ВИЛЬНЮССКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. ГЕДИМИНАСА

Катерина КРАЮШКИНА

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ СО ШЛАКОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

ДОКТОРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ,
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА (03Т)

VGTU
LEIDYKLA TECHNIKA
Вильнюс 2013

Докторская диссертация подготовлена в Национальном авиационном университете (Украина) в 2008–2012 г. г.

Диссертация защищается экстерном.

Научный консультант

проф. габил. др. Андрей БЕЛЯТЫНСКИЙ (Национальный авиационный университет (Украина), инженерия транспорта – 03Т).

Ученый Совет по защите диссертации по научному направлению инженерии транспорта Вильнюсского технического университета им. Гедиминаса:

Председатель

проф. габил. др. Марионас БОГДЯВИЧЮС (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, инженерия транспорта – 03Т).

Члены:

проф. др. Жильвинас БАЗАРАС (Каунасский технологический университет, инженерия транспорта – 03Т),
проф. др. Альфредас ЛАУРИНАВИЧЮС (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, инженерия транспорта – 03Т),
проф. габил. др. Генрикас СИВИЛЯВИЧЮС (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, инженерия транспорта – 03Т),
проф. др. Юрис СМИРНОВС (Рижский технический университет, инженерия строительства – 02Т).

Защита диссертации состоится на открытом заседании Ученого Совета по защите диссертации по научному направлению инженерии транспорта, которое состоится **27 мая 2013 года в 14 час.** в Зале заседаний Сената Вильнюсского технического университета им. Гедиминаса

Адрес: ал. Саулетекё 11, LT-10223 Вильнюс, Литва.
Телефон: +370 5 274 4956; факс +370 5 270 0112; эл. почта: doktor@vgtu.lt

Сообщение о представленной к защите диссертации разослано 26 апреля 2013 года.
Электронную версию докторской диссертации можно посмотреть в интернет-портале http://dspace.vgtu.lt, а печатную копию в Библиотеке Вильнюсского технического университета им. Гедиминаса (ал. Саулетекё 14, LT-10223 Вильнюс, Литва).

ISBN 978-609-457-472-6

© Издательство ТЕХНИКА ВТУ им. Гедиминаса, 2013
© Катерина Краюшкина, 2013
ekrayushkina@yandex.ua

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Kateryna KRAYUSHKINA

ASFALTO DANGŲ SU ŠLAKAIS SAVYBIŲ ĮTAKA AUTOMOBILIŲ TRANSPORTO IR KELIŲ EKSPLOATACINIAMS RODIKLIAMS

MOKSLO DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
TRANSPORTO INŽINERIJA (03T)

Vilnius LEIDYKLA TECHNIKA 2013

Disertacija rengta 2008–2012 metais Nacionaliniame aviacijos universitete (Ukraina).

Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas

prof. habil. dr. Andrii BIELIATYNSKYI (Nacionalinis aviacijos universitetas (Ukraina), transporto inžinerija – 03T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Marijonas BOGDEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Nariai:

prof. dr. Žilvinas BAZARAS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – 03T),
prof. dr. Alfredas LAURINAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T),
prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T),
prof. dr. Juris SMIRNOVS (Rygos technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2013 m. gegužės 27 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.
Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiusti 2013 m. balandžio 26 d. Disertaciją galima peržiūrėti interneto svetainėje http://dspace.vgtu.lt ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).
VGTU leidyklos TECHNIKA 2129-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-609-457-472-6

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2013
© Kateryna Krayushkina, 2013
ekrayushkina@yandex.ua

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Kateryna KRAYUSHKINA

INFLUENCE OF ASPHALT PAVEMENTS WITH SLAG ADDITIVES ON EXPLOITATION PARAMETERS OF AUTOMOBILE ROADS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
TRANSPORT ENGINEERING (03T)

Vilnius 2013

Doctoral dissertation was prepared at National Aviation University (Ukraine) in 2008–2012.

The dissertation is defended as an external work.

Scientific Consultant

Prof Dr Habil Andrii BIELIATYNSKYI (National Aviation University (Ukraine), Transport Engineering – 03T).

The Dissertation Defense Council of Scientific Field of Transport Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Habil Marijonas BOGDEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T).

Members:

Prof Dr Žilvinas BAZARAS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – 03T),
Prof Dr Alfredas LAURINAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T),
Prof Dr Habil Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T),
Prof Dr Sc Juris SMIRNOVS (Riga Technical University, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of Transport Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 27 May 2013**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.
Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 26 April 2013.
A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Internet website http://dspace.vgtu.lt and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

ISBN 978-609-457-472-6
© VGTU Press TECHNIKA, 2013
© Kateryna Krayushkina, 2013
ekrayushkina@yandex.ua

Аннотация

В последнее время, в связи с увеличением стоимости дорожно-строительных материалов, актуальной задачей стало широкое применение местных материалов. Наиболее широкомасштабными местными материалами в Украине являются шлаки черной и цветной металлургии, которые применяются в дорожном строительстве. Поэтому определение значений транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог с асфальтобетонным покрытием со шлаковыми материалами и прогнозирование изменений этих показателей в процессе эксплуатации необходимо и актуально.

Для достижения этой цели обоснованы транспортно-эксплуатационные показатели, характеризующие работу покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами, разработаны математические модели динамики изменения этих показателей дорог, проведены экспериментальные исследования для оценки изменения транспортно-эксплуатационных показателей в процессе нормативного срока эксплуатации, проведены расчеты для прогнозирования времени изменения транспортно-эксплуатационных показателей дорог из асфальтобетона со шлаковыми материалами и оценки их работы в зимний период эксплуатации дорог.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые были установлены факторы, влияющие на изменение транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дороги из асфальтобетонов со шлаковыми материалами в период эксплуатации, разработаны две математические модели, одна из которых описывает взаимодействие подсистемы «Дорога–Автомобиль–Среда» в течение всего периода эксплуатации, а другая – «Среда–Дорога» – в зимний период эксплуатации в процессе формирования зимней скользкости. Определена сила сцепления льда с поверхностью покрытий из асфальтобетона со шлаковими материалами.

Практический результат работы состоит в получении математических моделей, которые могут быть инструментом для разработки рекомендаций по ремонту и эксплуатационному содержанию дорог, а также для создания програмного обеспечения по прогнозированию транспортно-эксплуатационного состояния асфальтобетонных покрытий. Результаты исследований внедрены Службой автомобильных дорог в Донецкой области Украины, а также в учебном процессе Национального авиационного университета при дипломном проектировании и выполнении научных работ студентов.

Reziumė

Pastaruoju metu, išaugus kelių statyboje naudojamų medžiagų kainoms, aktualu plačiau naudoti vietines medžiagas. Ukrainoje vieni iš labiausiai paplitusių vietinių medžiagų, tinkamų kelių statybai, yra juodosios ir spalvotosios metalurgijos šlakai. Todėl būtina ir aktualu nustatyti automobilių kelių asfalto dangų su šlakais automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių reikšmes bei prognozuoti šių rodiklių pokyčius eksploatacijos metu.

Norint pasiekti šį tikslą buvo nustatyti automobilių transporto ir kelių eksploataciniai rodikliai, apibūdinantys asfalto dangų su šlaku būklę, sukurti šių kelio rodiklių dinamikos pokyčių ir klimato veiksnių įtakos, eksploatuojant dangą žiemos metu, matematiniai modeliai. Atlikti eksperimentiniai tyrimai, kuriais įvertinti automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių pokyčiai normatyviniu eksploatacijos metu, taip pat slidumo susidarymo žiemą ant automobilių kelių asfalto dangų su šlaku ypatybės, atlikti asfalto dangų su šlaku kelių automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių pokyčio prognozės skaičiavimai, eksploatuojant kelius žiemą.

Mokslinis darbo naujumas tas, kad pirmą kartą buvo nustatyti veiksniai, darantys poveikį asfalto dangos su šlakais automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių pokyčiams eksploatacijos metu. Buvo sukurti du matematiniai modeliai, iš kurių vienas apibūdina posistemio „kelias–automobilis–aplinka“ sąveiką visą eksploatacijos laikotarpį, kitas – „aplinka–kelias“, apibūdinantis aplinkos ir kelio sąveiką eksploatuojant žiemą, kai kelio paviršius slidus. Nustatyta ledo ir asfalto dangos su šlakais paviršių sukibimo jėga.

Praktinis darbo rezultatas – sukurti matematiniai modeliai, kurie galėtų būti taikomi rengiant kelių remonto ir techninės priežiūros rekomendacijas bei programinę įrangą asfalto dangų eksploatacinei būklei prognozuoti.

Tyrimo rezultatus įdiegė Donecko srities Automobilių kelių tarnyba. Tyrimo rezultatai naudojami studijų procese rengiant studentų baigiamuosius darbus ir atliekant mokslinius tyrimus Nacionaliniame aviacijos universitete (Ukraina).

Abstract

Recently, due to the increased cost of road construction materials, a widespread use of local materials can be treated as an urgent task. The slags of ferrous and nonferrous metals as local materials in Ukraine are the most widely used in road construction. Therefore, determination of road-service qualities of roads with asphalt pavement constructed of slag materials and prediction of changes in these parameters during operation is necessary and important.

To achieve this goal the following research studies have been conducted:

- road–service qualities have been validated that characterize the behavior of asphalt pavement constructed of slag materials,
- mathematical models of the dynamics of these road indicators change and the impact of weather and climatic factors on the operation of pavements in winter have been developed,
- pilot studies to assess changes in road–service qualities during normative period service and the features of formation of winter slipperiness on roads with asphalt pavement constructed of slag materials have been fulfilled,
- calculations have been made to predict the time of service–riding qualities change for the roads with asphalt pavements constructed of slag materials and evaluation of their work during winter operation of roads have been conducted.

Scientific novelty of the work lies in the fact that for the first time the factors affecting the change in service-riding qualities of roads with asphalt pavement constructed of slag material during operation were determined; two mathematical models were developed, one of which describes the interaction of the subsystem 'Road–Car–Environment' throughout the whole operation cycle, and another one 'Environment–Road' describes winter operation during the formation of winter slipperiness with the definition of cohesion strength of ice with the surface of asphalt concrete pavement constructed of slag materials.

The practical result lies in obtaining mathematical models that can be the tool in the development of recommendations for repair and operational maintenance of roads, as well as for creating software for forecasting riding qualities of asphalt pavements.

The research results were introduced by the State Road Administration in the Donetsk region, as well as in the educational process at the National Aviation University during diploma designing and performing the research works by the students.

Обозначения

Символы

a – параметр зависящий от типа покрытия и группы расчетной нагрузки, МПа;

$a_{ср}$ – среднее значение ускорения на всем рассматриваемом участке;

a_m и b_m – параметры уравнения определенные на основе экспериментальных исследований;

A – среднесуточная интенсивность движения на i–том подходе к пересечению;

b – параметр, который характеризует влияние повторяемости нагрузок, МПа;

B – ширина проезжей части, м;

B_j – расчетное значение уравнения регресии;

c, d – эмпирические коэффициенты;

D – расчетный диаметр отпечатка колеса, 33 см;

E – модуль упругости дорожной одежды, МПа;

$E_{\min}$ – минимальный модуль упругости, МПа;

$E_{тр}$ – необходимый модуль упругости дорожной одежды, на который она запроектирована;

$E_{фл}$ – модуль упругости дорожной конструкции в контрольной точке в данный момент времени, МПа;

i – продольный уклон, ‰;

g_3 – средние экономические затраты, вследствие одного отчетного ДТП в зимний период, грн;

K – количество деформаций, которые влияют на скорость, %;

$K_{зп}^{дор}$ – минимально допустимое значение коэффициента запаса прочности дорожной одежды;

$КП_н$ – нормативный комплексный показатель транспортно-эксплуатационного состояния дорог;

$K_Г$ – эмпирический коэффициент, зависящий от вида грунта земляного полотна в контрольной точке, принят $K_Г = 2{,}15$ – для суглинков, супесков пылеватых;

L – длина участка дороги, м;

m – набор параметров, описывающих конструкцию дорожной одежды и прочностные свойства использованных материалов;

$M^*(x)$ – математическое ожидание;

N – интенсивность движения, авт/час;

$N_ч$ – фактическая часовая интенсивность движения, авт/час;

$N_{пр}$ – интенсивность движения расчетных автомобилей на последний год эксплуатации конструкции, авт./сут;

N_c – суммарная интенсивность движения, приведенная к расчетной нагрузке группы А, авт.;

$S\{y\}$ – среднее квадратическое отклонение;

Q – скрытая теплота плавлення льда, кДж/кг;

$Q_{трад.}$ и $Q_{шлак}$ – общие расходы соли на традиционном и шлаковом асфальтобетонном покрытии, т;

q – плотность теплового потока в конструкции, Вт/м^2;

q_i – норма расхода противогололедного материала, г/м^2;

q_n – интенсивность падающего на покрытие излучения, Вт/м^2;

$R(t)$ – усередненная высота макрошероховатости, мм;

R_n – тепловое сопротивление, характеризующее теплообмен покрытия с воздухом (м^2·К)/Вт;

$\sum R_x$ – тепловое сопротивление слоев, расположенных выше глубины x, (м^2·К)/Вт;

$P_в$, $P_{сух}$ – разрывная нагрузка;

t – прогнозированный срок службы дорожной одежды, лет;

T – количество дней, в течение которых проводится учет числа ДТП;

$T_n(t)$ – температура дорожного покрытия, °С;

U – показатель тяжести последствий ДТП;

v – набор параметров, описывающих влияние погодно-климатических факторов;

$v_{фmax}$ – максимальная фактическая скорость движения, км/час;

$v_р$ – расчетная скорость движения, принятая соответственно нормативным документам, км/час;

V_i – количество участников ДТП, зарегистрированных за T дней;

V – среднесуточная интенсивность движения на отрезке дороги за год;

Z – количество происшествий в год;

$W_ф$, $W_р$ – измерянная и расчетная относительная влажность земляного полотна в период проведения испытаний;

α – коэффициент, учитывающий влияние интенсивности движения;

β – коэффициент, учитывающий состав транспортного потока;

ρ – плотность материала, кг/м^3;

λ – теплопроводность, Вт/м К;

H_ϕ – граница фазового перехода, м;

ρ_n – коэффициент поглощения дорожным покрытием радиации;

α – коэффициент теплообмена, Вт/(м^2·К);

σ – среднеквадратическое отклонение случайной величины;

$\overline{y(t)} = \{E_\phi(t), S(t), k_{си}(t), V(t)\}$ – вектор внешних параметров подсистемы;

$F_{Д-А-С}$ – закон функционирования подсистемы;

$\overline{v(t)} = \{v_1(t), v_2(t), v_3(t)\}$ – вектор действия внешней среды (погодно-климатические параметры);

$\overline{d(t)} = \{m_1, m_2, E_0, S_0, R_0\}$ – вектор собственных параметров подсистемы (дорожные параметры);

$\overline{h(t)} = \{N(t), N_p(t), S_{tp}(t)\}$ – вектор собственных параметров подсистемы (транспортные параметры);

$\overline{y'(t)} = \{S_p\}$ – вектор, компонентами которого есть состояние покрытия автомобильной дороги в зимний период;

$F_{С-Д}$ – закон функционирования подсистемы;

$\overline{v'(t)} = \{T(t), v_1'(t), v_2'(t)\}$ – вектор действия внешней среды (метеорологические параметры);

$\overline{d'(t)} = \{m_1', m_2', ..., m_5'(t), T'_n(t)\}$ – вектор собственных параметров подсистемы (дорожные параметры).

