

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права
УДК 625.7/8:504.055

САКАНОВ
Дархан Куандыкович

**ЭКОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
СТРОИТЕЛЬСТВА УЛУЧШЕННЫХ ЦЕМЕНТОБЕТОННЫХ
ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 05.23.11 – проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Брест, 2026

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный консультант **БУСЕЛ Алексей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, государственное предприятие «БелдорНИИ», г. Минск

Официальные оппоненты: **ВЕРЕНЬКО Владимир Адольфович**, доктор технических наук, профессор, г. Минск;

НЕГРЕЙ Виктор Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой и охрана труда», учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель;

ШАПОВАЛОВ Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель

Оппонирующая организация **Казахский автомобильно-дорожный институт имени Л.Б. Гончарова**, г. Алматы, Республика Казахстан

Защита состоится 17 июня 2026 г. в 11:00 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 14 мая 2026 г.

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



В.В. Кравченко

ВВЕДЕНИЕ

Дороги с цементобетонным покрытием применяются более чем в 70 странах мира уже свыше ста лет, а их жизненный цикл составляет в среднем 25–30 лет. За последнее время доля автомобилей с грузоподъемностью более 8 тонн и автопоездов в грузовом потоке возросла на 45 %, при этом значительная их часть является перегруженной с нагрузками на ось, превышающими 100 кН. Для восприятия таких нагрузок проектируют цементобетоны с прочностью на сжатие более 100 МПа и на изгиб более 8,0 МПа. Достигнуты определённые успехи в создании бетонов, стойких к динамическим нагрузкам, температурным перепадам, воздействию противогололёдных реагентов и истиранию шипованной резиной. Вместе с тем традиционные способы укладки бетонных смесей не предусматривают направленного технологического воздействия на формирование структуры верхнего слоя покрытия, непосредственно контактирующего с колёсной нагрузкой и окружающей средой. Покрытия, выполненные по традиционной технологии, характеризуются высокой эмиссией шума при контакте с колёсами, что негативно сказывается на окружающей среде. Традиционная фактура в виде поперечных насечек обеспечивает необходимое сцепление в продольном направлении, однако в поперечном направлении этот показатель существенно ниже, что создаёт риск увода автомобиля при заносе, а также провоцирует избыточную акустическую нагрузку на придорожную среду. Предлагаемая научная концепция состоит в том, что посредством направленного технологического воздействия на поверхности покрытия формируется слой из упрочнённого плотного бетона с фактурой, обеспечивающей надёжное сцепление с колёсами автотранспорта и эффективное рассеивание звуковых волн, генерируемых в зоне контакта шины с проезжей частью.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

В Национальной стратегии «Казахстан-2050» поставлена задача увеличения транзитных перевозок через Казахстан к 2050 году в 10 раз, поэтому вопросы развития отечественной транспортной системы имеют важное государственное значение. Исходя из этого, предусматривается выполнение 11 проектов строительства международных дорог в объеме 5,4 млрд долларов. Основные трассы: Центр – Юг общей протяженностью 1200 км, Центр – Восток – более 1000 км, Центр – Запад – более 2000 км – запланированы как грузонапряженные транспортные артерии, с устройством на отдельных их участках цементобетонных покрытий. Реализация этих проектов требует применения новых

научно обоснованных технических и технологических решений. Вместе с тем цементобетонные покрытия, выполненные по традиционной технологии, при контакте с колесами обладают высокой эмиссией шума, что неблагоприятно воздействует на биологические объекты окружающей среды.

На территории Республики Казахстан имеется 10 заповедников, 12 национальных парков и 5 природных резерватов, 11 ботанических садов, 50 природных заказников, они занимают 8,2 % площади страны, по их территории проходит более 1000 км дорог. Поэтому проблема снижения уровня шума вблизи бетонных дорог требует своего решения.

Современные автострады и новые транспортные средства обеспечивают высокие скорости движения, однако на бетонных дорогах существует проблема сцепления колес с покрытием, особенно при боковом заносе. В связи с этим возникает необходимость нанесения такой искусственной фактуры на поверхность проезжей части, чтобы она не препятствовала плавному движению колес с высокой скоростью и обеспечивала условия безопасного торможения.

Для оценки эффективности предлагаемых технологических решений требуется новая система диагностики цементобетонных покрытий, способная выявить скрытые дефекты и неоднородности, оценить уровень сцепления с колесами автотранспортных средств и эмиссию звуковых волн при их проезде.

Актуальность работы заключается в том, что строительство улучшенных бетонных покрытий на основе новых технологических решений создало реальные условия увеличения грузо- и пассажирооборота на важнейших транспортных артериях, что способствует экономическому развитию Республики Беларусь и Республики Казахстан.

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Исследования по теме диссертации проводились в развитие и реализацию Государственной программы «Нурлы жол – путь в будущее» на 2015–2020 гг., в том числе по договорам с Комитетом автомобильных дорог Министерства по инвестициям и развитию Республики Казахстан:

1. Договор № 3 на выполнение работ по теме «Диагностика и паспортизация автомобильных дорог республиканского значения и совершенствование нормативно-технической базы автодорожной отрасли» от 15 июля 2013 г. (трехгодичная программа 2013–2016 гг.).

2. Договор № 36 на выполнение работ по теме «Совершенствование нормативно-технической базы автодорожной отрасли» от 21 июля 2016 года (трехгодичная программа 2016–2018 гг.).

3. Договор № 46 на выполнение работ по теме «Диагностика автомобильных дорог международного и республиканского значения» от 22 сентября 2016 года (трехгодичная программа 2016–2018 гг.).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель работы – разработка научно обоснованной технологии устройства улучшенных цементобетонных дорожных покрытий, обладающих повышенной устойчивостью к воздействию интенсивных транспортных нагрузок и погодноклиматических факторов, характерных для Республики Казахстан, пониженной эмиссией шума при движении автомобилей и высокой степенью сцепления с колесами автотранспортных средств.

Для выполнения поставленной цели в работе определены следующие **задачи исследований**:

- провести детальный анализ направлений развития сети автомобильных дорог Республики Казахстан с учетом роста интенсивности движения и нарастающих нагрузок на оси автомобилей, сложных погодноклиматических факторов Республики Казахстан, имеющихся экологических ограничений при расположении дорог в природоохранных зонах, для выявления основных проблем в обеспечении качества при строительстве бетонных дорог;

- выполнить сравнительный анализ существующих технологий строительства цементобетонных покрытий автомобильных дорог и определить перспективные направления их совершенствования;

- исследовать структурно-механические свойства цементобетона в слоях покрытий и установить причины возникновения дефектов для разработки способов направленного технологического воздействия на бетонную смесь при ее укладке в дорожное покрытие;

- разработать механические и химические способы усиления структуры верхних слоев цементобетонных покрытий в процессе строительства для повышения их устойчивости к действию колесной нагрузки и погодноклиматических факторов;

- разработать способы уменьшения эмиссии шума и повышения сцепления на контакте цементобетонного покрытия с колесом автомобиля с целью снижения экологической нагрузки на биологические объекты, расположенные вдоль дорог, и повышения безопасности движения;

- разработать методику оценки устойчивости фактуры покрытия к действию транспортных нагрузок и погодноклиматических факторов при условии обеспечения надежного сцепления с колесами для удержания автомобилей на проезжей части;

- выполнить опытно-технологические работы по освоению новых технических и технологических решений;

- усовершенствовать систему экологической оценки и контроля показателей безопасности проезда по бетонным дорогам, в том числе расположенным в районе жилых зон и природоохранных объектов;

- провести экономическую и экологическую оценку результатов исследований;

– разработать нормативно-правовую базу для строительства бетонных дорог с показателями свойств, превышающими традиционный уровень качества.

Научная новизна

Научная новизна результатов исследований заключается в следующем:

1. Разработана теоретическая основа упрочнения структуры цементобетона в верхнем слое дорожного покрытия путем его механического уплотнения в процессе схватывания цемента, заключающаяся в создании давления под уплотняющим катком, превышающего структурную прочность затвердевающего цементного теста.

2. На основе анализа процесса контракции бетона предложен способ введения в него химической уплотняющей добавки за счет ее диффузии в неуплотненный слой с последующей кольматацией пор и упрочнения структуры бетона в процессе твердения.

3. Решена проблема снижения эмиссии шума в зоне контакта колеса с дорогой путем рассеивания звуковых волн на развитой фактуре покрытия, представленной в виде полусфер установленного диаметра.

4. Предложены технологии виброуплотнения бетонного покрытия с учетом отражения виброволн от упругого основания и вибропогружения армирующих дюбелей с надежной фиксацией их в проектном положении, что обеспечивает повышение производительности и качества строительства бетонных дорог.

5. Разработана методика оценки структурной однородности покрытия по его толщине путем послойного сканирования пористости и определения водопоглощения, позволяющая установить эффективность уплотнения по всей толщине покрытия.

6. На основе проведенных опытно-технологических работ, диагностики дорожных цементобетонных конструкций, результатов мониторинга эксплуатирующихся дорожных покрытий под воздействием транспортной нагрузки, установлены:

– закономерности изменения шероховатости и коэффициентов сцепления на улучшенных цементобетонных покрытиях под интенсивной транспортной нагрузкой, позволяющие определить ресурс их работоспособности;

– закономерности эмиссии и распространения шума от транспортного потока, проходящего по цементобетонным покрытиям с различной текстурой поверхности, что позволяет определить ширину санитарно-защитных зон вдоль дорог.

7. Предложена система диагностики бетонных покрытий, включающая определение технических и экологических параметров, позволяющая оценить качество строительства улучшенных цементобетонных покрытий автомобильных дорог.

Положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие положения:

– концепция направленного регулирования структурообразования цементобетона путем виброуплотнения в оптимальном режиме всего слоя покрытия, прикатки или химической пропитки верхнего слоя с одновременным рифлением его поверхности, что обеспечивает устойчивость покрытия к действию транспортных нагрузок и погодно-климатических факторов, с одновременным снижением шумового воздействия от движущегося транспорта на окружающую среду и увеличением сцепления с колесами по условиям безопасности движения;

– установленные закономерности виброуплотнения бетонных смесей специально подобранных и укладываемых в дорожное покрытие и разработанная на их основе технология формирования слоя цементобетонного покрытия, учитывающая отражение виброволн от основания дорожной одежды, что позволяет на 12 %–14 % повысить темпы строительства;

– установленные закономерности дополнительного уплотнения верхнего слоя цементобетонных покрытий путем прикатки при давлениях, превышающих противодействие сжатию структуры схватывающегося цементного теста, или пропитки уплотняющим составом с учетом контракции цементного камня и формирующейся при этом пористости в верхнем слое покрытия, использование которых обеспечивает снижение в 1,6–2,0 раза истираемости бетонного покрытия под воздействием колес автотранспорта;

– разработанная методика определения структурной однородности покрытия на основе послойного сканирования кернов и определения водопоглощения, позволяющая проводить анализ порового пространства по глубине слоя и оценивать его однородность с целью обеспечения оптимального режима уплотнения;

– установленные закономерности эмиссии и рассеивания звуковых волн в зоне контакта колеса автомобиля с цементобетонным покрытием в зависимости от его фактуры и разработанным на этой основе способе снижения в 2,0–2,5 раза шумовой нагрузки от движения транспортного потока;

– методика оценки способности дорожных покрытий отражать и рассеивать звуковые волны, возникающие на их контакте с колесами транспортных средств, что позволяет устанавливать ширину санитарно-защитной зоны вдоль дорог для достижения требуемого ограничения по максимальному уровню шума – не более 50 дБ;

– рекомендации по оценке фактуры поверхности цементобетонных покрытий для обеспечения безопасности движения по условиям устойчивого сцепления с колесами автотранспортных средств, позволяющие предотвратить увод автомобилей с проезжей части при высоких скоростях движения;

– программное обеспечение для расчета контракционных пор в слое бетона, подлежащего доуплотнению, и объема пропиточного состава, необходимого для кольматации открытых капилляров в верхнем слое покрытия;

– технические, экономические и экологические параметры улучшенных цементобетонных покрытий, позволяющие проводить их диагностику и оценку качества.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации

Сформированные выводы и предложенные решения, полученные при выполнении работы, являются самостоятельным результатом исследований автора. Постановка проблемы, формулировка задач, поиск теоретических закономерностей и выполнение экспериментальных измерений, научные и практические рекомендации, конечные результаты исследований осуществлены автором лично. Определение направлений исследований и согласование алгоритмов решения поставленных задач проводились при участии научного консультанта.

В публикации в соавторстве с П. В. Корниенко личный вклад соискателя состоит в организации использования самоуплотняющихся бетонных смесей с применением эффективных гиперпластификаторов на основе поликарбоксилатов с учетом изменения тепловыделения цемента при его гидратации; в публикации в соавторстве с Г. Г. Измаиловой – в теоретическом обосновании и практической реализации подходов к комплексной оценке качества портландцементов, включая разработку алгоритма интерпретации физико-механических и химико-минералогических характеристик, направленных на повышение эксплуатационной надежности цементобетонных покрытий автомобильных дорог; в публикации в соавторстве с Д. А. Аспанбетовым – в разработке экспериментальной методики оценки распределения воздушных пустот в бетонных дорожных покрытиях с применением цифровой микроскопии, формулировании рекомендаций по оптимизации технологических параметров укладки для повышения прочности, акустических свойств и долговечности цементобетонных покрытий, а также проведена адаптация дисконтной модели и расчетных параметров сценариев воспроизводства дорожной инфраструктуры Казахстана; в публикации в соавторстве с Т. А. Чистовой – заключается в теоретическом обосновании и экспериментальной проверке технологии активации минеральных заполнителей для верхнего слоя бетонных покрытий с целью повышения прочности и долговечности цементобетона; в публикации в соавторстве с В. В. Бабицким – организации экспериментальных исходных данных для разработки и математическом обосновании модели структурообразования цементного камня в поверхностном слое бетонного покрытия с учетом процессов гидратации, водоцементного отношения, температуры и водоотделения; в публикации в соавторстве с Kwangdon Kim – в постановке научной задачи, связанной с адаптацией методов укладки цементобетонного покрытия к климатическим условиям

Южного Казахстана, в разработке и проведении натуральных и лабораторных экспериментов по определению оптимального времени распиловки швов и режима укрытия плит полиэтиленовой пленкой, а также в систематизации факторов, влияющих на температурный и прочностной режим твердения цементобетона.

