

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 625.855.53

МАКАРЕВИЧ
Антон Александрович

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД УЛИЦ
СПОСОБОМ ХОЛОДНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ НА МЕСТЕ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.23.11 – Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Минск, 2010

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **Веренько Владимир Адольфович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование дорог», Белорусский национальный технический университет

Официальные оппоненты: **Пастушков Геннадий Павлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мосты и тоннели», Белорусский национальный технический университет;

Полойко Владимир Федорович, кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог ПКУП «Жилкомплект Мингорисполкома»

Оппонирующая организация Республиканское дочернее унитарное предприятие «Белорусский дорожный научно-исследовательский институт «Белдорнии»

Защита состоится 17 декабря 2010 г. в 15.30 на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.05.05 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220114, г. Минск, пр. Независимости, 150, к. 15, ауд. 839. Телефон ученого секретаря 265-64-22.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, следует направлять на имя ученого секретаря по адресу: 220013, Минск, пр. Независимости, 65, Белорусский национальный технический университет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «16» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций



Мытько Л.Р.

© Макаревич А.А., 2010
© БНТУ, 2010

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В Республике Беларусь основным способом капитального ремонта дорожных одежд улиц населенных пунктов является их усиление новыми конструктивными слоями из горячих асфальтобетонов. Этот способ имеет много недостатков, среди которых высокая стоимость и неизбежность появления отраженных дефектов.

В последнее время широкое применение в практике дорожного строительства нашла технология восстановления дорожных одежд способом холодной регенерации на месте, которая позволяет эффективно использовать материалы старого покрытия. Применение этой технологии в городах Беларуси долгое время сдерживалось отсутствием нормативно-технической документации, методик расчета дорожных конструкций и проектирования составов смесей.

Как показал первый опыт выполнения работ по данной технологии в городе Минске, проектирование конструкции дорожных одежд по действующим в республике техническим нормативным правовым актам без учета особенностей регенерированного материала не обеспечило требуемой надежности, и их срок службы оказался ниже проектного вследствие преждевременного образования дефектов – в первую очередь температурных трещин. Использование зарубежных методик и документации также оказалось неэффективным из-за различий климатических и транспортных условий и применяемых материалов. Не были решены материаловедческие, конструктивные и технологические проблемы при холодной регенерации асфальтобетона на месте, связанные с особенностями получаемого материала и конструкции дорожной одежды. Только в случае разработки методики проектирования восстановленных дорожных одежд, учитывающей транспортные и климатические условия Беларуси и особенности регенерированного материала, можно достигнуть требуемых уровней надежности и долговечности дорожных одежд. Исходя из вышесказанного, можно считать, что тема настоящего исследования является актуальной.

Связь работы с крупными научными проектами и темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности. Проведение научных исследований выполнялось:

– в рамках научно-исследовательского проекта «Научное сопровождение работ по освоению технологии регенерации дорожных одежд городских улиц и стабилизации грунтов» (номер госрегистрации 20061058), выполненного в соответствии с заданием УП «Горремавтодор Мингорисполкома» в 2006–2007 гг.;

– в рамках научно-исследовательского проекта «Исследование влияния различной жесткости и положения конструктивных слоев при расчетах и конструировании дорожной одежды повышенной деформационной устойчивости», выполненного в соответствии с заданием департамента

«Белавтодор» Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь в 2006–2007 гг.;

– в рамках программы научно-технического сотрудничества на период 2008–2010 гг. № 8с-1 «Исследование надежности дорожных асфальтобетонных покрытий и разработка долговечных дорожных одежд», утвержденной на восьмой сессии Межправительственной Белорусско–Китайской комиссии по научно-техническому сотрудничеству на 2008–2010 гг.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка и научное обоснование методов конструирования и расчета дорожных одежд со слоями из материалов, восстановленных способом холодной регенерации на месте, исходя из их структурных особенностей в условиях взаимодействия с другими конструктивными слоями, значительно отличающимися по своим деформационным характеристикам под действием современных транспортных нагрузок и погодно-климатических факторов Республики Беларусь.

Для достижения поставленной цели были решены следующие *задачи исследования*:

– разработан способ определения характерных участков дорожной одежды при ее ремонте способом холодной регенерации на месте;

– исследовано напряженно-деформированное состояние дорожной одежды со слоем из регенерированного материала под действием нагрузки от колеса расчетного транспортного средства и под действием низких температур;

– проведены экспериментальные исследования реологических, прочностных и деформационных свойств регенерированного материала;

– разработан алгоритм определения напряжений и перемещений, возникающих в дорожной одежде при внешнем воздействии путем многомерной численной интерполяции результатов исследования ее напряженно-деформированного состояния;

– определены параметры и режимы технологического процесса производства работ по холодной регенерации дорожных одежд на месте, позволяющие обеспечить соответствие расчетных характеристик регенерированного материала, получаемого в производственных условиях, значениям, использованным при расчете конструкций дорожной одежды;

– выполнена производственная проверка и технико-экономическая оценка разработанной методики проектирования дорожных одежд при их восстановлении способом холодной регенерации на месте.

Объектом исследования являются методы проектирования и расчета конструкций дорожных одежд улиц населенных пунктов, восстановленных способом холодной регенерации на месте. *Предметом исследования* являются конструкции дорожных одежд, восстановленные способом холодной регенерации на месте, распределение напряжений и перемещений в

таких дорожных одеждах и методы их расчета, свойства регенерированного материала.