Сокращения

АБДД «Дорога» – автоматизированный банк дорожных данных;

ДТП – дорожно-транспортное происшествие;

МАДИ – Московский автомобильно-дорожный институт;

ММК – Макеевский металлургический комбинат;

ПГМ – противогололедные материалы;

ТЭП – транспортно-эксплуатационные показатели;

ХНАДУ – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет;

DAT – дата наблюдения;

T1 – время окончания перехода температуры воздуха от положительных значений к отрицательным;

T2 – время окончания перехода температуры воздуха от отрицательных к положительным значениям;

TEM – температура воздуха, измененная на протяжении всего времени перехода температуры с интервалом 3 часа;

TMIN – минимальная температура воздуха;

TMAX – максимальная температура воздуха, с которой началось снижение;
GRAD – скорость понижения температуры (температурный градиент).

Определения

Автомобильная дорога – инженерное сооружение, предназначенное для движения автомобилей. Основными элементами являются: земляное полотно, дорожная одежда, проезжая часть, обочины, искусственные и линейные сооружения, и все виды обстановки.

Асфальтовый бетон – монолит, который образуется после остывания до температуры окружающей среды, уплотненной асфальтобетонной смеси.

Битумы нефтяные – органическое вяжущее, представляющее собой смесь высокомолекулярных углеводородов нефтяного происхождения и их производных, содержащих кислород, серу, азот и комплексные соединения металлов. Состоят из асфальтенов и мальтенов (смолы и масла). Различают вязкие и жидкие битумы. По назначению различают битумы строительные, кровельные, дорожные.

Дорожная одежда – одно- или многослойная конструкция проезжей части автомобильной дороги, которая принимает нагрузки от транспортных средств и передает их на грунт земляного полотна.

Интенсивность движения – количество автомобилей, проходящих через определенное сечение дороги в единицу времени (за сутки или за один час).

Керн – образец (проба) материала в виде цилиндра, извлеченный из слоя (или нескольких слоев) дорожной конструкции без разрушения структуры с помощью специальной установки – керноотборника. Керн предназначен для определения свойств материала в конструктивном слое (толщины слоев, плотности, коэффициента уплотнения, влажности).

Межремонтный срок службы дорожной одежды – календарный срок (период), в течение которого происходит снижение прочности конструкций дорожной одежды до уровня, предельно допустимого по условиям эксплуатации (с учетом интенсивности и состава движения).

Модуль основности шлаков $\left(M_o = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} \right)$ – характеристика активности металлургических шлаков и устойчивости их при известковом распаде. Определяют как отношение содержания в шлаке основных окислов к содержанию кислых. При $M_o < 1$ шлаки относятся к кислым и не подвержены известковому распаду; при $M_o > 1$ шлаки относятся к основным и склонны к известковому распаду.

Нежесткая дорожная одежда – дорожно-строительная конструкция, которая содержит слои, прочность которых зависит от температуры, влажности и срока действия нагрузки.

Отходы металлургической промышленности – шлаки, получаемые при переработке руд и сжигании топлива, флюсы, не используемые при доменном производстве.

Покрытие – верхняя часть дорожной одежды, которая непосредственно принимает на себя действие колес транспортных средств и атмосферных факторов.

Поверхностная обработка – защитный слой, который устраивается на поверхности проезжей части для повышения шероховатости и износостойкости покрытия.

Прочность дорожной одежды – свойство дорожной одежды сохранять сплошность своей поверхности (отсутствие трещин) и ровность в допустимых пределах, под воздействием многократно повторяющихся нагрузок от движущегося транспорта и погодно-климатических факторов в течение срока службы.

Расчетная скорость движения – граничная безопасная скорость движения легкового одиночного автомобиля, которая допускается для дороги определенной категории, при условии обеспечения его устойчивости на сухом или влажном чистом покрытии и достаточного расстояния видимости.

Теплопроводность – процесс распространения тепла в телах, происходящий без перемещения вещества.

Транспортно-эксплуатационные показатели – ряд параметров, определяющих технический уровень дороги и ее эксплуатационные возможности. Основными показателями являются: скорость, интенсивность и состав движения, пропускная и провозная способности, уровень аварийности, качество дорожного покрытия, время сообщения, себестоимость перевозок автомобильным транспортом и др; Шлаки металлургические – побочный продукт и отходы, получаемые в черной и цветной металлургии при выплавке металлов из руд, в процессах передела чугуна в сталь, при выплавке чугуна в вагранках и т. п. Шлаки, полученные при выплавке стали из чугуна в различных печах, называют сталелитейными, а при выплавке руд цветных металлов (медные, никелевые и др.) – шлаками цветной металлургии.

Žymėjimai

Simboliai

a – parametras, priklausantis nuo dangos tipo ir skaičiuotinos apkrovos grupės, MPa;
a_m, b_m – lygties parametrai, gauti eksperimentiniais tyrimais;
a_{cp} – vidutinė pagreičio reikšmė visame nagrinėjamame ruože;
A – vidutinis dienos eismo intensyvumas i-tojoje sankryžos prieigoje;
b – parametras, apibūdinantis apkrovų dažnio poveikį, MPa;
B – kelio važiuojamosios dalies plotis, m;
B_j – regresijos lygties skaičiuojamoji reikšmė;
c, d – empiriniai koeficientai;
D – rato žymės skaičiuojamasis skersmuo, 33 cm;
E – kelio dangos tamprumo modulis, MPa;
E_{min} – minimalus elastingumo modulis, MPa;
E_{mp} – dangos elastingumo modulis, kuriam jis yra suprojektuotas;
$E_{фл}$ – kelio konstrukcijos elastingumo modulis patikros vietoje duotu laiku, MPa;
i – išilginis nuolydis, ‰;
$g_З$ – vieno įskaitinio kelių eismo įvykio vidutinės ekonominės išlaidos žiemą, grivinomis;
K – deformacijų, darančių įtaką greičiui, skaičius, %;
$K_{зп}^{дор}$ – kelio dangos patvarumo atsargos koeficiento mažiausiai galima reikšmė;
$КП_н$ – normatyvinis eksploatacinės būklės keliuose kompleksinis rodiklis;

$K_Г$ – empirinis koeficientas, priklausantis nuo sankasos grunto tipo patikros vietoje; priemolio, dulkinio priesmėlio $K_Г$ = 2,15;

L – kelio atkarpos ilgis, m;

m – rinkinys parametrų, apibūdinančių kelio dangos konstrukciją ir naudojamų medžiagų mechanines savybes;

$M^*(x)$ – matematinė viltis;

N – eismo intensyvumas, aut./val.;

$N_ч$ – faktinis valandinis eismo intensyvumas, aut./val.;

$N_{пр}$ –ataskaitinių automobilių eismo intensyvumas praėjusiais konstrukcijos eksploatavimo metais, aut./parą;

N_c – bendras eismo intensyvumas, sumažintas iki skaičiuojamosios A grupės apkrovos; aut.;

$S\{y\}$ – vidutinis standartinis / kvadratinis nuokrypis;

Q – paslėpta ledo tirpimo šiluma, kJ/kg;

$Q_{трад.}$ ir $Q_{шлак}$ – bendros druskos sąnaudos asfalto tradicinei dangai ir dangai su šlaku, t;

q – šilumos srauto tankis konstrukcijoje, W/m^2;

q_i – medžiagos prieš apledėjimą sunaudojimo norma, g/m^2;

q_n – spinduliuotės, krintančios į dangą, intensyvumas, W/m^2;

$R(t)$ – suvidurkintas makrošiurkštumo aukštis, mm;

R_n – šiluminė varža, apibūdinanti dangos šilumos mainus su oru (m^2 K)/W;

$\sum R_x$ – sluoksnių šiluminė varža, esanti aukščiau x gylio (m^2 K)/W;

$P_в$, $P_{сух}$ – įtrūkimo apkrova;

t – prognozuojama kelio dangos eksploatavimo trukmė, metai;

T – dienų skaičius, kuriomis atliekama kelių eismo įvykių skaičiaus apskaita;

$T_n(t)$ – kelio dangos temperatūra, C;

U – kelių eismo įvykių sunkumo rodiklis;

v – parametrų, apibūdinančių klimatinių veiksnių įtaką, rinkinys;

$v_{фmax}$ – maksimalus faktinis eismo greitis, km/h;

$v_р$ – projektinis greitis, patvirtintas normatyviniuose dokumentuose, km/h;

V_i – užregistruotų kelių eismo įvykių, nutikusių per T dienas, dalyvių skaičius;

V – vidutinis paros eismo intensyvumas kelio ruože per metus;

Z – eismo įvykių skaičius per metus;

$W_ф$, $W_р$ – sankasos matuojama ir apskaičiuojama santykinė oro drėgmė tyrimo metu;

α – koeficientas, įvertinantis eismo intensyvumo įtaką;

β – koeficientas, įvertinantis eismo srauto transporto sudėtį;

ρ – medžiagos tankis, kg/m^3;

λ – šilumos laidumas, W/m K;

$H_ф$ – fazės perėjimo riba, m;

ρ_n – kelio dangos spinduliuotės sugerties koeficientas;

α – šilumos perdavimo koeficientas, W/(m^2 · K);

σ – vidutinis kvadratinis atsitiktinio kintamojo nuokrypis;

$\overline{y(t)} = \{E_ф(t), S(t), k_{сц}(t), V(t)\}$ – posistemio išorinių parametrų vektorius;

$F_{Д–А–С}$ – posistemio veiklos dėsnis;

$\overline{v(t)} = \{v_1(t), v_2(t), v_3(t)\}$ – išorinės aplinkos vektorius (klimato parametrai);

$\overline{d(t)} = \{m_1, m_2, E_0, S_0, R_0\}$ – posistemio savųjų parametrų vektorius (eismo parametrai);

$\overline{h(t)} = \{N(t), N_p(t), S_{tp}(t)\}$ – posistemio savųjų parametrų vektorius (transporto parametrai);

$\overline{y'(t)} = \{S_p\}$ – vektorius, kurio komponentai yra automobilių kelio dangos būklė žiemos metu;

$F_{C–Д}$ – posistemio funkcionavimo dėsnis;

$\overline{d'(t)} = \{m_1', m_2', ..., m_5'(t), T'_n(t)\}$ – išorinės aplinkos vektorius (meteorologiniai parametrai);

$\overline{d'(t)} = \{m_1', m_2', ..., m_5'(t), T'_n(t)\}$ – posistemio savųjų parametrų vektorius (kelių parametrai).

Santrumpos

АБДД «Дорога» – automatizuotas kelių duomenų bankas „Kelias“;
ДТП – kelių eismo įvykis;
МАДИ – Maskvos automobilių ir kelių institutas
ММК – Makejevkos plieno gamykla;
ПГМ – medžiagos prieš apledėjimą;
ТЭП – automobilių transporto ir kelių eksploataciniai rodikliai;
ХНАДУ – Charkovo nacionalinis automobilių ir kelių universitetas;
DAT – stebėjimo data;
T1 – oro temperatūros virsmo iš teigiamų reikšmių į neigiamas pabaigos laikas;
T2 – oro temperatūros virsmo iš neigiamų reikšmių į teigiamas pabaigos laikas;
TEM – oro temperatūra, keičiama visą temperatūros virsmo laiką intervalu kas 3 val.;
TMIN – minimali oro temperatūra;
TMAX – maksimali temperatūra, nuo kurios ji pradėjo mažėti;
GRAD – temperatūros mažėjimo greitis (temperatūros gradientas).

Sąvokos

Automobilių kelias – inžinerinis statinys, skirtas automobilių eismui. Pagrindinės sudedamosios dalys: sankasa, danga, grindinys, bordiūrai, dirbtiniai ir linijiniai statiniai, visų rūšių aplinka.

Asfaltas – monolitas, kuris susidaro atšalus sutankintam asfalto mišiniui iki aplinkos temperatūros.

Bitumai – organinis rišiklis, kuris yra naftos kilmės makromolekulinių angliavandenilių ir jų darinių mišinys, jo sudėtyje yra deguonies, sieros, azoto ir metalo

junginių mišinių. Sudarytas iš asfaltenų ir maltenų (dervos ir alyvos). Bitumai skirstomi į klampiuosius ir skystuosius. Pagal paskirtį skirstomi į statybos, stogų dangos, kelių bitumus.

Kelio danga – vieno ar kelių sluoksnių automobilių kelio dangos konstrukcija, kuriai tenka apkrovos nuo transporto priemonių, kurias ji perduoda kelio sankasos gruntui.

Eismo intensyvumas – transporto priemonių, pravažiuojančių nustatytu kelio ruožu vienu metu (per vieną parą arba per vieną valandą), skaičius.

Kernas – cilindro formos medžiagos pavyzdys (bandinys), specialiu įrenginiu – kerno atskyrikliu, ištraukiamas iš kelio konstrukcijos sluoksnio (arba kelių sluoksnių) nesugadinant struktūros. Kernas skirtas medžiagų savybėms nustatyti konstrukciniame sluoksnyje (sluoksnių storį, tankį, sutankinimo koeficientą, drėgmę).

Dangos eksploatacijos trukmė tarp remontų – kalendorinis laikotarpis (periodas), kurio metu vyksta kelio dangos konstrukcijos stiprio ir didžiausių leidžiamųjų eksploatavimo sąlygų (įskaitant judėjimo intensyvumo ir sudėties) lygio sumažėjimas.

Šlakų pagrindo modulis $\left(M_0 = (CaO + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3)\right)$ – metalurgijos šlakų klinčių aktyvumo ir tvarumo irimo charakteristika, nustatanti bazinių oksidų turinio ir kiekio santykį rūgščiame šlake. Kai $M_O < 1$, šlakai yra rūgštūs ir nepažeidžiami irstant kalkėms; kai $M_O > 1$, šlakai yra pagrindiniai ir linkę į kalkių irimą.

Nestandžioji kelio danga – kelių statybos konstrukcija, sudaryta iš sluoksnių, kurių stiprumas priklauso nuo temperatūros, drėgmės ir apkrovos veikimo trukmės.

Metalurgijos pramonės atliekos – šlakai, gaunami perdirbant rūdą ir deginant kurą, fliusus, nenaudojamus aukštakrosnėse.

Danga – viršutinė kelio dalis, kuriai tenka transporto priemonės ratų ir oro sąlygų poveikis.

Paviršiaus apdorojimas – apsauginis sluoksnis, išdėstomas ant kelio paviršiaus, siekiant didinti dangos šiurkštumą ir patvarumą.

