

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права
УДК 625.855.32

АФАНАСЕНКО
Алексей Александрович

**ТЕХНОЛОГИЯ, СОСТАВЫ И СВОЙСТВА ВЫСОКОПЛОТНОГО
АСФАЛЬТОБЕТОНА С КАРКАСНО-КОНТАКТНОЙ СТРУКТУРОЙ
ДЛЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия

Брест, 2026

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель: **ВЕРЕНЬКО Владимир Адольфович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **ШАПОВАЛОВ Виктор Михайлович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси»

БОЧКАРЕВ Дмитрий Игоревич, кандидат технических наук, доцент, главный конструктор ООО «Дилидженд плюс», доцент кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Оппонирующая организация: Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»

Защита состоится 24 июня 2026 г. в 13⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.09.01 при учреждении образования «Брестский государственный технический университет» по адресу: 224017, г. Брест, ул. Московская 267, ауд. 5/300. Телефон ученого секретаря +375 (29) 7225326, e-mail: vvkravchenko@g.bstu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

Автореферат разослан 20 мая 2026 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.09.01,
кандидат технических наук



В. В. Кравченко

ВВЕДЕНИЕ

Асфальтобетонные покрытия занимают ведущие позиции в мировом дорожном строительстве, а рост интенсивности движения и увеличение осевых нагрузок повышают требования к их долговечности, что требует применения материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Международный опыт, например, таких стран, как США, Германия, Китай, Франция, Финляндия и других, а также исследования ряда отечественных ученых подтверждают, что использование асфальтобетонов повышенной плотности и прочности является одним из наиболее эффективных решений для увеличения срока службы покрытий и повышения их устойчивости к механическим и климатическим воздействиям.

Вместе с тем, применение подобных материалов в Республике Беларусь не нашло широкого распространения, что обусловлено отсутствием теоретического обоснования использования высокоплотных асфальтобетонных смесей каркасно-контактной структуры, методики подбора их составов, а также нормативной базы, содержащей технические требования к ним, учитывающие особенности климатических и эксплуатационных условий.

Настоящее диссертационное исследование направлено на решение научно-технической задачи повышения качества и срока службы дорожных асфальтобетонных покрытий.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами. Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Государственной программы «Дороги Беларуси» на 2021–2025 годы, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 09.04.2021 № 212.

Работа содержит результаты исследований автора, полученные при выполнении научно-исследовательских работ: ГБ 06-66 «Исследование долговечности высокоплотных асфальтобетонов различного состава и структуры с разработкой рекомендаций по их применению» (№ ГР 20061049, 2006–2007 гг.); «Участие в исследованиях и разработке рекомендаций по обеспечению структурной устойчивости асфальтобетона с учетом его напряженно-деформированного состояния в условиях современных транспортных нагрузок» (№ ГР 20072304, 2006 – 2007 гг.); «Разработать составы, технологию получения, освоить производство битумов и асфальтобетонов, модифицированных многокомпонентными добавками на основе вторичных полимерных компонентов» (№ ГР 20110196, 2010–2011 гг.); «Исследование и разработка конструкций дорожных одежд на основе комплексной оптимизации и модификации состава и расчетных характеристик материалов всех конструктивных слоев» (№ ГР 20112305, 2012 г.); «Исследование влияния, приобретенных и накопленных в процессе производства и применения дорожно-строительных материалов дефектов на параметры надежности

дорожных конструкций нежесткого типа с разработкой технологических, конструктивных и материаловедческих мероприятий по их снижению» (№ ГР 20240069, 2023–2025 гг.).

Цель и задачи исследования. Целью исследования является установление закономерностей формирования свойств высокоплотного асфальтобетона с каркасно-контактной структурой в зависимости от его состава и разработка на этой основе эффективной технологии его получения и применения для устройства дорожных покрытий повышенной надежности.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- теоретически обоснован и экспериментально подтвержден оптимальный состав асфальтобетонной смеси с повышенным содержанием вяжущего, обеспечивающий формирование высокоплотного каменного каркаса за счет выявленной количественной взаимозависимости между геометрическими характеристиками набора фракций минерального заполнителя с крупностью зерен до 10 мм и структурной плотностью формируемого им каркаса;

- установлены основные критерии работоспособности органического вяжущего при положительных и отрицательных температурах на основе исследований его реологических свойств в широком температурном диапазоне от -30 до $+80$ °С и определено влияние модифицирующих добавок на эксплуатационные характеристики битума, на основе чего разработана методика подбора их оптимального содержания для обеспечения требуемой сдвигоустойчивости и трещиностойкости асфальтобетона;

- определены и экспериментально обоснованы критерии обеспечения технологической устойчивости на стадии приготовления и последующего использования асфальтобетонных смесей с высоким содержанием вяжущего и установлена зависимость этой устойчивости от реологических свойств битума в диапазоне рабочих температур от 150 до 180 °С, разработан эффективный способ их стабилизации путем совместного применения модифицированного битума и стабилизирующих добавок;

- разработан и оптимизирован состав стабилизирующей добавки на основе местных вторичных материалов по критерию стекания вяжущего, обеспечивающий технологическую устойчивость асфальтобетонных смесей с высоким содержанием вяжущего;

- произведена опытно-производственная апробация результатов исследований, обеспечено их внедрение в нормативную документацию Республики Беларусь; дана технико-экономическая оценка эффективности разработки.

Объект исследования – высокоплотный асфальтобетон с каркасно-контактной структурой для устройства конструктивных слоев дорожных покрытий.

Предмет исследования – закономерности формирования структуры, физико-механических и эксплуатационных свойств высокоплотного асфальтобетона с каркасно-контактной структурой при варьировании параметров минерального заполнителя, органического вяжущего, модифицирующих и стабилизирующих добавок.

Научная новизна диссертации заключается в новых научных экспериментально подтвержденных данных, полученных при разработке теоретического и экспериментального обоснования технологии получения асфальтобетонных смесей каркасно-контактной структуры с повышенным содержанием вяжущего, отличающихся комплексным учетом факторов формирования структуры и свойств материала, включая зерновой состав заполнителя, реологические свойства битумного вяжущего, а также приемы стабилизации смеси, на основе экспериментально установленных и систематизированных закономерностей.

Впервые для моделирования зернового состава асфальтобетонных смесей каркасной структуры применен стохастический метод, что позволило на основе компьютерного моделирования создать более 650 моделей их зернового состава и, с помощью методов математической статистики и теории перколяции, установить критерии оптимальной каркасности материала и выявить зависимость плотности структуры каменного каркаса от параметров крупного заполнителя. На основе анализа зернового состава применяемого мелкого заполнителя и его сопоставления с «идеальным» математически определен критерий максимальной плотности упаковки песчаных фракций. По совокупности полученных зависимостей и критериев теоретически обоснован и экспериментально подтвержден зерновой состав заполнителей в асфальтобетонной смеси, обеспечивающий максимальную плотность минерального каркаса.

Экспериментально установлена количественная зависимость изменений сдвигоустойчивости и трещиностойкости разрабатываемого асфальтобетона, определено, что увеличение условной вязкости битума в 2 раза приводит к повышению сдвигоустойчивости асфальтобетонной смеси в среднем на 12,5 %, при одновременном снижении ее трещиностойкости на 4-16 %, что является научной основой для сбалансированного выбора параметров вяжущего для различных условий эксплуатации покрытия, обеспечивающего соответствие указанных критериев нормативным требованиям.

Для определения требуемых реологических свойств органического вяжущего в зоне положительных температур предложено использовать условную вязкость и индекс пенетрации, а в зоне отрицательных температур вязкость по модели Максвелла, что позволило установить предельные значения вязкости, обеспечивающие устойчивость асфальтобетонных смесей с повышенным содержанием вяжущего к деформациям и разрушениям в условиях эксплуатации при температурах от -30 до $+80$ °С, а также установить количественные зависимости теплоустойчивости и трещиностойкости битума от содержания полимерных модификаторов, что в совокупности послужило основой для разработки методики выбора оптимального вида и количества модифицирующих добавок.