Положения, выносимые на защиту

– способ определения характерных участков дорожной одежды путем построения кривых накопленных сумм фактического уровня надежности покрытия, основанный на установленной связи количества дефектов определенного типа на поверхности покрытия с параметрами конструкции дорожной одежды и свойствами материалов;

– зависимости величин напряжений и перемещений, возникающих в конструктивных слоях дорожных одежд, восстановленных способом холодной регенерации, от параметров конструкции, свойств материалов и величин внешних воздействий, полученные в ходе исследования их напряженно-деформированного состояния;

– закономерности изменения свойств регенерированного материала в широком диапазоне температуры и времен действия нагрузки, позволяющие получить необходимые для расчета конструкции дорожной одежды характеристики материала по минимальному количеству испытаний;

– алгоритм определения напряжений и перемещений, действующих в конструктивных слоях дорожной одежды под действием внешних факторов, путем многомерной численной интерполяции результатов исследования ее напряженно-деформированного состояния и основанный на нем программный комплекс по расчету и оптимизации конструкций дорожных одежд городских улиц при их восстановлении способом холодной регенерации на месте;

– методика расчета дорожных одежд улиц населенных пунктов при их восстановлении способом холодной регенерации на месте на действие транспортной нагрузки и низких температур по разработанным критериям прочности исходя из требуемых показателей их долговечности и надежности;

– параметры и режимы технологического процесса производства работ по восстановлению дорожных одежд городских улиц способом холодной регенерации на месте, позволяющие обеспечить соответствие свойств регенерированного в производственных условиях материала его свойствам, заложенным в расчет конструкции.

Личный вклад соискателя

Все основные результаты исследований получены автором самостоятельно. Общая концепция и направление исследований разработаны совместно с научным руководителем. В проведении исследований, а также в реализации их результатов, принимали участие сотрудники Центра научных исследований и испытаний дорожно-строительных и гидроизоляционных материалов НИЧ БНТУ: Занкович В.В., Афанасенко А.А. и др.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих научно-технических конференциях:

1. Международная научно-практическая конференция «Проблемы надежности дорожных одежд городских улиц и дорог», г. Минск, 30 июня – 01 июля 2005 г.

2. Республиканский семинар «О внедрении новых технологий в дорожном ремонтно-строительном производстве», г. Минск, 27 сентября 2006 г.

3. Всекитайская конференция «Новые технологии в области содержания автомобильных дорог», г. Синьсян, КНР, 18–19 апреля 2007 г.

4. Международная научно-техническая конференция «Структурообразование, технология, свойства и долговечность органических вяжущих и бетонов на их основе», г. Харьков, Украина, 22–23 ноября 2007 г.

5. Республиканский семинар «Новые технические нормативные правовые акты в области проектирования и строительства улиц населенных пунктов», РУП «Стройтехнорм», г. Минск, 07 октября 2009 г.

6. 4-я Всекитайская конференция «Новые технологии и оборудование в области содержания автомобильных дорог», г. Синьсян, КНР, 25–26 марта 2010 г.

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 12 статей объемом 4,8 авторского листа, из них 6 статей объемом 2,1 авторского листа, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 181 страницу, в т.ч. 48 иллюстраций, 24 таблицы, список библиографических источников из 197 наименований, 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и практическая значимость диссертационного исследования.

В первой главе произведен анализ литературных источников, касающихся технологии холодной регенерации нежестких дорожных одежд, и обобщен опыт первых опытных работ по этой технологии в г. Минске. Технология холодной регенерации дорожных одежд на месте заключается в приготовлении и укладке смесей, состоящих из измельченного отработанного асфальтобетона и одного или нескольких вяжущих веществ (как органических – битумная эмульсия, жидкий или вспененный битум [2–А], так и гидравлических – цемент, известь), без разогрева непосредственно на дороге с использованием специальных машин – ресайклеров.

Исследования, выполненные Бахрахом Г.С., Костельковым М.П., Шипицыным В.В., Топиловой В.М., Илиополовым С.К., Васильевым А.П., Красиковым О.А., Веренько В.А., Кашевской Е.В., Штабинским В.В., Шумчиком В.К. и другими учеными, показали, что эта технология может стать экономически выгодной и экологически чистой альтернативой традиционным способам ремонта дорожных одежд. Однако для ее успешного и наиболее эффективного применения в практике ремонта дорожных одежд улиц населенных пунктов в условиях Беларуси остается ряд нерешенных вопросов в области диагностики, конструирования и расчета дорожных одежд.

Выявленные проблемы позволили обозначить пути их устранения, с учетом чего была сформулирована цель и поставлены задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена разработке методики конструирования и расчета дорожных одежд улиц населенных пунктов при их восстановлении способом холодной регенерации на месте.

В связи с тем, что свойства регенерированного материала во многом зависят от параметров существующей конструкции и свойств материалов старых конструктивных слоев [7–А, 8–А], проектирование новой конструкции дорожной одежды должно вестись отдельно на каждом из участков существующего покрытия, для которых параметры существующей конструкции остаются постоянными. Такие характерные участки существующего покрытия можно выделить путем построения графика накопленных сумм фактического уровня надежности. Этот способ основывается на установленном факте существования зависимости количества дефектов определенного вида от типа конструкции дорожной одежды и свойств использованных материалов при одинаковых условиях внешнего воздействия. Накопленную сумму уровня надежности покрытия на i -м пикете рассчитывают по формуле

