальтошлаковом бетоне щелочную среду с достаточно высоким  $\text{pH} = 11 - 12$ , обеспечивающим диспергирование шлака за счет разрыва ковалентных связей  $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$  и  $\text{Al} - \text{O} - \text{Si}$ . При достижении степени перенасыщения водного раствора катионами  $\text{Ca}^{2+}$  происходит их взаимодействие с кремне- и алюмосиликатами с образованием целого ряда гидроалюмосиликатов кальция. К тому же, предполагается, что упрочнение полученных систем происходит за счет хемосорбционных связей, которые могут возникнуть при взаимодействии основных гидратированных веществ шлака с кислыми соединениями жидкого нефтяного битума, прежде всего, с асфальтогеновыми кислотами.

На рис. 1 приведены значения предела прочности при сжатии холодных асфальтошлакобетонов в зависимости от времени структурообразования (температура структурообразования бетона 20 °C) и вида металлургического шлака.

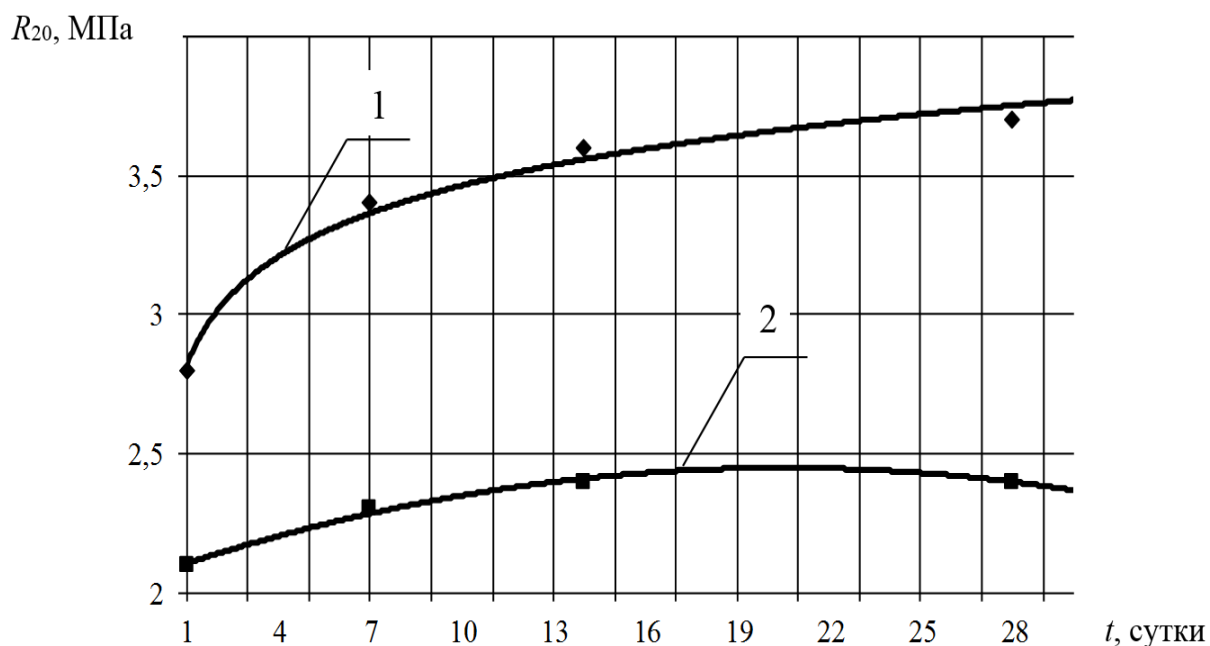


Рис. 1. Зависимость предела прочности при сжатии при 20 °С ( $R_{20}$ ) образцов влажного асфальтошлакобетона от времени структурообразования ( $t$ , сутки): 1 – на отсеве дробления отвалного мартеновского шлака (ЕМЗ); 2 – на доменном гранулированном шлаке (ДМЗ).

Образцы влажного асфальтошлакобетона на отсеве дробления отвалного мартеновского шлака характеризуются более высокой прочностью, по сравнению с бетонами на доменном гранулированном шлаке. В данном случае играет важную роль начальный период структурообразования асфальтошлакобетона, связанного с формированием коагуляционной структуры. Доменный шлак имеет гранулы с достаточно развитой поровой структурой. При этом большинство пор замкнуто внутри гранулы. Поэтому в процессе смешивания органического вяжущего и доменного гранулированного шлака жидкий битум не полностью заполняет микропоровое пространство гранул. Также значительное количество воды затворения из-за непродолжительного времени смешивания смеси не может диффундировать в замкнутые поры зерен гранулированного шлака. Следовательно, поры в гранулах доменного шлака остаются замкнутыми и являются концентраторами критических напряжений при приложении нагрузки к образцу.

Введение полимерных модификаторов Butonal NS 198 и Kraton D 1101 в жидкие битумы позволило повысить предел прочности при сжатии влажных асфальтошлакобетонов.

Влажные асфальтополимершлакобетоны характеризуются более высокими значениями предела прочности по сравнению с холодными асфальтобетонами, в которых минеральная часть представлена гранитным щебнем и известняковым минеральным порошком (рис. 2).