Kelio dangos stipris – savybė išlaikyti dangos paviršiaus vientisumą / tęstinumą (be įtrūkių) ir lygumą neviršijant ribų, veikiant judančio transporto / eismo ir klimato veiksnių daugkart pasikartojančioms apkrovoms viso eksploatavimo / naudojimo metu.

Projektinis greitis – vieno lengvojo automobilio saugus greičio riba, kuri yra leidžiamoji tam tikrai kelio kategorijai, atsižvelgiant į jo stabilumą, esant sausam arba šlapiam paviršiui ir pakankamam matomumo atstumui.

Šilumos laidumas – šilumos sklidimas kietuosiuose kūnuose, vykstantis materijai nejudant.

Transporto eksploataciniai rodikliai – keletas parametrų, lemiančių kelio techninį lygį ir jo eksploatacines galimybes. Pagrindiniai rodikliai: eismo greitis, intensyvumas ir sudėtis, pralaidumo ir vežimo pajėgumai, avaringumo lygis, kelio dangos kokybė, susisiekimo laikas, vežimo kelių transportu savikaina ir kiti.

Metalurginiai šlakai – šalutinis produktas ir atliekos, gaunamos lydant juodąsias ir spalvotąsias metalų rūdas, perdirbant ketų į plieną, lydant ketų šachtinėse lydymosi krosnyse ir pan. Šlakai, gauti lydant plieną iš ketaus įvairiose krosnyse, vadinami plieno liejimo, o lydant spalvotąsias metalų rūdas (vario, nikelio ir kt.) – spalvotaisiais metalurginiais šlakais.

Symbols

a – parameter depends on the type of pavement and the design load group, MPa;
a_{cp} – average acceleration value on the whole area under consideration;
a_m and b_m – parameters of the equation defined on the basis of experimental studies;
A – average daily traffic volume on *i-number* approach to the intersection;
b – a parameter that characterizes the effect of stress frequency, MPa;
B – width of a carriageway, m;
B_j – the calculated value of regression equation;
c, d – empirical coefficients;
D – the design value of the diameter of a wheel print, 33 cm;
E – modulus of elasticity of pavement, MPa;
$E_{\min}$ – minimum modulus of elasticity, MPa;
E_{mp} – the required modulus of pavement for which it was designed;
$E_{фл}$ – modulus of elasticity of the road structure in the checkpoint at a definite time, MPa;
i – longitudinal slope, ‰;
g_3 – average economic cost of one reported road accident occurred in winter, UAH;
K – number of deformations affecting the speed,%;
$K_{зп}^{\text{дор}}$ – minimum permissible value of safety factor of the pavement;
$КП_и$ – standard complex index of riding qualities of the roads;

$K_Г$ – empirical coefficient depending on the type of subgrade at the checkpoint; adopted $K_Г$ = 2.15 - for loam, dust loamy sand;

L – length of the road sector, m;

m – a set of parameters describing the structure of the pavement and strength properties of the materials used;

$M^*(x)$ – mathematical expectation;

N – traffic volume, vehicles/ hour;

$N_ч$ – actual hourly traffic volume, vehicles / hour;

$N_{пр}$ –traffic value of the calculated vehicles during the last year of the structure operation, vehicles /day;

N_c – total traffic volume, reduced to the design load of the group A, vehicles;

$S\{y\}$ – standard squared deviation;

Q – latent ice melting heat, kJ / kg;

$Q_{трад.}$ and $Q_{шлак}$ – total salt consumption on the traditional and slag asphalt pavement, t;

q – heat flow density in the structure, Wt/m^2;

q_i – consumption rate of de-iceing material, g/m2;

q_n – intensity of the incident radiation on the pavement, Wt/m^2;

$R(t)$ – average height of macro-roughness, mm;

R_n – thermal resistance which characterizes heat exchange between the pavement and air (m^2·K)/ Wt;

$\sum R_x$ – thermal resistance of the layers located above the depth x, (m^2·K) / Wt;

$P_в$, $P_{сух}$ – breaking load;

t – predicted service life of the pavement, in years;

T – the number of days during which the number of accidents is accounted;

$T_n(t)$ – temperature of the road surface, ° C;

U – severity rate of road accidents;

v – set of parameters describing the influence of climatic factors;

$v_{ф\max}$ – actual maximum speed, km / h;

v_p – the design speed adopted in accordance with the regulations, km /h;

V_i – number of participants involved in road accidents recorded during T days;

V – average daily traffic on the road section during the year;

Z – number of accidents per year;

$W_ф$, W_p – measured and calculated relative humidity of subgrade at the time of testing;

α – coefficient taking into account the influence of traffic volume;

β – coefficient taking into account the composition of traffic flow;

ρ – density of the material, kg/m^3;

λ – thermal conductivity, Wt/m K;

$H_ф$ – boundary of the phase transition, m;

ρ_n – coefficient of radiation absorption by the road surface;

α – heat transfer coefficient, Wt/(m^2·K);

σ – standard mean-square deviation of a random variable;

$\overline{y(t)} = \{E_ф(t), S(t), k_{си}(t), V(t)\}$ – vector of external parameters of the subsystem;

$F_{Д-А-С}$ – the law of the subsystem operation;

$\overline{\nu(t)} = \{\nu_1(t), \nu_2(t), \nu_3(t)\}$ – vector of external environment (weather and climatic parameters);

$\overline{d(t)} = \{m_1, m_2, E_0, S_0, R_0\}$ – vector of inherent parameters of the subsystems (road parameters);

$\overline{h(t)} = \{N(t), N_p(t), S_{tp}(t)\}$ – vector of inherent parameters of the subsystems (traffic parameters);

$\overline{y'(t)} = \{S_p\}$ – vector which components are pavement condition in winter;

$F_{С-Д}$ – the law of the subsystem operation;

$\overline{\nu'(t)} = \{T(t), \nu_1'(t), \nu_2'(t)\}$ – vector of environmental impact (meteorological parameters);

$\overline{d'(t)} = \{m_1', m_2', ..., m_5'(t), T'_n(t)\}$ – vector of inherent parameters of the subsystem (road parameters).

Abbreviations

АБДД «Дорога» – RDAB 'Road'– Road Data Automated Bank;
ДТП – Road Accident (RA);
МАДИ – Moscow Automobile and Road Institute (MADI);
ММК – Makeyevka Metallurgical Works (MMW);
ПГМ – De-Icing Materials (DIM);
ТЭП – Riding Qualities (RQ);
ХНАДУ – Kharkiv National Automobile and Road University (KhNADU);
DAT – date of observation;
T1 – time of completion of the temperature transition from positive to negative values;
T2 – time of completion of the temperature transition from negative to positive values;
TEM – air temperature changed in the course of time of temperature transition at the intervals of 3 hours;
TMIN – minimum air temperature;
TMAX – maximum air temperature value from which temperature reduction began;
GRAD – speed of temperature reduction (temperature gradient).

Definitions

A road is an engineering construction designed for vehicle traffic. The main elements of the road are: subgrade, pavement, roadway, curbs, artificial and linear structures and all kinds of road equipment.

Asphaltic concrete is a monolith which is formed after cooling to ambient temperature of compacted asphalt mixture.

Oil bitumen is an organic binder which is a mixture of high-molecular-weight petroleum hydrocarbons and their derivatives containing oxygen, sulfur, nitrogen and complex metal compounds. They are composed of pyrobitumen and petrolene (resins and oils). Among them viscous and liquid bitumen are distinguished. With regard to the function, the following kinds of bitumen are distinguished: construction, roofing and road bitumen.

Road pavement is one- or multi-layer structure of the road carriageway which takes loads from vehicles and transfers them to the subgrade.

Traffic volume is the number of vehicles passing through a certain cross-section of the road at a definite time (during one day or one hour).

Core is the sample (specimen) of material in the form of a cylinder, extracted from the layer (or from several layers) of the road structure without destruction of the structure using a special device – a core barrel. The core is designed to determine the material's properties in a structural layer (layer thickness, density, compaction factor, humidity).

Overhaul life of the pavement is a calendar time (period) during which the decrease in the strength of the pavement structure to the maximum permissible level of operating conditions (taking into consideration traffic volume and composition of traffic) occurs.

Lime factor of slag $\left(M_0 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} \right)$ is a characteristic of the slag's activity and sustainability at disintegration of lime. It is defined as the ratio of the content of basic oxides to acidic in the slag. When $M_0 < 1$ the slag is considered as an acidic and is not subject to the disintegration of lime; at $M_0 > 1$ the slag is considered as basic and is prone to disintegration of lime.

Non-rigid pavement is a road design structure that contains layers, the strength of which depends on temperature, humidity and duration of the load impact.

Waste of metallurgy industry is the slag, resulting from the processing of ores and burning fuel, fluxes that are not used in the blast furnace process.

Road surface is the upper part of the pavement which is directly affected by the vehicle wheels and weather conditions.

Surface treatment is a protective layer which is arranged on the surface of the roadway to improve roughness and durability of the road surface.

Strength of the road pavement is a property of the road pavement to maintain continuity of the surface (no cracks) and evenness within acceptable limits under the influence of repetitive loads from moving traffic and climatic factors during the life cycle.

The design speed is a limit safe speed of a single passenger car which is allowed for the road of a certain category, subject to its stability on dry or wet clear surfaces and sufficient visibility distances.

Thermal conductivity is the propagation of heat in solids occurring without movement of the matter.

Riding qualities is a number of parameters that determine technical level of the road and its operational capabilities. The main indicators are: speed, traffic volume and composition of traffic, carrying capacity and transportation capacity, accident rate, quality of the road surface, transportation time, cost of road transportation, etc.

Metallurgical slag is a by-product and waste from ferrous and non-ferrous metallurgy obtained at smelting from ore, in the process of recasting of iron into steel by melting iron in cupolas, etc. The slag resulted from smelting of steel from iron in different furnaces is called steel slag, and the slag resulted from smelting of non-ferrous metals (copper, nickel, etc.) is called non-ferrous slag.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ 1
Постановка задачи 1
Актуальность работы 2
Объект исследования 3
Цель диссертации 3
Задачи диссертации 3
Методы исследований 4
Научная новизна 4
Практическое значение полученных результатов 5
Апробация результатов диссертации 5
Структура диссертации 6

1. АНАЛИЗ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШЛАКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ 7
1.1. Исследование возможности использования шлаковых материалов в дорожных покрытиях 7
1.2. Исследования транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог 15
1.2.1. Обоснование транспортно-эксплуатационных показателей 15
1.2.2. Динамика изменения прочности дорожной одежды в период эксплуатации 17
1.2.3. Динамика изменения ровности асфальтобетонных покрытий 19

1.2.4. Динамика изменения коэффициента сцепления 22
1.2.5. Методы оценки скорости движения в процессе эксплуатации автомобильной дороги 24
1.3. Исследование влияния дорожных условий и погодно-климатических факторов на безопасность движения для выявления опасных участков дорог 29
1.3.1. Анализ существующих методов учета выявления участков концентрации дорожно-транспортных происшествий 29
1.3.2. Закономерности формирования участков концентрации дорожно-транспортных происшествий на дорожной сети 40
1.3.3. Влияние зимней скользкости на безопасность дорожного движения 44
1.4. Влияние погодно-климатических факторов на транспортно-эксплуатационное состояние дорожных покрытий 48
1.5. Существующие конструктивные мероприятия по улучшению транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог в зимний период 53
1.6. Выводы по первой главе и задачи исследования 58

2. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ 61
2.1. Математические модели, описывающие изменение транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог в период эксплуатации 61
2.2. Внешние и внутренние параметры подсистемы «Дорога–Автомобиль–Среда» (Д–А–С) 69
2.3. Внешние параметры подсистемы «Среда–Дорога» (С–Д) 71
2.4. Математические модели, описывающие динамику изменений транспортно-эксплуатационных показателей автомобильной дороги 74
2.5. Модель для определения скорости движения транспортного потока 77
2.6. Моделирование процессов образования зимней скользкости на дорожных покрытиях 79
2.7. Определение сцепления льда с поверхностью асфальтобетонных покрытий 85
2.8. Выводы по второй главе 87

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ПОКРЫТИЯМИ ИЗ АСФАЛЬТОБЕТОНА СО ШЛАКОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ 89
3.1. Проведение экспериментальных исследований 89
3.2. Описание участка автомобильной дороги 90
3.3. Методики и результаты экспериментальных исследований транспортно-эксплуатационных показателей покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами 95

3.3.1. Проведение визуальной оценки состояния дорожной одежды и исследования изменения прочности дорожной конструкции 96
3.3.2. Исследования процессов изменения ровности асфальтобетонного покрытия 101
3.3.3. Исследования процессов изменения коэффициента сцепления 104
3.4. Экспериментальные исследования транспортно-эксплуатационных показателей покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами 106
3.5. Методика проведения расчетных экспериментов 110
3.5.1. Моделирование скорости движения транспортных потоков 110
3.5.2. Моделирование состояния дорожных покрытий в зимний период 113
3.6. Определение сцепления льда с поверхностью асфальтобетонных покрытий 116
3.7. Экономическая эффективность использования асфальтобетона со шлаковыми материалами 120
3.8. Экономическая эффективность содержания дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами в зимний период эксплуатации 124
3.9. Итоговые значения параметров, влияющих на уровень транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог с разными типами асфальтобетонных покрытий 127
3.10. Выводы по третьей главе 130

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ 133

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 137

СПИСОК НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ 149

SUMMARY IN LITHUANIAN 151

SUMMARY IN ENGLISH 165

ПРИЛОЖЕНИЯ 179
Приложение 1. Статистическая обработка результатов вычислительных экспериментов 181
Приложение 2. Фрагмент журнала визуальной оценки состояния дорожной одежды на автомобильной дороге II технической категории 183
Приложение 3. Рекомендации по ремонту и эксплуатационному содержанию автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами 189
Приложение 4. Оценка динамики изменения транспортно-эксплуатационных показателей 197

Приложение 5. Результаты моделирования скорости движения транспортных потоков на автомобильных дорогах с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми и традиционными материалами.. 205
Приложение 6. Результаты моделирования процессов образования зимней скользкости 213
Приложение 7. Результаты измерений и оценка ровности асфальтобетонного покрытия со шлаковыми материалами 223
Приложение 8. Результаты измерений величины коэффициента сцепления покрытия на опытном участке автомобильной дороги II технической категории..... 227
Приложение 9. Согласие соавторов научных публикаций 231
Приложение 10. Копии публикаций автора 239

Turinys

ĮVADAS 1
Problemos formulavimas 1
Darbo aktualumas 2
Tyrimų objektas 3
Darbo tikslas 3
Darbo uždaviniai 3
Tyrimo metodika 4
Darbo mokslinis naujumas 4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė 5
Darbo rezultatų aprobavimas 5
Disertacijos struktūra 6