Положения, выносимые на защиту:

– методика формирования пространственного каменного каркаса асфальтобетонной смеси, основанная на стохастическом моделировании зернового состава, которая учитывает геометрию зерен, соотношение соседствующих фракций и пространственную долю каменного заполнителя (c_n), что обеспечивает возможность установить и графически отразить зависимость вероятностного распределения плотности минерального скелета и на ее основе определить условия для формирования каркасно-контактной структуры асфальтобетонных смесей с минимальной остаточной пористостью;

– предельные кривые зернового состава заполнителей в асфальтобетонной смеси каркасно-контактной структуры, полученные на основе установленной математической зависимости и результатов компьютерного моделирования с последующей статистической обработкой множества зерновых составов мелкозернистых смесей с размером частиц в диапазоне до 10 мм, которые обеспечивают сдвигоустойчивость асфальтобетона по показателю уровня надежности (P_1) не ниже 0,90 и расчетный срок службы дорожного асфальтобетонного покрытия не менее 10 лет;

– результаты экспериментальных исследований и установленная зависимость изменения сдвигоустойчивости и трещиностойкости асфальтобетона с повышенным содержанием вяжущего от вязкости битума и характеристик зернового каркаса смеси, которые обеспечили как сбалансированный выбор параметров вяжущего для различных условий эксплуатации, так и определение предельных значений вязкости битума для обеспечения указанных критериев в пределах нормативных требований;

– методика оценки свойств органического вяжущего с учетом применения полимерных добавок, основанная на экспериментальном определении эффективной вязкости по моделям Максвелла, температуры размягчения (T_p) и глубины погружения иглы (h), которая позволяет количественно оценить влияние типа и содержания полимерных модификаторов на тепло- и трещиностойкость асфальтобетона, а также обоснованно выбирать их оптимальное количество и тем самым достигать уровня надежности асфальтобетона по критериям сдвигоустойчивости (P_1) не ниже 0,95, а уровня надежности по трещиностойкости (P_2) не ниже 0,86;

– состав стабилизирующей добавки, полученной на основе вторичных материалов, целлюлозных и синтетических волокон, обеспечивающий устойчивость асфальтобетонных смесей с повышенным содержанием вяжущего к стеканию при производственных температурах благодаря тому, что ее состав разработан с учетом реологических свойств применяемого вяжущего и позволяет достичь значения предела его текучести более 10 Па и снизить стекание битума по методу Шелленберга ниже 0,15 % от массы смеси;

– результаты опытно-производственной апробации высокоплотных асфальтобетонных смесей с каркасно-контактной структурой, послужившие основой для разработки и включения в нормативную базу Республики Беларусь технических нормативных правовых актов.

Личный вклад соискателя. Все основные результаты исследований получены автором самостоятельно. Общая концепция и направление исследований разработаны совместно с научным руководителем, доктором технических наук, профессором В.А. Веренько. В публикациях, выполненных в соавторстве, личный вклад соискателя заключается в проведении экспериментальной части исследований, обработке, анализе и интерпретации полученных данных, а также в подготовке рукописей к публикации.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: международная научно-практическая конференция «Проблемы надежности дорожных одежд городских улиц и дорог» (БНТУ, г. Минск, 30 июня – 1 июля 2005 г.); международная научно-техническая конференция молодых ученых и аспирантов «Современные технологии строительства и эксплуатации автомобильных дорог» (ХНАДУ, г. Харьков, Украина, 24–25 апреля 2008 г.); международный академический семинар «China/Former Soviet Union Area Workshop on Pavement Technologies» (Университет Чанган, г. Сиань, КНР, 14–16 октября 2010 г.); республиканская научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Автомобильные дороги – дороги будущего» (БелдорНИИ, г. Минск, 10 марта 2011 г.); международная научно-техническая конференция «Проблемы повышения качества и ресурсосбережения в дорожной отрасли» (БелдорНИИ, г. Минск, 30–31 мая 2013 г.); международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов «Инновации в строительстве и эксплуатации дорожно-строительного комплекса» (БНТУ, г. Минск, 22–23 ноября 2017 г.); международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа «Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов» (БелГУТ, г. Гомель, 16–17 ноября 2023 г.); международная научно-техническая конференция «Новые технологические решения для дорог и мостов в транспортной инфраструктуре» (БелдорНИИ, г. Минск, 27–28 марта 2025 г.); международная научно-практическая конференция «Внедрение новых технологий в автодорожную отрасль» (Исполнительный комитет СНГ, г. Минск, 28 апреля 2025 г.).

Производственная апробация результатов исследований проведена на предприятиях дорожной отрасли: ОАО «ДСТ-5», ГПО «Горремавтодор Мингорисполкома», ОАО «МАКРОДОР», СЗАО «Асфальтобетонный завод».

Опубликование результатов диссертации. По материалам диссертационной работы опубликовано 10 статей объемом 5,12 авторского листа в журналах, включенных в перечень научных изданий ВАК; 12 публикаций в материалах конференций; получен 1 патент и подано 2 заявки на патент. Результаты исследований использованы при написании 1 монографии и при разработке 5 технических нормативных правовых актов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 214 страниц, в т.ч. до 100 страниц машинописного текста, 56 иллюстраций, 37 таблиц, список библиографических источников из 223 наименований, из них 31 авторские, 5 приложений.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе проанализированы мировой и отечественный опыт, литературные источники и работы А.М. Богуславского, А.В. Бусела, В.А. Веренько, Л.Б. Гезенцвея, Н.В. Горельшева, В.А. Золотарева, Н.Н. Иванова, Г.Н. Кирюхина, Я.Н. Ковалева, С.Е. Кравченко, Б.И. Ладыгина, В.В. Мозгового, Б.С. Радовского, И.А. Рыбьева, В.Н. Яромко, И.К. Яцевича и многих других исследователей, а также учтена современная нормативная база, что позволило определить основные типы асфальтобетонных, применяемых в качестве верхних слоев дорожных покрытий.

По результатам критического анализа положительных и отрицательных характеристик современных асфальтобетонных смесей сформулирована концептуальная основа исследования: создание надежного и высококачественного асфальтобетона требует формирования оптимальной структуры каменного каркаса с максимальной степенью упаковки минеральных компонентов и заполнения образовавшихся пустот оптимальным количеством вяжущего с заданными свойствами для обеспечения повышенного срока службы и эксплуатационной надежности дорожного покрытия. На этом основании сформулированы цель и задачи исследований, приведенные в общей характеристике работы.

Во второй главе приведены параметры использованных материалов, методы и методики проведения исследований.

В качестве крупного заполнителя использовали гранитный щебень фракций (далее – щебень): 5–10 мм по ГОСТ 8267; 2–4 мм, 4–6,3 мм, 6,3–10 мм по СТБ 1311. В качестве мелкого заполнителя применяли: щебень фракции 2,5–5 мм (из отсевов дробления гранитных пород); песок из отсевов дробления гранитных пород (далее – отсев) по ГОСТ 8736. В качестве наполнителя использовали неактивированный доломитовый минеральный порошок (далее – МП) по ГОСТ 16557.

В качестве органического вяжущего использовали битум следующих марок: БНД 90/130 по ГОСТ 22245; 50/70 и 70/100 по СТБ EN 12591; БН 90/10 по ГОСТ 6617; ПБ 70 II по ТУ ВУ 100059044.002.

Для модификации битума использовали: бутадиев-стирольный термоэластопласт ДСТ 30-01 (далее – ДСТ); сополимеры типа стирол-бутадиев-стирол (далее – SBS) марки KTR 401; модификаторы на основе воска Фишера-Тропша (далее – синтетические воски); модификатор, разработанный в БНТУ, выпускаемый по ТУ ВУ 690610504.710 (далее – полимер РБ); вторичные материалы: вторичный полипропилен (ПП, PP-recycled, далее – полипропилен); вторичный полиэтилен высокого давления (ПВД или LDPE, далее – полиэтилен). В качестве стабилизирующих добавок использовали: стабилизатор Viator 66; тонкоизмельченную макулатуру по ГОСТ 10700, группы Б, марки МС-7Б (целлюлозное волокно, далее – эковата). Технические характеристики модифицирующих и стабилизирующих добавок приняты в соответствии с паспортами и технической документацией на продукцию.