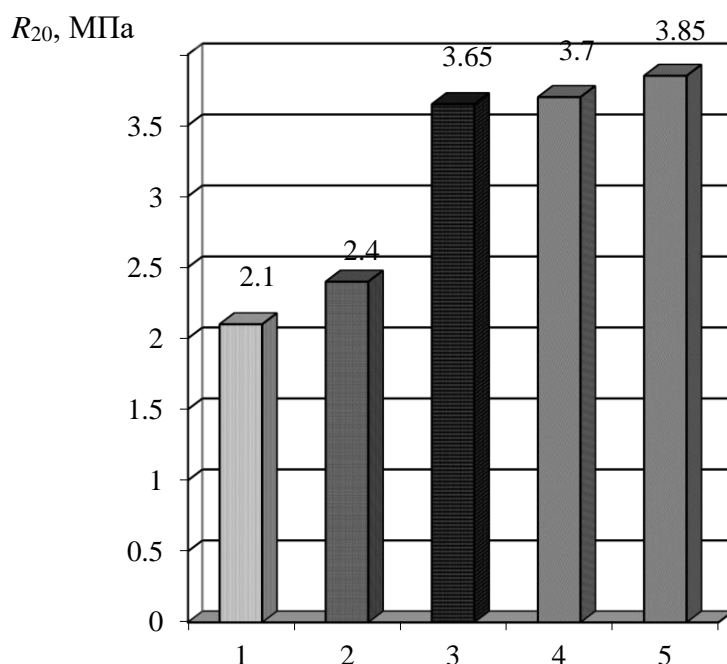


Рис. 2. Сравнительная диаграмма значений пределов прочности при сжатии при 20 °С различных образцов асфальтобетонов в возрасте 28 суток: 1 – холодный асфальтобетон тип Гх; 2 – дисперсно-армированный холодный асфальтобетон тип Гх (содержание полипропиленового фиброволокна – 0,7 % мас.); 3 – влажный холодный асфальтошлакобетон на отсеве дробления отвального мартеновского шлака; 4 – влажный асфальтошлакобетон на отсеве дробления отвального мартеновского шлака, модифицированный 2,0 % мас. латексом Butonal NS 198; 5 – влажный асфальтошлакобетон на отсеве дробления отвального мартеновского шлака, модифицированный 2,0 % мас. термоэластопластом Kraton D 1101 (4,5 – бетонные смеси приготовлены на жидком битуме СГ 70/130, который модифицирован 2% мас. латексом BUTONAL NS198 и Kraton D 1101 соответственно).

Характерно, что предел прочности при сжатии влажных асфальтошлакобетонов в среднем в 1,6 раза выше, чем традиционного холодного асфальтобетона типа Гх на гранитном щебне и в 1,5 раза выше, чем армированного фиброволокном холодного асфальтобетона типа Гх.

Таким образом, предел прочности асфальтошлакобетонов растет с увеличением времени структурообразования, что связано с постепенным развитием процессов гидратации минеральных зерен шлака. В среднем, после 14 суток структурообразования рост предела прочности при сжатии замедляется.

При определении оптимальной концентрации негашеной извести и разжиженного битумополимерного вяжущего в составе влажного асфальтополимершлакобетона выполнено экспериментально-статистическое моделирование.

Факторы варьирования, которые действуют на систему «битумополимерное вяжущее – отсев дробления отвального мартеновского шлака (100 % мас.) – вода затворения (14 % мас.) – негашеная известь»:  $X_1$  – массовая концентрация негашеной молотой извести;  $X_2$  – концентрация разжиженного битума, модифицированного латексом Butonal NS 198 (2 % мас.). Параметры оптимизации: предел прочности при сжатии образцов асфальтополимершлакобетона при 20 °С ( $Y_1$ ),  $R_{20}$ , не менее 3,4 МПа; средняя плотность ( $Y_2$ ),  $\rho_{\text{ср}}$ , не менее 2,28 г/см<sup>3</sup>, коэффициент длительной водостойкости ( $Y_3$ ),  $K_{\text{вд}}$ , не менее 0,85 .

При помощи программы обработки данных двухфакторного, трехуровневого планированного эксперимента типа BD13 «PlanExp B-D13 v.1.0» for Windows выполнен расчет математических моделей в виде полинома второй степени:

$$Y_1(X_1, X_2) = 3,502 + 0,146x_1 + 0,248x_2 - 0,201x_1^2 - 0,269x_2^2 - 0,069x_1x_2, \quad (1)$$

$$Y_2(X_1, X_2) = 2,308 + 0,006x_1 + 0,023x_2 - 0,018x_1^2 - 0,022x_2^2 + 0,016x_1x_2, \quad (2)$$