1. ŠLAKŲ NAUDOJIMO TIESIANT KELIUS MOKSLINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ. .. 7
1.1. Šlakų taikymo kelių dangoms galimybių tyrimas 7
1.2. Automobilių kelių automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių tyrimai 15
1.2.1. Automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių pagrindimas.... 15
1.2.2. Dangos stiprumo dinamikos pokyčiai eksploatacijos metu 17
1.2.3. Asfalto dangos lygumo dinamikos pokyčiai 19
1.2.4. Sukibimo koeficiento pokyčių dinamika 23
1.2.5. Eismo greičio vertinimo metodai eksploatuojant kelią 24
1.3. Avaringų kelio rupžų nustatymas tiriant kelio sąlygų ir klimato veiksnių įtaka eismo saugumui 29

1.3.1. Taikomų eismo įvykių koncentracijos ruožų nustatymo metodų analizė ... 29
1.3.2. Eismo įvykių koncentracijos ruožų susidarymo dėsningumai kelių tinkle ... 40
1.3.3. Plikledžio įtaka kelių eismo saugai ... 44
1.4. Klimatinių veiksnių įtaka automobilių kelių dangų eksploatacijos būklei ... 49
1.5. Konstrukcinės priemonės gerinančios automobilių kelių eksploatacijos būklę žiemą ... 53
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas ... 58

2. AUTOMOBILIŲ TRANSPORTO IR KELIŲ EKSPLOATACINIŲ RODIKLIŲ MODELIAVIMO METODAI ... 61
2.1. Matematiniai modeliai, apibūdinantys automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių pokyčius eksploatavimo metu ... 61
2.2. Išoriniai ir vidiniai posistemio „kelias–automobilis–aplinka“ (K–A–A) parametrai ... 69
2.3. Išoriniai posistemio „aplinka–kelias“ (A–K) parametrai ... 71
2.4. Matematiniai modeliai, apibūdinantys automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių pokyčių dinamiką ... 74
2.5. Transporto eismo srauto greičio nustatymo modelis ... 79
2.6. Plikledžio susidarymo ant kelių dangos modeliavimas ... 79
2.7. Ledo sukibimo su asfalto dangos paviršiumi nustatymas ... 85
2.8. Antrojo skyriaus išvados ... 87

3. AUTOMOBILIŲ KELIŲ DANGŲ SU ŠLAKU TRANSPORTO IR KELIŲ EKSPLOATACINIŲ RODIKLIŲ EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI ... 89
3.1. Eksperimentinių tyrimų atlikimas ... 89
3.2. Automobilių kelio ruožo aprašymas ... 90
3.3. Asfalto dangų su šlaku automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių eksperimentinių tyrimų metodai ir rezultatai ... 95
3.3.1. Kelio dangos būklės vizualus vertinimas ir kelio konstrukcijos stiprio tyrimas ... 96
3.3.2. Asfalto dangos lygumo pokyčių tyrimai ... 101
3.3.3. Sukibimo koeficiento pokyčių tyrimai ... 104
3.4. Asfalto dangos su šlaku automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių eksperimentiniai tyrimai ... 106
3.5. Skaitinių eksperimentų atlikimo metodika ... 110
3.5.1. Transporto eismo srautų greičio modeliavimas ... 110
3.5.2. Kelių dangų būklės žiemą modeliavimas ... 113
3.6. Ledo sukibimo su asfalto dangos paviršiumi nustatymas ... 116
3.7. Asfalto su šlaku naudojimo ekonominis efektyvumas ... 120
3.8. Asfalto dangų su šlaku priežiūros žiemą ekonominis efektyvumas ... 124
3.9. Galutinės parametrų reikšmės, darančios įtaką kelių su įvairiomis asfalto dangomis eksploatacinės būklės lygiui ... 127
3.10. Trečiojo skyriaus išvados ... 130

BENDROSIOS IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS 133

LITERATŪROS SĄRAŠAS 137

AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS . 149

SUMMARY IN LITHUANIAN 151

SUMMARY IN ENGLISH 165

PRIEDAI 179
1 priedas. Statistinis skaitinių eksperimentų rezultatų apdorojimas 181
2 priedas. II techninės kategorijos automobilių kelio ruožo vizualaus kelio dangos būklės 2010 m. vertinimo žurnalo fragmentas. 183
3 priedas. Pasiūlymai automobilių kelių asfalto dangų su šlaku remontui ir eksploatacinei priežiūrai 189
4 priedas. Automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių pokyčių dinamikos vertinimas 197
5 priedas. Transporto srautų judėjimo įpraistais automobilių keliais ir keliais su asfalto danga su šlakais greičio modeliavimo rezultatai 205
6 priedas. Slidumo susidarymo žiemą modeliavimo rezultatai 213
7 priedas. Asfalto dangų su šlaku lygumo matavimų rezultatai ir vertinimas 223
8 priedas. II techninės kategorijos automobilių kelio ruožo dangos sukibimo koeficiento dydžio matavimų rezultatai 227
9 priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje 231
10 priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos..... 239

Contents

INTRODUCTION 1
Formulation of the problem 1
Relevance of the work 2
The object of research 3
The aim of the thesis 3
The tasks of the thesis 3
The research methods 4
Scientific novelty 4
Practical significance of the obtained results 5
Approval of research results 5
Thesis structure. 6

1. ANALYSIS OF RESEARCH AND OBJECTIVES IN THE CONSTRUCTION OF ROADS 7
1.1. The possibility of using slag materials in road pavements 7
1.2. Research exploitation parametrs of the road 15
1.2.1. Substantiation exploitation parametrs 15
1.2.2. Dynamics of changes in the strength of the pavement during the operation 17
1.2.3. Dynamics of changes in the evenness of asphalt concrete pavement 19
1.2.4. Dynamics of changes in the coefficient of friction 22
1.2.5. Methods for assessing speed during operation of the road..... 24
1.3. Investigation of the effect of road conditions and climatic factors on traffic safety for the identification of hazardous road sections 29

1.3.1. Analysis of existing methods based on identified areas of concentration of traffic accidents 29
1.3.2. Regularities of the formation sites of concentration of accidents on the road network 40
1.3.3. Influence of winter slipperiness on road safety 44
1.4. The influence of climatic factors on the transportation and operational condition of road surfaces 49
1.5. Existing design measures to improve the transport and operating condition of roads in winter 53
1.6. Conclusions of Chapter 1 and a formulation tasks of the thesis 58

2. MODELLING METHODS OF EXPLOITATION PARAMETRS OF AUTOMOBILE ROADS 61
2.1. Mathematical models describing the change in exploitation parametrs roads during operation 61
2.2. External and internal parameters of the subsystem 'Road–Automobile–Environment' (R–A–E) 69
2.3. External parameters of the subsystem 'Environment–Road' (E–R) 71
2.4. Mathematical models describing the dynamics of change exploitation parametrs of the automobile road 74
2.5. Model to determine the rate of traffic flow 78
2.6. Numerical simulation of winter on slippery road surfaces 79
2.7. Determination of adhesion of ice to the surface of asphalt concrete pavement 85
2.8. Conclusions of Chapter 2 87

3. EXPERIMENTAL RESEARCHES TER AUTOMOBILE ROAD WITH PAVEMENT FROM ASPHALT CONCRETE WITH SLAG MATERIALS 89
3.1. Aim and objectives of the research 89
3.2. Description section of the automobil road 90
3.3. Methods and the results experimental research exploitation parametrs pavement of asphalt concrete with slag materials 95
3.3.1. Conduct a visual assessment of the road surface and research changes in the strength road construction 96
3.3.2. Research of processes of changes in roughness of asphalt concrete pavement 101
3.3.3. Research of processes of changes in the coefficient of friction 104
3.4. Experimental research of the exploitation parametrs pavement of asphalt concrete with slag materials 106
3.5. The methodology of the calculation experiment 110
3.5.1. Simulation speed traffic flow 110
3.5.2. Modeling of road pavement in winter 113
3.6. Determination of adhesion of ice to the surface of asphalt paveme 116
3.7. Economic efficiency of use asphalt concrete from slag materials 120
3.8. Economic efficiency of use asphalt concrete from slag materials road in winter 124
3.9. TER values of variuos type of automobile road pavements 127
3.10. Conclusions of Chapter 3 130

GENERAL CONCLUSIONS AND RECOMENDATIONS 133

REFERENCES 137

LIST OF PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION 149

SUMMARY IN LITHUANIAN 151

SUMMARY IN ENGLISH..... 165

ANNEXES ……..……..... 179
Annex 1. Statistical analysis of calculation experiments 181
Annex 2. Fragment from the log of visual assessment of the pavement on the road of the II-nd technical category in 2010 183
Annex 3. Guidelines for repair and operational maintenance of roads with asphalt pavements produced using slag materials 189
Annex 4. Evaluation of dynamic changes in riding qualities..... 197
Annex 5. Results of simulation of traffic flows speed on the roads with asphalt pavements produced using slag materials . 205
Annex 6. Results of simulation of winter slipperiness formation 213
Annex 7. Results of measurements and evaluation of smoothness of asphalt pavements produced using slag materials..... 223
Annex 8. Results of measurements of friction coefficient of pavement on the test section of the road of the II-nd technical category..... 227
Annex 9. The agreements of coauthors to presents publications for the dissertation defence 231
Annex 10. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation 239

Введение

Постановка задачи

В условиях постоянного развития автомобильного транспорта, сопровождаемого быстрым увеличением численности состава парка автомобилей, увеличением грузоподъемности и динамических характеристик автомобилей, эффективность работы транспортных средств в решающей степени зависит от транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог, которое оценивается прочностью, ровностью и шероховатостью. Основная роль здесь принадлежит асфальтобетонным покрытиям, которые защищают дорожную конструкцию от непосредственного влияния погодно-климатических факторов и обеспечивают расчетные скорости движения.

Асфальтобетонные покрытия хорошо зарекомендовали себя в наиболее сложный для дорожно-эксплуатационных служб зимний период, когда вследствии скользкости, образовывающейся на дорожном покрытии, имеют место значительное снижение скорости движения транспортных средств, перерывы в движении и увеличение количества ДТП, что отрицательно сказывается на экономических показателях государства.

Одной из приоритетных задач дорожной отрасли является повышение эксплуатационной надежности автомобильных дорог в разные периоды года. Основными путями решения этой задачи является применение

асфальтобетонных покрытий, которые обладают достаточной долговечностью, что позволяет обеспечить нормативные ТЭП (транспортно-эксплуатационные показатели) и усовершенствование конструкций дорожных одежд с целью уменьшения образования зимней скользкости.

Актуальность работы

В последнее время, в связи с увеличением стоимости дорожно-строительных материалов, наиболее актуальной задачей в дорожном строительстве стало широкое применение местных материалов. В восточных регионах Украины с развитой металлургической промышленностью наиболее распространенными местными материалами являются побочные продукты черной и цветной металлургии – шлаки. Многочисленными исследованиями определена возможность их использования для приготовления асфальтобетонных смесей.

Существующими нормативными документами, действующими в Украине, использование асфальтобетонов со шлаковыми материалами ограничивается для покрытий автомобильных дорог III технической категории и ниже. Это объясняется тем, что свойства асфальтобетонов со шлаковыми материалами как дорожно-строительных материалов рассматриваются в сравнении со свойствами асфальтобетонов на традиционных (гранитных минеральных) материалах и недостаточно уделяется внимания изучению эксплуатационных и деформационно-прочностных свойств асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами, особенно на автомобильных дорогах высших категорий.

В исследованиях, проведенных ранее, не отражен вопрос изменения ТЭП: прочности, ровности, шероховатости асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами в процессе длительной эксплуатации в зависимости от погодно-климатических условий, не изучены особенности образования зимней скользкости на их поверхности.

Поэтому, изучение динамики изменений ТЭП автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами является актуальной задачей.

Актуальность проблемы, которая рассматривается, объясняется и тем, что в районах с развитой металлургической промышленностью использование асфальтобетонов со шлаковыми материалами в покрытиях автомобильных дорог позволяет получить определенную экономию денежных средств при их строительстве и эксплуатации, а также помагает решить проблему использования отходов металургической промышлености.

Объект исследования

Объектом исследования в диссертационной работе является изменение во времени ТЭП автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковими материалами в зависимости от погодно-климатических, дорожных и транспортных факторов, а также процессы образования зимней скользкости на асфальтобетонных покрытиях со шлаковыми материалами.

Цель диссертации

Цель работы состоит в определении значений ТЭП автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами и прогнозировании изменений этих показателей в процессе эксплуатации под влиянием погодно-климатических факторов, интенсивности и грузонапряженности транспортных средств.

Задачи диссертации

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

1. Провести анализ ранее проведенных исследований и определить наиболее значимые факторы, влияющие на изменение ТЭП асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог на протяжении нормативного срока службы.
2. Разработать математическую модель для описания изменения ТЭП при длительном временном интервале в подсистеме «Дорога–Автомобиль–Среда» с определением погодно-климатических и дорожных показателей, влияющих на их изменение.
3. Разработать математическую модель для определения состояния покрытия на кототких временных интервалах в зимний период в подсистеме «Среда–Дорога» с определением метеорологических и дорожных показателей, влияющих на процессы образования зимней скользкости.
4. Усовершенствовать модель для исследования особенностей образования гололеда на дорогах с разными типами покрытий на основе уравнения нестационарной теплопроводности.

5. Провести экспериментальные исследования по определению основных закономерностей изменения ТЭП асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами от длительности влияния погодно-климатических факторов.
6. Провести расчет экономической эффективности от использования асфальтобетона со шлаковыми материалами.
7. Разработать рекомендации по ремонту и эксплуатационному содержанию автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами.

Методы исследований

В работе применяются научно-обоснованные методы математической статистики и регрессивного анализа при постоении математических моделей, адекватность которых подтверждена экспериментальными исследованиями, результатами внедрения и использованием современного оборудования.

Научная новизна

При решении поставленных задач в процессе исследований получены следующие научные результаты в области транспортной инженерии:

1. На основе экспериментально-теоретических исследований установлены факторы, влияющие на изменение основных ТЭП автомобильных дорог в период эксплуатации.
2. Впервые на основе теоретических и экспериментальных исследований поведения асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами с учетом уравнения нестационарной теплопроводности получена теоретико-эмпирическая зависимость ТЭП от действия погодно-климатических факторов и особенностей образования гололеда для разных типов асфальтобетона.
3. Впервые разработана математическая модель, описывающая взаимодействие подсистемы «Дорога–Автомобиль–Среда» на длительном временном интервале и позволяет определить изменение прочности дорожной одежды, ровности покрытия, коэффициента сцепления и скорости движения транспортных потоков.

4. Впервые разработана математическая модели, описывающая взаимодействие подсистемы «Среда–Дорога» на коротких временных интервалах в процессе формирования зимней скользкости.
5. Усовершенствована теория механизма определения теплофизиеских характеристик асфальтобетона со шлаковыми материалами с учетом адгезии льда к их поверхности в зимний период и процессов образования зимней скользкости на поверхности асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами.
6. Усовершенствованы процессы моделирования для прогнозирования изменения прочности дорожной одежды, ровности и коэффициента сцепления дорожных асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами.