По другим соавторам в числе опубликованных трудов решались вопросы технического характера, включающие вопросы подготовки материалов для испытаний, построения графиков по результатам испытаний, перевода научных трудов и др.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на:

– международной научно-практической конференции «Строительство, архитектура, дизайн: интеграционные процессы в современных условиях» (г. Алматы, Республика Казахстан, КазГАСА, 29–30 ноября 2012 г.);

– международном конгрессе ФГБОУ ВПО «СибАДИ» «Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации» (г. Омск, Российская Федерация, «СибАДИ», 1–3 октября 2013 г.);

– на международных научных конференциях: «Инновации в дорожном строительстве» (г. Минск, Республика Беларусь, 27–28 ноября, 2016 г.); «Автомобильные дороги в условиях гор и жаркого климата» (г. Баку, Республика Азербайджан, 11 мая, 2018 г.); «Цементобетонные покрытия дорог. Состояние проблемы и перспективы» (г. Минск, Республика Беларусь, 29 мая 2018 г.); «Инновационные подходы в дорожном строительстве: перспективы и развитие» (г. Нур-Султан, Республика Казахстан, 28–29 ноября, 2019 г.); «Автомобильные дороги и транспортная техника: проблемы и перспективы развития» (г. Алматы, Республика Казахстан, 19 декабря, 2019 г.).

Практическое применение результатов диссертации было реализовано: при строительстве автомобильной дороги М-14 «Вторая кольцевая дорога вокруг г. Минска», при устройстве взлетно-посадочной полосы международного аэропорта г. Минска; при реконструкции участка автомобильной дороги с цементобетонным покрытием «Нур-Султан – Павлодар»; при устройстве взлетно-посадочной полосы Международного аэропорта г. Одесса; при строительстве автомобильных дорог с цементобетонными покрытиями в Республике Казахстан.

Опубликование результатов диссертации. По теме диссертационной работы опубликовано 25 научных работ. Результаты исследований представлены в 1 монографии, 21 статье (5,8 а. л.), напечатанных в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК Республики Беларусь, Республики Казахстан и Российской Федерации для опубликования результатов диссертационных исследований, 2 заявках на изобретения: Патент KZ 35080, Патент KZ 35074, 1 свидетельство о регистрации компьютерной программы, а также 8 нормативно-технических документах.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает в себя: введение, семь глав основного текста с изложением результатов исследований, заключение, список использованных источников и приложения. Общий объем диссертации 291 страницы, в том числе 207 страниц основного текста, 122 рисунка, 47 таблиц и 15 приложений. Библиографический список включает 333 наименования, из которых 43 авторские работы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении представлено обоснование актуальности темы диссертационного исследования, отмечена новизна и практическая ценность работы.

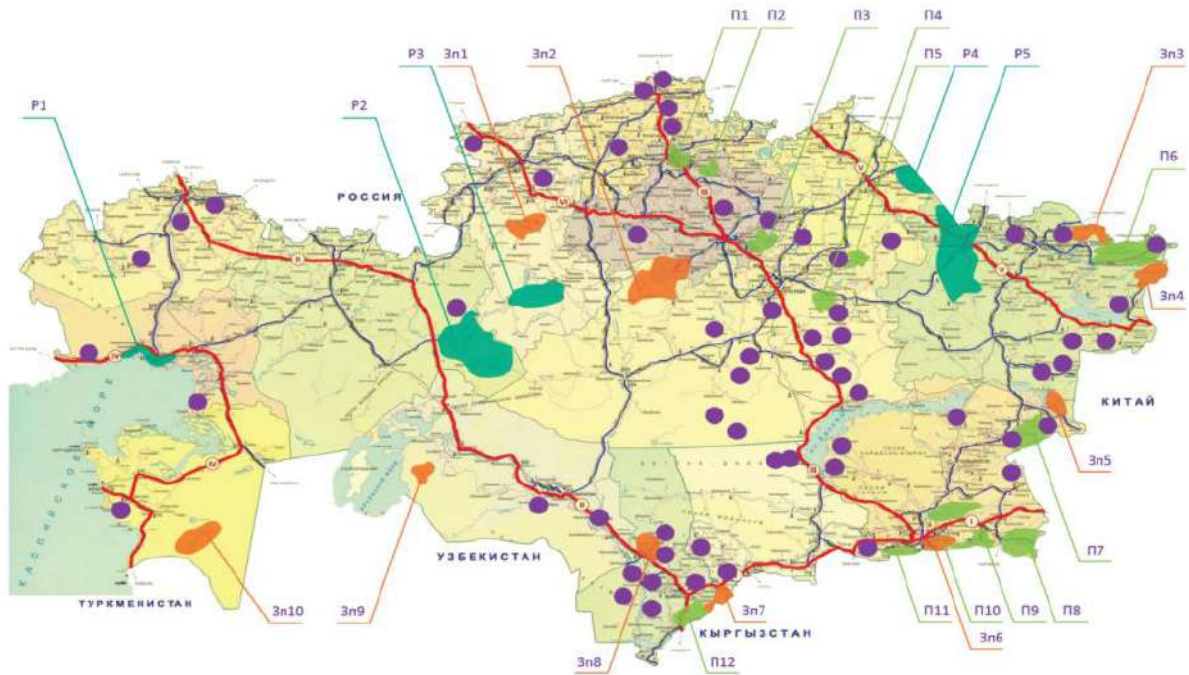
В первой главе диссертации представлены особенности развития сети автомобильных дорог в Республике Казахстан с учетом увеличения интенсивности движения и нарастания нагрузок, наличия природоохранных зон и селитебных территорий.

Отмечено, что в Казахстане за последние 10 лет доля автотранспорта в объеме грузооборота увеличилась с 16 % до 32 % и эта тенденция сохраняется. Протяженность автомобильных дорог Казахстана составляет 128,3 тыс. км, причем 8,3 тыс. км входит в состав международных транспортных коридоров, на которых резко возросли интенсивность движения и осевые нагрузки. В связи с этим введен норматив расчета дорожных одежд под нагрузку 13 т на ось автомобиля и начато активное строительство бетонных покрытий дорог.

Учитывая большую площадь природоохранных зон (рисунок 1) и селитебных территорий вдоль автомобильных дорог, снижение шума от проезда транспорта по бетонным дорогам является актуальной задачей.

Проблемами бетонных дорог и материалов для их строительства занимались и продолжают работать ученые многих стран: Б. С. Радовский, М. Я. Бикбау, В. Н. Яромко, В. В. Ушаков, С. В. Шестоперов, М. Я. Якобсон, В. П. Носов, И. М. Грушко, В. Б. Ратинов, Л. А. Феднер, А. М. Шейнин, О. Т. Батраков, Чан Туан Ми, В. Ф. Коровяков, М. Айерс, М. Я. Вореина, А. Е. Захезин и др. Эти исследователи отмечают перспективность строительства бетонных дорог с учетом роста транспортной нагрузки и выявляют ряд нерешенных проблем, в частности:

- неоднородность по толщине слоя покрытия, получаемого при традиционной технологии укладки стандартных дорожных цементобетонных смесей;
- концентрация дефектов покрытия в зоне деформационных швов;
- низкая устойчивость верхнего слоя покрытия к действию противогололедных материалов, попеременному замораживанию-оттаиванию и истирающему действию колес транспортных средств;
- недостаточная удерживающая способность на проезжей части автотранспортных средств, движущихся с высокими скоростями;
- высокий уровень шума вблизи бетонных дорог.



Зп1 – Зп10 – заповедники; П1 – П12 – национальные природные парки; Р1 – Р5 – резерваты
Рисунок 1 – Карта природоохранных зон Республики Казахстан

Попытки решения этих задач имели локальный характер. Так, в отдельных случаях отмечается использование сборных железобетонных покрытий дорог из предварительно напряженных плит. Но данная технология сложна в применении и не избавляет от проблем в надежной стыковке отдельных блоков и защите арматуры от солевой коррозии при эксплуатации дорог. Непрерывно армированные цементобетонные покрытия имеют дефекты в местах перенапряжения бетона в момент прохода тяжелых транспортных средств. Применение фибробетона со стальными элементами сопровождается нанесением вреда шинам, а замена их на фибру из стекловолокна связана с ее коррозией в щелочной среде бетона.

Таким образом, мировая тенденция строительства бетонных дорог в настоящее время основана на традиционном применении укладки и уплотнении бетонных смесей в скользящей опалубке, погружением арматурных дюбелей в зоне швов для стыковки плит. Усовершенствование этой технологии требует комплексного подхода к подбору бетонной смеси, ее виброуплотнению, устройству деформационных швов, обеспечению требуемой устойчивости верхнего слоя покрытия к непосредственному контакту с колесами автотранспортных средств и агрессивной окружающей средой, созданию такой фактуры поверхности, которая обеспечивала бы снижение звуковой эмиссии при проезде автомобилей и хорошее сцепление с их колесами.

Диагностирование указанных свойств цементобетонных покрытий требует применения специфических методик, обзор которых показывает, что в настоящее время необходимо применять комплексное обследование и интегральные характеристики для оценки их качества.

Во второй главе изложены теоретические основы строительства улучшенных цементобетонных покрытий с усиленным верхним слоем и пониженной эмиссией шума.

Усиление структуры бетона возможно только на основе учета происходящих физико-химических процессов, главными из которых являются уплотнение бетонной смеси и гидратация цемента.

Теоретические исследования (И. Н. Ахвердов, Э. И. Батяновский, В. В. Бабицкий и др.) показывают, что в вязкопластичной бетонной смеси зерна заполнителя разделены прослойкой цементного теста, которое препятствует их перемещению, поэтому они находятся во взвешенном состоянии. Для того, чтобы расположение зерен заполнителя в пространстве было более компактным, необходимо нарушить или разрушить структурные связи в затвердевавшем цементном тесте. При относительно большом количестве воды в смеси ($X = (В/Ц)_T / K_{н.г} > 1$, где $(В/Ц)_T$ – водоцементное отношение в цементном тесте, $K_{н.г}$ – консистенция нормальной густоты) связи разрушаются при сравнительно низких частотах колебаний, а возникающие деформации в цементном тесте обеспечивают тиксотропное разжижение и способствуют перегруппировке и компактной упаковке зерен заполнителя в смеси. В этом случае условия необходимые для проявления тиксотропии цементного теста, совпадают с условиями, при которых достигается компактная упаковка зерен заполнителя.

Наибольшей эффективностью отличается вибрационное воздействие на вязкопластичную систему, при котором проявляется эффект резонанса, то есть наблюдается совпадение частот вибрации с частотой собственных колебаний твердофазных частиц. Для проявления эффекта резонанса в цементном тесте (усредненный размер зерен 20–30 мкм) требуется высокая частота при малой амплитуде колебаний. Резонансные явления применительно к заполнителям проявляются при воздействии низкочастотными, но с большой амплитудой колебаниями. Поэтому определить параметры эффективного виброуплотнения является одной из ключевых задач технологии укладки бетона в покрытие.

Согласно данным И. Н. Ахвердова, чем меньше жидкой фазы в цементном тесте и больше угол внутреннего трения, тем больше коэффициент затухания β_z , а, следовательно, и сложнее уплотнить смесь. Введение дополнительного количества воды при уплотнении дорожного покрытия отжимается вверх, поскольку обычно снизу устраивается водонепроницаемый слой из асфальтобетона или гидроизолирующей подгрунтовки. В связи с этим верхний слой бетона после твердения и высыхания оказывается более пористым.

В процессе воздействия на бетонную смесь виброволн какой-либо одной частоты одновременно возникают (в частности, за счет колебаний зерен заполнителя) колебания более высоких тонов. Особенно это ощутимо при вибровоздействиях высоких частот, в том числе с $\omega_B = 150–200$ Гц, способствующих пол-

ному разрушению структурных связей в цементном тесте. Следовательно, для инициирования тиксотропии цементного теста при вибрировании бетонной смеси достаточно возбуждать колебания одной высокой частоты, даже при низких значениях $(В/Ц)_г$ проявляются процессы, ведущие к уплотнению смеси.

Следует отметить, что при вибрировании слоя бетонной смеси, укладываемой в дорожное покрытие, наблюдается отражение упругих волн от дорожного основания, которое обычно выполняется в виде укатываемого бетона или асфальтобетона. При падении виброволн на границу раздела укладываемой смеси и затвердевшего основания происходит их частичное отражение, которое определяется коэффициентом отражения. Чем больше разница волновых сопротивлений сред (произведений плотности среды на скорость звука в ней), тем меньше доля прошедшей энергии волн и больше отраженной.