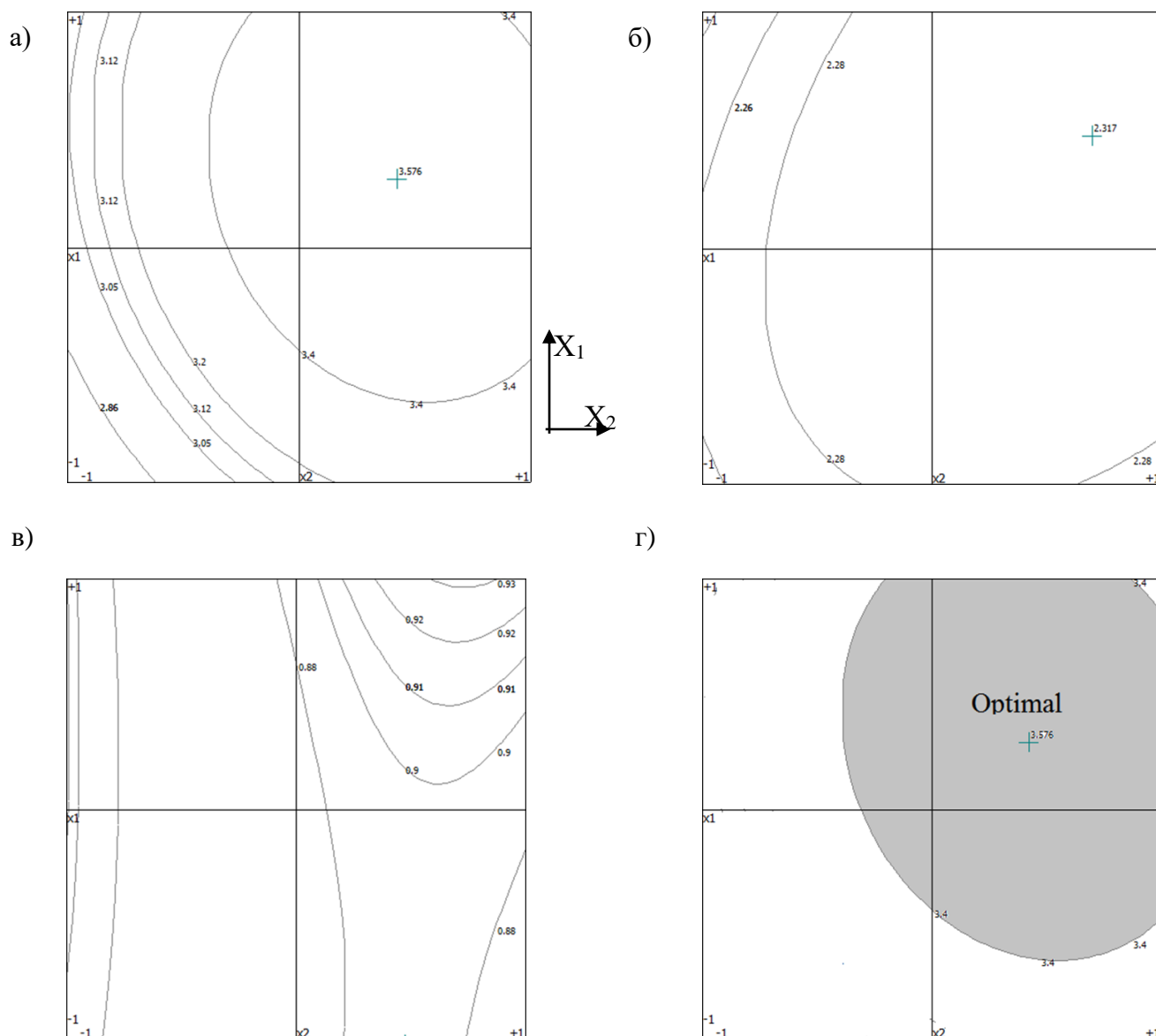
$$Y_3(X_1, X_2) = 0,869 + 0,011x_1 + 0,094x_2 + 0,01x_1^2 - 0,078x_2^2 + 0,02x_1x_2. \quad (3)$$

Установлено, что оптимальная массовая концентрация негашеной молотой извести во влажном асфальтополимершлакобетоне составляет 2 – 2,5 %. Оптимальное содержание битумополимерного вяжущего, модифицированного латексом Butonal NS 198 (2 % мас.), равно 8 – 8,5 % (рис. 3).

Условие получения структуры влажного асфальтополимершлакобетона, характеризующейся двумя взаимопроникающими микроструктурами коагуляционной и конденсационно-кристаллизационной выполняется при удельном числе упругих связей в подобных системах  $n_y = 0,4 - 0,6$ , количество которых определяли по формуле В. А. Веренько:

$$n_y = (c \cdot R_1 - R_2) / (c - 1) \cdot R_C, \quad (4)$$

где  $R_1$  – предел прочности влажного асфальтополимершлакобетона при скорости деформирования  $V_1 = 3$  мм/мин;  $R_2$  – предел прочности влажного асфальтополимершлакобетона при скорости деформирования  $V_2 = 15$  мм/мин;  $R_C$  – предельная структурная прочность, соответствующая максимуму на зависимости от температуры или скорости деформирования.



По оси  $X_1$ : массовая концентрация негашеной молотой извести.

По оси  $X_2$ : массовая концентрация разжиженного битума, модифицированного латексом Butonal NS 198 (2 % мас.)

Рис. 3. Графики функций: а) предела прочности при сжатии при 20 °C ( $Y_1$ ); б) средней плотности ( $Y_2$ ); в) коэффициента длительной водостойкости ( $Y_3$ ); г) область оптимальных значений.

В диссертационной работе экспериментально определены  $R_1$  и  $R_2$  влажно-го асфальтополимершлакобетона в зависимости от скорости деформирования и содержания в асфальтополимершлакобетоне битумополимерного вяжущего. При оптимальном содержании вяжущего 8 % по массе сверх 100 % отсева дробления отвалного мартеновского шлака определен максимальный предел прочности при сжатии асфальтополимершлакобетона, который достигается при минус 30 °C (7,8 МПа), тогда  $n_y = (5 \cdot 3,8 - 5,2) / (4 \cdot 7,8) = 0,44$ .

Таким образом, влажный асфальтополимершлакобетон оптимального состава характеризуется количеством кристаллизационных контактов 44 %.



Завершающей стадией структурообразования асфальтополимершлакобетонной смеси оптимальной структуры с использованием катионного латекса Butonal NS 198 на этапе технологической переработки является укладка и уплотнение её в конструктивные слои дорожной одежды.

Диапазон температур уплотнения, который для влажных асфальтополимершлакобетонных смесей составляет 30 – 90 °С соответствует наиболее компактному размещению частиц минерального остова. Таким образом, подготовленная для укладки асфальтополимершлакобетонная смесь должна иметь температуру не менее 40 °С. Процесс уплотнения асфальтополимершлакобетонных смесей менее энергоёмкий, чем традиционных холодных асфальтобетонных смесей типа Гх (ДСТУ Б.В.2.7-119:2011) (рис. 4, таблица 3).

Так, средний расход энергии на приращение единицы плотности асфальтополимершлакобетонной смеси составляет 512 Дж, а при уплотнении холодной асфальтобетонной смеси типа Гх – 648 Дж (таблица 3). Коэффициент уплотнения, характеризующий удельную работу на уплотнение, также свидетельствует о более высокой уплотняемости асфальтополимершлакобетонных смесей в сравнении с традиционной холодной смесью.