Практическое значение полученных результатов

Практический результат работы состоит в получении математических моделей, которые могут быть инструментом для разработки рекомендаций по ремонту и эксплуатационному содержанию автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами, а также для создания алгоритма и программного обеспечения по прогнозированию ТЭП асфальтобетонных покрытий, позволяющих расширить область использования шлаковых материалов в дорожном строительстве.

Результаты исследований внедрены Службой автомобильных дорог в Донецкой области при строительстве «Подъездной автомобильной дороги к производственной базе ООО «Дорожное строительство Альтком», в Донецкой области Украины. При выполнении работ были использованы рекомендации по ремонту и эксплуатационному содержанию автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами, а также в учебном процессе Национального авиационного университета на кафедре реконструкции аэропортов и автодорог при дипломном проектировании и выполнении научных работ студентов.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты исследований отражены в 15 статьях, обсуждены и апробированы на:

- Международной научно-практической конференции «Проблемы надежности дорожных одежд городских улиц и дорог» (Минск, БНТУ, 30 июня–1июля 2005 г.);
- Международной научно-технической конференции «Современные технологии и материалы в дорожном хозяйстве» (Харьков, ХНАДУ, 16–17 ноября 2006 г.);
- III международная конференция «Архитектура и экология: проблемы городской среды» (Киев, НАУ, 15–16 ноября 2011 г.);
- 14-тая конференция молодых ученых Литвы «Наука – будущее Литвы» (Вильнюс, Литва, 2011 г.);
- 15-тая конференция молодых ученых Литвы «Наука – будущее Литвы» (Вильнюс, Литва, 2012 г.);
- II Международной научно-технической конференции «Научно-прикладные аспекты автомобильной и транспортно-дорожной отраслей» (Луцк, ЛНТУ, 30 мая–3 июня 2012 г.);
- Международной научно-технической конференции «Современные компьютерно-инновационные технологии проектирования, строительства, эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов» (Харьков, ХНАДУ, 24–26 октября 2012 г.).

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав основного текста с представленными результатами исследований, основных выводов, списка использованных литературных источников, списка публикаций по теме диссертации и 10 приложений. Объем диссертации состоит из 180 страниц, в том числе 35 таблиц и 43 иллюстрации.

1

Анализ научных исследований использования шлаковых материалов в строительстве автомобильных дорог

1.1. Исследование возможности использования шлаковых материалов в дорожных покрытиях

В данное время, при строительстве, реконструкции и ремонтах автомобильных дорог, увеличиваются объемы использования местных строительных материалов, в том числе и вторичных продуктов черной и цветной металлургии – шлаков. Они используются во всех слоях конструкций дорожной одежды, в том числе и как минеральный наполнитель для асфальтобетона при устройстве асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог всех категорий и значения. Поэтому актуальным становится вопрос изучения ТЭП автомобильных дорог, при строительстве которых данные материалы используются в конструктивных слоях, а также особенности их эксплуатации в разные периоды года.

Асфальтобетон со шлаковыми материалами – это искусственный строительный конгломерат, который представляет собой смесь разных

видов металлургических шлаков и битума, изготовленный при определенных технологических режимах, уложенный и уплотненный в верхних слоях дорожной одежды.

Исследованию возможности использования металлургических шлаков в асфальтобетоне посвящены работы многих ученых и автора: Белятынского, Краюшкиной (2012), Еремина (1995), Королева (1986), Расстегаевой (1970), Самодурова (1984), Юдиной (1995), Hushek *et al.* (2002), Kandhal *et al*. (1997), Li *et al*. (2012), Sivilevicius *et al.* (2011), Shen *et al.* (2009), Sofilid *et al.* (2011), Takahashi *et al*. (2011), Wang *et al*. (2011), Wu *et al.* (2007). В результате литературного анализа был рассмотрен достаточно широкий спектр металлургических шлаков. На основе изучения физико-механических свойств, доказана возможность использования разных типов металлургических шлаков для приготовления горячего и холодного асфальтобетонов.

Из всех видов шлаков черной и цветной металлургии, наиболее пригодными для дорожного строительства являются доменные шлаки, которые в меньшей степени склонны к разным видам распада. Шлаковые материалы с заданными свойствами получают путем регулирования скорости процесса охлаждения шлакового расплава. Скорость охлаждения определяет химическую, гидравлическую активность материала, его физико-механические свойства, структуру и минералогический состав, а также особенности взаимодействия с битумом в асфальтобетоне. При быстром охлаждении шлаковый расплав превращается в песок с размером зерен 0–2,0 мм, который обладает высокими свойствами гидравлического вещества. При медленном охлаждении шлакового расплава тепловая энергия, в основном, расходуется на процессы кристаллизации. Материал набирает высокую прочность, но в значительной степени теряет гидравлические вяжущие свойства.

Асфальтобетон со шлаковыми материалами, так же, как и асфальтобетон из традиционных материалов, разделяется на щебеночный (мелкозернистый, крупнозернистый) и песчаный. Как минеральная часть в щебеночном асфальтобетоне присутствует шлаковый щебень, песок (природный или шлаковый) и минеральный порошок. В песчаном асфальтобетоне, в основе минеральной части, присутствуют шлаковые, шлакопемзовые пески и гранулированные шлаки. Для приготовления асфальтобетона, с использованием шлаковых материалов, используются битумы, которые отвечают требованиям ДСТУ 4044. В зависимости от температуры укладки асфальтобетона со шлаковыми материалами, смеси бывают горячими и холодными.

Масштабные исследования, по определению физико-механических свойств асфальтобетона со шлаковыми материалами и внедрения его в

практику дорожного строительства, были проведены Гезенцвеем (1985), Королевым, Тулаевым (1986), Коганзоном (1997). Свойства песчаного асфальтобетона, приготовленного из гранулированных доменных шлаков, шлаковых и шлакопемзовых песков детально исследованы и проверены в производственных условиях Ковалевым (1991). Изучению свойств эмульсионно-минеральных смесей с использованием шлаковых материалов посвящены работы Ковалева (1991). Свойства холодных асфальтобетонных смесей, с использованием шлаковых материалов, детально изучались Ереминым (1987). Исследованию процессов структурообразования смесей, из гранулированного доменного шлака и вязкого битума при строительстве покрытий автомобильных дорог, посвящена работа Расстегаевой (1970).

Анализ литературы, выполненный Белятынским (2006), Сухоруковым (1989), Христолюбовым (1989), Юмашевым (1982), Sivilevicius *et al*. (2011), Peceliunas, Prentkovskis (2006), позволяет определить основные отличительные особенности асфальтобетона со шлаковыми материалами от асфальтобетона из традиционных материалов. Изучая асфальтобетон со шлаковыми материалами, все выше приведенные авторы отмечают следующее: сохраняя закономерности, присущие асфальтобетону из традиционных материалов, свойства асфальтобетона со шлаковыми материалами определяются типом шлака, его структурой и пористостью, от которых зависит характер его взаимодействия с битумом.

Высокая химическая активность шлаков и высокое содержание адсорбционных центров, в виде двух- и трехвалентных катионов Ca^{+2}, Mg^{+2}, Pe^{+2}, Pe^{+3}, приводит к образованию прочной системы битум–минеральный материал. При взаимодействии битума со шлаковыми материалами, физические и химические сорбционные связи, которые образовались, прочно удерживают пленку битума на поверхности минерального материала. Высокая пористость шлаковых материалов приводит, при объединении с битумом, к фильтрации вяжущего и его компонентов в середину зерен минерального материала. В процессе фильтрации, масла проникают по капиллярам в зерна на наибольшую глубину, смолы, вследствии меньшей подвижности и большей активности, проникают на меньшую глубину. Имея развитую пористую структуру, шлаковый щебень в асфальтобетоне способствует более полному переведению битума в структурированное состояние. При этом, за счет выборочной диффузии битума, происходит обогащение структурированного слоя асфальтенами. Выборочная фильтрация компонентов битума приводит к образованию более жестких и менее эластичных битумных пленок на поверхности шлакового заполнителя.

Взаимодействие битума со шлаковым заполнителем приводит к реализации физических, механических, химических, электростатических и

диффузионных процессов, в результате адгезионные связи на границе битум–минеральный материал, становятся прочными и стойкими к влиянию погодно-климатических факторов, как в момент объединения, так и во времени. Характер поверхности шлакового щебня, вязкость битума и его силы взаимодействия с минеральным материалом обеспечивают асфальтобетону высокие показатели угла внутреннего трения φ (от 40° до 50°), что превышает значение для асфальтобетона – приготовленного с использованием гранитного щебня (от 33° до 41°).

Баришполом (1997), Ереминым (2000) установлена зависимость показателей битумоемкости от структурно-текстурных признаков шлакового щебня: наибольшей битумоемкостью обладают шлаки пемзообразного строения с пористостью 69 %, затем шлаки капиллярно-пористого строения с пористостью 37 %, наименьшей битумоемкостью характеризуются шлаки с пористостью до 14 %.

Асфальтобетон со шлаковыми материалами имеет большее значение остаточной пористости и, соответственно, больший показатель водонасыщения, чем аналогичные составы на традиционных (гранитных) минеральных материалах. Причем, это следует рассматривать не как недостаток, а как особенность этого вида асфальтобетона. Показатель водонасыщения, так же как и битумоемкость, зависит от открытой пористости материала. Гезенцвей (1956), Ковалев (1991), Руденский (1992) сравнивая асфальтобетон со шлаковыми материалами с высокопористым асфальтобетоном из природных минеральных материалов, пришли к выводу о недостаточной стойкости их к действию воды, а также циклам замораживания – оттаивания. Но наблюдения за устроенными покрытиями из асфальтобетона со шлаковыми материалами и исследования, выполненные Ковалевым (1991), показали, что покрытие имеет высокую морозостойкость. Это объясняется особенностью пористости асфальтобетона из традиционных минеральных материалов и асфальтобетона со шлаковыми материалами. В последнем остаточная пористость, в основном, представлена замкнутыми порами. Исследования свойств песчаного асфальтобетона на основе шлакопемзового песка позволили Матвееву (1974) установить, что закрытая пористость создает жесткую структуру материала, коэффициент линейного расширения которого в 1,5 раза ниже, чем в асфальтобетоне из традиционных материалов. Это приводит к понижению температурного напряжения при резких изменениях температуры, и повышению морозостойкости и, следовательно, долговечности покрытий.

Особенностью асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами, в сравнении с традиционными – есть более длительный процесс их формирования. Руденским (1992) установлено, что

формирование покрытий из асфальтобетонных смесей со шлаковыми материалами происходит не сразу, а продолжается некоторое время. При интенсивности движения более 1 000 авт./сутки, формирование асфальтобетона на шлаковом песке заканчивается через 1–1,5 года, на гранулированных шлаках – через 2–5 лет с момента строительства. При этом, покрытия уже в начальной стадии эксплуатации имеют высокую сдвигоустойчивость и на них не наблюдается образование колей и наплывов. В процессе эксплуатации покрытия, при стабилизации структуры асфальтобетона, происходит уменьшение объема пор, увеличение плотности асфальтобетона, увеличение значения угла внутреннего трения. Наибольший прирост наблюдается в первый год, в последующие годы угол внутреннего трения практически не изменяется. Значение же внутреннего сцепления в асфальтобетоне со шлаковыми материалами неуклонно возрастает в результате укрепления коагуляционных структурных связей и необратимых процессов, которые происходят в битумной пленке.

Самодуровым (1975), Красиковым *et al*. (1998) при изучении асфальтобетона с гранулированными шлаками и шлакопемзовыми песками, установлены особенности приготовления, укладки и уплотнения асфальтобетона со шлаковыми материалами. Так, на основе масштабных исследований установленно, что температурный режим приготовления таких смесей, находится в пределах 110–130 °С, укладка в покрытие смесей на вязких битумах возможна при температуре 70–80 °С, а температура уплотнения находится в диапазоне 50–70 °С. Таким образом, асфальтобетон со шлаковыми материалами занимает промежуточное положение между горячим и холодным типом асфальтобетона.

Исследования, проведенные в США учеными Hunt, Boyle (2000), описывают, что в 1994 году в штате Орегон были построены экспериментальные участки для оценки использования шлака сталеплавильного производства в горячей асфальтобетонной смеси (HMAC). Исследования охватывают строительство и наблюдение, в течение пяти лет, за состоянием и ТЭП покрытия, устроенного из асфальтобетона, в состав которого входило 30 % шлака сталеплавильного производства. Производство асфальтобетона и строительство дорожного покрытия не представляет сложности, даже тогда, когда измельченный шлак сталеплавильного производства используется в качестве заполнителя. Если себестоимость единицы продукции асфальтобетонных смесей, модифицированных шлаками сталеплавильного производства, такая же, как и асфальтобетонных смесей из гранитных материалов, – общие проектные расходы могут увеличиться в связи с уменьшением удельной площади покрытия за счет использования более «тяжелой» смеси,

изготовленной с использованием шлака сталеплавильного производства. Для опытного участка для (HMAC), построенного на 30 % из шлака сталеплавильного производства, удельная площадь покрытия была на 15 % меньше, чем при использовании традиционной асфальтобетонной смеси типа «B».

Исследования, проведенные в Турции учеными Ahmedzade, Sengoz (2009), демонстрируют влияние использования шлака сталеплавительного производства в качестве минерального материала на свойства горячей асфальтобетонной смеси. Четыри различных типа асфальтобетонных смесей были использованы для подготовки образцов Маршалла, и определения оптимального содержания битума. Физико-механические характеристики всех смесей были оценены по стабильности по Маршаллу, модулю упругости при растяжении, определении предела прочности при растяжении. Образцы были исследованы на электрическую чувствительность. Было отмечено, что шлаки сталеплавительного производства, использующиеся в качестве минерального материала, улучшали физико-механические свойства асфальтобетонных смесей.

Исследования, проведенные иорданскими учеными, были предназначены для изучения эффективности использования минерального материала из шлака сталеплавильного производства для улучшения физико-механических свойств асфальтобетонных смесей. В Иордании существуют три основных сталелитейных завода. Побочные продукты этих заводов – шлаки сталеплавильного производства, складываются произвольно насыпью на открытых площадках, в результате чего возникают крупные экологические проблемы. Исследования начались с оценки токсичности, химических и физических свойств шлаков сталеплавильного производства. Затем 0 %, 25 %, 50 %, 75 % и 100 % количества известнякового минерального материала в асфальтобетонных смесях было заменено материалом из шлака сталеплавильного производства. Эффективность заполнителя шлака сталеплавильного производства оценивали по улучшению показателей прочности на растяжение, модуля упругости, сопротивления колееобразаванию, усталостной долговечности образцов асфальтобетона. Было установлено, что замена до 75 % количества крупного известнякового заполнителя заполнителем из шлака сталеплавильного производства (ЗШСП) улучшило физико-механические свойства асфальтобетонных смесей. Результаты также показали, что 25 %-я замена была оптимальным уровнем замены.