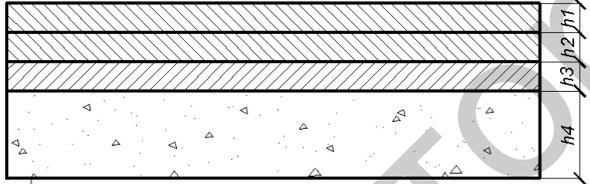
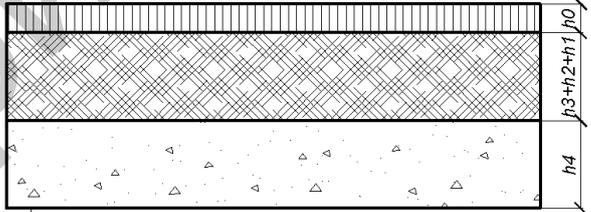
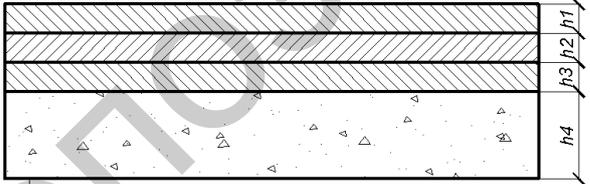
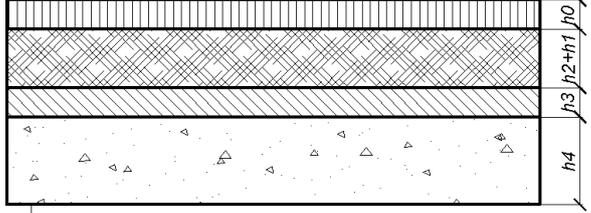
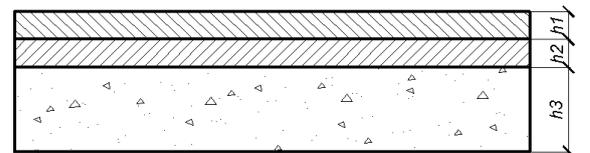
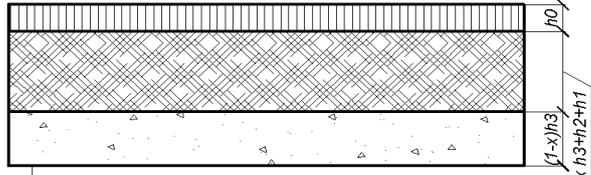
$$S_i^P = S_{i-1}^P + (P_{\phi i} - \overline{P}_{\phi}), \quad (1)$$

где S_i^P – накопленная сумма уровня надежности на данном пикете;
 S_{i-1}^P – накопленная сумма уровня надежности на предыдущем пикете;
 $P_{\phi i}$ – фактический уровень надежности покрытия на данном пикете;
 \overline{P}_{ϕ} – средний уровень надежности на данном и предыдущих пикетах.

Участок покрытия можно считать характерным по дефектности, если уклон графика накопленных сумм уровня надежности на нем имеет значение одного знака (возрастает или убывает).

Ремонт способом холодной регенерации на месте целесообразно проводить, если уровень надежности нижних слоев дорожной одежды меньше допустимого, а верхнего слоя – больше допустимого в соответствии со схемой (таблица 1) [9–А].

Таблица 1 – Конструкция дорожной одежды с регенерированным слоем в зависимости от конструкции старой дорожной одежды

Конструкция существующей дорожной одежды	Конструкция новой дорожной одежды с регенерированным слоем
 <p data-bbox="268 1258 798 1384"> <i>Несвязный материал основания</i> <i>A/б, уровень надежности меньше допустимого</i> <i>A/б, уровень надежности больше допустимого</i> <i>A/б, уровень надежности больше допустимого</i> </p>	 <p data-bbox="906 1258 1404 1348"> <i>Несвязный материал основания</i> <i>Регенерированный материал</i> <i>Новое покрытие (один или несколько слоев)</i> </p>
 <p data-bbox="268 1612 798 1738"> <i>Несвязный материал основания</i> <i>A/б, уровень надежности больше допустимого</i> <i>A/б, уровень надежности меньше допустимого</i> <i>A/б, уровень надежности больше допустимого</i> </p>	 <p data-bbox="906 1612 1404 1738"> <i>Несвязный материал основания</i> <i>A/б, уровень надежности больше допустимого</i> <i>Регенерированный материал</i> <i>Новое покрытие (один или несколько слоев)</i> </p>
 <p data-bbox="268 1937 798 2027"> <i>Несвязный материал основания</i> <i>A/б, уровень надежности меньше допустимого</i> <i>A/б, уровень надежности больше допустимого</i> </p>	 <p data-bbox="906 1937 1404 2027"> <i>Несвязный материал основания</i> <i>Регенерированный материал</i> <i>Новое покрытие (один или несколько слоев)</i> </p>

Конструирование новой дорожной одежды следует вести исходя из уровней надежности материалов конструктивных слоев старой дорожной одежды: выполнять регенерацию на всю глубину слоев, материал которых имеет уровень надежности меньше допустимого. Над регенерированным материалом необходимо устройство одного или нескольких защитных слоев из горячего плотного щебенистого асфальтобетона.

Оценку прочности дорожной одежды при ее ремонте способом холодной регенерации на месте в рамках разработанной методики проектирования ведут по пяти *критериям прочности*:

1) максимальные сжимающие напряжения в защитном слое покрытия не должны превысить допустимых значений с учетом коэффициента запаса прочности;

2) разность касательных и произведения нормальных напряжений на тангенс угла внутреннего трения асфальтобетона защитного слоя не должны превысить значения внутреннего сцепления с учетом коэффициента запаса прочности;

3) максимальные растягивающие напряжения в нижней части регенерированного слоя не должны превысить допустимых значений с учетом коэффициента запаса прочности и усталостных явлений;

4) прогиб конструкции под колесом расчетного автомобиля не должен превысить допустимых значений с учетом коэффициента запаса прочности;

5) температурные напряжения, возникающие в защитном асфальтобетонном слое, не должны превысить допустимых значений с учетом коэффициента запаса прочности и усталостных явлений.

Зависимости величин напряжений и перемещений, возникающих в конструктивных слоях дорожных одежд, восстановленных способом холодной регенерации, от параметров конструкции, свойств материалов и величин внешних воздействий при исследовании напряженно-деформированного состояния конструкции были установлены методом конечных элементов [4–А].

При исследовании напряженно-деформированного состояния дорожной одежды под воздействием транспортной нагрузки рассматривалась расчетная схема двухслойного покрытия с вариацией толщин и модулей упругости конструктивных слоев и основания. Всего было рассчитано 432 модели конструкций.

Расчеты выполнялись с использованием программного обеспечения фирмы MSC (MSC.Patran, MSC.Marc). В качестве расчетного транспортного средства был принят автобус МАЗ-105 с расчетной нагрузкой на среднюю ось 115 кН (двухскатное колесо) и параметрами взаимодействия с дорожным покрытием, представленными в таблице 2 (шина 12.00R20) [5–А].