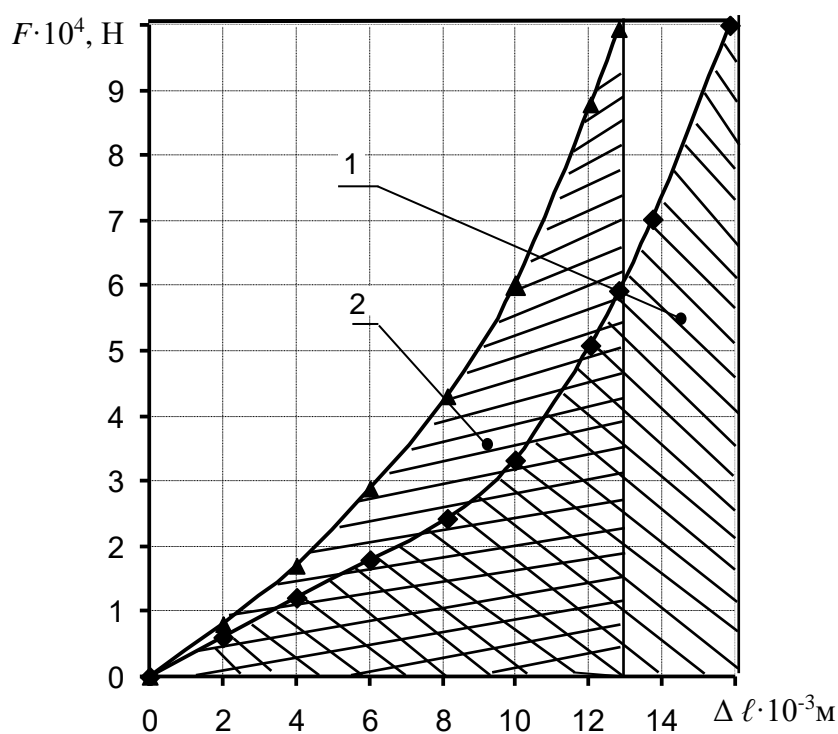


Рис. 4. Диаграмма уплотнения асфальтобетонных смесей: 1 – холодная асфальтобетонная смесь типа Гх на битуме СГ 70/130; 2 – влажная асфальтополимершлакобетонная смесь оптимальной структуры (температура построения зависимости  $F = f(\Delta \ell)$ ,  $T = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Таблица 3

## Технологические свойства холодных асфальтобетонных смесей

№ п/п	Состав асфальтобетонной смеси	Работа, затраченная на уплотнение, А, Дж	Коэффициент уплотнения, $K_y, \frac{Дж \cdot м^3}{кг}$	Приращение средней плотности бетона, $\Delta \rho_{\beta}^a, кг / м^3$
1.	Холодная мелкозернистая асфальтобетонная смесь (тип Гх), приготовленная на битуме СГ 70/130; щебень, отсев щебня гранитные, минеральный порошок известняковый (Т = 70°C)	648	1,26	508
2.	Влажная асфальтополимершлакобетонная смесь на битуме СГ 70/130, модифицированном 2 % мас. Butonal NS 198; с 2 % мас. негашеной извести (Т = 70°C)	512	1,03	485

Применение влажной асфальтополимершлакобетонной смеси приводит к повышению плотности и длительной водостойкости асфальтополимершлакобетона по сравнению с традиционным холодным асфальтобетоном типа Гх (таблица 4).

Таблица 4

## Механические свойства асфальтобетонов

Показатели	Состав холодных асфальтобетонов	
	Битум СГ 70/130, щебень, отсев щебня гранитные (гранулометрический тип Гх), МП известняковый	Битум СГ 70/130, модифицированный 2,0 % Butonal NS 198 мас. – 8 %, отсев дробления отвального мартеновского шлака – 100 %, вода – 14 %, негашеная молотая извести – 2 %.
Средняя плотность, $\rho_0^a, кг/м^3$	2238	2320
Набухание, Н, % от объема	1,9	1,5
Водонасыщение, W, %, от объема	6,6	4,92
Предел прочности при сжатии, МПа, при:		
0°C	5,8	5,9
20°C	2,4	3,7
50 °C	1,3	1,8
Предел прочности при изгибе, МПа, при 0°C	1,96	2,1
Коэффициент длительной водостойкости, $K_{вд}$	0,73	0,88

Методом Маршалла определена устойчивость, условная жесткость и пластичность бетонов на нефтяном дорожном битуме и жидких битумополимерных вяжущих (таблица 5). Асфальтополимершлакобетон, приготовленный на жидком битумополимерном вяжущем, характеризуется более высокими значениями устойчивости и низкой пластичности по сравнению с традиционным холодным асфальтобетоном типа «Гх», приготовленном на битуме СГ 70/130. Это должно обеспечить удовлетворительную сдвигоустойчивость и долговременную прочность асфальтополимершлакобетонных покрытий автомобильных дорог в области высоких положительных эксплуатационных температур.