С целью установления зависимостей формирования плотного каменного каркаса и определения оптимального соотношения фракций, обеспечивающего ему максимальную плотность, применили компьютерное моделирование по принципиальной схеме (рисунок 1). В рамках моделирования, с учетом стохастических подходов и метода «Монте-Карло», было создано более 650 моделей зерновых составов мелкозернистой смеси (с крупностью зерен до 10 мм).



Рисунок 1 – Принципиальная схема моделирования зернового состава

За основной исследовательский критерий долговечности асфальтобетона принят общий уровень надежности ($P_{об}$) по ТКП 45-3.03-3, то есть показатель, характеризующий вероятность безотказной работы материала в расчетный период времени, определяемый в зависимости от четырех критериев: сдвигоустойчивости (P_1), трещиностойкости (P_2), усталостной трещиностойкости (P_3), коррозионной стойкости (P_4).

В третьей главе представлены результаты исследований по следующим направлениям: разработка математической модели формирования оптимального гранулометрического состава асфальтобетонных смесей по критерию максимальной плотности минерального заполнителя; установление основных особенностей использования органического вяжущего в высокоплотных асфальтобетонных смесях с повышенным содержанием битума; определение критериев и условий стабилизации битума.

Путем системного анализа существующих подходов к проектированию гранулометрического состава заполнителей мелкозернистых плотных асфальтобетонных смесей установлено, что оптимальная кривая зернового состава плотной смеси по критерию профессора Н.Н. Иванова может быть описана математической зависимостью Фуллера со степенью 0,3 (рисунок 2а). Коэффициент корреляции в этом случае составляет 0,99, что свидетельствует о наличии линейной зависимости между переменными (рисунок 2б).

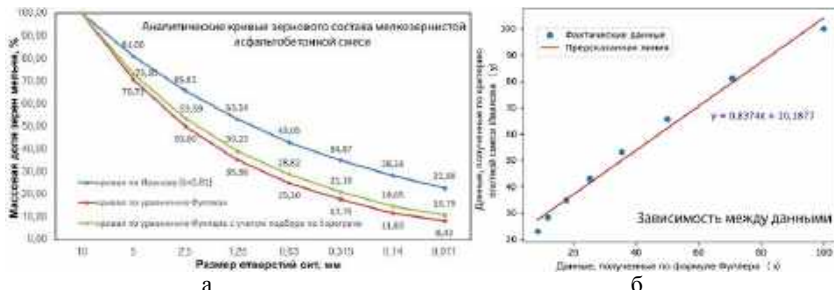


Рисунок 2 – Оптимизация зернового состава в объеме мелкого заполнителя

Выявленная закономерность использована в качестве базовой при оптимизации гранулометрической структуры разработанных асфальтобетонных смесей, и учитывает формирование минерального каркаса в объеме мелкого заполнителя.

С целью установления влияния вязкости битума и характеристик зернового состава на сдвигоустойчивость и трещиностойкость асфальтобетонов с высоким содержанием вяжущего были проведены экспериментальные исследования. В ходе работы использовали две серии смесей: первая: щебень 5-10 – 60 %; щебень 2,5-5 – 15 %; отсев – 10 %; МП – 15 %; битум – 9,5 % сверх 100 % массы минеральной части; вторая: щебень 2,5-5 – 20 %; отсев – 55 %; МП – 25 %; битум – 12,5 % сверх 100 % массы минеральной части. Обе серии смесей готовили с применением битума различной вязкости (пенетрация от 16 до 68 \times 0,1 мм при температуре 25 °С). Требуемый диапазон вязкостей был получен путем смешения в различных пропорциях битумов марок БНД 90/130 и БН 90/10.

Установлено (рисунок 3а), что устойчивость асфальтобетона с высоким содержанием вяжущего к пластическим деформациям (P_I) обеспечивается сочетанием двух факторов: каркасно-контактной структурой минеральной части и вязкостью битума. Так, асфальтобетон (состава 1), имеющий пространственный каркас за счет высокого содержания крупного заполнителя, при одинаковой вязкости битума характеризуется сдвигоустойчивостью в 3–4 раза более высокой, чем асфальтобетон бескаркасной структуры (состав 2). Рост вязкости битума приводит к повышению сдвигоустойчивости вследствие увеличения внутренней когезии. Экспериментально определено, что повышение условной вязкости битума в 2 раза обеспечивает рост сдвигоустойчивости асфальтобетона на 12,5 %.

Трещиностойкость асфальтобетонов рассмотренных составов (рисунок 3б) в меньшей степени определяется зерновым составом и количеством вяжущего (9,5 % или 12,5 %) и в большей степени зависит от когезии битума. Экспериментально установлено, что увеличение вязкости битума в 2 раза приводит к снижению трещиностойкости асфальтобетона на 4–16 %.

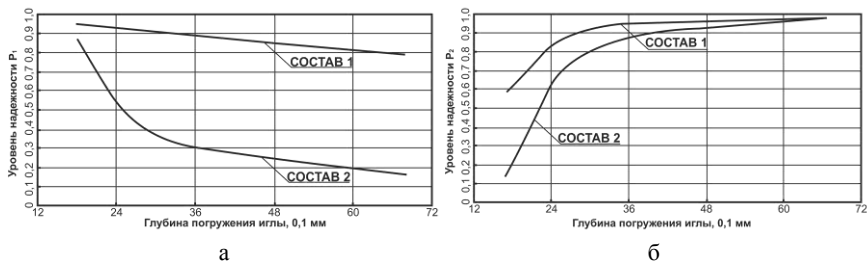


Рисунок 3 – Зависимость уровня надежности асфальтобетона от вязкости битума

Модификация является наиболее перспективным методом повышения когезии битума без снижения трещиностойкости асфальтобетона. В рамках

предварительной оценки эффективности модификации асфальтобетонных смесей с высоким содержанием вяжущего проведены экспериментальные исследования серии смесей следующего состава: щебень 5-10 мм – 60 %; щебень 2,5-5 мм – 15 %; отсев – 10 %; МП – 15 %; битум марки БНД 90/130 – 8,0 % сверх 100 % массы минеральной части. В качестве модификатора использовали ДСТ. Его концентрацию варьировали от 0,5 до 2,5 % от массы битума с шагом 0,5 % (рисунок 4).

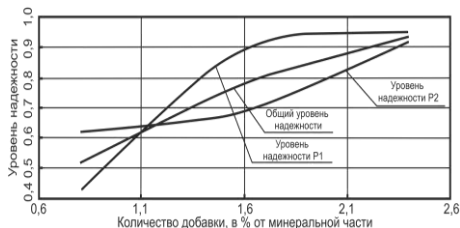


Рисунок 4 – Влияние содержания ДСТ на уровни надежности асфальтобетона

Установлено, что введение ДСТ в состав асфальтобетонных смесей с повышенным содержанием вяжущего повышает как устойчивость к пластическим деформациям (P_1), так и приводит к увеличению показателя трещиностойкости (P_2). Рациональное содержание полимерной добавки, обеспечивающее наилучший баланс прочностных характеристик и долговечности, составляет свыше 2,2 % от массы органического вяжущего. При таком содержании обеспечиваются требуемые уровни надежности (P_1) и (P_2), а также общий уровень надежности материала (P_0), достигающий 0,9, что соответствует требованиям ТКП 45-3.03-3.

Обеспечение технологической устойчивости асфальтобетонных смесей с повышенным содержанием вяжущего является критически важной задачей, так как стекание битума приводит к сегрегации, что напрямую снижает надежность и долговечность покрытия. Удерживающая способность вяжущего на поверхности минерального зерна определяется балансом гравитационных сил (зависящих от толщины пленки) и реологического сопротивления материала. При технологических температурах (150–180 °С) структурированное вяжущее можно рассматривать как вязкопластичное тело. Следовательно, ключевым параметром устойчивости выступает предел текучести (τ_0), описываемый моделями Шведова–Бингама, Гершеля–Балкли или Кассона.