Таблица 2 – Параметры взаимодействия шины с дорожным покрытием

Давление воздуха в шине, МПа	Нагрузка на одиночное колесо, Н	Ширина отпечатка под нагрузкой, см	Длина отпечатка под нагрузкой, см	Площадь отпечатка под нагрузкой, см ²	Контактное давление, МПа
0,77	28750	23,0	28,5	552,83	6,06

В ходе расчета моделировался участок дорожной одежды размером три на три метра, в центре которого была приложена нагрузка от заднего спаренного колеса автомобиля (рисунок 1). При этом для снижения временных затрат на выполнение расчетов расчетная схема учитывала симметричность действия нагрузки относительно осей X и Y (фактически строилась и рассчитывалась лишь четвертая часть участка).

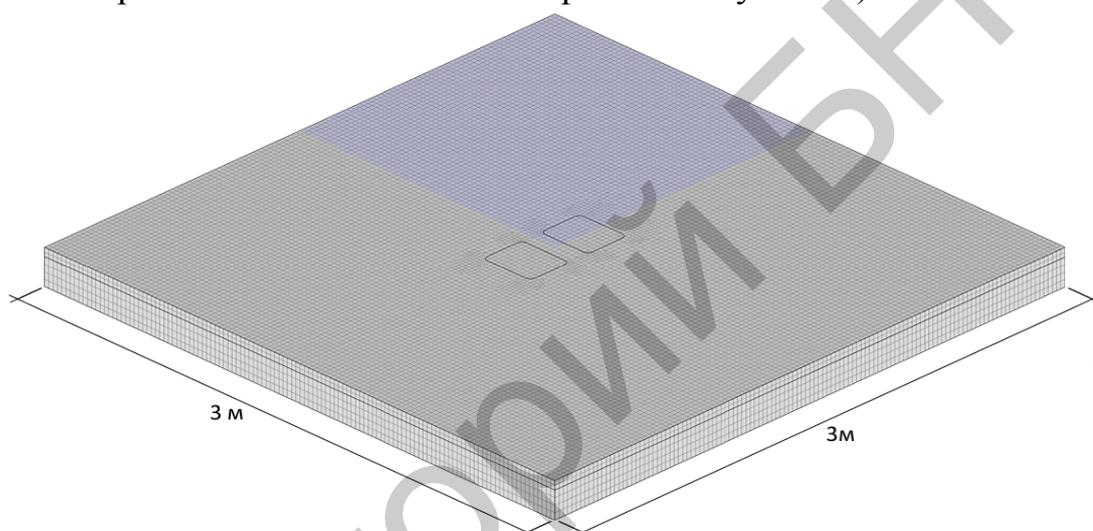


Рисунок 1 – Моделируемый участок дорожной одежды

При анализе полученных данных было установлено, что в защитном слое наиболее значимыми являются сжимающие напряжения, которые превосходят растягивающие в 8–14 раз, а в слое из регенерированного материала, особенно в его нижней части, преобладают растягивающие напряжения.

Увеличение толщины и жесткости регенерированного слоя положительно сказывается на работе асфальтобетонного покрытия. В то же время с увеличением жесткости регенерированного слоя напряжения в нем возрастают. Увеличение модуля упругости и толщины асфальтобетонного покрытия приводит к снижению напряжений в слое из регенерированного материала.

С целью определения температурных растягивающих напряжений в покрытии был произведен анализ напряжено-деформированного состояния дорожной одежды под воздействием отрицательных температур. Расчетные характеристики материалов (расчетные модули упругости, коэффициенты температурного расширения и т.д.) принимались с учетом распределения температуры по глубине дорожной одежды и фактической скорости

воздействия температурной нагрузки. Типичные суточные изменения температур воздуха в зимний период были изучены по данным ГУ «Республиканский гидрометеорологический центр». А расчеты температуры дорожной одежды на различной глубине в зависимости от температуры воздуха были выполнены по формулам, предложенным ранее Ковалевым Я.Н. В качестве расчетных условий было принято равномерное изменение температуры на поверхности покрытия с $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 12 часов.

В качестве критерия прочности было принято недопущение появления температурных трещин на поверхности покрытия в таком количестве, которое бы снизило его уровень надежности на конец срока службы ниже проектного значения. Допускалось появление трещин в регенерированном слое, шаг трещин условно принимался постоянным для упрощения моделирования и расчета конструкции методом конечных элементов. Расчетная схема, приведенная на рисунке 2, представляла собой участок дорожной одежды шириной 1 м и длиной, равной шагу трещины в регенерированном слое.

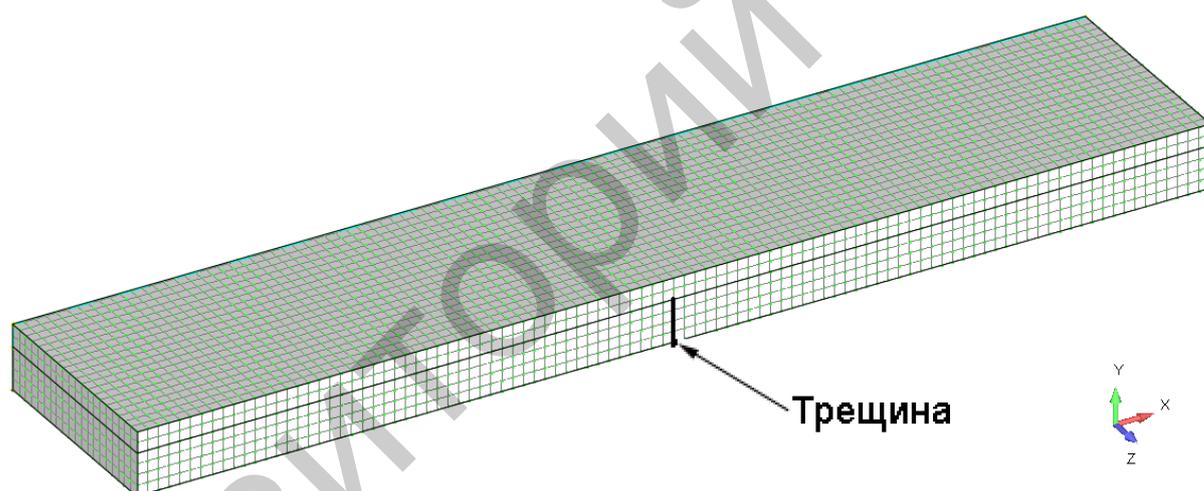


Рисунок 2 – Модель рассчитываемого участка дорожной одежды, разбитая на сетку конечных элементов в среде MSC.Patran