Таблица 5

Значение показателей, характеризующих сдвигоустойчивость бетонов по методу Маршалла (температура испытания 60°C)

№ п/п	Тип асфальтобетона	Условная пластичность, 1/10, мм	Устойчивость, Р, кН	Условная жесткость, А, Н/мм
1.	Горячий мелкозернистый асфальтобетон тип «Б» на битуме БНД 60/90; минеральный порошок известняковый	46	15,3	3316
2.	Холодный мелкозернистый асфальтобетон тип «Гх» на битуме СГ 90/130; минеральный порошок известняковый.	68	9,0	1330
3.	Влажный асфальтополимершлакобетон: отсев дробления отвального мартеновского шлака – 100%, негашеная молотая известь – 2 %, битум СГ 90/130, модифицированный 2 % мас. Butonal NS 198 – 8 %; вода затворения – 14 %	52	13,1	2510

Одной из основных причин потери эксплуатационных свойств дорожных бетонов во времени и снижения их долговечности, приводящие к изменению их структуры, это воздействие атмосферных, транспортных и грунтогеологических факторов. Под влиянием этих факторов происходят необратимые физико-химические превращения в асфальтошлакобетоне, которые приводят к потере его деформативной и демпфирующей способности, а также коррозионной стойкости.

Данные, приведенные на рис. 5, свидетельствуют о том, что по сравнению с традиционным асфальтобетоном типа «Б» (кривая 2 на зависимости  $K_{cm} = f(t)$ ) асфальтошлакобетоны также являются стабильными конгломератами в условиях постоянного действия высокой температуры (температура прогрева 60 °C). Процесс интенсивного старения, наблюдаемый для асфальтошлакобетона, закономерен и объясняется тем, что в его составе находится маловязкое битумное вя-

жущее, содержащее в свободном состоянии большое количество легкоиспаряемых фракций с низкой температурой кипения и большим количеством ненасыщенных ароматических соединений. Вследствие интенсивно протекающих процессов испарения и полиоксиконденсации веществ органического вяжущего растет его структурная плотность, что обуславливает рост когезионной прочности органического вяжущего, находящегося в межзерновом пространстве бетона. Это ведет к резкому росту прочности асфальтополимершлакобетона, особенно в первые 400 часов прогрева при  $t^\circ = 60^\circ\text{C}$  (рис. 5, кривая 3). После 1000 часов прогрева, что соответствует 5 годам эксплуатации асфальтошлакобетона в покрытии автомобильной дороги, его прочность стабилизируется. Это свидетельствует о том, что процессы капиллярной фильтрации компонентов с малой молекулярной массой в микропоры шлаковых частиц, испарения и полиоксиконденсации ароматических углеводородов закончились.

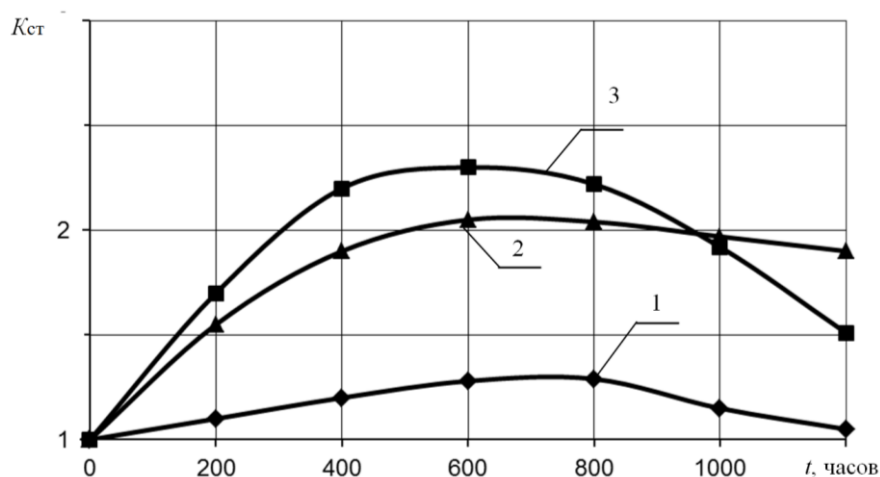


Рис. 5 Зависимость коэффициента теплового старения  $K_{ст}$  ( $K_{ст} = R_{20(t)}/R_{20(0)}$ ) асфальтошлакобетона от времени прогрева  $t$  при  $60^\circ\text{C}$ : 1 – отсев дробления отвалного мартеновского шлака – 100 %, вода затворения – 14 %; 2 – отсев дробления отвалного мартеновского шлака–100 %, модифицированный битум Butonal NS 198 (2 % мас.) – 8 % , вода затворения – 14 %; 3 – отсев дробления отвалного мартеновского шлака–100 %, негашеная молотая известь – 2 %, модифицированный битум Butonal NS 198 (2 % мас.) – 8 %, вода затворения – 14 %.

Важнейшим свойством асфальтобетона, определяющим долговечность покрытий автомобильных дорог, является устойчивость к воздействию кратковременных циклических (ударных) и длительных статических нагрузок от автотранспорта.

Испытания асфальтополимершлакобетона, холодного асфальтобетона типа «Гх» и горячего мелкозернистого асфальтобетона типа «Б» (ГОСТ 9128-2013) показали, что количество циклов до разрушения асфальтополимершлакобетона оптимальной структуры при заданных напряжениях несколько ниже, чем у холодного асфальтобетона типа «Гх» и горячего асфальтобетона типа «Б», и характеризуется, вероятно, большей интенсивностью разрушения в связи с более высоким количеством пор и пустот внутри материала, появившихся в процессе испарения воды затворения и гидратации мартеновского шлака, а также более низким содержанием органического вяжущего (рис. 6).