Учитывая отражение виброволн от основания, нами предложена формула для расчета энергии виброуплотнения в верхнем слое покрытия $E_{пов}$:

$$E_{пов} = \frac{E_{виб}\beta}{nH} + K \frac{E_{виб}\beta}{H + (H - nH)}, \quad (1)$$

где $E_{виб}$ – энергия вибрирования в месте установки вибратора, Дж;

β – коэффициент затухания;

n – относительная глубина погружения вибратора в слой бетонной смеси;

H – толщина укладываемого слоя, см;

K – коэффициент отражения виброволн от основания.

Для определения правильной установки вибраторов $E_{пов}$ сравнивается с энергией виброуплотнения на границе с основанием $E_{низ}$:

$$E_{низ} = \frac{E_{виб}\beta}{H - nH} + K \frac{E_{виб}\beta}{H - nH}. \quad (2)$$

Равномерное уплотнение происходит в том случае, если значение $E_{пов}$ близко значению $E_{низ}$.

Если учесть, что свежее укладываемая бетонная смесь имеет достаточно большое количество воды, то виброволны распространяются по жидкой фазе. Плотность воды равна $1,0 \text{ кг/м}^3$, а скорость звука в ней – 1440 м/с . Волновое сопротивление воды таким образом составляет $1440 \text{ кг/м}^2\text{с}$. Плотность бетонного основания в среднем составляет $2,4 \text{ кг/м}^3$, а скорость звука в бетоне равна 4500 м/с . Волновое сопротивление бетона – $10\,800 \text{ кг/м}^2\text{с}$. Коэффициент отражения на границе укладываемого бетона и бетонного основания составит $0,85$. Это означает, что около 85% энергии виброволн будет отражаться от основания, при этом изменяется их угол распространения в среде укладываемой бетонной смеси. В этом случае в нижней зоне покрытия наблюдается избыточный расход энергии на уплотнение, не дающий значимого положительного эффекта.

Экспериментальные исследования, выполненные Н. В. Студеничником, по определению коэффициента отражения виброволн с частотой 100 Гц (близкой к оптимальной для уплотнения бетона) показали, что измеренный коэффициент отражения на границе водной среды и уплотненного грунта (близкого по модулю упругости к дорожному основанию) колеблется в пределах 0,6–0,8. В связи с этим в расчеты работы вибраторов предлагается вводить коэффициент 0,75 для определения глубины их погружения (0,75 Н/2). Расчет по приведенным формулам показывает, что это решение позволяет обеспечить требуемое уплотнение верхнего слоя и повысить производительность бетоноукладчика.

Уплотненная бетонная смесь при твердении меняет свой объем и плотность, что вызывает изменения в структуре бетона, особенно верхнего слоя. В частности, гидратация цемента и контракция цементного камня способствуют оттоку из него избыточной влаги и образованию открытых пор. Нами была выполнена оценка этого процесса.

Для количественной оценки гидратационных процессов предложена система формул, связывающих относительную степень гидратации цемента ($\alpha_{\text{отн}}$) с рядом факторов, учитывающих вид, активность и минералогический состав цемента, вид и количество введенных в бетонную смесь химических добавок, технологические особенности бетона, температурно-влажностные условия твердения бетона и др.:

$$\alpha_{\text{отн}} = \frac{1 - \frac{C_3S}{100} \cdot e^{-\beta_1 \cdot \tau \cdot K_\phi} - \left(1 - \frac{C_3S}{100}\right) \cdot e^{-\beta_2 \cdot \tau \cdot K_\phi}}{1 - \frac{C_3S}{100} \cdot e^{-\beta_1 \cdot 28 \cdot K_\phi} - \left(1 - \frac{C_3S}{100}\right) \cdot e^{-\beta_2 \cdot 28 \cdot K_\phi}}, \text{ доли ед.}, \quad (3)$$

$$K_\phi = k_t \cdot k_\phi \cdot k_w \cdot k_m \cdot k_s \cdot k_{SO_3} \cdot k_{du} \cdot k_{dp}, \quad (4)$$

где C_3S – содержание алита в цементе, %;

τ – время твердения, сут;

β_1 – уравнивающий коэффициент, зависящий от вида цемента;

β_2 – коэффициент, зависящий от содержания минерала C_3A в цементе;

k_t – коэффициент, зависящий от температуры твердения цементного камня (бетона);

k_ϕ – коэффициент, зависящий от влажностных условий твердения цементного камня (бетона);

k_w – коэффициент, зависящий от начального водосодержания цементного теста;

k_m – коэффициент, зависящий от активности применяемого цемента;

k_s – коэффициент, зависящий от тонкости помола цемента;

k_{SO_3} – коэффициент, зависящий от содержания гипса в цементе;

k_{du} – коэффициент, зависящий от вида и количества добавки-ускорителя;

k_{dp} – коэффициент, зависящий от вида и количества пластифицирующей добавки.

Применительно к портландцементу активностью 50 МПа, получена зависимость степени гидратации цемента от водоцементного отношения в цементном тесте в пределах от 0,2 до 0,6 (рисунок 2).

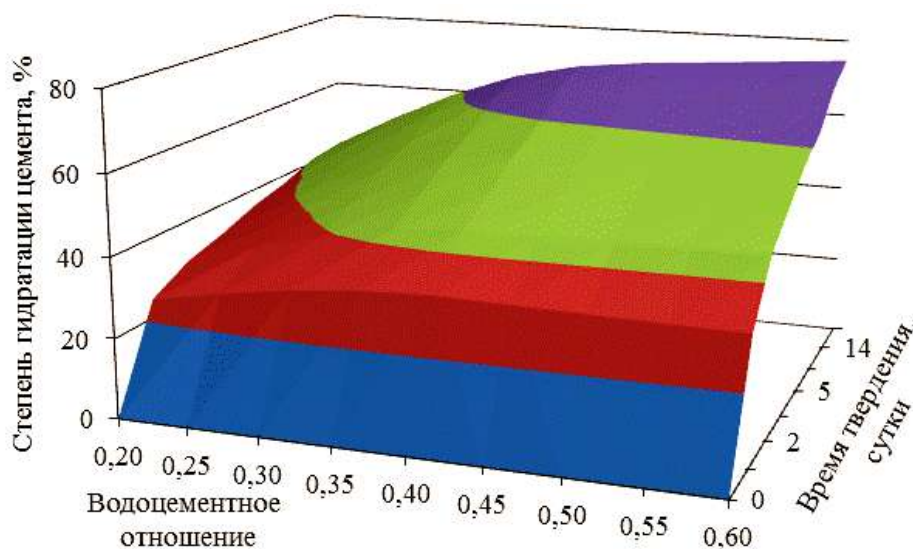


Рисунок 2 – Зависимость степени гидратации цемента от водоцементного отношения цементного теста

Анализируя приведенные на рисунке 2 данные, нетрудно убедиться в том, что принятые в бетоноведении представления о том, что степень гидратации цемента в бетоне около 70 %, далеки от реальности. Особенно это касается бетонных смесей с низким водоцементным отношением, традиционно применяемых в дорожном строительстве.

Зная же изменение степени гидратации цемента во времени, можно прогнозировать и величину контракции. Так, рассматривая кинетику изменения контракции для цемента плотностью 3150 кг/м^3 с учетом плотности продуктов гидратации, равной 2450 кг/м^3 (по Т. Пауэрсу), получаем следующие зависимости (рисунок 3).

Полученный контракционный объем создает дополнительную пористость особенно в верхней части слоя цементобетонного покрытия, поскольку вода, необходимая для гидратации, уходит вглубь. Образующийся объем пор можно заполнять специальными уплотняющими пропитками. Наши расчеты позволили определить глубину проникания жидкой пропитки в результате контракции и для выполнения расчетов нами создана специальная компьютерная программа SUB «Повышение долговечности цементобетонного дорожного покрытия», зарегистрированная в установленном порядке (БНТУ Свидетельство о регистрации №016 от 15.10.2020).

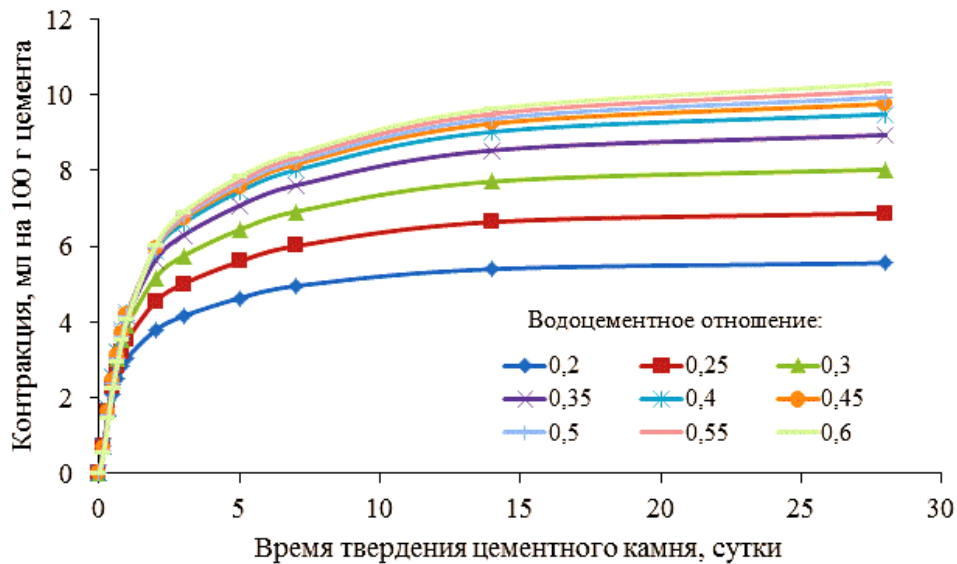


Рисунок 3 – Зависимость контракции цемента от водоцементного отношения цементного теста

Вторым вариантом доуплотнения верхнего слоя может служить прикатка под таким давлением, когда цементное тесто не проявляет обратимых тиксотропных свойств. По данным И. Н. Ахвердова, давление на цементное тесто должно превышать 0,065 МПа.

Проблемным вопросом является контакт движущейся автомобильной покрышки и покрытия, в котором возникает целый спектр звуковых волн. Знание механизма их эмиссии и распространения позволяет снизить степень отрицательного воздействия шума на окружающую среду.

Шина и дорога работают как рупор, усиливая звук от источника, расположенного в основании, и поднимая его на высоту 30–40 см. В случае идеально гладкой поверхности дороги происходит зеркальное отражение звуковых волн, в этом случае волны синфазны и угол отражения равен углу падения Θ_i . Согласно А. Исимару, если поверхность шероховатая, то звуковые колебания перестают быть синфазными. В этом случае для описания поверхностей с малыми неровностями пригоден метод малых возмущений, согласно которому рассеяние на участке шероховатой поверхности $\Delta S = L^2$ (рисунок 4) можно представить в виде двойного ряда Фурье по X и Y с периодом разложения L .

В этом случае принимают за основной критерий рассеяния высоту неровностей поверхности, измеренную в длинах волн $\mathcal{E} = \frac{\partial \xi}{\partial x}$ или $\mathcal{E} = \frac{\partial \xi}{\partial y}$ в зависимости от направления рассеяния, где ξ – высота от усредненной неровности покрытия.

Таким образом, управляя высотой неровностей, производя направленное рифление поверхности покрытия, можно регулировать степень рассеивания звуковой волны.

Согласно современным данным, наиболее опасный для слуха высокочастотный шум от контакта движущихся колес с дорожным покрытием находится

в диапазоне частот более 12500 Гц, а длина звуковых волн в этом диапазоне составляет 0,027–0,017 м. Учитывая это, неровности на покрытии должны иметь выступы размером 1,7–2,7 см, а наиболее перспективной для увеличения отражения звука является фактура поверхности в виде полусфер, поскольку в каждой их точке углы отражения отличаются.

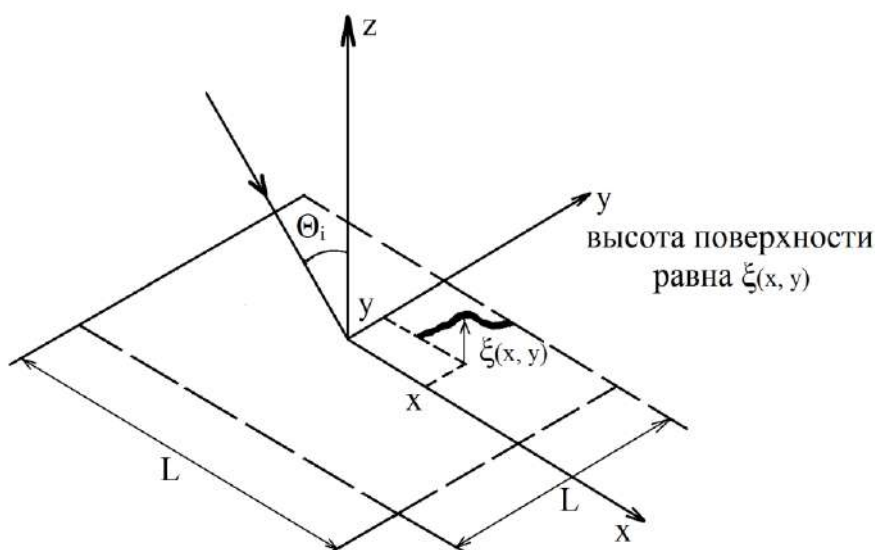


Рисунок 4 – Рассеяние волн на шероховатой площадке

Но, создавая искусственные неровности на покрытии, необходимо обеспечивать надежное сцепление рифленой поверхности с колесами транспортных средств. Если макрошероховатые выступы имеют сечение в виде полукруга, то качение колеса происходит наиболее плавно. При этом сопротивление движению снижается, а для достижения требуемого коэффициента сцепления в этом случае большую роль начинает играть микрошероховатость на самих выступах. В работах М. В. Немчинова установлена важная роль микрошероховатости, которая имеет хорошую корреляционную связь с коэффициентом сцепления.