Таким образом, решались две взаимосвязанные задачи. Первая заключалась в установлении зависимости касательных напряжений сдвига (τ), возникающих под действием силы тяжести, от толщины пленки вяжущего (рисунок 5а). Вторая задача, решенная методом ротационной вискозиметрии, состояла в оценке влияния стабилизирующих добавок (минерального порошка, полимеров и целлюлозных волокон) на величину предела текучести τ_0 (рисунок 5б).

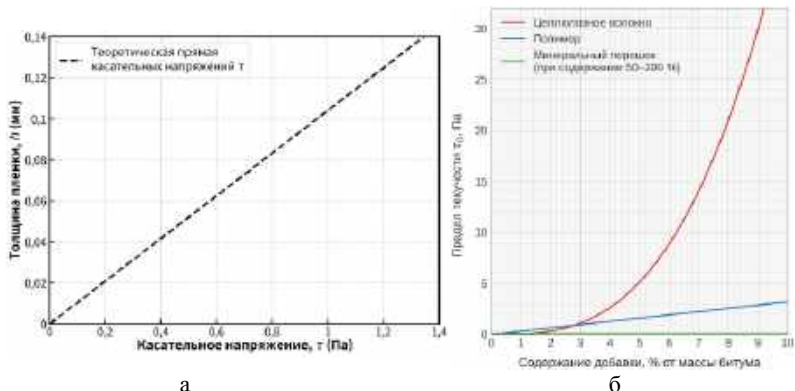


Рисунок 5 – Оценка стабилизации асфальтобетонных смесей

Анализ зависимости касательных напряжений от параметров пленки свидетельствует о том, что в нестабилизированных системах при толщине пленки вяжущего, превышающей 10 мкм, гравитационные касательные напряжения сдвига (τ) достигают значений свыше 0,1 Па. Поскольку при технологических температурах (150–180 °С) данная величина превышает собственный реологический предел текучести (τ_0) неструктурированного битума, система теряет агрегативную устойчивость, что инициирует процесс стекания вяжущего.

Доказана низкая эффективность монокомпонентной стабилизации для высоконаполненных битумных систем. Научно обоснована необходимость перехода к принципу комплексной стабилизации, базирующемуся на взаимодействии дисперсной фазы (минерального порошка), полимерного модификатора и армирующего агента (целлюлозного волокна). Реализация данного подхода обеспечивает повышение предела текучести до 17,2 Па. Сформированный реологический барьер исключает стекание мастичных прослоек толщиной до 1800 мкм, что гарантирует технологическую надежность асфальтобетонной смеси.

В четвертой главе представлены результаты статистической обработки полученных в ходе компьютерного моделирования данных. Определено (рисунок 6а), что для достижения максимальной плотности мелкозернистых смесей каркасной структуры оптимальное содержание щебня лещадной формы в составе крупного заполнителя должно находиться в пределах от 9 до 16 %. При этом содержание таких частиц не должно превышать 31 %, поскольку это приводит к существенному снижению плотности зернового состава. Установлено (рисунок 6б), что плотность каркаса крупного заполнителя регулируется соотношением соседних фракций. Оптимальным является соотношение 1:4,4, что хорошо коррелирует с общими теоретическими предпосылками. В то же время следует полностью исключать смеси с соотношением соседних фракций 1:1.

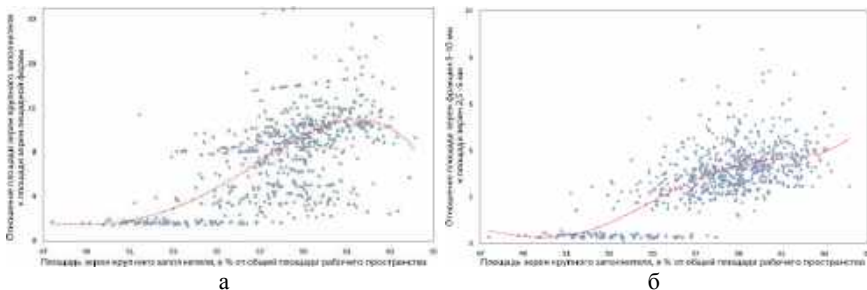


Рисунок 6 – Влияние параметров зернового состава на плотность каркаса

Установлено, что распределение Вейбулла наиболее точно аппроксимирует распределение плотности крупного заполнителя. Это подтверждается гистограммой распределения (рисунок 7а) и QQ-графиком (рисунок 7б). Экспериментальные точки на QQ-графике расположены близко к теоретической прямой, а незначительные отклонения в крайних квантилях объясняются естественным статистическим разбросом данных.

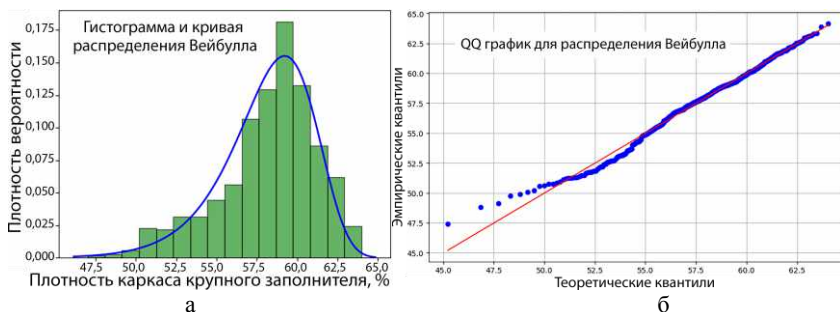
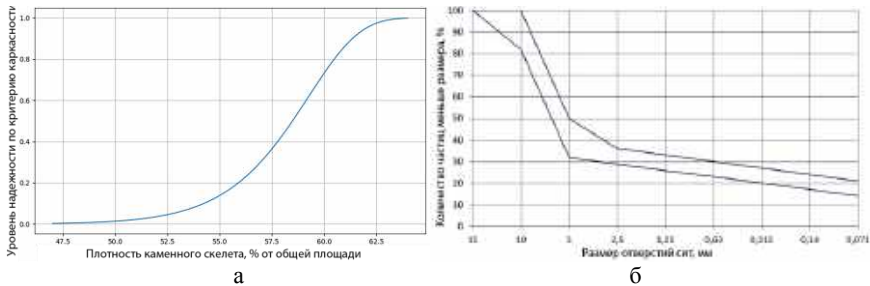


Рисунок 7 – Аппроксимация распределения плотности заполнителя

На основании распределения Вейбулла построили кривую плотности вероятности для минерального каркаса (рисунок 8а). Эта кривая отражает интегральную зависимость плотности каркаса от уровня надежности и служит основой для подбора оптимального зернового состава, обеспечивающего его максимальную плотность.

На основе установленной в главе 3 зависимости формирования плотного каменного каркаса в объеме мелкого заполнителя и с учетом 65 %-й вероятности попадания зернового состава в кривую распределения были получены предельные кривые (рисунок 8б). Они определяют гранулометрический состав, обеспечивающий высокую плотность асфальтобетонных смесей с каркасно-контактной структурой.



а – кривая плотности вероятности для крупного заполнителя (по закону Вейбулла)
 б – предельные кривые зернового состава асфальтобетона

Рисунок 8 – Статистическое обоснование предельных кривых зернового состава

На основе анализа упаковки частиц в объеме крупного заполнителя и с применением подходов теории перколяции (в частности, инварианта Шера-Цаллена) установлены критерии каркасности асфальтобетонных смесей в зависимости от пространственной доли щебеночного заполнителя (c_a): при $c_a < 0,16$ формируется песчаная структура; при $0,16 \leq c_a < 0,4$ – песчано-щебеночная; при $0,4 \leq c_a < 0,53$ – щебеночно-песчаная; при $c_a \geq 0,53$ – плотная щебеночная. Таким образом, для достижения максимального уровня надежности по критерию плотности пространственного каркаса крупного заполнителя следует проектировать составы со значением c_a выше 0,53.