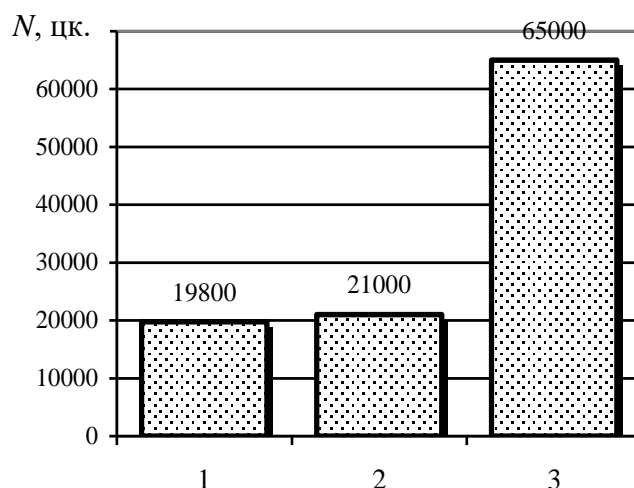


Рис. 6. Зависимость усталостной долговечности асфальтобетонов (нагрузка: 0,4 МПа, частота воздействия: 0,1 Гц, температура 10 °С): 1 – влажный асфальтополимершлакобетон оптимальной структуры на модифицированном битуме СГ 70/130; 2 – холодный асфальтобетон на битуме СГ 70/130 тип «Гх»; 3 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»).

Таким образом, результаты исследований показали, что разработанный состав влажного асфальтополимершлакобетона характеризуется достаточно высокими деформационно-прочностными и коррозионными свойствами сопоставимыми с традиционными горячими мелкозернистыми бетонами. Это указывает на целесообразность их применения для текущего ремонта покрытий нежестких дорожных одежд автомобильных дорог.

**Пятый раздел** посвящен практической реализации исследований. Для ПАО «Облдорремстрой» разработаны «Рекомендации по производству и применению влажных асфальтополимершлакобетонных смесей для текущего ремонта нежестких дорожных одежд в неблагоприятных погодных условиях» и определена предполагаемая экономическая эффективность от внедрения 1 т асфальтополимершлакобетонных смесей, которая составит 257,56 руб. Результаты исследований внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» по профилю «Автомобильные дороги» в дисциплинах «Физико-химическая механика строительных материалов» и «Современные композиционные материалы для дорожного строительства».

## ВЫВОДЫ

1. Теоретически обоснованы и экспериментально запроектированы составы, и разработана технология производства ремонтных влажных асфальтополимершлакобетонных смесей, включающих отсев дробления отвального мартеновского шлака, известь негашеную молотую, модифицированные жидкие битумополимерные вяжущие и воду затворения, характеризующиеся осадкой конуса ОК = 15 – 20 см. Асфальтополимершлакобетон в ремонтируемой карте покрытий нежестких дорожных одежд формирует во времени комбинированную микроструктуру, представленную оптимальным сочетанием коагуляционных (контакты между частицами шлака осуществляются через адсорбционно-сольватные структурированные слои модифицированного органического вяжущего) и конденсационно-кристаллизационных кон-

тактов прямого срастания кристаллов гидратированных минералов тонкодисперсных частиц отвалного мартеновского шлака; удельное количество конденсационно – кристаллизационных контактов составляет 0,44. Коагуляционная структура обеспечивает релаксацию внутренних напряжений, возникающих при механических нагрузках и термических воздействиях, а конденсационно – кристаллизационная обеспечивает прочность дорожного покрытия в области высоких температур.

2. С использованием метода экспериментально-статистического моделирования определена оптимальная концентрация компонентов влажной асфальтополимершлакобетонной смеси. Установлено, что оптимальное соотношение компонентов в смеси в массовых частях: отсева дробления отвалного мартеновского шлака – 100 %, извести негашеной молотой – 2 %, воды затворения – 14 %, разжиженного битума, модифицированного латексом марки Butonal NS 198 – 8 %.

3. Определены оптимальные параметры технологических режимов производства асфальтополимершлакобетонных смесей, а именно температура приготовления 80 – 95 °С, время производства 90 секунд, что обеспечивает однородность асфальтополимершлакобетонной смеси, характеризуемой стабилизацией в асфальтополимершлакобетонной смеси коэффициента вариации содержания ключевого компонента  $K_v = 4,4 \%$ .

4. Установлены оптимальные температурные интервалы укладки (40 – 90 °С) и уплотнения (30 – 90 °С) в конструктивные слои полужестких и нежестких дорожных одежд автомобильных дорог асфальтополимершлакобетонных смесей. Холодные асфальтополимершлакобетонные смеси характеризуются более низкой удельной энергией уплотнения  $1,03 \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}$  против  $1,26 \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}$  для стандартных холодных асфальтобетонных смесей.

5. Влажные асфальтополимершлакобетоны в возрасте 28 суток по показателям физико-механических свойств сопоставимы с требованиями, предъявляемые к горячим асфальтобетонам первой марки (ГОСТ 9128-2013) и характеризуются более широкой зоной вязкоупругого поведения (температурный интервал вязкопластичного состояния 90 – 100 °С), повышенным значением модуля упругости и устойчивости по Маршаллу в области повышенных температур, и меньшим показателем температурной чувствительности механических свойств. Они устойчивы к старению, водостойки.

6. Установлено, что энергоемкость процесса производства влажных асфальтополимершлакобетонных смесей в два раза меньше, чем энергоемкость производства горячих асфальтобетонных смесей. Экономия энергии при производстве одной тонны асфальтобетонной смеси составляет 62610 кДж. Использование техногенного сырья – отсева дробления отвалного мартеновского шлака позволяет экономить кондиционные минеральные материалы гранитный щебень и искусственный песок, минеральный порошок. Предполагаемая экономическая эффективность от внедрения 1 т асфальтополимершлакобетонов составит 257,56 рублей.

7. По результатам исследований для ПАО «Донецкоблдорремстрой» разработаны «Рекомендации по производству и применению влажных асфальтополимершлакобетонных смесей для текущего ремонта нежестких дорожных одежд в неблагоприятных погодных условиях». Результаты исследований внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» по профилю «Автомобильные дороги» в дисциплинах «Физико-химическая механика строительных материалов» и «Современные композиционные материалы для до-

рожного строительства».