При определении коэффициентов сцепления (φ) А. И. Шутовым и А. Н. Котуховым было установлено, что увеличение скорости от 20 до 100 км/ч требует увеличения макрошероховатости с 0,6 до 1,5 мм, определенной по методу «песчаное пятно». Поскольку современные транспортные средства движутся со скоростью более 100 км/ч, нами было предложено макрошероховатость выполнять в виде полусфер с Δ более 1,8 мм, на поверхности которых сохраняется микрошероховатость за счет выступающего мелкого заполнителя.

Расчеты, выполненные С. А. Феватовым, показывают, что для надежной устойчивости грузового автомобиля на проезжей части боковой коэффициент сцепления в некоторых случаях (при разном давлении в задних колесах грузового автомобиля) должен быть больше продольного коэффициента сцепления и превышать значение 0,6. Поэтому при выборе фактуры поверхности дорожного покрытия необходимо учитывать это обстоятельство.

На основании проведенного теоретического анализа была сформулирована следующая рабочая гипотеза: использование направленного регулирования структурообразования цементобетона путем виброуплотнения в оптимальном режиме всего слоя покрытия, прикатки или химической пропитки его верхнего слоя с одновременным рифлением его поверхности можно обеспечить устойчивость покрытия к действию транспортных нагрузок и погодно-климатических факторов, с одновременным снижением шумового воздействия от движущегося транспорта на окружающую среду и увеличением сцепления покрытия с колесами по условиям безопасности движения.

В третьей главе представлены объекты и методы исследования.

Объектами исследования являются технологические процессы, связанные со всем комплексом строительства цементобетонных покрытий автомобильных дорог, начиная от производства бетонной смеси, заканчивая устройством деформационных швов и отделкой поверхности уложенного покрытия. Отдельно рассмотрены материалы для производства бетонных смесей в Республике Казахстан.

Было установлено, что технологические процессы требуют своего совершенствования в части повышения качества бетонных смесей и оперативного контроля состава исходных материалов и их свойств; виброуплотнения и прикатки слоя покрытия; нанесения требуемой фактуры поверхности и устройства деформационных швов, надежно передающих нагрузки от плиты к плите; ухода за уложенным бетоном с целью укрепления верхнего слоя покрытия в процессе контракции цементного камня. Названные мероприятия позволяют получить улучшенные дорожные покрытия, способные воспринимать интенсивные транспортные нагрузки; действие погодно-климатических факторов, характерных для Казахстана; снижать шумовое воздействие на окружающую среду и обеспечивать безопасность движения на высоких скоростях.

Наряду со стандартными методами оценки свойств материалов и дорожных конструкций, использовали ряд оригинальных методов. Так, для определения состава цемента применялся метод рентгенофлюоресцентного анализа на спектрометре «VENUS-200», позволяющий выявить содержание основных клинкеробразующих минералов и сравнить их с установленными дополнительными требованиями.

Для оценки структуры бетона по глубине слоя использовали метод анализа цифровых изображений поверхности кернов, полученных с помощью электронного микроскопа Hitachi S – 2460N с 40-кратным увеличением. Это позволило обнаруживать особенности структуры бетона, начиная с 10–15 микрон.

Шероховатость поверхности бетонного покрытия изучали, используя лазерный метод измерения профиля поверхности с помощью прибора ИДР-2. Пересчет полученных значений на стандартный показатель, измеряемый методом «песчаное пятно», выполнялся с точностью 0,1 мм.

Испытания покрытий для оценки их ровности и сцепления с колесами автотранспортных средств проводили с помощью передвижной лаборатории, оборудованной измерительными комплексами «Профилограф» и «ПКРС-2у», аккредитованной в соответствии с требованиями СТБ ИСО/МЭК 17025.

Изучались относительные уровни звукового давления N_{kdB} после отражения звуковых стандартных третьоктавных частот от рифленой поверхности образца (рисунок 5). Эти значения фиксировались при помощи спектроанализатора при отражении сигнала розового шума, характерного для транспортных средств. В нашем случае высота расположения высокочастотного громкоговорителя h над уровнем исследуемой поверхности составляла 30 см, что близко к расположению точки максимального звучания при проезде автомобиля.

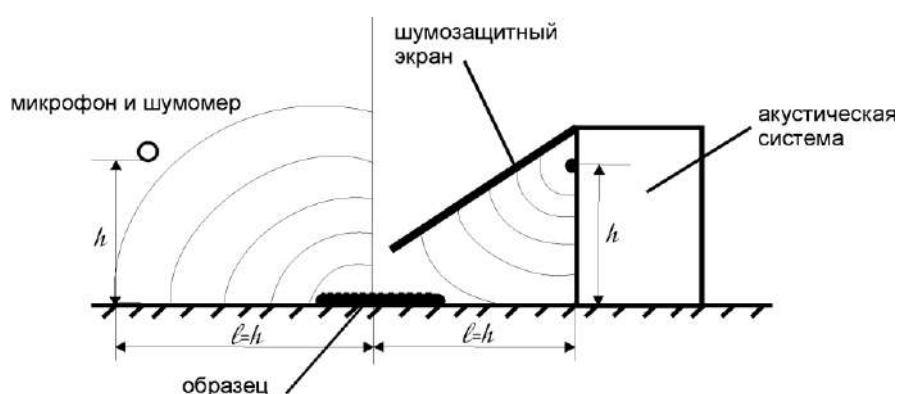


Рисунок 5 – Схема измерений звука, отраженного от шероховатой поверхности

Поскольку спектральные характеристики содержат значения в относительной цифровой шкале $dBFS$, то за предполагаемый цифровой ноль принимали уровень звукового давления 95 dB, что примерно соответствует уровню автомобильного шума непосредственно у источника – рядом с колесом.

Для определения величины относительного звукового давления N_k в процентах рассчитывали значение звукового давления волн, отраженных от рифленого образца, и сравнивали его со значением от гладкой бетонной поверхности.

Эксплуатационные характеристики покрытия оценивались путем определения эффективности передачи нагрузки через поперечные швы между плитами. Испытания проводились с помощью дефлектометра Dynatest FWD Model 8000.

Комплексная оценка качества бетонных дорог выполнялась с помощью передвижной диагностической лаборатории с фотофиксацией дефектов, определением коэффициентов сцепления и лазерной фиксацией профиля покрытия.

В четвертой главе содержатся результаты экспериментальных исследований.

Первостепенную роль в формировании структуры цементного бетона играет минералогический состав цемента, который согласно положению, сформулированному С. В. Шестоперовым, должен характеризоваться высоким содержанием трехкальциевого силиката ($C_3S \geq 55\%$) с ограниченным содержанием

трехкальциевого алюмината ($C_3A \leq 8\%$, а для особо высокой морозостойкости – менее $4\%–6\%$). Причина этого ограничения в том, что кристаллогидраты, образующиеся в результате реакций C_3A с водой, содержат до 6 и более ее молекул, при этом структура этих новообразований в цементном камне более пористая, чем из кристаллогидратов других клинкерных минералов. В этой связи при устройстве дорожных покрытий быстрая оценка минералогического состава применяемого цемента очень важна.

В связи с этим нами были проведены испытания экспресс-методом на приборе «VENUS-200» 72 проб портландцемента марок ПЦ 500-Д0-Н; ПЦ 400-Д0-Н от 6 заводов-производителей. Из всех проб 14 показали отрицательные результаты. В таблице 1 приведены экспериментально установленные средние данные о химическом составе проб цемента и рассчитанных на этой основе значениях коэффициента насыщения (KH), силикатного модуля (n) и глиноземного модуля (p).

Таблица 1 – Данные о химическом составе проб цемента (соотношении оксидов)

| Средний фактический химический состав проб цемента, % | | | | KH, доли ед. | n, доли ед. | p, доли ед. |
|---|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|----------------|----------------|
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | | | |
| А. Для проб цемента, прочностные характеристики которого соответствуют нормативным требованиям: | | | | | | |
| 21,5 | 4,5 | 3,9 | 64,0 | 0,92 | 2,56 | 1,15 |
| Б. Для проб, не соответствующих нормативным требованиям по прочностным характеристикам: | | | | | | |
| 17,6 | 3,2 | 5,8 | 59,6 | 1,1 | 1,95 | 0,55 |

Для цементов, не обеспечивших прочностные характеристики требуемого уровня, средние данные по содержанию оксидов не удовлетворяют дополнительным требованиям (таблица 2), связывающим химический состав цемента с его минералогическим составом, предопределяющим темп твердения, рост и уровень прочности образцов.

Таблица 2 – Дополнительные требования к показателям оксидов при определении химических составов цементов

| Наименование оксида | Средний фактический результат для «несоответствующих» проб, % | Требуемый показатель, % |
|---|---|-------------------------|
| Оксид кремния SiO ₂ | 17,6 | 21–24 |
| Оксид алюминия Al ₂ O ₃ | 3,2 | 4–8 |
| Оксид железа Fe ₂ O ₃ | 5,8 | 2–4 |
| Оксид кальция CaO | 59,6 | 63–76 |

Это несоответствие связано с недостаточным содержанием C_3S в вяжущих с пониженными прочностными свойствами и суммы $C_3S + C_3A$, которая предопределяет темп твердения и кинетику роста прочности цементного бетона. Данные исследования позволили ужесточить требования к цементам в составе дорожных бетонов в разработанном нами нормативном документе.

Были проведены исследования направленные на выявление зависимости прочности, истираемости и морозостойкости дорожного бетона от особенностей его состава (таблица 3): вида использованного крупного заполнителя – традиционного и кубовидного щебня; обогащения мелкого заполнителя гранитным отсевом; использования пластифицирующей и воздухововлекающей добавок, а также введения в состав активного оксида кремния (SiO_2) – в виде аморфного микрокремнезема (МК).

Таблица 3 – Составы бетонных смесей

| Номер состава | Содержание материалов в 1 м ³ , кг | | | | | | | | | Средняя плотность бетонной смеси, кг/м ³ |
|---------------|---|----------------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|------|-----------------------------|-------------------------|---|
| | Цемент | Микрокремнезем | Щебень традиционный | Щебень кубовидный | Песок природный | Гранитный отсев | Вода | Химические добавки, % от МЦ | | |
| | | | | | | | | Пластификатор JP-700HQ | Воздухововлекающая А-30 | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 (кон.) | 410 | - | 1100 | - | 710 | - | 225 | 1,2 | - | 2350 |
| 2 | 410 | - | 1100 | - | 710 | - | 159 | 1,2 | 0,12 | 2460 |
| 3 | 410 | - | - | 1100 | 710 | - | 159 | 1,2 | 0,12 | 2460 |
| 4 | 410 | - | 1100 | - | 426 | 284 | 159 | 1,2 | 0,12 | 2420 |
| 5 | 410 | - | - | 1100 | 426 | 284 | 159 | 1,2 | 0,12 | 2420 |
| 6 | 410 | 20,5 | 1100 | - | 710 | - | 159 | 1,2 | 0,12 | 2440 |
| 7 | 410 | 41 | 1100 | - | 710 | - | 159 | 1,2 | 0,12 | 2440 |

Наиболее ярко особенности составов бетонов проявились при их испытаниях на морозостойкость по третьему методу согласно ГОСТ 10060.

Так, наибольшие потери массы образцов бетона на традиционном щебне состава № 1 ($\Delta_m = 1,37$ %) соответствуют почти 4 %-ному (3,76 %) снижению прочности. Резкое уменьшение потерь массы образцов бетона на таких же материалах, но со сниженным водоцементным отношением и с дополнительной поризацией замкнутой пористостью (за счет введения комплекса из пластификатора и воздухововлекающей добавки) состава № 2 ($\Delta_m = 0,27$ %) отмечается незначительным

(~0,57 %) снижением прочности на сжатие относительно прочности контрольных образцов. Очевидно, что это связано, с одной стороны, с повышением плотности, непроницаемости и прочности структуры цементного камня, а с другой, с компрессионным эффектом замкнутой искусственно образованной пористости в нем.

Также очевиден эффект от введения в состав бетона добавки микрокремнезема, проявившийся в снижении потерь массы (составы № 6 и 7) в сравнении с аналогичным по исходным материалам составом № 2 и в еще большей степени с контрольным (без добавок) составом № 1. Очевидно, что это следствие уплотнения зон контакта цементного камня с поверхностью заполнителя и роста непроницаемости бетона для испытательного водного солевого раствора.

Введение отсева в качественный крупнозернистый песок нецелесообразно, что подтвердили результаты наших экспериментов. Использование в бетоне кубовидного щебня (составы № 3 и 5) не выявило существенных преимуществ.