В исследованиях, которые осуществлялись американскими и австралийскими исследователями: Chaurand *et al.* (2007), оценивается никелированный шлак воздушного охлаждения с точки зрения его применения в дорожном строительстве в качестве заполнителя в горячей

асфальтобетонной смеси. Никелированный шлак воздушного охлаждения представляет собой жидкий побочный продукт производства никеля, который затвердивает при температуре окружающей среды. В программу лабораторных исследований, которые проводились для определения характеристик никелированного шлака воздушного охлаждения, входили испытания физических и механических свойств, петрографические исследования, и подбор состава горячей асфальтобетонной смеси.

Исследования, проведенные учеными из Омана, Asi *et al.* (2007), Hassan, Al-Jabri (2011), сообщают о лабораторном исследовании гранулированного медного шлака в качестве мелкого заполнителя в горячей асфальтобетонной смеси. Подбор состава смеси по Маршаллу проводился на различных смесях, содержащих до 40 % заполнителя – медного шлака. Испытания динамического модуля, как основного показателя свойств материала в Руководстве по проектированию дорожного покрытия с использованием механически–эмперического метода (ME–PDG), проводились на разных частотах (от 0,1 Гц до 16 Гц) и при различных температурах (от 25 °C до 60 °C). Были разработаны базовые кривые и коэффициенты сдвига для динамического модуля для контрольных смесей и шлакосодержащих смесей. Разработаны кривые сравнивались с прогнозирующей моделью по Witczak для 2 и 3 ME–PDG. Результаты показали снижение прочности по мере увеличения содержания шлаков в смесях по сравнению с контрольной смесью.

В итоге, заполнитель, в состав которого входит шлак сталеплавильного производства, благодаря своим физическим и химическим свойствам, – представляет собой на 100 % переработанный продукт, обладающий большим потенциалом в качестве замены природных заполнителей в дорожном строительстве. В большинстве работ, с использованием заполнителей из шлака сталеплавильного производства, сообщается, что асфальтобетонные смеси с его использованием, имеют более высокую пористость, адгезию с вяжущим, благодаря структуре поверхности и химическому составу, благоприятной форме частиц. Высокая поронепрерывность заполнителей из шлака сталеплавильного производства может повысить водонепроницаемость в асфальтобетонных смесях и улучшить сопротивление скольжению и аквапланированию, а адгезия с битумом может решить проблему проникания влаги в нижележащие слои дорожной одежды в связи с повреждением покрытия. Эти свойства способствуют повышению качества асфальтобетонных смесей и покрытий с их использованием, и уровню безопасности дорожного движения. Проведенные исследования также предполагают, что асфальтобетонные смеси, включающие заполнители из шлаков сталеплавильного производства, также могут повысить устойчивость к

колееобразованию и трещинообразованию. С экономической точки зрения, использование шлака сталеплавильного производства, в качестве заполнителя в дорожном строительстве, может снизить затраты на добычу и переработку природных минеральных материалов. Сталеплавильная промышленность также может снизить стоимость шлаков, предназначенных для переработки и утилизации огромного количества запасов шлака. В то время, как срок службы дорожного полотна может быть увеличен, расходы на техническое обслуживание покрытия могут также быть снижены, таким образом обеспечивая дополнительные средства для других проектов по разработке. Что касается влияния на сохранение окружающей среды, использование материалов из шлака сталеплавильного производства может по-разному непосредственно сократить как зависимость от природных заполнителей, так и количество проектов по добыче сырья. С другой стороны, включение шлака сталеплавильного производства в проекты дорожного строительства, может уменьшить площадь, которая используется для захоронения отходов.

Несмотря на положительные качества асфальтобетона со шлаковыми материалами, рядом авторов отмечается негативное влияние пористости шлакового щебня на свойства асфальтобетона. Выборочная диффузия летучих фракций битума в минеральный материал приводит к его старению в покрытии. Это увеличивает жесткость асфальтобетона, уменьшая его деформационные свойства. Прирост прочности покрытия во времени исследователями рассматривается как недостаток асфальтобетона со шлаковыми материалами, что приводит к появлению трещин на покрытии в зимнее время.

Для повышения трещиностойкости асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами в зимнее время рекомендуется использовать менее вязкие битумы, которые без уменьшения прочности асфальтобетона повысят его деформационную способность, и замедляет процессы старения.

Расстегаевой (1970) отмечено, что на структурно-механические свойства асфальтобетона со шлаковыми материалами, такие как увеличение прочности и модуля упругости, процессы окислительного старения битума не влияют отрицательно. Наличие в порах минерального материала летучих фракций битума, масел и смол способствуют в летнее время процессам регенерации битума в асфальтобетоне.

Таким образом, выполнив анализ научных работ многих авторов по использованию шлака как минерального материала для приготовления асфальтобетона разных типов, можно сделать вывод о том, что все работы были направлены на определение возможности использования шлаковых

материалов в верхнем слое дорожной одежды – покрытии. Изучались физико-механические свойства асфальтобетона, а также механизм взаимодействия битума со шлаковым материалом для определения оптимального состава асфальтобетона.

Были проведены наблюдения за опытными участками для изучения условий формирования покрытия и его трещиностойкости. Но исследования ТЭП автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами на протяжении нормативного срока эксплуатации и в разные сезоны года, отсутствуют. Не полностью раскрыт вопрос относительно определения характера и длительности изменения свойств асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами для прогнозирования ТЭП. Решение этих задач вызывает определенный интерес в связи с повышением требований к эксплуатационной надежности дорог и уровню безопасности дорожного движения.

1.2. Исследования транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог

1.2.1. Обоснование транспортно-эксплуатационных показателей

Транспортно-эксплуатационным состоянием автомобильных дорог называется соответствие основных геометрических параметров плана, продольного и поперечного профилей дороги установленным нормативным требованиям. Согласно исследованиям Sivilevičius *et al.* (2009), Miandoabchi, Farahani, (2011), Lazda, Smirnovs (2011), Sapragonas, Makaras (2011), Sapragonas, Dargužis (2011), Peceliūnas, Prentkovskis (2006), Santos *et al.* (2011), оценка транспортно-эксплуатационных свойств дорожной одежды и покрытия должна базироваться на определении соответствия проезжей части требованиям движения транспортных средств и способности сохранения этого соответствия на период эксплуатации.

При этом, показателями, которые характеризуют требования к состоянию проезжей части и должны соответствовать нормативным требованиям, являются следующие:

– прочность дорожной одежды;

– ровность поверхности покрытия;

– шероховатость покрытия и коэффициент сцепления колеса автомобиля с покрытием.

Состояние дороги определяется состоянием проезжей части (дорожной одежды и покрытия), состоянием земляного полотна и полосы отвода, наличием элементов инженерного обустройства дороги и информационного обеспечения движения, состоянием искусственных и водоотводных сооружений, уровнем обеспечения безопасности движения, уровнем загруженности проезжей части.

Такой ТЭП как прочность дорожной одежды нормируется согласно ДБН В.2.3-4, ВБН В.2.3-218-186 с учетом расчетной нагрузки, интенсивности и состава движения, типа покрытия, дорожно-климатической зоны, грунтово-гидрологических условий. Ровность покрытия и коэффициент сцепления по условиям обеспечения безопасности дорожного движения определяются по методике и нормируются согласно ДСТУ Б В.2.3-3, РВ.2.3-218-02071168-385 и ГСТУ 218.02070915-102. Значения параметров шероховатости и коэффициента сцепления колеса автомобиля с покрытием отображены в ДСТУ 3587 и определяются согласно требованиям ДСТУ Б В.2.3-3, ДСТУ Б В.2.3-8. Уровень загруженности проезжей части определяют как отношение фактической интенсивности движения к пропускной способности дороги согласно с П-Г.1-218-113. Таким образом, материал дорожного покрытия должен соответствовать заданым в нормативной литературе значениям ТЭП. Чем дольше эти ТЭП поддерживаются на допустимом (нормированном) уровне, тем данный материал лучше. Но вопрос влияния структуры и свойств слоев покрытия, а также вида минерального материала асфальтобетона на ТЭП дорог до настоящего времени исследованы недостаточно.

В случае использования в асфальтобетоне новых видов минеральных материалов, которые существенно отличаются по своим свойствам от традиционных, необходимо комплексное, всестороннее изучение не только их физических свойств, но и ТЭП в процессе службы дороги. Оценка состояния асфальтобетонных покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами в период эксплуатации дороги позволит обосновать необходимость их использования в дорожных покрытиях.

Для изучения особенностей эксплуатации автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами, как основные ТЭП, следует выбирать: прочность дорожной одежды, ровность покрытия и коэффициент сцепления. Как показатель, который отражает транспортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорог, принята скорость движения транспортного потока.

1.2.2. Динамика изменения прочности дорожной одежды в период эксплуатации

Одним из основных показателей транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги и ее работоспособности, является прочность дорожной одежды. Прочность дорожной одежды оценивается коэффициентом запаса прочности ($K_{зп}$), который определяется как отношение среднего фактического модуля упругости дорожной конструкции в расчетный период года ($E_ф$) к необходимому модулю упругости ($E_н$) при существующем движении по дороге. Прочность дорожной одежды считают достаточной, если ее фактический модуль упругости ($E_ф$), определенный в результате натурных исследований, превышает необходимый по типу покрытия и условиям движения ($E_н$), то есть для величины коэффициента запаса прочности $\left(K_{зп}\right)$, имеет место соотношение:

$$K_{зп} > K_{зп}^{\text{дор}} = 0{,}95 > 0{,}85 \text{ для дорог разных категорий,} \qquad (1.1)$$

где $K_{зп}^{\text{дор}}$ – минимально допустимое значение коэффициента запаса прочности дорожной одежды.

Методика оценки прочности с использованием разного оборудования, которое используют в Украине, достаточно детально изложена в нормативной литературе.

Фактическая прочность дорожной одежды изменяется на протяжении всего периода эксплуатации дороги. На характер развития деформаций существенно влияют нагрузки от движения транспортных средств, погодно-климатические условия, стабильность водно-теплового режима земляного полотна, прочностные свойства использованных дорожно-строительных материалов, качество строительства и уровень эксплуатации.

При высоких положительных температурах и тяжелом интенсивном движении транспорта появляется опасность образования пластических деформаций, которые сопровождаются уменьшением толщины слоя покрытия в одних местах и ее увеличением на соседних участках. На появление таких деформаций влияет цвет покрытия. Более темные покрытия за счет радиационного нагрева могут иметь температуру на 15–20 °С выше по сравнению с температурой воздуха. С этой точки зрения – более светлые покрытия, например, из асфальтобетона со шлаковыми материалами, нагреваются меньше, то есть меньше поддаются действию сдвиговых усилий.

Снижение прочности дорожной конструкции происходит и в результате возникновения на асфальтобетонном покрытии трещин, появление которых характерно, в основном, для холодного времени года –

зимой или при отрицательной температуре в весенний период. Вопросами динамики изменения прочности дорожной одежды занимались: Апестин (1986), Белятынский (2009), Бируля (1962), Зонов (1989), Ковалев (1991), Коганзон (2001), Красиков (1998), Марьяхин (1981), Сиденко, Михович (1976), Слободчиков (1987), Яковлев (2001), Antov *et al*. (2009), Dell'Acqua, Russo (2011), Deniz *et al*. (2010), Prentkovskis *et al*. (2007), Sivilevičius, Šukevičius (2007). Анализ работ этих авторов показывает, что процесс изменения модуля упругости дорожной одежды можно разделить на три этапа. Первый этап – формирование дорожной одежды после строительства, реконструкции или капитального ремонта, в процессе которого происходит доуплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожной одежды, повышается жесткость и распределительная способность монолитных слоев, незначительно повышается модуль упругости с последующей стабилизацией. На втором этапе происходит постепенное снижение прочности дорожной одежды под влиянием движения транспортных средств и погодно-климатических факторов, которое связано с процесами усталости, измельчением минерального материала и снижением распределительной способности конструктивних слоев. Существенно влияют на снижение прочности такие факторы как: появление трещин и износ покрытия. Этот процесс продолжается до тех пор, пока для прочности дорожной конструкции выполняется условие (1.1), после чего наступает третий этап резкой потери прочности, что характеризуется значительными деформациями на покрытии и в конструктивных слоях дорожной одежды. В этот период за счет активного взаимодействия колес автомобиля с неровным покрытием происходит быстрое развитие тех деформаций, которые уже существуют и появление новых. В весенний период происходит уплотнение грунта земляного полотна и резкое снижение прочности дорожной конструкции.

Апестиным (1977) была предложена математическая модель для описания процесса снижения значений модуля упругости дорожной одежды в пределах его нормативного срока службы $T_н$. Были получены теоретические зависимости для расчета значений снижения модуля упругости E_t в процессе эксплуатации дороги. Одна из этих зависимостей имеет следующий вид:

$$E_t = a + b\left[\lg\left(\frac{q^{T_H+1} - q^t}{q^{T_H+1} - 1}\right)N_{пр} - 1\right], \qquad (1.2)$$

где a – параметр зависящий от типа покрытия и группы расчетной нагрузки, МПа; b – параметр, который характеризует влияние повторяемости нагрузок, МПа; q – показатель изменения интенсивности

движения; t – год, на который прогнозируется прочность дорожной одежды; $N_{пр}$ – интенсивность движения расчетных автомобилей на текущий год эксплуатации дорожной конструкции, авт./сут.

Выражение (1.2) позволяет получить значение модуля упругости дорожной одежды E_t в любой момент времени от введения дороги в эксплуатацию до окончания ее нормативного срока службы. К сожалению, эта математическая модель не учитывает начальную величину прочности дорожной одежды на момент ее окончательного формирования после завершения строительных работ на автомобильной дороге.

Сильяновым *et al.* (1978) была разработана диаграмма изменения уровня надежности дорожной одежды в процессе ее эксплуатации. Эта диаграмма основана на том, что в начальный период эксплуатации дороги уровень ее надежности максимальный и определяется принятой конструкцией дорожной одежды. В процессе эксплуатации характеристики дорожного покрытия не остаются постоянными, а происходит снижение их первичных свойств.

Для прогнозирования во времени изменения модуля упругости дорожной одежды, с асфальтобетонным покрытием из традиционного асфальтобетона Красиковым (2000) была разработана математическая модель, которая базируется на известных свойствах дисперсии:

$$\overline{E_t} = \overline{E_1}\left\{1 - \left[a_m + b_m (\lg t)\right]\right\}, \qquad (1.3)$$

где E_1 – модуль упругости в первый год службы дорожной одежды, МПа; N_c – суммарная интенсивность движения, приведенная к расчетной нагрузке группы А, авт.; t – прогнозированный срок службы дорожной одежды, лет; ат, b_m – параметры уравнения, выведенные на основе экспериментальных исследований.

Математическая модель, предложенная Красиковым (2000), может быть использована далее, для прогнозирования динамики изменения прочности дорожной одежды с покрытиями из асфальтобетона на традиционных материалах и проведения сравнительных оценок с конструкциями дорожной одежды с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами.

Подобные исследования были проведены Белятынским (2008) с разработкой програмного комплекса.