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН ДНР:

1. Измерение прогибов асфальтобетонного образца-балочки с применением емкостного датчика. / В. И. Братчун, В. В. Ставцев, Е. А. Ромасюк, В. П. Демешкин, **В. В. Жеванов** и др. // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Современные строительные материалы: сб. науч. тр. – Макеевка, 2017. – Вып. 2017-2(124). – С. 25 – 33. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2017/vestnik\\_2017-2\(124\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/vestnik_2017-2(124).pdf). (*Обработка данных, полученных с применением датчика емкостного типа*).

2. Вяжущие свойства отсева дробления отвалных мартеновских шлаков и их активация химическими добавками. [Электронный ресурс] / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, **В. В. Жеванов**, О. Н. Нарижная и др. // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Современные строительные материалы: сб. науч. тр. – Макеевка, 2018. – Вып. 2018-1(129). – С. 5 – 10. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2018/vestnik\\_2018-1\(129\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2018/vestnik_2018-1(129).pdf) (*Выполнен анализ научных работ в области применения отсева дробления отвалного мартеновского шлака в дорожном строительстве*).

3. Повышение деформационно-прочностных свойств холодных асфальтошлакобетонов. [Электронный ресурс] / В. И. Братчун, Е. А. Ромасюк, **В. В. Жеванов** и др. // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Современные строительные материалы: сб. науч. тр. – Макеевка, 2019. – Вып. 2019-1(135). – С. 13 – 20. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2019/vestnik\\_2019-1\(135\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2019/vestnik_2019-1(135).pdf) (*Получены экспериментальные данные по пределу прочности при сжатии образцов асфальтошлакобетонов*).

4. Братчун, В. И. О закономерностях формирования структуры и свойств асфальтошлакобетонов, приготовленных на жидких битумах, модифицированных латексом BUTONAL NS 198. [Электронный ресурс] / В. И. Братчун, **В. В. Жеванов**, Е. А. Ромасюк // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Современные строительные материалы: сб. науч. тр. – Макеевка, 2020. – Вып. 2020-1(141). – С. 53 – 59. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2020/vestnik\\_2020-1\(141\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2020/vestnik_2020-1(141).pdf). (*Установлены закономерности формирования коагуляционно-кристаллизационной структуры асфальтополимершлакобетона*).

5. **Жеванов, В. В.** Холодные асфальтошлакобетоны на жидких битумополимерных вяжущих. [Текст] / **В. В. Жеванов**. // Строитель Донбасса. Научно-практический журнал. – Макеевка, 2020. – № 1 (10). – С. 4 – 7.

– публикации в других сборниках:

1. Беспалов, В. Л. Холодные асфальтошлакобетоны для устройства полужестких покрытий автомобильных дорог. [Электронный ресурс] / В. Л. Беспалов, В. И. Братчун, **В. В. Жеванов**. // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – Луганск, 2017. – № 3(5). – Ч. 2 – С. 100 – 104. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://izdat.dahluniver.ru/images/archive/35->

.2\_2017.pdf. (Установлены закономерности формирования коагуляционно-кристаллизационной структуры асфальтополимершлакобетона).

– публикации по материалам научных конференций:

1. Холодные асфальтошлакобетоны для ремонта дорожных покрытий. / **В. В. Жеванов**, Е. А. Ромасюк, А. В. Квашук, Ю. М. Стойчева // Научные чтения памяти доцента кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Александра Дмитриевича Лазько: сборник тезисов докладов международной конференции (27 декабря 2018 г., Макеевка). – Макеевка: ГОУ ВПО «ДОННАСА», 2019. – С. 52. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://donnasa.ru/?page\\_id=69275&lang=ru](http://donnasa.ru/?page_id=69275&lang=ru).

2. **Жеванов, В. В.** Исследование деформационно-прочностных свойств модифицированных Butonal NS 198 холодных асфальтошлакобетонов. / **В. В. Жеванов**. // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса 2019. Материалы V международной научно-практической конференции «Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса» в рамках пятого Международного научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса: Инфраструктурное и социально-экономическое развитие» (22 мая 2019 г., Горловка). – Горловка: АДИ ГОУВПО «ДОННТУ», 2019. – С. 165 – 170. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.adidonntu.ru/node/2246>

3. **Жеванов, В. В.** Экономическая эффективность применения холодных асфальтошлакобетонов для ремонта дорожного покрытия. / **В. В. Жеванов**, Е. А. Ромасюк, Р. Ф. Гайдай. // Актуальные вопросы экономики и управления: теоретические и прикладные аспекты: материалы четвертой международной научно-практической конференции, 29 марта 2019 г., Горловка). – Горловка: АДИ ДОННТУ, 2019. – С. 565 – 570. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.adidonntu.ru/node/2224>

4. Братчун, В. И. О закономерностях формирования структуры и свойств асфальтошлакобетонов, приготовленных на жидких битумах, модифицированных латексом Butonal NS 198. / В. И. Братчун, **В. В. Жеванов**, Е. А. Ромасюк. // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы международной научно-практической конференции (7 – 8 ноября 2019 г., Пермь). – Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2019. – С. 228 – 231. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://pstu.ru/activity/innovation/scientific\\_activities](https://pstu.ru/activity/innovation/scientific_activities).

5. Отсев дробления отвального мартеновского шлака – гидравлически активный структурообразующий компонент асфальтобетонной смеси. / **В. В. Жеванов**, Е. А. Ромасюк, В. Н. Кротинова, А. А. Колесникова // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы международной научно-практической конференции (5 – 6 ноября 2020 г., Пермь). – Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2020. – С. 284 – 287. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://pstu.ru/activity/innovation/scientific\\_activities](https://pstu.ru/activity/innovation/scientific_activities).