Для изучения реологических свойств битума при отрицательных температурах была использована установка «ИВУС-1» (разработка Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси). Принцип действия прибора основан на исследовании физико-механических свойств вязкоупругих материалов методом динамического индентирования. С учетом условий лабораторных испытаний в качестве основной модели вязкоупругого тела была принята реологическая модель Максвелла, в рамках которой определялась вязкость битума в диапазоне от 0 до -30 °С. Экспериментальные данные обработаны методами математической статистики, в результате установлена эмпирическая зависимость:

$$\eta = 0,126 \cdot \exp\left(\frac{2091,09}{T}\right) \cdot h^{-0,121}, \quad (1)$$

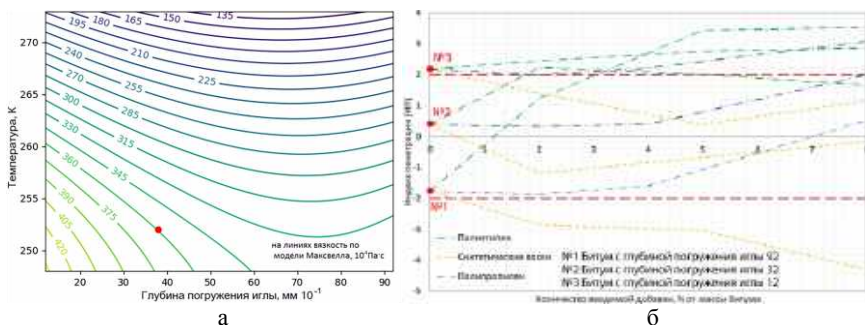
где η – вязкость по модели Максвелла, 10^4 Па·с;

T – температура, К;

h – глубина погружения иглы, при 25 °С, 10^{-1} мм.

Исходя из полученной зависимости и с учетом расчетной зимней температуры для покрытий в Республике Беларусь (-21 °С, по данным М.Я. Куделко), была определена предельная вязкость органического вяжущего. Для условий динамического индентирования это значение составило $359 \cdot 10^4$ Па·с (рисунок 9а). Таким образом, для обеспечения трещиностойкости покрытия, устроенного из асфальтобетонной смеси с повышенным содержанием вяжущего, необходимо выбирать битум, вязкость которого не превышает указанного значения.

Для изучения реологических свойств битумов при высоких летних температурах в качестве основных характеристик предложено использовать индекс пенетрации (ИП, отражающий интервал пластичности) и условную вязкость. Эти показатели определяли на основании данных о глубине проникания иглы (h) и температуре размягчения (T_p), рассчитывая их по формулам И.М. Руденской и эмпирической зависимости Иидзимы и Комы. Таким образом, были установлены закономерности изменения теплоустойчивости битума от вида и количества введенных модификаторов (полиэтилена, синтетического воска и полипропилена), представленные на рисунке 9б.



а – номограмма для определения вязкости по модели Максвелла

б – влияние вида и содержания модифицирующих добавок на индекс пенетрации

Рисунок 9 – Влияние температуры и модификаторов на реологические свойства битума

Установлено (рисунок 9б), что на теплоустойчивость битума существенно влияют вид и количество введенного модификатора. Модификация полипропиленом характеризуется сложным, нелинейным эффектом. При его добавлении в битумы различной вязкости (№1, №2, №3) кривые индекса пенетрации имеют схожий характер, что свидетельствует об отсутствии химического взаимодействия между полимером и битумом.

Введение синтетического воска в любом количестве вызывает стабильное снижение индекса пенетрации для всех исследованных битумов. Это свидетельствует о повышении теплоустойчивости вяжущего, то есть об ухудшении его эксплуатационных свойств в области отрицательных температур. Таким образом, синтетический воск не может быть рекомендован для использования в асфальтобетонных смесях с повышенным содержанием вяжущего в климатических условиях Республики Беларусь.

Применение полиэтилена дает наиболее выраженный положительный эффект, проявляющийся в увеличении индекса пенетрации. Эффективность модификации полиэтиленом существенно зависит от вязкости исходного вяжущего: наибольший эффект наблюдается для наименее вязкого битума (№1), тогда как для наиболее вязкого (№3) он проявляется слабее.

Для количественного описания полученных данных была разработана обобщенная эмпирическая зависимость. Модель построена методом

наименьших квадратов с использованием численной оптимизации по алгоритму Левенберга-Марквардта и имеет следующий вид:

$$X = 3,74 \cdot \ln\left(\frac{\eta}{\eta_0}\right) - 1,02 \cdot \left(\frac{h_0}{h} - 1\right) + 0,31, \quad (2)$$

где X – массовая доля полимера в битуме, %; η – динамическая вязкость модифицированного битума, 10^4 Па·с; η_0 – динамическая вязкость немодифицированного битума, 10^4 Па·с; h – глубина погружения иглы для модифицированного битума при температуре 25 °С, 10^{-1} мм; h_0 – глубина погружения иглы для немодифицированного битума, при температуре 25 °С, 10^{-1} мм.

На основе установленных зависимостей (рисунки 9а, 9б) и полученных эмпирических выражений (1), (2) разработана методика подбора оптимального вида и содержания полимерной добавки, обеспечивающей одновременное выполнение требований по сдвигоустойчивости и трещиностойкости асфальтобетона.

Для стабилизации асфальтобетонных смесей с высоким содержанием битума на основе вторичных материалов была разработана композиционная добавка. Подбор оптимальных диапазонов проводился с помощью регрессионных моделей, построенных по экспериментальным данным, с учетом нескольких критериев, ключевым из которых являлось стекание вяжущего (не более 0,15 %, определяемое по классическому методу Шелленберга). В результате аналитической оптимизации был установлен следующий состав стабилизирующей добавки: целлюлозное волокно (эковата) 39-48 %, волокно синтетическое (относится к невозвратным отходам от производства меха искусственно) 38-47 %, термостабилизатор (Диафен ФП) 6-9 %, битум 8-12 %.

На заключительном этапе были проведены верификационные исследования разработанного асфальтобетона, результаты которых свидетельствуют, что по ряду ключевых физико-механических показателей его составы превосходят традиционные аналоги, применяемые в Республике Беларусь: горячие плотные асфальтобетоны – в 2 раза, а щебеночно-мастичный асфальтобетон – в 1,3 раза (рисунок 10а). Для асфальтобетонов на немодифицированном битуме общий уровень надежности составил не менее 0,86, что, согласно ТКП 45-3.03-3, соответствует сроку службы не менее 10 лет. Применение же модифицированного вяжущего позволило повысить этот показатель до 0,98, увеличив тем самым расчетный срок службы покрытия до 12 лет и более (рисунок 10б).

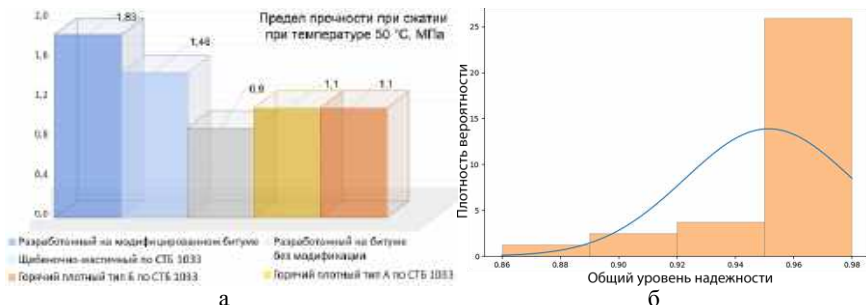


Рисунок 10 – Оценка свойств разработанного асфальтобетона

В пятой главе приведены результаты исследований, выполненных с целью адаптации разработанных асфальтобетонных смесей к транспортным и погодно-климатическим особенностям Республики Беларусь. Предложены и апробированы в реальных условиях эксплуатации новые дорожные конструкции, которые впоследствии вошли в состав разработанного альбома типовых дорожных конструкций.