Важным показателем для дорожного бетона является его истираемость, которую определяли с использованием сухого абразива на круге истирания ЛКИ-3. При испытании использовали стандартные образцы бетона и образцы с поверхностью, доуплотненной во время схватывания цемента (через 3,5 часа после затворения) нагрузкой 0,08 МПа и пропиткой специальным предложенным нами защитным составом в виде 10 %-ного водного раствора смеси сульфата натрия и технической соды (карбоната калия) в соотношении 1 : 2,5 по массе с расходом 0,25 кг на м². После нанесения пропитки начинается интенсивное образование кристаллогидратов, формирующих гель, который захватывает в свои ячейки большое количество жидкой фазы и, вследствие этого, вызывает быстрое схватывание и последующее интенсивное упрочнение цементного камня. Карбонат калия участвует в реакции карбонизации с гидроксидом кальция, что способствует уплотнению и упрочнению пропитанного слоя бетона. Результаты испытаний приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Показатели истираемости бетона

| Номер состава бетонной смеси по таблице 5 | Характеристика поверхности истирания образцов и показатель истираемости бетона, г/см ² | | |
|---|---|-------------------------|-------------------------|
| | исходная | доуплотненная прикаткой | доуплотненная пропиткой |
| 1 | 0,30 | 0,10 | 0,14 |
| 2 | 0,30 | 0,18 | 0,16 |
| 3 | 0,30 | 0,18 | 0,15 |
| 4 | 0,30 | 0,18 | 0,15 |
| 5 | 0,30 | 0,19 | 0,14 |
| 6 | 0,25 | 0,13 | 0,11 |
| 7 | 0,15 | 0,08 | 0,10 |

Из приведенных в таблице 4 данных следует, что в первом случае поверхность упрочняется за счет обжатия капилляров и вытеснения воздуха при прикатке, во втором – за счет кольтматации пор химическими соединениями.

Для анализа эффективности виброуплотнения изучалась равномерность структуры бетона по глубине дорожного покрытия. Были просканированы керны, отобранные на участках, где укладка выполнялась с использованием различных вибраторов на укладочных комплексах фирмы Gomaco, движущихся с различными скоростями.

Анализ цифровых изображений позволил рассчитать эквивалентные диаметры воздушных пор и общее содержание воздуха по глубине уложенного слоя бетона. На графике (рисунок 6) показано содержание воздуха и размеры закрытых воздушных пустот в зависимости от скорости укладки.

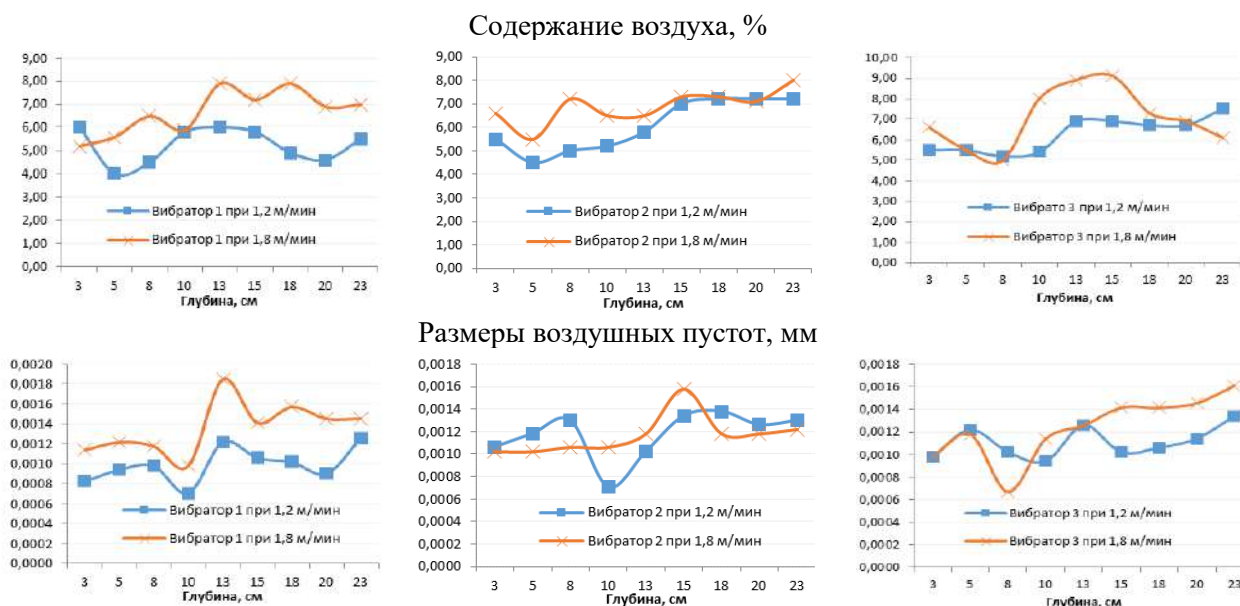


Рисунок 6 – Содержание воздуха и размеры воздушных пустот в зависимости от скорости движения укладчика

Представленные данные свидетельствуют о том, что наблюдается снижение содержания замкнутых воздушных пустот на 2 %–4 % в верхней части образцов (на глубине до 3 см), т. е. пузырьки воздуха выходят на поверхность с образованием открытых капилляров. Послойный анализ структуры бетонных покрытий показывает, что верхняя часть отобранных кернов имеет разрыхленное состояние на глубину до 3 см. Поэтому предложенные технологические решения по доуплотнению или пропитке уплотняющим составом этого слоя видятся обоснованными.

Если учесть, что рассчитанное нами давление под иглой прибора Вика в момент схватывания цементного теста составляет 0,316 МПа, то доуплотнение тонкого верхнего слоя в период до наступления схватывания предложено осуществлять с минимальной нагрузкой, близкой 0,065 МПа.

Для оптимизации процесса доуплотнения верхнего слоя были проведены эксперименты по определению водопоглощения в верхнем слое толщиной 3 см и по изучению истираемости образцов бетона после приложения нагрузки 0,05–0,09 МПа на стандартно уплотненную бетонную смесь через 2,5–4,5 часа после ее затворения. Испытания проводили при 20 °С. Полученные результаты были обработаны с использованием программного комплекса Matlab (рисунок 7).

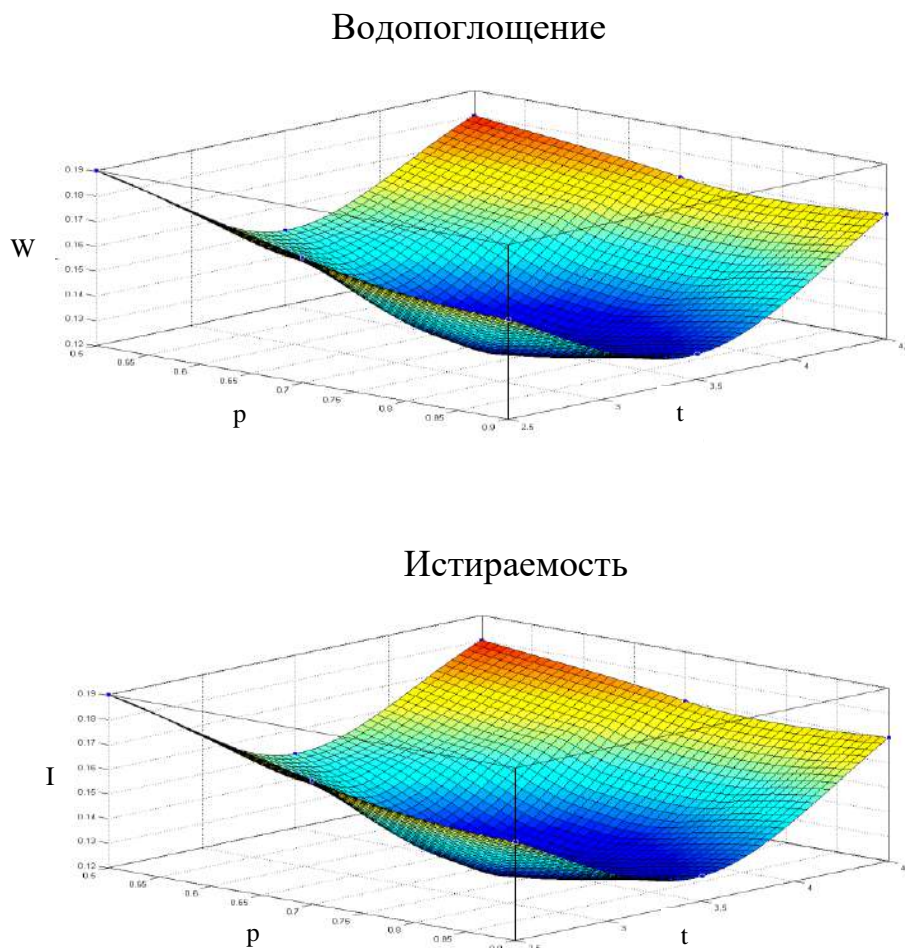


Рисунок 7 – Зависимости водопоглощения (w) верхнего слоя бетона толщиной 3 см и истираемости (I) от давления (p) при доуплотнении и времени (t) после затворения бетонной смеси

На графиках виден четко выраженный экстремум, что позволяет сделать вывод о достижении максимальной устойчивости к истиранию и наименьшего водопоглощения при приложении нагрузки 0,070–0,075 МПа через 3,2–3,7 часа после затворения. Таким образом, были установлены технологические режимы прикатки бетонного покрытия после его укладки.

Доуплотнение верхнего слоя бетона можно обеспечить и с помощью химической обработки специальными пропитками. Согласно расчетам, глубина пропитки в результате контракции цемента составляет 7,0–9,0 мм. При этом

происходит кольматация пор в верхнем слое бетона. Измерения скорости прохождения ультразвука прибором ИК 1404 в верхнем слое бетона после 28 суток твердения на образцах с пропитанной поверхностью составил в среднем 4950 м/с, а на образцах без пропитки 4100 м/с. Это свидетельствует о соответствующем увеличении плотности верхнего слоя бетона и его упругости в среднем в 1,2 раза.

Наблюдения за эксплуатацией бетонных дорог и анализ кернов, взятых из цементобетонного покрытия, показал, что на стыках плит имеются дефекты в виде нарушения структуры бетона и трещин (рисунок 8). Это связано с несовершенством технологии погружения дюбелей, соединяющих плиты покрытия.



Рисунок 8 – Дефект в бетоне, возникающий при погружении металлических дюбелей (трещина над погруженной арматурой)

Для устранения этих дефектов нами была предложена специальная конструкция вибропогружателей для бетоноукладочного комплекса Gomaco, позволяющая обеспечить виброуплотнение бетонной смеси над дюбелями и их точную установку в проектное положение. Эксперименты с вибропогружением дюбелей подтвердили эффективность данного технического решения.

Для оценки эффективности рассеяния звуковых волн с помощью шероховатой поверхности на дорожном покрытии использовали сравнение звукового давления после отражения шума от поверхности образцов. Наилучшие результаты получены для образца, имеющего выступы в виде полусфер и имитирующие оголенные минеральные частицы на поверхности бетона. На рисунке 9 представлен спектр отражения звуковых волн для этого образца.

На основании этого спектра (таблица 5) был рассчитан общий уровень звукового давления.



Рисунок 9 – Спектр отраженного звука от рифленой поверхности образца

Таблица 5 – Откорректированные уровни звукового давления

| Вид фактуры покрытия | Приведенный уровень звукового давления, дБ, для средних частот, Гц, третьоктавных полос с учетом поправки весового фильтра ΔL_k | | | | | | | | | | | | Вычисленный общий уровень, дБА | |
|----------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------------------------------|-------------|
| | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 | 5000 | 6300 | 8000 | 10 000 | | 12 500 |
| Гладкий бетон | 66,22 | 67,71 | 66,01 | 62,92 | 63,81 | 60,62 | 60,79 | 61,88 | 61,84 | 67,92 | 59,19 | 60,36 | 54,06 | 75,1 |
| Оголенные частицы | 65,40 | 67,54 | 65,50 | 61,97 | 63,76 | 58,17 | 55,64 | 62,69 | 63,09 | 63,83 | 59,85 | 57,24 | 51,19 | 74,1 |

В итоге установили, что на исследованной поверхности падение звукового давления в сравнении с гладким бетоном составляет 12,2 %. Это можно объяснить тем, что поверхность, состоящая из оголенного заполнителя в виде полусфер, максимально отражает волны в различных направлениях, рассеивая их в воздушном пространстве.

Регулирование фактуры поверхности дорожного покрытия позволяет изменить спектр звуковых волн в опасном диапазоне и увеличить их степень рассеивания. Но при этом необходимо учитывать требования сцепления колес с дорогой, поэтому были выполнены выборочные измерения коэффициентов сцепления на участках бетонных покрытий с традиционной фактурой в виде насечек, которые показали, что на покрытии с поперечной насечкой коэффициент

сцепления поперек дороги равен 0,27–0,34, что в 1,4–1,8 раза меньше, чем вдоль дороги. Это может вызвать увод автомобиля с трассы при боковом заносе.

Нанесение шероховатости в виде полусферических неровностей с помощью специального рифленого катка (рисунок 10) устраняет данную проблему.

Аналогичные эффекты достигаются при оголении частиц щебня на поверхности бетона с помощью известной технологии «мытого бетона», но эта технология не устраняет проблему рыхлой структуры верхнего слоя покрытия, имеющей глубину распространения 2–3 см. Поэтому было предложено новое техническое решение по рифлению бетонной поверхности дорожных покрытий с помощью прикатного валика «Способ изготовления шероховатого дорожного покрытия из цементобетона», который запатентован в Республике Казахстан (Патент № 35080).