## АННОТАЦИЯ

Жеванов Вячеслав Владимирович. Ресурсо- и энергоэффективные влажные асфальтополимершлакобетонные смеси для текущего ремонта нежестких одежд автомобильных дорог. – На правах рукописи.



Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – Строительные материалы и изделия. – ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», Макеевка, 2020 г.

Диссертация посвящена разработке составов влажного асфальтополимершлакобетона с использованием отсева дробления отвального мартеновского шлака, извести негашеной молотой, приготовленного на разжиженных битумополимерных вяжущих и воды затворения с установлением закономерностей формирования коагуляционно-кристаллизационной структуры асфальтополимершлакобетона.

Теоретически обоснованы и экспериментально запроектированы составы и разработана технология производства ремонтных асфальтополимершлакобетонных смесей, включающих отсев дробления отвального мартеновского шлака, известь негашеную молотую, воду затворения и модифицированные жидкие битумополимерные вяжущие, характеризующиеся осадкой конуса ОК = 15 – 20 см, которые после укладки в ремонтируемые карты покрытий нежестких дорожных одежд формируют во времени комбинированную микроструктуру, представленную оптимальным сочетанием коагуляционных (контакты между частицами шлака осуществляются через адсорбционно-сольватные структурированные слои модифицированного органического вяжущего) и конденсационно-кристаллизационных контактов прямого срастания кристаллов гидратированных минералов тонкодисперсных частиц отвального мартеновского шлака; удельное количество конденсационно – кристаллизационных контактов составляет 0,44; коагуляционная структура обеспечивает релаксацию внутренних напряжений, возникающих при механических нагрузках и термических воздействиях, а конденсационно – кристаллизационная обеспечивает прочность дорожного покрытия в области высоких температур.

С использованием метода экспериментально-статистического моделирования определена оптимальная концентрация компонентов влажной асфальтополимершлакобетонной смеси. Установлено, что оптимальное соотношение компонентов в смеси в массовых частях, составляет: отсева дробления отвального мартеновского шлака – 100 %, извести негашеной молотой – 2 %, воды затворения – 14 %, разжиженного битума, модифицированного латексом марки Butonal NS 198 – 8 %.

Асфальтополимершлакобетонные смеси оптимальной структуры отличаются повышенной уплотняемостью при температурах 30 – 90 °С, а бетоны в возрасте 28 суток по показателям физико-механических свойств превосходят требования, предъявляемые к горячим асфальтобетонам первой марки (ГОСТ 9128-2013) и характеризуются более широкой зоной вязкоупругого поведения (температурный интервал упруговязкопластичного состояния 90 – 100 °С), повышенным значением модуля упругости и устойчивости по Маршаллу в области повышенных температур, и меньшим показателем температурной чувствительности механических свойств. Они устойчивы к старению, водостойки.

Для ПАО «Донецкоблдорремстрой» разработаны «Рекомендации по производству и применению влажных асфальтополимершлакобетонных смесей для текущего ремонта нежестких дорожных одежд в неблагоприятных погодных условиях». Определена предполагаемая экономическая эффективность от внедрения 1 т асфальтополимершлакобетонных смесей, которая составит 257,56 руб.

Ключевые слова: нефтяной дорожный битум, отсев дробления отвального мартеновского шлака, влажная асфальтополимершлакобетонная смесь, асфальтополимершлакобетон, полимерный модификатор, уплотняемость, долговечность.

### SUMMARY

Zhevanov Vyacheslav Vladimirovich. Resource-efficient and energy-efficient wet asphalt-polymer slag concrete mixtures for routine repair of non-rigid road clothes. – As a manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.23.05 – building materials and products. – Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, 2020.

The thesis is devoted to the development of compositions of cold asphalt-polymer-slag concrete using screening of crushing of dump open-hearth slag, burnt lime prepared on liquefied bitumen-polymer binders and mixing water with the establishment of regularities in the formation of the coagulation-crystallization structure of asphalt-polymer slag concrete.

Compositions have been theoretically substantiated and experimentally designed and a technology has been developed for the production of repair asphalt-polymer slag concrete mixtures, including screening of crushing of dump open-hearth slag, quicklime ground lime, mixing water and modified liquid bitumen-polymer binders, characterized by a cone settlement of OK = 15 – 20 cm, which are repaired after paving of non-rigid road pavements form in time a combined microstructure, represented by an optimal combination of coagulation (contacts between slag particles are carried out through adsorption-solvate structured layers of a modified organic binder) and condensation-crystallization contacts of direct intergrowth of crystals of hydrated minerals of fine particles of waste slag; the specific number of condensation - crystallization contacts is 0.44; the coagulation structure provides relaxation of internal stresses arising from mechanical loads and thermal influences, and the condensation-crystallization structure ensures the strength of the road surface in the high temperature range.

Using the method of experimental-statistical modeling, the optimal concentration of the components of the wet asphalt-polymer slag concrete mixture was determined. It has been established that the optimal ratio of components in the mixture in mass parts is: screening of crushing of dump open-hearth slag – 100%, quicklime ground – 2%, mixing water – 14%, liquefied bitumen modified with Butonal NS 198 latex – 8%.

Asphalt-polymer slag concrete mixtures of optimal structure are characterized by increased compaction at temperatures of 30 – 90 ° C, and concretes aged 28 days in terms of physical and mechanical properties exceed the requirements for hot asphalt concrete of the first grade and are characterized by a wider zone of viscoelastic behavior ( temperature range of elastic-viscoplastic state 80 – 90 ° C), an increased value of the modulus of elasticity and stability according to Marshall in the region of elevated temperatures, and a lower indicator of the temperature sensitivity of mechanical properties. They are resistant to aging, water resistant.

Key words: oil road bitumen, screening of crushing of dump open-hearth slag, asphalt-polymer slag concrete, polymer modifier, durability, compaction.