1.2.3. Динамика изменения ровности асфальтобетонных покрытий

Ровность покрытия – важный ТЭП, который определяет межремонтные сроки службы покрытий дорожной одежды нежесткого типа и

характеризует безопасность и комфортность движения по дороге. Ровность определяется комплексом тех же параметров, что и прочность дорожной одежды и зависит от ее состояния.

Ухудшение ровности дорожного покрытия имеет существенное влияние на скорость движения, комфортность проезда, утомляемость водителей и пассажиров вследствие вредных вибраций, влекущих за собой снижение безопасности движения и повышение себестоимости перевозок.

Оценку ровности проводят двумя способами:

измерением размера и числа просветов (мм) под трехметровой рейкой, которая прикладывается к покрытию;

суммарным учетом сдавливания рессор автомобиля или прицепа (см/км), которые фиксируются с помощью передвижной установки ПКРС-2У или толчкомером ТХК-2.

Динамике изменения ровности асфальтобетонных покрытий в процессе эксплуатации дороги посвящены работы многих ученых: Бабкова (1982), Белятынского, Никитенко (1999), Бируля (1968), Дивочкина et al. (1988), Елисеева (1974), Красикова (1986), Коганзона (1998), Сидоренко, Подрезова (1989), Сильянова (1984), Слободчикова (1987), Emery (1995), Яковлева (2000), Sivilevičius (2011).

В процессе изучения ТЭП автомобильных дорог в ХНАДУ под руководством проф. Бируля (1962) путем статистической обработки данных наблюдений, была выведена зависимость изменения ровности покрытия по сезонам года, с учетом эмпирического коэффициента ровности, который соответствует каждому из четырех периодов года.

Слободчиковым (1987) была получена экспериментальная зависимость ровности асфальтобетонных покрытий от количества пропущенных дорогой грузовых транспортных средств.

Коном и Ефименко (1989) была получена регрессионная зависимость ровности от модуля упругости дорожной одежды, для использования при планировании ремонтных работ на автомобильных дорогах с нежесткими типами покрытий.

Яковлевым (2000) в МАДИ были проведены исследования по изучению динамики изменения ровности асфальтобетонных покрытий. На основе известной максимальной скорости движения одиночного легкового автомобиля были разработаны математические модели для изучения ожидаемой ровности асфальтобетонного покрытия S_i:

для толчкомера ТХК-2:

$$S_t = \left[\frac{7{,}1}{\left(a \frac{E_t}{E_{тр}} - в \right) КП_н} \right]^2, \quad (1.4)$$

для ПКРС-2У:

$$S_t = \left[\frac{610{,}7}{\left(a \frac{E_t}{E_{тр}} - в \right) КП_н} \right]^{1{,}15}, \quad (1.5)$$

где E_t – ожидаемый модуль упругости дорожной одежды на t – год эксплуатации; $E_{тр}$ – необходимый модуль упругости дорожной одежды, на который она запроектирована; а, $в$ – коэффициенты, которые зависят от соотношения $\frac{E_t}{E_{тр}}$; $КП_н$ – нормативный комплексный показатель транспортно–эксплуатационного состояния дорог.

Математические модели, предложенные Бируля (1962), Коном, Ефименко (1989), Слободчиковым (1987), Яковлевым (2000), имеют один существенный недостаток – они не учитывают, в комплексе, влияние таких параметров, как интенсивность движения транспортных средств, модуль упругости дорожной одежды, начальную величину ровности покрытия, и определяют только некоторые из них. Очевидно, что при сдаче дороги в эксплуатацию с наличием на поверхности значительных неровностей, они начинают быстро развиваться за счет активной формы взаимодействия колеса автомобиля с неровным покрытием, что значительно ускоряет процесс ухудшения ровности при одинаковых условиях. Кроме того, изменение ровности зависит от однородности дорожной одежды по прочности, что также не учитывалось в моделях.

Для определения динамики изменения ровности асфальтобетонных покрытий с целью планирования ремонтных работ Красиковым (2000) была разработана математическая модель, в основу которой вошло изучение влияние на динамику процесса изменения величины первичной ровности. Эта математическая модель представлена следующим выражением:

$$S_t = S_0 \left[1 + cE_{\min}^{d} N_c(t)^{aE_{\min}^{b}} \right], \quad (1.6)$$

где S_0, S_t, – значение ровности по толчкомеру после сдачи дороги в эксплуатацию и на прогнозированный год t соответственно, см/км; $N_c(t)$ – суммарная интенсивность движения, приведенная к расчетной нагрузке, авт; $E_{\min}$ – минимальный модуль упругости, МПа; *a, b, c, d* – эмпирические коэффициенты.

Математическая модель, предложенная Красиковым (2000), была использована им для прогнозирования динамики изменения ровности на традиционных асфальтобетонных покрытиях и может быть использована для проведения сравнительных оценок с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами.

1.2.4. Динамика изменения коэффициента сцепления

Динамикой изменения коэффициента сцепления в период эксплуатации автомобильной дороги занимались такие ученые, как: Борисюк (2004), Зонов (1998), Немчинов, Косарев (1985), Сухоруков (1989), Христолюбов (1989), Юмашев (1982), Dargužis *et al*. (2011), Zariijs (2011).

Анализ результатов исследований свидетельствует, что на величину коэффициента сцепления влияют такие показатели, как: характеристика дорожного покрытия (текстура, шероховатость, материал), погодные условия, свойства шин, нагрузки на ось, типы и режимы движения автомобилей, а также геометрические параметры и ровность проезжей части.

Марьяхин (1984), Haritonovs *et al*. (2010), Sivilevičius, Vislavičius (2008) доказали, что характеристика дорожного покрытия является наиболее важным показателем, влияющим на изменение величины коэффициента сцепления. Наиболее это влияние заметно в условиях зимы, когда состояние покрытия и его сцепные свойства часто и резко изменяются под влиянием погодно - климатических факторов.

На величину коэффициента сцепления влияет шероховатость покрытия, которая соответственно величинам и высотам неровностей подразделяется на макро- и микрошероховатость. К макрошероховатости относят неровности длиной больше 2–3 мм и высотой 0,2–0,3 мм, сформированные каменным материалом, использованным при строительстве асфальтобетонных покрытий или при специальной поверхностной обработке. Микрошероховатость характеризуется неровностями длиной меньше 2–3 мм и высотой меньше 0,2–0,3 мм и определяется собственной шероховатостью материала.

Оценку шероховатости покрытия проводят методом «песчаного пятна» согласно ДСТУ 3587. Данный метод определяет среднюю глубину впадин шероховатости покрытия автомобильной дороги.

В процессе эксплуатации дороги величины микро- и макрошероховатости покрытия постепенно уменьшаются, что приводит к уменьшению величины коэффициента сцепления.

Анализ ранее проведенных научных исследований показал, что характер и интенсивность изменения микро- и макрошероховатости зависит от следующих показателей:

– механических (трение качения, трение скольжения и ударная нагрузка от колеса автомобиля);

– климатических (изменение температуры, влажность);

– свойства минерального материала, который входит в состав асфальтобетона (зернистость, пористость, степень выветривания породы);

количество абразива на покрытии (пыль, продукты износа покрытия).

Основной причиной уменьшения шероховатости (износа) покрытия являются механические показатели, зависящие от интенсивности и состава транспортного потока. В результате их воздействия происходит постоянное обнажение и шлифовка крупных минеральных зерен асфальтобетона. Значительное увеличение интенсивности движения тяжелых грузовых автомобилей приводит к ускорению процесса шлифовки зерен щебня.

На степень снижения коэффициента сцепления, особенно в первый год работы покрытия, существенно влияет начальная высота макронеровностей и размер щебня. Если щебенки обеспечивают достаточно высокую макрошероховатость, то снижение коэффициента сцепления небольшое. При износе выступов макрошероховатости дорожного покрытия происходит изменение формы выступов минерального материала, щебенка переориентируется в пространстве, а ее верхняя часть становится округлой. Шлифовка зерен щебня способствует снижению величины коэффициента сцепления, которая стабилизируясь, достигает своего минимального значения и далее не изменяется, а определяется только микрошероховатостью каменного материала.

Одновременно со шлифовкой происходит и обратный процесс – выветривание, который особенно усиливается в зимний период. В результате действия комплекса погодно-климатических факторов в каменном материале возникают микротрещины, которые постепенно увеличиваются и приводят к разрушению его поверхностного слоя. В связи с этим на дорогах с невысокой интенсивностью движения поверхность

покрытия достаточно долго сохраняет необходимую микрошероховатость. При значительном транспортном потоке процесс шлифовки по интенсивности значительно превышает процесс выветривания.

Исследования, проведенные Сухоруковым (1989), показали, что наибольшей остаточной микрошероховатостью и, соответственно, наибольшим минимальным значением коэффициента сцепления, характеризуется асфальтобетон на основе разнопрочных и разнополируемых материалов.

В результате многолетних наблюдений за традиционными асфальтобетонными покрытиями Немчиновым, Косаревым (1985) установлена графическая зависимость динамики изменения коэффициента сцепления от микро- и макрошероховатости покрытия, которая, в свою очередь, зависит от интенсивности и состава транспортного потока. Общая закономерность изменения шероховатости покрытия представлена в виде:

$$R(t) = a \cdot e^{-b} N_p + c \,, \qquad (1.7)$$

где $R(t)$ – усредненная высота макрошероховатости, мм; N_p – количество проезжающих автомобилей; a, b, c – коэффициенты, зависящие от размера щебня, твердости покрытия и состава транспортного потока.

Эта графическая зависимость может быть использована для сравнения динамики изменения величины коэффициента сцепления асфальтобетонных покрытий, устроенных из асфальтобетона со шлаковыми и традиционными минеральными материалами.

1.2.5. Методы оценки скорости движения в процессе эксплуатации автомобильной дороги

Скорость движения транспортного потока является основной характеристикой для оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги. По величине скорости движения можно оценивать также степень обеспечения безопасности движения и экономичности перевозок.

Скорость движения непрерывно изменяется на дороге, поскольку на ее величину влияет группа показателей, связанных с дорожными условиями и погодно-климатическими факторами, особенностями психофизиологии водителя, а также состоянием автомобиля.

К ТЭП автомобильной дороги, влияющим на скорость движения транспортных средств, можно отнести ровность покрытия и величину коэффициента сцепления. Многочисленными исследованиями, проведенными Бируля, Миховичем (1968), Слободчиковым (1987), Emery (1999), Cristoforou *et al.* (2010), Keršys *et al.* (2011), Jia *et al.* (2009)

установлена связь между скоростью движения транспортных средств и ровностью покрытия. Немчиновым (1984) установлена графоаналитическая зависимость, которая позволяет определить скоростной режим транспортного потока в зависимости от величины шероховатости и сцепных качеств покрытия.

Сильяновым (1977) было установлено влияние на скорость движения типа покрытия и крупности заполнителя в асфальтобетоне, который используется при устройстве верхнего слоя покрытия. При большой крупности материала (например, крупнозернистый асфальтобетон) резко возрастает уровень шума при качении колеса по покрытию. Это вынуждает водителя снижать скорость.

По данным Бабкова (1974), Белятынского (2000), Боровского (1984), Глухова (1987), Коноплянко (2007), Кравченко (2003), Расникова *et al*. (1984), Gustafson (1981), на скорость движения транспортных средств существенно влияют погодно-климатические факторы, определяющие состояние дорожного покрытия и обочин. При этом, скорость движения транспортных средств (при 85 % обеспеченности) на прямолинейном горизонтальном участке при мокром покрытии снижается на 10 %, при снежном накате – на 22 %, при гололеде – на 36 %.

Для расчета скоростей движения одиночных автомобилей и транспортных потоков в зависимости от погодно-климатических факторов, дорожных условий и от состояния автомобилей, предложены различные зависимости, представленные в работах Бабкова (1974), Клинковштейна, Афанасьева (2001), Коганзона (2001), Красникова (1988), Сильянова (1977), Хорошилова (1986).

Хорошиловым (1986), предложены графо-аналитические методы расчета скоростей движения одиночных автомобилей на стадии проектирования автомобильных дорог. Основой их методик является расчет максимальных скоростей с учетом динамических характеристик автомобиля, элементов плана и продольного профиля.

Расчету скорости одиночного автомобиля на основе учета реальных условий движения и случайных факторов посвящены работы Нефедова (1970). Предложенная им методика позволяет учесть эксплуатационное состояние дорог и случайный характер изменения состояния автомобиля.

В работе Клинковштейна, Афанасьева (1991) предложены математические зависимости по расчету скорости движения одиночного автомобиля в зависимости от интенсивности движения, геометрических элементов дороги (продольный уклон, радиус кривой в плане, ширина проезжей части и обочин), расстояния видимости и ровности проезжей части.

Математические модели для определения скорости движения одиночного автомобиля используются только для ориентировочной оценки проектных решений на стадии проектирования и не учитывают разнообразия дорожных условий. Скорость движения одиночного автомобиля не отражает общей картины о скоростном режиме потоков автомобилей, который складывается на дороге и зависит от интенсивности, состава и плотности транспортного потока.

Красниковым (1974) была разработана математическая модель для расчета скорости транспортного потока в зависимости от его плотности и количества полос движения. Но эта методика не отражает реальное состояние дороги в условиях эксплуатации, поскольку не учитывает влияние основных транспортно-эксплуатационных показателей автомобильной дороги.

Для учета суммарного влияния на скорость движения отдельных элементов дороги, транспортно-эксплуатационного состояния покрытия и интенсивности движения Кацем (1986) было получено уравнение на основе численной корреляции:

$$V_n = \log K + 3{,}16\,B - 0{,}2i - 0{,}0213\,N - 0{,}13\,P - 71{,}0\,, \qquad (1.8)$$

где K – количество остаточных деформаций, которые влияют на скорость, %; B – ширина проезжей части, м; i – продольный уклон, ‰; N – интенсивность движения, авт/час; P – процент легковых автомобилей в транспортном потоке.

Но полученная авторами зависимость не учитывает влияния на скорость движения ТЭП дороги, то есть таких как ровность покрытия и коэффициент сцепления.

Сильяновым (1977) была предложена эмпирическая зависимость, которая учитывает влияние средств организации движения и погодно–климатических условий:

$$V_n = \Theta\gamma\overline{V_0} - \alpha N\,, \qquad (1.9)$$

где V_0 – средняя скорость свободного движения потока, состоящего только из легковых автомобилей, км/час (V_0 = 80 км/час); N – интенсивность движения, авт/час; α – коэффициент, зависящий от состава движения; Θ – коэффициент, который учитывает влияние геометрических элементов дороги, состава транспортного потока и средств организации движения; γ – коэффициент, который учитывает влияние погодно–климатических факторов и определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{m_1 q_1 + m_2 q_2 + m_3 q_3 + m_4 q_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}\,, \qquad (1.10)$$

где m_1, m_2, m_3, m_4 – соответственно количество дней работы дороги при наличии влажного покрытия, гололеда, снежного наката и сухого покрытия (определяются по климатическим справочникам); g_1, g_2, g_3, g_4 – коэффициенты снижения скоростей соответственно при гололеде (g_1 = 0,45), влажном покрытии (g_2 = 0,85), снежном накате (g_3 = 0,8) и сухом состоянии проезжей части (g_4 = 1,0).