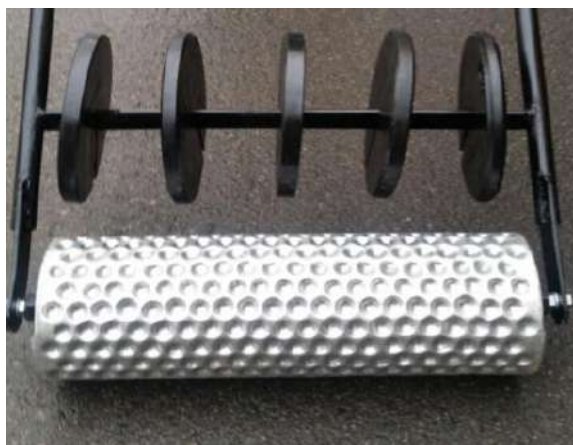


Рисунок 10 – Рифленый каток

Пятая глава посвящена анализу данных по практической апробации новых технологических решений.

Опытно-технологические работы, выполненные во время строительства Второй Минской кольцевой автомобильной дороги и взлетно-посадочной полосы в Национальном аэропорту г. Минска, позволили выбрать оптимальные режимы уплотнения специально подобранных бетонных смесей:

- амплитуда колебаний – 3,20 мм;
- частота колебаний – 7850 кол./мин (130,8 Гц);
- величина кинетической энергии вибратора – 450 Н·см.

При этом эффективный диаметр вибрирования смеси находился в пределах 492–536 мм, что позволяло оптимизировать работу бетоноукладочного комплекса при толщине слоев от 22 до 45 см. Это позволило достичь однородной структуры бетона на всю глубину слоя, за исключением верхней зоны 2–3 см, которая разрыхляется за счет миграции воды после окончания виброформования.

Учитывая то обстоятельство, что под укладываемым слоем находится основание из асфальтобетона, имеющего плотность 2,36–2,40 кг/м³ и отражающе-

го виброволны в бетонную смесь, вибраторы были приподняты над основанием выше их традиционной установки в середине слоя, т. е. погружение их в бетонную смесь составляло $0,75H/2$, где H – толщина укладываемого слоя. Это позволило более эффективно уплотнять смесь за счет приложения основной энергии вибрирования ближе к поверхности слоя и тем самым увеличить производительность бетоноукладочного комплекса в среднем на 12 %–14 %, что отразилось на скорости движения комплекта машин. Этот эффект зафиксирован в акте внедрения разработки.

Для устранения излишней пористости верхнего слоя бетона в покрытии при укладке бетонной смеси на автодороге Кызылорда – Павлодар – Успенка – граница Российской Федерации на 1251 километре выполняли доуплотнение слоя бетона с помощью прикатного валика. Вес валика был рассчитан исходя из условия деформирования цементного теста в период его схватывания.

Поскольку контактное давление σ_k (формула 5) должно превышать сопротивление уплотнению теста $P > 0,065$ МПа, был подобран каток с требуемым контактным давлением.

Что определяется формулой:

$$\sigma_k = \frac{3l_k}{2l_n} \sqrt[3]{\frac{Q_B^2 E_0}{B^2 D h}}. \quad (5)$$

где Q_B – статическая сила воздействия рабочего органа катка на уплотняемый слой, Н;

E_0 – модуль деформации материала, Па;

B – ширина вальца, м;

D – диаметр вальца, м;

h – толщина уплотняемого слоя, м.

l_k – глубина погружения конуса в момент доуплотнения, м;

l_n – глубина погружения конуса в момент схватывания, м.

Для условий начала схватывания цементного теста вес катка составил 30 кг, статическая сила – 294 Н, диаметр вальца – 0,5 м, ширина вальца – 1,0 м. Контактное давление под этим катком при уплотнении верхнего слоя бетона толщиной $H = 3,0$ см составляет 0,073 МПа, что немного превышает требуемое, равное 0,065 МПа. Таким образом обеспечивался необходимый режим доуплотнения верхнего слоя цементобетонного покрытия.

Учитывая то обстоятельство, что уловить момент начала схватывания цементного теста в построчных условиях довольно сложно (из-за перепадов температур, охлаждения при различной скорости ветра и др.), то процесс твердения бетонной смеси контролировали с помощью прибора ПГР для определения гу-

стоты раствора. При изменении уровня погружения конуса менее показателя, характерного для начала схватывания, на прикатный валик устанавливали дополнительный пригруз, пропорциональный снижению глубины погружения конуса.

Устойчивость нанесенной фактуры поверхности к действию колесной нагрузки оценивали по изменению микрошероховатости и коэффициента сцепления на дорожном покрытии в период эксплуатации.

Процесс разрушения верхнего слоя покрытия под проходящим транспортом на обработанном и не обработанном пропиточным составом покрытия фиксировали по полосам наката с помощью прибора ИДР-2. Зафиксирован средний износ шероховатости покрытия за 3 года, равный 0,022 мм на необработанном покрытии и 0,016 мм на обработанном. Таким образом, пропитка снизила темп износа выступов в 1,4 раза. Полученные положительные результаты оформлены как новое техническое решение «Защитная пропитка твердеющего дорожного цементобетона» и запатентованы в Республике Казахстан (Патент № 35074).

Были изучены вопросы распространения и гашения звуковых волн от различных классов автомобилей, проходящих по опытным дорожным покрытиям. Спектры шума снимались на расстоянии 7,5; 60; 120 метров от середины крайней полосы движения. В результате было отмечено, что традиционная фактура «насечки» имеет существенно большую эмиссию звуковых волн перед полусферической – «мытый бетон». Общий уровень звукового давления существенно падает с расстоянием: при удалении на 120 метров для грузовых автомобилей падение составляет около 28 дБА, а для легковых – 24 дБА.

Сочетание таких факторов снижения шума как направленное изменение фактуры поверхности бетона и удаление защищаемых объектов от полос движения позволяет выйти на получение требуемых условий звукового комфорта путем определения минимальных санитарно-защитных зон вдоль дорог, в пределах которых снижается уровень звукового давления до необходимых пределов.

Так на покрытии с фактурой в виде полусфер на расстоянии 200 метров от середины крайней полосы движения достигается комфортный уровень шума, не превышающий максимального уровня в 50 дБА для особо охраняемых природных территорий Казахстана, в то время как на дорогах с «насечкой» этот уровень достигается на расстоянии 250–270 метров.

Исходя из полученных данных, санитарно-защитная зона вдоль бетонных дорог с улучшенным покрытием в особо охраняемых природных территориях должна составлять не менее 200 метров. Для жилой застройки, где требуемый максимальный уровень звукового давления не должен превышать 60 дБА, эта зона должна составлять не менее 120 метров.

По результатам проведенных опытно-технологических работ можно сделать вывод, что предложенные технические решения практически приемлемы

для дорожного строительства и обеспечивают требуемые параметры экологической безопасности.

Шестая глава содержит оценку эксплуатационных параметров покрытий.

Опытные работы по устройству покрытий с нанесением рифления в виде полусфер на дороге в Казахстане показали, что снижение шероховатости в первый год эксплуатации составляла 0,044 мм, что близко к этому показателю для «мытого бетона» – 0,039 мм.

Как было отмечено выше, проблемным вопросом в устройстве цементобетонных покрытий является стыковка плит в швах сжатия. Для обеспечения надежной передачи нагрузок от одной плиты к другой была предложена конструкция вибропогружателей дюбелей в виде вилок с шестью точками их фиксации (рисунок 11). Это обеспечивало точность установки дюбелей в проектное положение. А цилиндрическое сечение держателей вилок, от которых виброволны равномерно распространяются во все стороны, обеспечивало доуплотнение бетонной смеси и предотвратило образование полостей и трещин в рабочей зоне дюбелей.



Рисунок 11 – Вилки для вибропогружения дюбелей

Эффективность передачи нагрузки между плитами увеличивается в среднем на 19 %, что существенно удлиняет срок службы покрытия.

Для количественной оценки экологичности применяемой технологии строительства бетонных дорог с улучшенным покрытием использована методика расчета индекса экологичности и качества (*IEQ*), разработанная в Петербургском университете путей сообщения.

Шумовое воздействие от проходящего транспорта пропорционально снижает экологические параметры, а уменьшение интенсивности и скорости движения понижает эффективность перевозок. Поскольку эти параметры взаимопротивоположны, был найден экстремум обобщенного индекса экологичности и качества (*IEQ*) для традиционной и улучшенной технологии устройства бетонных дорог.

Для дорог с насечками оптимальной является скорость движения 59 км/ч при интенсивности 980 авт./ч. При этом максимальный уровень шума на расстоянии 120 метров от крайней полосы движения на 14 дБА превышает требования для особо охраняемых природных территорий Казахстана. Ограничение скорости движения грузового транспорта на уровне 60 км/ч для международных транспортных коридоров, где устраиваются бетонные покрытия, неприемлемо.

Рифление прикатным валиком (рисунок 12), выполненное из условия обеспечения требуемой шероховатости и низкой шумовой эмиссии, позволило в 1,2–1,3 раза снизить звуковую нагрузку на придорожную полосу.



Рисунок 12 – Рифленое улучшенное цементобетонное покрытие на автодороге Кызылорда – Павлодар – Успенка – граница РФ, км 1251

Индекс экологичности бетонных покрытий при этом повышается до 0,6, а допустимая скорость движения грузового транспорта на дорогах возрастает до 90 км/ч. Таким образом, предложенное техническое решение обеспечило экологические параметры бетонной дороги.

Проведенная работа по диагностике бетонных дорог позволила оценить сохранность достигнутых эффектов под действием интенсивных транспортных нагрузок и погоднo-климатических факторов. В результате установлено, что дополнительное уплотнение прикаткой и обработкой химическими средствами усиливает структуру бетона и обеспечивает увеличение продолжительности сохранения требуемой фактуры поверхности дорожных цементобетонных покрытий в среднем в 1,67 раза.

Седьмая глава содержит экономическую оценку предложенных технологических решений и комплекс технических и технологических документов, в которых изложены практические рекомендации по выполнению работ в производственных условиях и организации экологического мониторинга.

Расчетная экономическая эффективность от эксплуатации улучшенного цементобетонного покрытия на 1 км автомобильной дороги I технической категории за счет оптимизации расходов в период жизненного цикла 30 лет составляет в ценах, приведенных к 2019 году, 211,8 долларов США.

Экономический эффект от улучшения условий движения за счет специальной фактуры покрытия, устроенной с применением прикатного валика, составляет 108 долларов США на 1 км дороги.

Оптимизация виброуплотнения обеспечивает повышение производительности бетоноукладочного комплекса на 12 %–14 %, что позволило получить в процессе строительства эффект в размере 7056 долларов США на каждом километре дороги. С учетом того, что разработанная технология применялась при строительстве 76,6 км полос на дороге М-14 и 29,6 км в аэропорту г. Минска, общий эффект составил 701 тыс. долларов США.

Таким образом, разработанные технические решения для получения улучшенного цементобетонного покрытия автомобильных дорог экономически обоснованы и приносят существенный экономический эффект от их применения.

На основе выполненных исследовательских работ и полученных практических результатов диссертационной работы были разработаны новые нормативные документы, внесены изменения и дополнения в действующие в Республике Казахстан в виде национальных стандартов ведомственных нормативно-технических документов. В разработанных документах заложены основы по проектированию, строительству и эксплуатации улучшенных цементобетонных покрытий. Накопленный опыт реализован при строительстве 1241 км автомобильных дорог республиканского значения на территории Республики Казахстан.

Основными разработанными документами являются: национальный стандарт Республики Казахстан СТ РК 1279, который устанавливает требования к методам определения шероховатости и коэффициента сцепления на покрытиях автомобильных дорог; ведомственные нормативно-технические документы в виде Р РК 218-117, содержащего рекомендации по технологии строительства цементобетонных покрытий; Р РК 218-127, определяющего правила подбора цементобетонной смеси для дорожных покрытий; Р РК 218-137, устанавливающего экологические требования к объектам дорожно-транспортной инфраструктуры; Р РК 218-148, определяющего технико-экономической эффективности и долговечности цементобетонных покрытий; Р РК 218-119, содержащего рекомендации ремонта цементобетонных покрытий; Р РК 218-139, определяющего методологию экономических эффектов; ТК РК 218-126, определяющего организацию производства работ при строительстве цементобетонных покрытий на территории Республики Казахстан.

Созданная нормативно-техническая база позволила наладить широкое внедрение результатов исследований и получить значимый экономический эффект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе в результате обобщения выполненных теоретических и экспериментальных исследований развиты концептуальные основы бетоноведения, заключающиеся в формировании устойчивой структуры бетона за счет эффективного уплотнения цементного теста в процессе его твердения и контракции цементного камня.

Разработана методология технологического воздействия на слой бетонной смеси, уложенной в дорожное покрытие на упругом основании, позволяет учесть отражение виброволн при уплотнении; перераспределение влаги, вводимых добавок и мелкодисперсных частиц; процесс твердения и контракции цементного камня. На этой основе предложены технологические решения по оптимальному вибровоздействию на бетонную смесь, доуплотнению верхнего слоя покрытия дополнительной прикаткой или химической обработкой. В совокупности это позволяет решить задачу получения улучшенного, более устойчивого к действию погодно-климатических факторов и транспортной нагрузки цементобетонного покрытия.

Вторым научным направлением явилось формирование технологических основ обеспечения экологической безопасности вблизи бетонных дорог, базирующихся на теории эмиссии и рассеивания звуковых волн. Это позволило установить технологические параметры отделки поверхности покрытия с целью достижения максимального эффекта рассеивания звуковых волн, доминирующих в диапазоне октавных полос, характерных для транспортного шума.