На основе ранее выполненного компьютерного моделирования и статистического анализа (глава 4) определено, что с ростом толщины слоя с 3 до 5 см повышается однородность и упорядоченность минерального каркаса, что способствует увеличению плотности упаковки зерен (рисунок 11а). Установлена параболическая зависимость между плотностью упаковки зерен и толщиной слоя (рисунок 11б), которая показывает, что максимальная плотность достигается при толщине 5,14 см. Дальнейшее увеличение толщины приводит к снижению плотности, что подтверждает существование оптимальной толщины укладки слоя, обеспечивающей формирование наиболее плотной минеральной структуры.

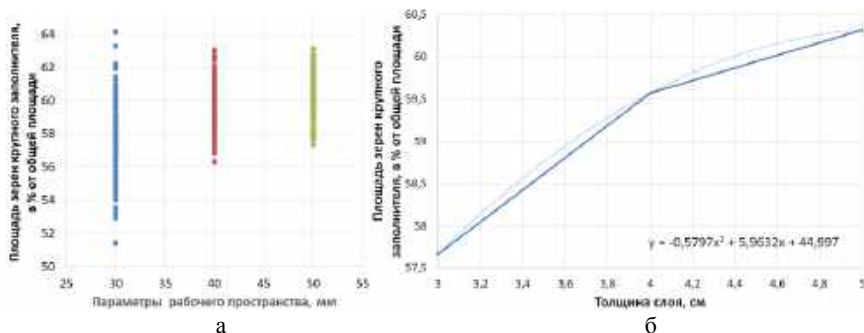


Рисунок 11 – Определение оптимальной толщины укладки слоя асфальтобетона

Производственная апробация подтвердила полную технологическую совместимость разработанной смеси с укладочными комплексами, применяемыми в Республике Беларусь. Это позволило использовать материал без кардинальных изменений существующей техники. Благодаря подтвержденным высоким эксплуатационным качествам, разработанный материал был успешно применен более чем на 50 объектах улично-дорожной сети г. Минска в качестве слоев покрытия. Технико-экономический расчет показал, что расчетный срок службы разработанного асфальтобетона практически в 2 раза превышает аналогичный показатель для традиционных горячих смесей. Без учета приведенных затрат на устройство и транспортировку, экономический эффект на одну тонну приготовленной смеси составляет 13,05 и 24,50 рубля по сравнению с горячими плотными и щебеночно-мастичными смесями соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны научно-практические основы усовершенствованной технологии получения и применения высокоплотного асфальтобетона каркасно-контактной структуры повышенной надежности и увеличенного срока эксплуатации [1-А–31-А].

2. На основе результатов компьютерного моделирования установлена зависимость между структурной плотностью асфальтобетонной смеси и параметрами гранулометрического состава заполнителей, обеспечивающая максимальную плотность минерального каркаса в объеме крупного заполнителя фракций 2,5-10 мм при содержании в нем от 9 до 16 % зерен лещадной формы и соотношении смежных фракций 1:4,4, а в объеме смеси мелкого заполнителя фракцией до 2,5 мм оптимальный зерновой состав согласуется с математической зависимостью Фуллера со степенным показателем 0,3, что в совокупности позволило разработать предельные кривые зернового состава смеси крупного и мелкого заполнителя, обеспечивающие получение высокоплотного асфальтобетона каркасно-контактной структуры и достичь уровня надежности по критериям устойчивости к пластическим деформациям (P_f) не менее 0,86 [2-А; 6-А; 7-А; 9-А; 13-А; 22-А].

3. Установлена и экспериментально подтверждена количественная зависимость эксплуатационных характеристик асфальтобетона с повышенным содержанием вяжущего от когезионных свойств битума и параметров зерновой структуры, проявляющаяся в том, что двукратное увеличение условной вязкости битума соответствует росту сдвигоустойчивости асфальтобетона на 12,5 %, при этом снижение трещиностойкости не превышает 16 %; выявлена зависимость свойств битумов, модифицированных полимерными компонентами, и разработана методика выбора оптимального количества модификатора в диапазоне от 1 до 8 % его массы, что позволяет оптимизировать состав органического вяжущего в зависимости от содержания полимера и обеспечить уровень надежности асфальтобетона не ниже 0,95 по критерию сдвигоустойчивости (P_f) и не ниже 0,90 по критерию трещиностойкости (P_2), а также не ниже 0,92 при оценке общего уровня надежности ($P_{од}$), что соответствует сроку службы не менее 12 лет, рассчитанному по ТКП 45-3.03-3 [2-А; 3-А; 6-А; 10-А; 11-А; 13-А; 15-А; 19-А–21-А].

4. Данные расчета методом конечных элементов и результаты экспериментальных исследований позволили установить граничные условия обеспечения технологической устойчивости асфальтобетонных смесей с высоким содержанием вяжущего во взаимосвязи с толщиной битумной пленки, разделяющей зерна заполнителей: при толщине более 700 мкм и отсутствии стабилизирующих компонентов наблюдается рост касательных напряжений свыше 10 Па, что превышает предел текучести битума и инициирует неуправляемое стекание вяжущего; предложен и экспериментально обоснован комплекс мер стабилизации устойчивости смеси за счет применения модифицированного битума, минерального порошка и структурирующей целлюлозной добавки,

который обеспечивает увеличение предела текучести до 65 Па, что позволяет сформировать термически устойчивую структуру и исключает перераспределение вяжущего в ней [1-А; 4-А; 14-А].

5. На основе использования вторичных целлюлозных и полимерных волокон разработана и запатентована стабилизирующая добавка для асфальтобетонных смесей с высоким содержанием вяжущего, которая при введении в состав асфальтобетонной смеси в количестве от 0,2 до 0,5 % ее массы обеспечивает повышение предела текучести битума свыше 10 Па, при этом экспериментально определенный показатель стекания по классическому методу Шелленберга не превышает 0,15 %, что предотвращает перераспределение и стекание битума в процессе хранения, транспортировки и укладки асфальтобетонной смеси в дорожное покрытие [8-А; 14-А; 24-А].

6. Установлена квадратичная (параболическая) зависимость плотности упаковки зерен асфальтобетонной смеси с крупностью заполнителя до 10 мм от толщины укладываемого слоя, достигающая максимума при толщине 5,14 см; для количественной оценки неоднородности структуры предложен коэффициент вариации, значение которого снижается с увеличением толщины слоя, что свидетельствует о повышении однородности и упорядоченности распределения зерен заполнителя; совокупность установленных зависимостей позволила оптимизировать параметры укладки асфальтобетонных слоев для повышения их структурной устойчивости и долговечности [9-А; 10-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты исследований рекомендуются к использованию проектными, дорожно-строительными и мостостроительными организациями, асфальтобетонными заводами по следующим направлениям:

- проектными организациями при разработке конструктивных решений дорожных одежд, включая капитальные и усиленные типы, с применением высокоплотных асфальтобетонных смесей с каркасно-контактной структурой для верхних слоев покрытий автомобильных дорог, улиц, мостов и путепроводов;

- дорожно-строительными организациями при новом строительстве, капитальном ремонте и реконструкции автомобильных дорог общего пользования, улиц и площадей населенных пунктов, с устройством верхних слоев и слоев износа на основе разработанных смесей;

- мостостроительными организациями при устройстве покрытий проезжей части мостов, путепроводов и эстакад, включая сопряжения с дорожным полотном;

- асфальтобетонными заводами и производителями дорожно-строительных материалов для производства асфальтобетонных смесей по усовершенствованной рецептуре, с оптимизированным гранулометрическим составом и стабилизированным органическим вяжущим;

- в иных отраслях строительства при устройстве покрытий промышленных площадок, подъездных путей и объектов транспортной инфраструктуры, где требуется высокая долговечность и устойчивость к эксплуатационным нагрузкам.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых журналах:

1-А. Афанасенко, А. А. Технологическая устойчивость асфальтобетонных смесей с повышенным содержанием вяжущего / А. А. Афанасенко, В. В. Занкович // Строительная наука и техника. – 2006. – № 1(4). – С. 35–39.

2-А. Афанасенко, А. А. Высокомодульные асфальтобетоны с повышенным содержанием вяжущего для дорожных покрытий / А. А. Афанасенко, В. А. Веренько // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: сб. науч. тр. – 2006. – Вып. 34–35. – С. 145–148.