Изучение напряженно-деформированного состояния дорожной одежды под воздействием температуры позволило установить, что растягивающие напряжения в асфальтобетонном покрытии в несколько раз выше, чем в регенерированном слое. Максимальные растягивающие напряжения от температуры возникают на поверхности конструкции в месте над трещиной в регенерированном слое, т.е. трещина в регенерированном слое создает концентрацию напряжений в покрытии в месте над трещиной. Концентрация напряжений над трещиной увеличивается при увеличении шага трещин, модуля упругости регенерированного слоя и его толщины.

Зависимости, полученные при изучении напряженно-деформированного состояния дорожной одежды под воздействием транспорта и температуры, применяются для оптимизации толщин слоев при конструировании, а данные напряжений и перемещений используются для

расчетов напряженно-деформированного состояния реальных конструкций с использованием алгоритма многомерной численной интерполяции, разработанного в четвертой главе.

В третьей главе экспериментально исследованы деформационно-прочностные характеристики регенерированных материалов и установлены закономерности изменения этих характеристик в широком диапазоне температуры и времени действия нагрузки. Исследования проводились с целью разработки упрощенной методики определения расчетных характеристик регенерированного материала с высокой достоверностью и минимальным количеством трудозатрат.

Свойства асфальтобетонов и бетонов на органико-гидравлическом вяжущем (к которым относится и регенерированный материал) зависят от температуры и времени действия нагрузки. Большинство существующих методик выражает эту зависимость через принципы температурно-временной аналогии, однако, регенерированный материал не относится к реологически простым материалам, и напрямую принцип температурно-временной аналогии к нему не применим.

Исследование расчетных характеристик производилось на образцах регенерированного материала различных составов. В ходе эксперимента было установлено, что кривые зависимостей прочности однотипных материалов от температуры и скорости деформирования имеют одинаковую форму, зная которую, можно рассчитать прочность в любом месте этих кривых, задаваясь максимальной структурной прочностью (R_c) и температурой стеклования (T_q) материала. Указанная зависимость представлена на рисунке 3.

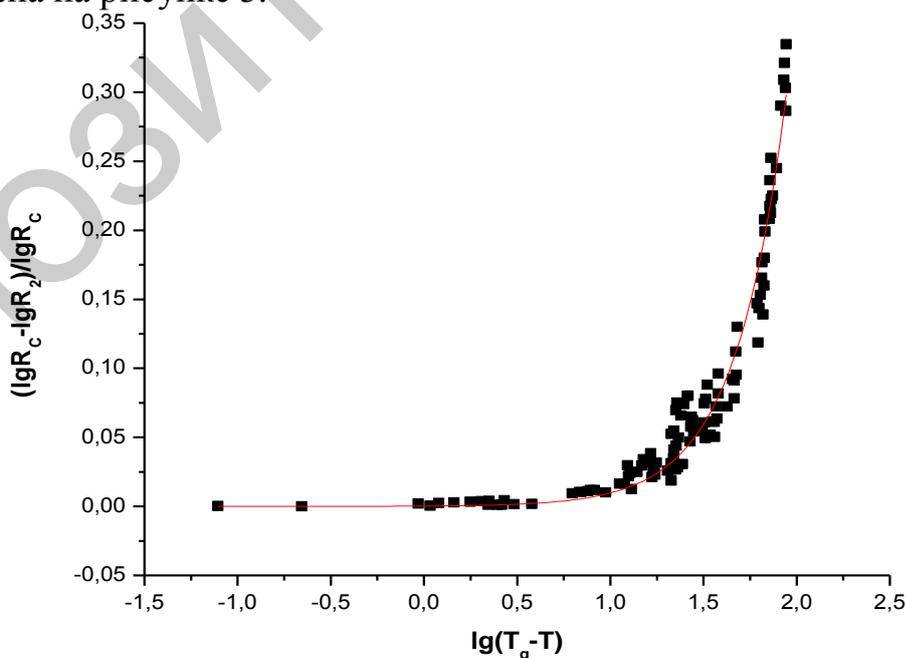


Рисунок 3 – Зависимость изменения прочности (относительно R_c) регенерированного материала при изменении температуры (относительно T_q)

Предельную структурную прочность регенерированного материала можно определить по результатам двух испытаний предела прочности при растяжении при одинаковой низкой расчетной температуре и различных скоростях приложения нагрузки V_1 и V_2 . Для определения температуры стеклования регенерированного материала в ходе статистической обработки данных эксперимента была получена новая эмпирическая зависимость от результатов этих же испытаний:

$$T_q = T - \left(57,3 \arctg \left(-1,921 \lg \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \right) \right)^m, \quad (2)$$

где T – температура, при которой производится испытание, °С;
 R_1 – большее из двух значений результатов испытаний прочности на раскол при скоростях деформирования V_1 и V_2 , Па;
 R_2 – меньшее из двух значений результатов испытаний прочности на раскол при скоростях деформирования V_1 и V_2 , Па;
 m – коэффициент, зависящий от вида материала, для асфальтобетонов равный 1,35, для регенерируемого материала рассчитывается по формуле

$$m = 1,2 - (Ц \cdot 0,06)^2; \quad (3)$$

где Ц – содержание цемента в составе регенерированного материала, %.