Основные результаты научных исследований.

1. На основании аналитического информационного анализа показано, что с ростом количества автотранспортных средств и увеличением интенсивности движения на дорогах будут все шире применяться цементобетонные покрытия, способные воспринимать осевые нагрузки более 13 т. Для строительства таких дорог необходимо использовать новые технологические решения, направленные на улучшение качественных показателей и экологических параметров дорожных покрытий [1-А ; 3-А ; 14-А ; 18-А – 22-А ; 25-А; 26-А ; 28-А ; 30-А; 31-А].

2. Наличие на территории Казахстана особо охраняемых природных образований, площадь которых составляет 8,2 % территории страны и по которым проходит более 1000 км автодорог, диктует необходимость обеспечения звукового комфорта в пределах 35 дБА для эквивалентного и 50 дБА для максимального уровня звука. Характерная для Казахстана урбанизация населения с локализацией расселения вдоль автомобильных дорог вносит дополнительные ограничения по шумовой нагрузке от автотрасс [1-А ; 3-А ; 5-А – 8-А ; 11-А ; 15-А ; 29-А].

3. Обзор методов диагностики дорог позволил установить, что для оценки качества цементобетонных дорожных покрытий необходимо проводить комплексные исследования главным образом неразрушающими методами, направленными на определение степени однородности слоя покрытия по всей толщине, его прочности и коррозионной стойкости. Особое внимание следует уделять верхнему слою, где имеются проблемы с формированием плотной структуры бетона вследствие несовершенства технологии укладки и уплотнения бетонной смеси [1–А ; 8–А ; 21–А ; 24–А].

4. На основе усовершенствованных положений теории бетоноведения предложены технологические режимы укладки и уплотнения бетонной смеси в слое дорожного покрытия, учитывающие отражение виброволн от основания и параметры деформации цементного теста при дополнительной прикатке. Это позволило выбрать оптимальные частоты виброуплотнения в пределах 7000–8000 колебаний в минуту и глубину погружения вибраторов на $0,75 H/2$, где H – толщина уплотняемого слоя, и что обеспечило повышение производительности бетоноукладочного комплекса на 12 %–14 %. Дополнительную прикатку верхнего слоя покрытия предложено выполнять катком с давлением под вальцом в пределах 0,7–0,8 МПа в момент начала схватывания цементного теста, что обеспечивает отжатие жидкости и газа и сближение частиц твердой фазы бетонной смеси, формирование прочной и устойчивой структуры цементобетона. В случае необходимости прикатку предложено заменять пропиткой специально разработанным уплотняющим составом, включающим сульфат натрия и карбонат калия и проникающим в поры бетона в процессе контракции цементного камня [1–А ; 10–А ; 12–А ; 16–А ; 37–А ; 39–А].

5. Установлено, что оптимизация фактуры поверхности на цементобетонных покрытиях автомобильных дорог должна быть направлена на достижение максимального рассеивания звуковых волн и обеспечение сцепления с колесами автотранспортных средств за счет макрошероховатых выступов с микрошероховатостью на их поверхности. На основании теории распространения и рассеивания звуковых волн и с учетом расчетных показателей сцепления была предложена фактура поверхности в виде полусфер диаметром 10–15 мм, соответствующих макрошероховатости более 1,8 мм по методу «песчаное пятно», и имеющих на своей поверхности микрошероховатость в виде выступающих мелких частиц заполнителя, обеспечивающая снижение эмиссии шума на 1–5 дБ и повышение коэффициента сцепления поперек движения до уровня 0,6, что предотвращает увод автомобилей с проезжей части при боковом заносе [3–А ; 5–А ; 7–А ; 11–А ; 12–А ; 15–А ; 23–А ; 24–А ; 27–А].

6. Для предупреждения образования дефектов в зоне стыковки бетонных плит разработана технология вибропогружения металлических дюбелей без нарушения структуры бетона над ними и с установкой их в строгом геометриче-

ском положении, исключая их заклинку при температурных деформациях покрытий. Предложена специальная конструкция вибропогружателей для бетоноукладочного комплекса, обеспечившая повышение эффективности передачи нагрузки между плитами в среднем на 19 % [1–А ; 12–А ; 14–А ; 20–А ; 33–А].

7. Опытно-технологические работы по устройству покрытия с пониженной эмиссией шума выявили перспективность получения фактуры поверхности в виде полусфер, аналогичной «мытому бетону». Спектральный анализ звуковых волн, проведенный на разной удаленности от середины крайней полосы движения транспорта, показал, что падение звукового давления на расстоянии 120 м составляет 24–29 дБА. Это позволило рассчитать ширину санитарно-защитной зоны для дорог с цементобетонным покрытием, которая составляет 200 метров для особо охраняемых территорий Казахстана и 120 м – для жилой застройки [5–А ; 6–А ; 7–А ; 8–А ; 11–А ; 15–А].

8. Мониторинг улучшенных цементобетонных покрытий под интенсивной транспортной нагрузкой показал, что доуплотненный верхний слой бетона имеет прочность и упругость в 1,2 раза выше, чем при отсутствии прикатки. Это позволило снизить темп его износа в среднем в 1,4 раза [2–А ; 4–А ; 9–А ; 10–А ; 12–А ; 13–А ; 17–А ; 33–А ; 34–А ; 35–А].

9. Проведение внедренческих работ на объектах строительства в Казахстане, Беларуси и Украине позволило выявить практическую приемлемость предложенных технологических решений по строительству улучшенных цементобетонных покрытий, обладающих низкой истираемостью и коррозионной устойчивостью, свойствами пониженного шумовыделения и хорошего сцепления с колесами автомобилей.

Суммарный экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы в процессе строительства бетонных дорог превышает 713 тыс. долларов США [16–А ; 18–А ; 38–А ; 39–А].

10. Для массового применения предложенных технологических решений и обеспечения экологической безопасности бетонных дорог разработан ряд нормативно-технических документов, утвержденных к использованию на территории Казахстана и Беларуси и позволяющих практически реализовать основные результаты диссертационных исследований [32–А – 42–А].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монографии

1–А. Саканов, Д. К. Эколого-технологические проблемы строительства автомобильных дорог с цементобетонными покрытиями / Д. К. Саканов. – М. : МПК, 2019. – 144 с.

Статьи в научных журналах, включенных в перечень ВАК

2–А. Саканов, Д. К. Возможности изменения свойств цементного камня и бетона в современных условиях / Д. К. Саканов, К. Т. Саканов, П. В. Корниенко // Вестник КазГАСА. – 2014. – № 1 (51). – С. 99–106.

3–А. Саканов, Д. К. Проблемы строительства бетонных дорог на особо охраняемых природных территориях Казахстана / Д. К. Саканов // Автомобильные дороги и мосты. – 2016. – № 2 (18). – С. 7–10.

4–А. Саканов, Д. К. Мониторинг качества цементов для дорожного строительства в Республике Казахстан / Д. К. Саканов, В. Н. Ларина, Н. М. Борщова // Автомобильные дороги и мосты. – 2017. – № 2 (20). – С. 60–65.

5–А. Саканов, Д. К. Исследование и оценка шумового воздействия от автомобильного транспорта на придорожные территории / Д. К. Саканов // Автомобильные дороги и мосты. – 2017. – № 2 (20). – С. 72–77.

6–А. Саканов, Д. К. Снижение шума автотранспортных средств на пути его распространения / Д. К. Саканов // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева. – 2017. – № 4 (103). – С. 55–62.

7–А. Саканов, Д. К. Обеспечение безопасных акустических экологических параметров вблизи бетонных дорог / Д. К. Саканов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. – 2017. – № 4 (51). – С. 115–120.

8–А. Зеленые принципы устойчивого развития дорожно-транспортной инфраструктуры / Д. К. Саканов, Д. А. Аспанбетов, Е. К. Айдарбеков, Г. Б. Умарова // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева. – 2018. – № 2 (105). – С. 33–37.

9–А. Саканов, Д. К. Анализ результатов мониторинга цементов, применяемых при строительстве цементобетонных покрытий за 2013–2015 годы / Д. К. Саканов, Г. Г. Измаилова, В. Н. Ларина // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева. – 2018. – № 2 (105). – С. 219–226.

10–А. Саканов, Д. К. Свойства цементного бетона в зависимости от особенностей его состава / Д. К. Саканов // Автомобильные дороги и мосты. – 2018. – № 1 (21). – С. 64–73.

11–А. Саканов, Д. К. Снижение шума за пределами цементобетонных автомобильных дорог / Д. К. Саканов // Автомобильные дороги и мосты. – 2018. – № 1 (21). – С. 85–92.

12–А. Саканов, Д. К. Прочностные характеристики цементобетонного покрытия в процессе укладки / Д. К. Саканов, Д. А. Аспанбетов // Вестник Павлодарского государственного университета. – № 3. – Павлодар, 2018. – С. 302–312.

13–А. Саканов, Д. К. Эффективные заполнители для верхнего слоя бетонных покрытий / Д. К. Саканов, Т. А. Чистова // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС ; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2016. – Вып. 8. – С. 213–224.

14–А. Саканов, Д. К. Опыт строительства автомобильных дорог с цементобетонным покрытием в Республике Казахстан / Д. К. Саканов, К. Т. Саканов // Вестник Павлодарского государственного университета. – 2018. – № 3. – С. 313–320.

15–А. Саканов, Д. К. Система мониторинга дорожного шума / Д. К. Саканов // Автомобильные дороги и мосты. – 2019. – № 1 (23). – С. 44–48.

16–А. Саканов, Д. К. Экономическая эффективность применения технического решения «Прикатный валик» / Д. К. Саканов, Д. А. Аспанбетов // Автомобильные дороги и мосты. – 2019. – № 1 (23). – С. 84–92.

17–А. Саканов, Д. К. Структурные преобразования в поверхностном слое цементобетонного дорожного покрытия / Д. К. Саканов, В. В. Бабицкий // Автомобильные дороги и мосты. – 2019. – № 1 (23). – С. 49–55.

18–А. Саканов, Д. К. Экономическая эффективность улучшенных цементобетонных покрытий / Д. К. Саканов, Д. А. Аспанбетов // Вестник Павлодарского государственного университета. – 2019. – № 4. – С. 375–385.

19–А. Sakanov, D. K. Features of the road construction development in the Republic of Kazakhstan / D. K. Sakanov // Дороги і мости : зб. наук. пр. / редкол.: А. О. Безуглий [та інш.]. – Київ, 2020. – Вип. 21. – С. 130–137.

20–А. Sakanov, D. K. Experience of constructing the roads with cement concrete coatings / D. K. Sakanov // Дороги і мости : зб. наук. пр. / редкол.: А. О. Безуглий [та інш.]. – Київ, 2020. – Вип. 21. – С. 138–145.

21–А. Саканов, Д. К. Методы оценки качества цементобетонных покрытий / Д. К. Саканов // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2020. – № 2. – С. 168–177.

22–А. Sakanov, D. Behavioral Characteristics of Cement Concrete Pavements in South Kazakhstan: Climatic Changes and Optimal Construction Method / D. Sakanov, Kwangdon Kim, Z. Saginov, S. Mominova, Zh. Ussenkulov // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 2. – С. 142–149.

Статьи в научных рецензируемых журналах, не включенных в перечень ВАК

23–А. Саканов, Д. К. Особенности строительства бетонных дорог в особо охраняемых природных территориях Д. К. Саканов // Дороги Содружества независимых государств. – 2016. – № 7 (54). – С. 100–103.

24–А. Саканов, Д. К. Сцепление колеса с покрытием дорог (с использованием современной лаборатории) / Д. К. Саканов // Дороги Содружества независимых государств. – 2017. – № 2 (57). – С. 90–91.

Статьи в сборниках научных трудов и материалах конференций

25–А. Саканов, Д. К. Модифицированные бетоны на основе современных пластифицирующих добавок / Д. К. Саканов, К. Т. Саканов, С. Т. Акимбекова, Е. М. Жаншуков, Ж. К. Орынтаев // Строительство, архитектура, дизайн: интеграционные процессы в современных условиях : материалы V междунар. науч.-практ. конф., Алматы, 29–30 нояб. 2012 г. : в 2 т. / Казахская головная архитектурно-строит. акад. – Алматы, 2012. – Т. I : Строительство. – С. 422–425.

26–А. Саканов, Д. К. Современные автомагистрали Казахстана, обеспечивающие (транзитный поток) межконтинентальные перевозки / Д. К. Саканов, К. Т. Саканов, Ж. К. Орынтаев // Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации : материалы Междунар. конгр., Омск, 1–3 окт. 2013 г. : в 3 кн. / редкол.: В. Ю. Кирничный [и др.]. – Омск, 2013. – Кн. 3. – С. 16–21.

Тезисы докладов конференций

27–А. Саканов, Д. К. Диагностика показателей сцепления колеса с дорожным покрытием с использованием современной передвижной лаборатории / Д. К. Саканов // Инновации в дорожном строительстве : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 дек. 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2016. – С. 55–59.

28–А. Саканов, Д. К. Автомобильные дороги с цементобетонным покрытием: опыт строительства в Казахстане / Д. К. Саканов // Автомобильные дороги в условиях гор и жаркого климата : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Баку, 11 мая 2018 г. – Баку, 2018. – С. 78–83.

29–А. Саканов, Д. К. Эколого-технологические особенности дорожных бетонных покрытий с применением техногенных отходов промышленности / Д. К. Саканов // Цементобетонные покрытия дорог. Состояние проблемы и перспективы : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 29 мая 2018 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2018. – С. 67–71.