3-А. Афанасенко, А. А. Влияние вида вяжущего на надежность литых асфальтов / А. А. Афанасенко, В. А. Веренько // Дороги и мосты: сб. научных трудов ГосдорНИИ, Киев. – 2006. – Вып. 5. – С. 103–113.

4-А. Афанасенко, А. А. Оптимизация составов асфальтобетонных смесей с повышенным содержанием вяжущего по критерию технологической устойчивости / А. А. Афанасенко, В. В. Занкович // Автомобильные дороги и мосты. – 2007. – № 1. – С. 66–69.

5-А. Афанасенко, А. А. Основные направления научных исследований в области дорожного проектирования и материаловедения / А. А. Афанасенко, В. А. Веренько, В. В. Занкович // Строительная наука и техника. – 2011. – № 1 (34). – С. 67–73.

6-А. Афанасенко, А. А. Литой высококомодульный асфальтобетон: основные подходы к подбору составов, техническим требованиям и конструированию дорожной одежды / А. А. Афанасенко // Автомобильные дороги и мосты. – 2023. – № 2 (32). – С. 19–29.

7-А. Афанасенко, А. А. Оптимизация зернового состава асфальтобетонных смесей с целью обеспечения максимальной плотности / А. А. Афанасенко // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 3. – С. 235–241.

8-А. Афанасенко, А. А. Аналитический обзор методов стабилизации асфальтобетонных смесей с повышенным содержанием вяжущего / А. А. Афанасенко, П. П. Яцевич, А. В. Корончик // Вестник гражданских инженеров. – 2024. – № 2 (103). – С. 59–70.

9-А. Афанасенко, А. А. Оптимизация зернового состава мелкозернистых асфальтобетонных смесей каркасной структуры по критерию максимальной плотности / А. А. Афанасенко // Автомобильные дороги и мосты. – 2024. – № 1 (33). – С. 29–35.

10-А. Афанасенко, А. А. Оптимизация плотности зернового состава мелкозернистых асфальтобетонных смесей: зависимость структурных параметров от толщины слоя покрытия / А. А. Афанасенко, П. П. Яцевич // Автомобильные дороги и мосты. – 2025. – № 1 (35). – С. 13–20.

Материалы конференций

11-А. Афанасенко, А. А. Высокоплотные тонкослойные асфальтобетонные покрытия / А. А. Афанасенко, В. А. Веренько // Наука - образованию, производству, экономике: междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. / БНТУ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск : БНТУ, 2004. – Т. 1. – С. 374–378.

12-А. Афанасенко, А. А. О возможности применения литого асфальтобетона для устройства дорожных покрытий городских улиц / А. А. Афанасенко, В. А. Веренько // Проблемы надежности дорожных одежд городских улиц и дорог: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф., Минск, 30 июня – 01 июля 2005 г. / Беларус. нац. техн. ун-т.; редкол.: В. А. Веренько [и др.] – Минск, 2005. – С. 37–45.

13-А. Афанасенко, А. А. Высокоплотные асфальтобетоны для условий Республики Беларусь / А. А. Афанасенко, В. А. Веренько, В. В. Занкович // Современные технологии строительства и эксплуатации автомобильных дорог: материалы международной научно-технической конференции молодых ученых и аспирантов, Харьков, Украина, 24–25 апреля 2008 г. / ХНАДУ. – Харьков, 2008. – С. 140–153.

14-А. Afanasenka, A. Ways to improve the technological stability of asphalt concrete with high content of binder / A. Afanasenka, U. Veranko, V. Zankavich, S. Lira // China/Former Soviet Union Area Workshop on Pavement Technologies, Xi'an, China, 14–16 October, 2010 / Chang'an University. – Xi'an, 2010. – P. 78–92.

15-А. Афанасенко, А. А. Повышение надежности и долговечности асфальтобетонных покрытий / А. А. Афанасенко, С. В. Лира // Автомобильные дороги – дороги будущего: сб. тез. докладов науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 10 марта 2011 г. / БелдорНИИ. – Минск : БелдорНИИ, 2011. – С. 58–65.

16-А. Афанасенко, А. А. Асфальтобетон повышенной деформационной устойчивости с применением асфальтогранулята / А. А. Афанасенко, В. А. Веренько // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. / БНТУ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск : БНТУ, 2012. – Т. 3. – С. 93.

17-А. Афанасенко, А. А. Современные подходы к ремонту и содержанию дорожных асфальтобетонных покрытий / А. А. Афанасенко, В. А. Веренько, В. В. Занкович // Проблемы повышения качества и ресурсосбережения в дорожной отрасли: сб. тр. межд. конф., Минск, 30–31 мая 2013 г. / Департамент «Белавтодор», БелдорНИИ. – Минск : БелдорНИИ, 2013. – С. 52–57.

18-А. Афанасенко, А. А. Перспективные методы содержания дорожных покрытий в условиях Республики Беларусь / А. А. Афанасенко // Инновации в строительстве и эксплуатации дорожно-строительного комплекса: международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-23 ноября 2017 г. / БНТУ; ред. А. В. Бусел [и др.]. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 23–25.

19-А. Афанасенко, А. А. Особенности подбора состава модифицированных асфальтобетонных смесей / А. А. Афанасенко, В. А. Веренько // Инновации в строительстве и эксплуатации дорожно-строительного комплекса: международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-23 ноября 2017 г. / БНТУ; ред. А. В. Бусел [и др.]. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 25–30.

20-А. Афанасенко, А. А. Разработка теоретических основ использования модифицированных асфальтобетонных смесей повышенной плотности и удобоукладываемости для устройства долговечных покрытий автомобильных дорог и улиц / А. А. Афанасенко, П. П. Яцевич // Инновации в строительстве и эксплуатации дорожно-строительного комплекса: международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-23 ноября 2017 г. / БНТУ; ред. А. В. Бусел [и др.]. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 30–33.

21-А. Афанасенко, А. А. Перспективы применения тонкослойных асфальтобетонных покрытий в условиях Республики Беларусь / А. А. Афанасенко // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа-БелГУТа, Гомель, 16–17 ноября 2023 г.: в 2 ч. / БелГУТ ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2023. – Ч. 1. – С. 360–362.

22-А. Афанасенко, А. А. Оптимизация составов асфальтобетонных смесей по критерию максимальной плотности / А. А. Афанасенко // Новые технологические решения для дорог и мостов в транспортной инфраструктуре: сб. тез. докладов науч.-техн. конф., Минск, 27–28 марта 2025 г. / БелдорНИИ. – Минск : БелдорНИИ, 2025. – С. 11–17.

Монографии

23-А. Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / В. А. Веренько, В. В. Занкович, А. А. Афанасенко, П. П. Яцевич, А. В. Ладышев, С. В. Лира; под ред. В. А. Веренько. – Минск : Арт Дизайн, 2015. – 296 с.

Патенты

24-А. Стабилизирующая добавка для асфальтобетонной смеси: пат. ВУ 12332 / А. А. Афанасенко, В. А. Веренько, В. В. Занкович. – Опубл. 2009.08.30.

Нормативные документы

25-А. Проектирование дорожных одежд улиц и дорог населенных пунктов: Изменение №1 ТКП 45-3.03-3-2004. – Введ. 15.04.2009. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2009. – 31 с.

26-А. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон повышенной деформационной устойчивости для конструктивных слоев дорожных одежд улиц г. Минска: Извещение об изменении №3 ТУ ВУ 100019869.001-2011. – Введ. 11.08.2016. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2016. – 21 с.

27-А. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон повышенной деформационной устойчивости для конструктивных слоев дорожных одежд улиц г. Минска: Извещение об изменении №4 ТУ ВУ 100019869.001-2011. – Введ. 30.07.2021. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2021. – 19 с.

28-А. Типовые строительные конструкции, изделия и узлы. Серия БЗ.503.9-16.18. Конструкции дорожных одежд улиц населенных пунктов. Материалы для проектирования: Серия БЗ.503.9-16.18: утв. ГПО «Горремавтодор Мингорисполкома» 09.04.2018. – Введ. 11.06.18. – Минск : Минстройархитектуры, 2018. – 69 с.