Для расчетов прочности регенерированного материала при любой температуре T и скорости деформирования V была получена следующая формула:

$$\lg R_{VT} = \lg R_C \left(1 - \frac{37,6^{\lg(T_q - T)}}{3876} \right) + \frac{(T_q - T)}{(100 + 2T)m} (\lg V - \lg V_2), \quad (4)$$

где $\lg V$ – десятичный логарифм скорости деформирования V , м/с, при которой необходимо найти требуемое значение прочности.

Разработанная методика расчета деформационно-прочностных характеристик регенерированного материала в широком диапазоне температур и скоростей деформации дает хорошую сходимость результатов со значениями экспериментальных испытаний.

Четвертая глава посвящена разработке комплекса компьютерных программ, предназначенных для автоматизации работ по визуальному обследованию покрытий, выделению характерных участков и расчету конструкций дорожных одежд на прочность по полученным критериям.

Для автоматизации проведения визуального обследования покрытий и выделения характерных участков дорожных одежд автором был разработан комплекс программ, позволяющий производить фиксацию дефектов различных видов на экране карманного компьютера с последующей

обработкой собранных данных и выделением характерных участков дорожной конструкции. Комплекс состоит из двух программ:

– программа «MobileDefectsCalc», предназначенная для ввода данных о дефектах и работающая на мобильных устройствах под управлением операционной системы Windows Mobile;

– программа «DefectsCalc», предназначенная для подготовки электронной схемы дороги и обработки собранных данных на настольном компьютере.

Расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций методом конечных элементов требуют наличия соответствующего специализированного программного обеспечения и навыков его использования, что затрудняет применение разработанной методики расчета дорожных одежд на практике. В связи с этим для определения напряжений и перемещений, возникающих под воздействием транспорта и температуры в конструктивных слоях дорожной одежды, восстановленной способом холодной регенерации на месте, была разработана прикладная компьютерная программа «CRDesign». Работа программы основана на алгоритме многомерной численной интерполяции результатов исследования напряженно-деформированного состояния дорожных одежд методом конечных элементов. Этот алгоритм применяется для определения значений напряжений и перемещений в любой произвольной конструкции дорожной одежды путем обработки данных, полученных в главе 2. Другими функциями программы «CRDesign» являются расчет характеристик материалов конструктивных слоев по методике, разработанной в главе 3, и критериальная оценка прочности конструкции дорожной одежды.

В работе всех представленных программ использованы общие программные классы, в которых заключен весь необходимый функционал (такой как подсчет площади объектов, расчет текущих географических координат, определения расчетных характеристик материалов и т.д.). Классы помещены в динамической библиотеке *TotalRoad.dll*, которая используется всеми представленными программами, как на настольном, так и на карманном компьютере.

В пятой главе разработаны параметры и режимы технологического процесса производства работ по холодной регенерации дорожных одежд на месте, позволяющие обеспечить соответствие свойств регенерированного материала, получаемого в производственных условиях, свойствам материала, заложенным в расчет конструкции, а также представлены сведения о производственной апробации результатов исследований.

Во время выполнения опытных работ по холодной регенерации дорожной одежды на улице Шафарнянской были изучены различные режимы уплотнения регенерированного материала, что позволило выбрать оптимальную схему уплотнения. В соответствии с ней уплотнение регенерированного материала непосредственно за ресайклером должно

производиться тяжелым гладковальцевым виброкатком с высокой амплитудой вибрационного воздействия для достижения высокой плотности материала в нижней части регенерированного слоя. Последние проходы каток должен производить с малой амплитудой вибрации либо вовсе без вибрации для уменьшения риска образования усадочных трещин. Влажность материала при уплотнении должна находиться в пределах 0,95–1 от оптимального значения.

В связи с тем, что зерновой состав дробимого при регенерации материала зачастую не соответствует требованиям, был предложен способ улучшения его гранулометрии. Он включает учет зависимости степени дробления материала от скорости движения ресайклера, а также методики расчета состава и количества несвязного каменного материала, который может быть добавлен (путем предварительного распределения слоем определенной толщины перед проходом ресайклера) с целью выравнивания поперечного профиля или улучшения гранулометрического состава регенерированного материала. Выполнение этих расчетов возможно с помощью компьютерной программы «АсТон» [10–А].

Были также разработаны методики расчета длины захватки ресайклера из условия, что время между соседними проходами не должно превысить предельно допустимого значения для используемых вяжущих веществ и назначения сроков открытия движения транспорта и строительной техники по регенерированному слою.

Опытно-промышленная проверка результатов диссертации производилась при проектировании дорожных одежд улиц города Минска, ремонт которых выполнялся способом холодной регенерации на месте.

По результатам опытных работ и при непосредственном участии автора в 2006–2007 гг. был разработан и введен в действие технический кодекс установившейся практики ТКП 110-2007 «Восстановление дорожных одежд улиц населенных пунктов способами холодной регенерации на месте», в который вошли основные результаты исследований, представленных в данной работе, в том числе способ определения характерных участков покрытия, методика конструирования дорожных одежд, принципы расчета дорожных одежд на температурную трещиностойкость, параметры технологических процессов при производстве работ.

Начиная с 2007 г. все расчеты конструкций дорожных одежд, ремонт которых выполнялся способом холодной регенерации, производились с учетом требований ТКП 110.

Экономический эффект от применения разработанной методики проектирования дорожных одежд получен за счет продления их срока службы и составил около 1 рубля на 1 м² покрытия в базовых ценах 1991 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Способ определения характерных участков дорожных одежд путем построения кривых накопленных сумм фактического уровня надежности покрытия, основанный на установленной связи количества дефектов определенного типа на поверхности покрытия с параметрами конструкции дорожной одежды и свойствами материалов конструктивных слоев [3– А].

2. Зависимости величин напряжений и перемещений, возникающих в дорожной одежде с регенерированным слоем под действием внешних факторов, от параметров конструкции, свойств материалов конструктивных слоев и величин внешних воздействий; и основанная на них методика расчета конструкций дорожных одежд улиц населенных пунктов при их восстановлении способом холодной регенерации на месте на действие транспортной нагрузки и температуры [1–А, 4–А, 11–А, 12–А].