30–А. Саканов, Д. К. Опыт строительства и эксплуатации автомобильных дорог с цементобетонными покрытиями в Казахстане // Инновационные

подходы в дорожном строительстве: перспективы и развитие : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Нур-Султан, 28–29 нояб. 2019 г. – Нур-Султан, 2019. – С. 93–97.

31–А. Саканов, Д. К. Некоторые общие проблемы строительства дорог с цементобетонным покрытием в странах СНГ / Д. К. Саканов, Б.Б. Каримов // Автомобильные дороги и транспортная техника: проблемы и перспективы развития : материалы Восьмой междунар. науч.-практ. конф., Алматы 19 дек. 2019 г. / Казахский автомобильно-дорож. ин-т – Алматы, 2019. – С. 182–187.

Нормативно-методические документы

32–А. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы определения шероховатости дорожного покрытия и коэффициента сцепления колеса автомобиля с дорожным покрытием : СТ РК 1279-2013. – Взамен СТ РК 1279-2004 ; введ. 12.12.2013. – Астана : Госстандарт, 2014. – Ш, 16 с.

33–А. Рекомендации по технологии строительства цементобетонных покрытий с учетом климатических условий Казахстана : Р РК 218-117-2014. – Введ. 25.11.2014, № 13. – Астана : КаздорНИИ, 2015. – 160 с.

34–А. Рекомендации по рациональным составам для цементобетонных покрытий автомобильных дорог с учетом климатических условий Казахстана: Р РК 218-127-2016. – Введ. 26.02.2016. – Астана : КаздорНИИ, 2016. – 36 с.

35–А. Рекомендации «Цементы для цементобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог» : Р РК 218-148-2018. – Введ. 21.12.2018. – Астана : КаздорНИИ, 2018. – 38 с.

36–А. Рекомендации «Зеленые принципы устойчивого развития дорожно-транспортной инфраструктуры» : Р РК 218-137-2017. – Введ. 26.12.2017. – Астана : КаздорНИИ, 2017. – 69 с.

37–А. Рекомендации по ремонту и содержанию цементобетонных покрытий автомобильных дорог : Р РК 218-119-2014. – Введ. 25.11.2014. – Астана : КаздорНИИ, 2014. – 122 с.

38–А. Рекомендации по расчету экономических эффектов от строительства, реконструкции, ремонта и содержания автомобильных дорог на макро- и микроэкономическом уровне : Р РК 218-139-2017. – Введ. 26.12.2017. – Астана : КаздорНИИ, 2017. – 56 с.

39–А. Технологическая карта на устройство цементобетонного покрытия шириной 13 м и толщиной 27 см с использованием комплекта машин Wirtgen SP 1600, Wirtgen TCM 1800 : ТК РК 218-126-2016. – Введ. 17.02.2016. – Астана : КаздорНИИ, 2016. – 33 с.

Изобретения, патенты, свидетельства

40–А. Патент KZ 35080, МПК E01C 7/12 (2006.01). Способ изготовления шероховатого дорожного покрытия из цементобетона : № 2020/0270.1 : заявл. 28.04.2020 : опубл. 21.05.2021 / Саканов Д.К. Заявитель Саканов Д. К. – 4 с.

41–А. Патент KZ 35074, МПК C04B 41/50 (2006.01). Защитная пропитка твердеющего дорожного цементобетона: № 2020/0271.1 : заявл. 28.04.2020 : опубл. 21.05.2021 / Саканов Д. К. Заявитель Саканов Д. К. – 3 с.

42–А. Компьютерная программа SUB : свидетельство о регистрации № 016 / Д. К. Саканов, В. В. Бабицкий. – Опубл. 15.10.2020. Правообладатель Белорусский национальный технический университет.

РЭЗІЮМЭ

Саканаў Дархан Куандыкавіч

Эколага-тэхналагічныя асновы будаўніцтва палепшаных цэментабетонных пакрыццяў аўтамабільных дарог

Ключавыя словы: цэментобетоннае дарожнае пакрыццё, тэхналогія будаўніцтва, структура цэментобетона, ўшчыльненне, эмісія і распаўсюджванне шуму, каэфіцыент счэплення, дыягностыка дарожных пакрыццяў.

Аб'ект даследаванняў – тэхналагічныя працэсы, якія звязаны з усім комплексам будаўніцтва бетонных пакрыццяў аўтамабільных дарог і ўключаюць працэсы атрымання бетоннай сумесі, яе ўкладкі і ўшчыльнення, забеспячэння цвярдзення бетону, фарміравання фактуры на паверхні пакрыцця і ўстройвання ў ім дэфармацыйных швоў.

Мэта працы – распрацоўка навукова абгрунтаванай тэхналогіі ўстройвання палепшаных цэментабетонных дарожных пакрыццяў, якія валодаюць павышанай устойлівасцю да ўздзеяння інтэнсіўных транспартных нагрузак і пагодна-кліматычных фактараў, характэрных для Рэспублікі Казахстан, паніжанай эмісіяй шуму пры руху аўтамабіляў і высокай ступенню счэплення з коламі аўтатранспартных сродкаў.

Створана тэарэтычная аснова ўмацавання структуры бетону ў верхнім пласце дарожнага пакрыцця шляхам яго механічнага ўшчыльнення ў працэсе завяршэння схоплівання цэменту або ўвядзення ўшчыльнялай дабаўкі за кошт яе дыфузіі ў працэсе кантракцыі цэментавага каменя. На падставе гэтага распрацаваны новыя спосабы ўмацавання верхняга слоя цэментабетонных дарожных пакрыццяў.

Вырашана праблема зніжэння эмісіі шуму ў зоне кантакту кола з дарогай шляхам расейвання гукавых хваль на развітой тэкстуры пакрыцця, прадстаўленай у выглядзе паўсфер устаноўленага дыяметра.

Прапанаваны тэхналогіі вібраўшчыльнення бетоннага пакрыцця, якая выкарыстоўвае адбіццё вібрахвалёў ад пругкай асновы, і вібраапускання арміруючых дзюбеляў з надзейнай фіксацыяй іх у праектным становішчы, якая ўлічвае ўласцівасці бетонных сумесяў.

Распрацавана методика ацэнкі структурнай аднастайнасці пакрыцця па яго таўшчыні шляхам паслойнага сканавання порыстасці і вызначэння водапаглынання, якая дазваляе ацаніць эфектыўнасць ўшчыльнення.

Прапанавана сістэма дыягностыкі бетонных пакрыццяў, якая ўключае тэхнічныя і экалагічныя параметры, заснаваная на сучасным абсталяванні хадавых лабараторый, якая дазваляе ацаніць якасць будаўніцтва палепшаных цэментабетонных пакрыццяў аўтадарог.

Вынікі даследаванняў укаранены на аб'ектах будаўніцтва ў Казахстане, Беларусі і Украіне. Створана нарматыўная база для будаўніцтва палепшаных цэментабетонных пакрыццяў, якая ўключае 8 дакументаў.

РЕЗЮМЕ

Саканов Дархан Куандыкович

Эколого-технологические основы строительства улучшенных цементобетонных покрытий автомобильных дорог

Ключевые слова: цементобетонное дорожное покрытие, технология строительства, структура цементобетона, уплотнение, эмиссия и распространение шума, коэффициент сцепления, диагностика дорожных покрытий.

Объект исследований – технологические процессы, связанные со всем комплексом строительства бетонных покрытий автомобильных дорог и включающие процессы получения бетонной смеси, ее укладки и уплотнения, обеспечения твердения бетона, формирования фактуры на поверхности покрытия и устройства в нем деформационных швов.

Цель работы – разработка научно обоснованной технологии устройства улучшенных цементобетонных дорожных покрытий, обладающих повышенной устойчивостью к воздействию интенсивных транспортных нагрузок и погодноклиматических факторов, характерных для Республики Казахстан, пониженной эмиссией шума при движении автомобилей и высокой степенью сцепления с колесами автотранспортных средств.

Создана теоретическая основа упрочнения структуры бетона в верхнем слое дорожного покрытия путем его механического уплотнения в процессе завершения схватывания цемента или введения уплотняющей добавки за счет ее диффузии в процессе контракции цементного камня. На основании этого разработаны новые способы упрочнения верхнего слоя цементобетонных дорожных покрытий.

Решена проблема снижения эмиссии шума в зоне контакта колеса с дорогой путем рассеивания звуковых волн на развитой текстуре покрытия, представленной в виде полусфер установленного диаметра.

Предложены технологии виброуплотнения бетонного покрытия, использующая отражение виброволн от упругого основания, и вибропогружения армирующих дюбелей с надежной фиксацией их в проектном положении, учитывающая свойства бетонных смесей.

Разработана методика оценки структурной однородности покрытия по его толщине путем послойного сканирования пористости и определения водопоглощения, позволяющая оценить эффективность уплотнения.

Предложена система диагностики бетонных покрытий, включающая технические и экологические параметры, основанная на современном оборудовании ходовых лабораторий, позволяющая оценить качество строительства улучшенных цементобетонных покрытий автодорог.

Результаты исследований внедрены на объектах строительства в Казахстане, Беларуси и Украине. Создана нормативная база для строительства улучшенных цементобетонных покрытий, включающая 8 документов.

SUMMARY**Sakanov Darkhan Kuandykovich****Ecological and technological bases of construction
of improved cement concrete road pavements**

Keywords: cement concrete road pavement, construction technology, cement concrete structure, compaction, noise emission and distribution, adhesion coefficient, diagnostics of road pavements.

The subject of research is technological processes related to the entire complex of construction of concrete road pavements and including the processes of production of concrete mixture, laying it and compacting it, ensuring concrete hardening, forming a texture on the surface of the pavement and arranging expansion joints in it.

The objective of research – the development of scientifically based technology for improved cement concrete road pavements with high resistance to heavy traffic loads and climatic factors typical for the Republic of Kazakhstan, and reduced noise emission and a high degree of adhesion.

A theoretical basis for concrete structure strengthening in the upper layer of the road pavement by mechanical compaction in the process of completion of cement setting or the adding of a compacting additive due to its diffusion during the contraction of cement stone has been developed. Based on this, new methods for strengthening the top layer of cement concrete road pavements have been developed.

The problem of reducing noise emission in the contact zone of the wheel with the road by scattering acoustic waves on the developed surface texture, represented as hemispheres of a set diameter, is solved.

The technologies of concrete pavement vibration compaction using reflection of vibration waves from an elastic base, and vibration loading of reinforcing dowels with their reliable fixation in the design position, taking into account the properties of concrete mixtures, are offered.

A method for evaluating the structural uniformity of the pavement by its thickness by layer-by-layer scanning of porosity and determining water absorption, allowing to evaluate the effectiveness of compaction, has been developed.

The system of diagnostics of concrete pavements including technical and ecological parameters, based on the modern equipment of running laboratories, allowing to estimate quality of construction of the improved cement concrete pavements of highways is offered.

The research results were implemented at construction sites in Kazakhstan, Belarus and Ukraine. A regulatory framework for the construction of improved cement concrete pavements including 8 documents has been created.



Научное издание

САКАНОВ
Дархан Куандыкович

**ЭКОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
СТРОИТЕЛЬСТВА УЛУЧШЕННЫХ ЦЕМЕНТОБЕТОННЫХ
ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук
по специальности 05.23.11 – проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Подписано к печати 11.05.2026. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 2,5. Тираж 60 экз. Заказ № 317.

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.

ЛИСТ ИСПРАВЛЕНИЙ

в автореферат Саканова Дархана Куандыковича
«Эколого-технологические основы строительства улучшенных
цементобетонных покрытий автомобильных дорог»
на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
05.23.11- проектирование и строительство дорог, метрополитенов,
аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

| Расположение опечатки | Напечатано | Следует читать |
|---|--|--|
| строка 25, абзац 4, страница 12 | – уравнивающий коэффициент, зависящий от вида цемента; | – уравнивающий коэффициент, зависящий от вида цемента, сут ⁻¹ ; |
| строка 26, абзац 4, страница 12 | – коэффициент, зависящий от содержания минерала С ₃ А в цементе; | – коэффициент, зависящий от содержания минерала С ₃ А в цементе, сут ⁻¹ ; |
| строка 29, таблица 4, столбец 1, страница 20 | по таблице 5 | по таблице 3 |
| строка 21, абзац 5, страница 26 | – модуль деформации материала, Па; | – модуль деформации материала, МПа; |
| строка 22, абзац 5, страница 26 | ширина вальца, м; | ширина вальца, мм; |
| строка 23, абзац 5, страница 26 | диаметр вальца, м; | диаметр вальца, мм; |
| строка 24, абзац 5, страница 26 | – толщина уплотняе- мого слоя, м; | – толщина уплотняе- мого слоя, мм; |
| строка 25, абзац 5, страница 26 | – глубина погружения конуса в момент доуплотнения, м; | – глубина погружения конуса в момент доуплотнения, мм; |
| строка 26, абзац 5, страница 26 | – глубина погружения конуса в момент схватывания, м. | – глубина погружения конуса в момент схватывания, мм. |
| строка 28, абзац 6, страница 26 | – 0,5 м, | – 500 мм, |
| строка 28, абзац 6, страница 26 | – 1,0 м. | – 1000 мм. |
| строка 11, абзац 2, страница 40 | на поферхности.... | на поверхности.... |

Соискатель

Д.К. Саканов

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.09.01

В.В. Кравченко