29-А. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон повышенной деформационной устойчивости с применением асфальтогранулята для конструктивных слоев дорожных одежд улиц г. Минска. Опытная партия: ТУ ВУ 191115757.001-2011 – Введ. 17.10.2011. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2011. – 20 с.

Заявки на изобретение

30-А. Дорожное асфальтобетонное покрытие: заявка ВУ а 20080045 / А. А. Афанасенко, В. А. Веренько, В. В. Занкович, Г. В. Чепцов, С. Е. Кравченко. – Опубл. 2009.08.30.

31-А. Асфальтобетонная смесь: заявка ВУ а 20160101 / А. А. Афанасенко, С. А. Жданок, С. Е. Кравченко, П. П. Самцов, П. П. Яцевич. – Опубл. 2017.10.30.

РЭЗІЮМЭ

Афанасенка Аляксей Аляксандравіч

Тэхналогія, склад і ўласцівасці высокашчыльнага асфальтабетону з каркасна-кантактнай структурай для дарожных пакрыццяў павышанай надзейнасці

Ключавыя словы: гарачы асфальтабетон; шчэбенева-мастычны асфальтабетон; літы асфальтабетон; стабілізуючыя дадаткі; мінеральны запаўняльнік; каркасна-кантактная структура; стахастычнае мадэляванне; шчыльнасць зерневага каркаса; арганічнае звязальнае; бітум; мадыфікуючыя дадаткі; палімеры; рэалагічныя ўласцівасці; асфальтабетонная сумесь; фізіка-механічныя ўласцівасці; узровень трываласці; аптымальная таўшчыня ўкладкі; канструкцыя дарожнага адзення.

Мэта дысертацыйнага даследавання – устанавленне заканамернасцяў фарміравання ўласцівасцей высокашчыльнага асфальтабетону з каркасна-кантактнай структурай у залежнасці ад яго складу і распрацоўка на гэтай аснове дзеяснай тэхналогіі яго атрымання і выкарыстання для ўладкавання дарожных пакрыццяў павышанай трываласці.

У ходзе даследавання прапанаваны стахастычны метады мадэлявання зерневага складу асфальтабетону, які дазваляе ацэньваць шчыльнасць мінеральнага каркаса з улікам колькасных і геаметрычных уласцівасцей запаўняльніка. Вызначаны залежнасці паміж складам асфальтабетоннай сумесі і яе эксплуатацыйнымі ўласцівасцямі, уключаючы зрухаўстойлівасць і трэшчынаўстойлівасць. Распрацавана матэматычная мадэль для падбору аптымальнага ўтрымання мадыфікуючых дадаткаў. Вызначаны крытэрыі тэхналагічнай устойлівасці сумесяў з высокім утрыманнем вяжучага і прапанаваны асноўныя метады стабілізацыі бітуму. Абгрунтаваны склад кампазіцыйнага стабілізуючага дадатку, які забяспечвае ўстойлівасць структуры сумесі пры павышаных тэмпературах.

На аснове атрыманых вынікаў сфарміраваны падыходы да праектавання высокашчыльных асфальтабетонных сумесяў з каркасна-кантактнай структурай, якія сталі асновай распрацаваных нарматыўна-тэхнічных дакументаў. Вытворчае апрабаванне на аб'ектах транспартнай інфраструктуры Рэспублікі Беларусь пацвердзіла высокую эфектыўнасць створаных матэрыялаў. Атрыманыя вынікі ўкаранены ў практыку дарожнага будаўніцтва і прапанаваны для ўладкавання канструктыўных слаёў дарожнага адзення, якое выкарыстоўваецца ва ўмовах інтэнсіўных механічных і кліматычных уздзеянняў.

РЕЗЮМЕ

Афанасенко Алексей Александрович

Технология, составы и свойства высокоплотного асфальтобетона с каркасно-контактной структурой для дорожных покрытий повышенной надежности

Ключевые слова: горячий асфальтобетон; щебеночно-мастичный асфальтобетон; литой асфальтобетон; стабилизирующие добавки; минеральный заполнитель; каркасно-контактная структура; стохастическое моделирование; плотность зернового каркаса; органическое вяжущее; битум; модифицирующие добавки; полимеры; реологические характеристики; асфальтобетонная смесь; физико-механические свойства; уровень надежности; оптимальная толщина укладки; конструкция дорожной одежды.

Цель диссертационного исследования – установление закономерностей формирования свойств высокоплотного асфальтобетона с каркасно-контактной структурой в зависимости от его составов и разработка на этой основе эффективной технологии его получения и применения для устройства дорожных покрытий повышенной надежности.

В ходе исследования предложен стохастический метод моделирования зернового состава асфальтобетона, позволяющий оценивать плотность минерального каркаса с учетом количественных и геометрических параметров заполнителя. Установлены зависимости между составом асфальтобетонной смеси и ее эксплуатационными характеристиками, включая сдвигоустойчивость и трещиностойкость. Разработана математическая модель для подбора оптимального содержания модифицирующих добавок. Определены критерии технологической устойчивости смесей с высоким содержанием вяжущего и предложены основные методы стабилизации битума. Обоснован состав композиционной стабилизирующей добавки, обеспечивающей устойчивость структуры смеси при повышенных температурах.

На основе полученных результатов сформированы подходы к проектированию высокоплотных асфальтобетонных смесей с каркасно-контактной структурой, которые легли в основу новых нормативно-технических документов. Производственная апробация на объектах транспортной инфраструктуры Республики Беларусь подтвердила высокую эффективность разработанных материалов. Полученные решения внедрены в практику дорожного строительства и рекомендованы для устройства конструктивных слоев дорожных одежд, эксплуатируемых в условиях интенсивных механических и климатических воздействий.

SUMMARY

Afanasenko Aleksey Aleksandrovich

Technology, Compositions, and Properties of High-Density Asphalt Concrete with a Stone Skeleton Structure for High-Performance Pavements

Keywords: hot-mix asphalt (HMA); stone mastic asphalt (SMA); mastic asphalt; stabilizing additives; mineral aggregate; stone skeleton structure; stochastic modeling; aggregate skeleton density; asphalt binder; bitumen; modifying additives; polymers; rheological properties; asphalt mix; physical and mechanical properties; reliability level; optimal layer thickness; pavement structure.

The aim of the research is to establish the relationships governing the formation of properties in high-density asphalt concrete with a stone skeleton structure as a function of its composition, and, based on these findings, to develop an effective technology for its production and application in constructing high-performance pavements.

In the course of the research, a stochastic method for modeling the asphalt concrete aggregate structure was proposed, allowing for the evaluation of the mineral skeleton density considering the quantitative and geometric parameters of the aggregate. Relationships between the asphalt mix composition and its performance characteristics, including rutting resistance and cracking resistance, were established. A mathematical model for selecting the optimal content of modifying additives was developed. The criteria for the technological stability of mixes with high binder content were defined, and the main methods for binder stabilization were proposed. The composition of a composite stabilizing additive that ensures the structural stability of the mix at high temperatures was substantiated.

Based on the obtained results, design approaches for high-density asphalt concrete mixes with a stone skeleton structure were formulated, which formed the basis for new technical standards and regulations. Production trials on transport infrastructure facilities in the Republic of Belarus confirmed the high performance of the developed materials. The developed solutions have been implemented in road construction practice and are recommended for the construction of pavement layers subjected to intensive mechanical and climatic impacts.



Научное издание

АФАНАСЕНКО
Алексей Александрович

**ТЕХНОЛОГИЯ, СОСТАВЫ И СВОЙСТВА ВЫСОКОПЛОТНОГО
АСФАЛЬТОБЕТОНА С КАРКАСНО-КОНТАКТНОЙ СТРУКТУРОЙ
ДЛЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия

Подписано к печати 14.05.2026. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага «Снегурочка».
Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 1,395. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 60. Заказ № 320

Печать цифровая. Изготовлено и отпечатано в типографии учреждения образования
«Брестский государственный технический университет»
224017, г. Брест, ул. Московская, 267. Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 3/1569 от 16.10.2017 г.