3. Закономерности изменения свойств регенерированного материала в широком диапазоне изменения температур и времен действия нагрузки, позволяющие получить необходимые для расчета конструкции дорожной одежды расчетные характеристики материала по минимальному количеству испытаний [6–А, 11–А, 12–А].

4. Алгоритм определения напряжений и перемещений, действующих в конструктивных слоях дорожной одежды под действием внешних факторов, путем многомерной численной интерполяции результатов исследования ее напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов и основанный на нем программный комплекс по расчету и оптимизации конструкций дорожных одежд городских улиц при их восстановлении способом холодной регенерации на месте [4–А, 11–А, 12–А].

5. Теоретически и экспериментально обоснованные параметры и режимы технологического процесса производства работ по восстановлению дорожных одежд способом холодной регенерации на месте, позволяющие обеспечить соответствие свойств регенерированного в производственных условиях материала его свойствам, заложенным в расчет конструкции [3–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Практическая и экономическая значимость результатов диссертационной работы заключается в возможности их использования для научного обоснования технических решений, принимаемых при диагностике, проектировании и ремонте дорожных одежд при их восстановлении способом холодной регенерации на месте.

2. Результаты диссертационной работы включены в следующие технические нормативные правовые акты:

– Изменение № 1 к техническому кодексу установившейся практики ТКП 45-3.03-3-2004 «Проектирование дорожных одежд улиц и дорог

населенных пунктов» (способ выделения однородных участков дорожных одежд при их диагностике);

– Технический кодекс установившейся практики ТКП 110-2007 «Восстановление дорожных одежд улиц населенных пунктов способами холодной регенерации на месте» (методика конструирования дорожных одежд со слоями из регенерированных материалов, методика расчета на температурную трещиностойкость, параметры и режимы технологических процессов при производстве работ).

3. Алгоритм многомерной численной интерполяции при определении напряжений в конструктивных слоях дорожных одежд реализован в следующих прикладных компьютерных программах:

– «CRDesign» - расчет дорожных одежд, восстановленных способом холодной регенерации на месте;

– «Nomoread» - расчет нежестких дорожных одежд повышенной деформационной устойчивости;

– «Nomoread China» - расчет нежестких дорожных одежд повышенной деформационной устойчивости для условий Китайской Народной Республики;

– ряд других программных средств, применяемых при диагностике и проектировании улиц населенных пунктов.

4. Разработанные в диссертационном исследовании методики конструирования и расчета дорожных одежд нашли широкое практическое применение и использованы при ремонте более 10 улиц в городе Минске. Экономический эффект, полученный за счет продления их срока службы, составляет около 1 рубля на 1 м² покрытия в базовых ценах 1991 г.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи

1–А. Веренько, В.А. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожной одежды со слоем, восстановленным холодным способом / В.А. Веренько, А.А. Макаревич // Строительная наука и техника. – 2007. – № 6. – С. 61—65.

2–А. Веренько, В.А. Получение бетонов на органогидравлических вяжущих на вспененном битуме / В.А. Веренько, А.А. Макаревич // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: сб. науч. тр. – Харьков, 2008.– Вып. 40. – С. 93–96.

3–А. Веренько, В.А. Опыт применения технологии холодной регенерации дорожных одежд на месте при ремонте улиц г. Минска / В.А. Веренько, А.А. Макаревич // Автомобильные дороги и мосты. – 2008. – № 1. – С. 13–18.

4–А. Веренько, В.А. Конструирование и расчет дорожных одежд повышенной долговечности / В.А. Веренько, В.В. Занкович, А.А. Макаревич // Road Machinery & Construction Mechanization. – 2009. – №2. – С. 17–26. (На китайском языке).

5–А. Веренько, В.А. Влияние параметров транспортной нагрузки на развитие деформаций дорожных покрытий / В.А. Веренько, В.В. Занкович, А.А. Макаревич // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: Сб. науч. тр. – Харьков, 2006.– Вып. 34–35. – С. 102-110.

6–А. Веренько, В.А. Прогнозирование расчетных характеристик бетонов на органогидравлических вяжущих в широких диапазонах температур и скоростей деформации / В.А. Веренько, А.А. Макаревич // Вестник БНТУ. – 2010. – № 3. – С. 20–27.

Материалы конференций

7–А. Афанасенко, А.А. Опыт применения диагностики материала дорожного покрытия на примере дорог и улиц города Минска / А.А. Афанасенко, А.А. Макаревич // Проблемы надежности дорожных одежд городских улиц и дорог: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. / БНТУ, Редкол.: В.А. Веренько [и др.] – Минск, 2005. – С. 16–28

8–А. Veranko, U. Asphalt Concrete Pavements Diagnostics Upon Evaluation of Working Condition of Pavements [Electronic resource] / U. Veranko, A. Makarevich, L. Tingguo, V. Zankavich, // Papers of II International Conference “Environmentally Friendly Roads. ENVIROAD 2009”. – Warsaw, –2009. – 1 CD-ROM.

9–А. Veranko, U. Engineering and Economic Aspects through the Prism of Asphalt concrete Pavement Life Cycle / U. Veranko, A. Makarevich, V. Zankavich, // China/Former Soviet Union Area Workshop on Pavement Technologies 2010. – Xi'an, 2010. – P. 45–57.

10–А. Веренько, В.А. Применение программного комплекса «АсТон» для проектирования составов асфальтобетона с заданным уровнем надежности / В.А. Веренько, В.В.Занкович, А.А.Макаревич // Проблемы надежности дорожных одежд городских улиц и дорог: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. / БНТУ, Редкол.: В.А. Веренько [и др.] – Минск, 2005. – С. 150–155.

11–А. Veranko, U. Pavement design at reparation using CIR method [Electronic resource] / U. Veranko, A. Makarevich // Papers of II International Conference “Environmentally Friendly Roads. ENVIROAD 2009”. – Warsaw, – 2009. – 1 CD-ROM.

12–А. Makarevich, A. Pavement Design With It Reparation Using Cold Recycling / A. Makarevich // China/Former Soviet Union Area Workshop on Pavement Technologies 2010. – Xi’an, 2010. – P. 212–219.

РЭЗІЮМЭ

Макарэвіч Антон Аляксандравіч

Аднаўленне дарожнага адзення вуліц спосабам халоднай рэгенерацыі на месцы

Ключавыя словы: халодная рэгенерацыя асфальтабетону, методыка праектавання, характэрныя ўчасткі, канструяванне і разлік дарожнага адзення, тэмпературнае трэшчынаўтварэнне, рэгенераваны матэрыял, разліковыя характарыстыкі, рэжымы вытворчасці работ.

Мэта работы: распрацоўка і навуковае абгрунтаванне метадаў канструявання і разліку дарожнага адзення са сляямі з матэрыялаў, адноўленых спосабам халоднай рэгенерацыі на месцы, зыходзячы з іх структурных асаблівасцяў ва ўмовах узаемадзеяння з іншымі канструктыўнымі сляямі, якія значна адрозніваюцца па сваім дэфармацыйным характарыстыкам пад дзеяннем сучасных транспартных нагрузкаў і пагодна-кліматычных фактараў Рэспублікі Беларусь.

У дысертацыйным даследаванні распрацавана методыка праектавання дарожнага адзення пры яго аднаўленні спосабам халоднай рэгенерацыі на месцы, якая ўключае новы спосаб вылучэння характэрных участкаў дарожнага адзення пры яго візуальнай дыягностыцы, метады канструявання і разліку дарожнага адзення са сляямі з рэгенераваных матэрыялаў, заснаваныя на вывучэнні іх напружана-дэфармаванага стану пад уздзеяннем знешніх фактараў. Для прымянення распрацаванай методыкі на практыцы прапанаваны адпаведныя алгарытмы і камплекты разліковых праграм. На падставе вывучэння ўласцівасцяў рэгенераванага матэрыялу ў шырокім дыяпазоне тэмператур і часу дзеяння нагрузкаў, атрымана методыка вызначэння яго разліковых характарыстык па мінімальнай колькасці выпрабаванняў. Для забеспячэння адпаведнасці ўласцівасцяў рэгенераваных матэрыялаў іх практным значэнням распрацаваны аптымальныя параметры і рэжымы тэхналагічнага працэсу пры работах па халоднай рэгенерацыі.

Вынікі даследавання ўключаны ў два тэхнічныя нарматыўныя прававыя акты і выкарыстаны пры праектаванні і капітальным рамонце больш за 10 вуліц у горадзе Мінску.

РЕЗЮМЕ

Макаревич Антон Александрович

Восстановление дорожных одежд улиц способом холодной регенерации на месте

Ключевые слова: холодная регенерация асфальтобетона, методика проектирования, характерные участки, конструирование и расчет дорожных одежд, температурное трещинообразование, регенерированный материал, расчетные характеристики, режимы производства работ.

Цель работы: разработка и научное обоснование методов конструирования и расчета дорожных одежд со слоями из материалов, восстановленных способом холодной регенерации на месте, исходя из их структурных особенностей в условиях взаимодействия с другими конструктивными слоями, значительно отличающимися по своим деформационным характеристикам под действием современных транспортных нагрузок и погодно-климатических факторов Республики Беларусь.

В диссертационном исследовании разработана методика проектирования дорожных одежд при их восстановлении способом холодной регенерации на месте, включающая новый способ выделения характерных участков дорожных одежд по величине фактического уровня надежности покрытия, методы конструирования и расчета дорожных одежд со слоями из регенерированных материалов, основанные на изучении их напряженно-деформированного состояния под воздействием внешних факторов. Для применения разработанной методики на практике предложены соответствующие алгоритмы и комплекты расчетных программ. На основании изучения свойств регенерированного материала в широком диапазоне температур и времен действия нагрузки предложена методика определения его расчетных характеристик по минимальному количеству испытаний. Для обеспечения соответствия свойств регенерированных материалов их проектным значениям разработаны оптимальные параметры и режимы технологического процесса производства работ по холодной регенерации дорожных одежд.

Результаты исследования включены в действующие технические нормативные правовые акты и использованы при проектировании капитального ремонта более 10 улиц в городе Минске.

SUMMARY

Makarevich Anton

City streets pavements rehabilitation by the cold in-place recycling

Key words: cold recycling of asphalt concrete, design methods, homogeneous sections, pavement calculation, thermal cracking, recycled material, design characteristics, production modes.

Objective: development and scientific justification of the pavement design and calculation methods with layers constructed using cold in-place recycling, based on their structural characteristics in terms of interaction with other structural layers significantly differ in their deformation characteristics under the influence of modern traffic loads and climatic factors peculiar to the Republic of Belarus.

This research developed a road pavements design method during their reparation using cold in-place recycling, including a new way of road pavements homogeneous sections detection during their visual diagnosis, methods of construction and calculation of road pavements with layers of recycled materials, based on the examination of their stress-strain state under the influence of external factors. To apply the developed technique in practice, appropriate algorithms and computer programs were suggested. Based on the study of the properties of the recycled material in a wide range of temperatures and times of the load offered to the method of its design characteristics on the minimum number of tests. To ensure that the properties of reclaimed materials are equal to the design values the optimum parameters and modes of construction processes using cold in-place recycling were developed.

The results are included in the existing technical regulations and used in designing and reparation of more than 10 streets in the city of Minsk.

Научное издание

МАКАРЕВИЧ Антон Александрович

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД УЛИЦ
СПОСОБОМ ХОЛОДНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ НА МЕСТЕ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.23.11 – Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Редактор Т.А. Подолякова

Подписано в печать 12.11.2010.

Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,34. Уч.-изд. л. 1,05. Тираж 60. Заказ 1337.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.