Математическая модель (1.9) позволяет оценить среднюю за сезон скорость движения транспортного потока в зависимости от климатических особенностей района прохождения дороги. Используя значения коэффициентов снижения скорости движения в зависимости от состояния дорожного покрытия (q_i), можно оценить скорость движения на конкретном участке дороги при разном состоянии дорожного покрытия.

Ситников *et al*. (1975) усовершенствовали математическую модель расчета скоростей движения транспортных потоков с полным учетом изменения транспортно-эксплуатационного состояния дорожных покрытий, за сет периодичности выполненных ремонтов, и учета закономерностей изменений интенсивности движения транспортных средств на перспективу. Для определения средней скорости движения транспортных потоков автомобилей ($\overline{v}_p$), им были получены уравнения:

– при линейном возрастании интенсивности движения:

$$\overline{v}_p = \gamma\left\{ v_0 - \delta\left[\alpha_s N_1 \frac{\varphi_{бр}}{2}\left(1 + \frac{b}{2} t_1^2\right) + \beta_s \right]\right\} - \varepsilon\overline{\alpha}\kappa_\alpha N_1\left(1 + bt_p\right); \quad (1.11)$$

– при возрастании интенсивности по закону сложных процентов:

$$\overline{v}_p = \gamma\left\{ v_0 - \delta\left[\alpha_s N_1 \frac{\alpha_s \varphi_{бр}\left(q^{t_1} - 1\right)}{2q \ln q} + \beta_s \right]\right\} - \varepsilon\overline{\alpha}\kappa_\alpha N_1 q^{t_p - 1}. \quad (1.12)$$

Математические модели (1.11) и (1.12) позволяют учесть такие параметры, как: расчетный год, для которого определяется скорость движения (t_p); влияние количества проходов автомобилей на ровность и скорость движения ($\varphi_{бр}$); грузоподъемность (Γ_j) и массу автомобилей в пустом состоянии (G_j); интенсивность (N) и состав движения (n_j); неравномерность изменения интенсивности движения по сезонам года (ε); изменение прочности дорожной одежды (δ); тип дорожного покрытия (α_s) и (β_s); межремонтные сроки (t_1).

Расчетные формулы (1.11) и (1.12) достаточно универсальные, поскольку включают много параметров, учитывающих транспортно-эксплуатационное состояние автомобильной дороги и позволяющих определять скорость движения транспортного потока на протяжении всего

срока эксплуатации. Но, вследствии необходимости учета разных параметров и коэффициентов, выполнять расчеты по данным формулам достаточно сложно, а переменность дорожных параметров требует разработки специального программного обеспечения.

Влияния на скорость движения автомобилей таких ТЭП автомобильной дороги, как прочность дорожной одежды, ровность покрытия, коэффициент сцепления, состояние покрытия проезжей части предусматривает методика, предложенная Васильевым (2003). В ее основу положена оценка влияния отдельных параметров, характеристик технического уровня и транспортно - эксплуатационного состояния дороги на коэффициент обеспечения расчетной скорости (K_{pc}) и, как следствие, на итоговую скорость движения транспортных средств. Коэффициент расчетной скорости (K_{pc}) определяется по формуле:

$$K_{pc} = \frac{v_{\phi\,\max}}{v_p}, \qquad (1.13)$$

где $v_{\phi\ \max}$ – максимальная фактическая скорость движения, км/час; v_p – расчетная скорость движения, принятая соответственно нормативным документам, км/час.

Методика расчета коэффициентов обеспеченности расчетной скорости позволяет учесть влияние и вклад отдельных дорожных показателей и их объединений в усредненный показатель – итоговый коэффициент обеспеченности расчетной скорости ($k_{\text{р.с.итог}}$). Для его определения в России в НПО РосдорНИИ разработана программа расчета, которая входит в комплекс заданий автоматизированного банка дорожных данных АБДД «Дорога». Банк данных формируется и периодически обновляется в ходе диагностического обследования сети федеральных дорог и содержит полную информацию по всем элементам дороги и ее транспортно-эксплуатационным показателям.

Информация об основных ТЭП автомобильной дороги, таких как прочность дорожной одежды, ровность проезжей части и коэффициент сцепления, находятся в специальных базах данных.

Использование результатов диагностики позволяет учесть реальные дорожные условия и их влияние на скорость движения автомобилей на любом участке дороги. Динамика изменения ТЭП дороги может быть учтена путем проведения расчетов по данным диагностики за ряд лет.

Как было отмечено Самодуровой (1992), для проведения исследований ТЭП дороги с разными типами покрытий с использованием методики расчета скорости движения транспортных потоков, коэффициентов обеспеченности расчетной скорости необходимо выполнить следующее:

- учесть основные ТЭП автомобильной дороги;
- создать резервные копии, необходимые для расчета баз данных;
- создать возможность внесения в копии баз данных изменений, необходимых для исследований;
- проводить серии вычислительных экспериментов с использованием имеющегося программного обеспечения без убытка для существующих баз данных, которые используются в органах управления автомобильными дорогами.

Результаты моделирования скоростей движения транспортных потоков на основе информации и программного обеспечения АБДД «Дорога» показали их совпадение с результатами экспериментальных исследований по определению скорости движения транспортных потоков для разного состояния дорожных покрытий.

Таким образом, анализ результатов проведенных исследований свидетельствует, что оценку ТЭП дорог с разными типами асфальтобетонных покрытий необходимо проводить на основе расчета усредненного показателя – скорости движения транспортного потока. Специфика проводимых исследований, позволяет использовать для оценки ТЭП метод расчета коэффициентов обеспеченности расчетной скорости.

1.3. Исследование влияния дорожных условий и погодно-климатических факторов на безопасность движения для выявления опасных участков дорог

1.3.1. Анализ существующих методов учета выявления участков концентрации дорожно-транспортных происшествий

Статистические модели распознавания участков дорожной сети с повышенным риском возникновения ДТП являются неотъемлемой частью общей системы направленной на повышение безопасности дорожного движения. Анализ показывает, что способы, позволяющие эффективно выявлять и своевременно устранять опасные участки дорог, приводят к экономии значительных средств за счет адресного планирования и реализации мероприятий по снижению аварийности, связанной с дорожными условиями.

При этом, как отечественными, так и зарубежными исследованиями установлено, что неблагоприятные дорожные условия могут приводить к возникновению участков концентрации ДТП вследствие отклонения показателей технического уровня, эксплуатационного состояния и уровня содержания дорог и дорожных сооружений от нормативных значений, допускаемых по условиям безопасности движения, особенно если эти отклонения имеют длительный характер и своевременно не устраняются. Таким образом, разработка методов выявления и модернизации участков концентрации ДТП имеют высокую научную и практическую значимость. Несмотря на то, что исследования по проблеме выбора критериев участков концентрации ДТП ведутся на протяжении многих лет в различных странах, до настоящего времени, в среде специалистов нет единого мнения относительно используемых для этих целей показателей аварийности. В связи с этим в практической деятельности организаций, связанных с обеспечением безопасности дорожного движения, вопросу выбора критериев участков концентрации ДТП, должно уделяться особое внимание.

При разработке методики выявления участков концентрации ДТП требуется установить влияние на безопасность движения переменных дорожных факторов и дать количественную оценку степенных изменений в течение рассматриваемого периода времени. Эти факторы обуславливают выбор математической модели, которая должна отвечать следующим требованиям:

- использовать случайную величину, характеризующую уровень аварийности на дорогах рассматриваемой сети и позволяющую выделять участки концентрации ДТП;
- оперировать минимально необходимой выборкой данных о ДТП;
- использовать тот тип распределения, который обеспечивает описание «случайных» ДТП на рассматриваемой сети с необходимым приближением;
- выявлять участки дорог, на которых наблюдается повышение стабильного числа ДТП над «случайными» и выделять, с учетом этих факторов, участки концентрации ДТП.

Случайной величиной, характеризующей аварийность на дороге, может быть число ДТП за некоторый период времени (месяц, квартал, год) на участке дороги расчетной длины. Если рассматривать в качестве случайной переменной число ДТП за период времени меньше года (месяц, квартал), появляется возможность более точного установления причин возникновения участков концентрации ДТП, которые могут быть из-за перемены дорожных факторов: скользкое покрытие, неудовлетворительное

состояние проезжей части и обочин в осенне-весеннюю распутицу и т.п. При разработке методик выявления участков концентрации ДТП на дорожной сети должен быть установлен оптимальный период времени, гарантирующий статистическую надежность получаемых результатов и не приводящий к искажению изначальных предпосылок природной модели. Обычно, для накопления требуемой выборки данных о ДТП используется период, равный 3–5 годам. Установлено, что с точки зрения статистической надежности 5–летний период является оптимальным для анализа данных о ДТП, поскольку дальнейшее его увеличение не приводит к существенному повышению точности инженерных расчетов при идентификации участков концентрации ДТП. При этом важную роль играет выбор расчетной длины участка дороги, для которого выполняется подсчет числа ДТП и оценка показателя риска ДТП. В исследованиях американских ученых установлено, что показатель риска ДТП становится нестабильной величиной для коротких участков (менее 500 м) особенно при низкой интенсивности движения (менее 500 авт./сут.) даже в случаях, когда использовались данные о ДТП за длительный период времени. Точность описания фактических распределений ДТП на рассматриваемой сети дорог зависит от выбранного для этой цели теоретического распределения и способа установления их параметров. Тип распределения определяется ТЭП рассматриваемой сети и уровнем аварийности на ней. Параметры распределений определяются по статистическим данным о ДТП за расчетный период времени, либо по корреляционным зависимостям, устанавливающим связь с характеристиками дорог и транспортными потоками, движущимися по ним.

Всю совокупность методов оценки опасных участков дорог можно разделить на следующие группы:

- первая группа – статистические методы, основанные на статистической обработке данных о фактической аварийности на конкретном участке дороги или сети дорог с использованием абсолютных или относительных показателей;
- вторая группа – вероятностные методы, основанные на определении возможного количества ДТП путем расчета вероятностной модели, полученной в результате обработки статистики происшествий;
- третья группа – методы, где в качестве оценочных критериев задействованы условия и режимы движения автомобилей на исследуемом участке дороги;
- четвертая группа – методы, основанные на анализе конфликтных ситуаций.

Оценка уровня безопасности движения на основании статистического учета ДТП осуществляется непосредственно по данным фактической аварийности. Статистические методы стали применяться раньше всех остальных, и по сей день являются наиболее распространенными. Уровень безопасности движения обычно оценивают с помощью абсолютных, относительных и удельных показателей аварийности. Абсолютные показатели позволяют оценить опасность участка дороги по количеству ДТП за заданный промежуток времени. При этом, опасными считаются те участки, на которых количество ДТП за рассматриваемый период превышает определенное число.

В разных странах имеются критерии оценки и выявления опасных участков на дорожной сети. Количественные критерии опасных участков дорог, используемые в различных странах, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Количественные критерии оценки опасных участков дорожной сети
1.1 lentelė. Kelių tinklo pavojingų zonų kiekybiniai vertinimo kriterijai
Table 1.1. Quantitative evaluation criteria of black spots at the road network

Наименование участка дороги	Длинна участка, км	Количество ДТП	Период учета ДТП, лет	Страна
1	2	3	4	5
Опасный участок	0,16	1 и более с ранениями	3	Велико-британия
«Черные участки»	0,3	12 и более	3	Велико-британия
Опасный участок	0,3	10 и более разного вида или 4 и более одного вида	1	Германия
Опасный участок	0,3–1,0	20 и более разного вида или 8 и более одного вида	1	Германия
Место концентрации ДТП	0,1–0,2	2 и более	1	Болгария

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
Участок концентрации ДТП	0,2	1 и более на каждые 100 м	1	Болгария
Опасное место	0,1	5 и более всех видов	1	Чехия
Опасный участок	1,0	10 и более всех видов	1	Бельгия
«Черные пятна»	1,0	10 и более с пострадавшими	5	Франция
Опасный участок	1,0	5 и более с пострадавшими	1	Сербия
Участок с высоким риском ДТП	0,1	4 и более с пострадавшими	4	Норвегия
Опасный перегон дороги	1,0 и менее	10 и более с пострадавшими	4	Норвегия

Важным шагом в развитии методов оценки уровня безопасности движения явилось введение понятия показателя тяжести последствий ДТП, предложенное еще в 1983 г. Рейнгольдом, изложенное Клинковштейном (2001):

$$U = \sum_i p_i n_i , \tag{1.14}$$

где U – показатель тяжести последствий ДТП; p_i – коэффициенты тяжести происшествий каждого типа; n_i – количество происшествий каждого типа.

Абсолютные показатели аварийности на практике используются, в основном, с целью определения масштаба аварийности, а также для сопоставительного анализа аварийности в различных регионах, вследствие различного количества транспортных средств, протяженности дорог и других специфических особенностей сопоставимых регионов или участков дорог, объективно влияющих на аварийность.

В Украине принято участки концентрации ДТП выявлять на основании числа ДТП не менее чем за 3 года с учетом коэффициента происшествий, измеряемого количеством ДТП на 1 млн. авт. км. Коэффициент происшествий (*И*) вычисляется по формуле:

$$И = \frac{z \cdot 10^6}{365 \cdot L \cdot N}, \tag{1.15}$$

где Z – количество происшествий в год; N – средняя суточная интенсивность движения в обоих направлениях движения, авт/сут; L – длинна участка дороги, км.

На дорогах II–II категории к участкам концентрации ДТП относятся участки дороги, где ДТП составляет 4 и более за последние три года и значение коэффициента происшествий превышает 0,4 ДТП/млн.авт.км. Этот показатель применяется для оценки уровня безопасности дорог. Если участок имеет локальный характер, где условия движения или характеристики покрытия дороги резко отличаются от смежных участков, коэффициент происшествий выражают количеством ДТП на 1 млн. авт.

В США и некоторых европейских странах также используются аналогичные показатели относительной аварийности. Для пересечений дорог на одном уровне:

$$R = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot N}{T \cdot \sum_{i=1}^{n} V_n}, \tag{1.16}$$

где R – число участков движения, вовлеченных в ДТП на 1 млн км, прошедших через пересечение; T – количество дней, в течение которых проводится учет числа ДТП; V_i – количество участников ДТП, зарегистрированных за T дней; N – средняя суточная интенсивность движения на i-том подходе к пересечению; n – количество подходов к пересечению.

Для отдельных участков дороги:

$$R_m = \frac{365 \cdot N}{T \cdot L}, \tag{1.17}$$

$$R_s = \frac{A \cdot 10^6}{T \cdot L \cdot N}, \tag{1.18}$$

где R_m – число ДТП за год на 1 км участка дороги; R_s – число ДТП на 1 млн. км суммарного пробега транспортных средств за год по этому отрезку дороги; N – средняя суточная интенсивность движения на отрезке дороги за год; L – длинна участка дороги.

Для определения состояния аварийности получил распространение метод «до и после», который предполагает сравнение состояния аварийности данного участка на основании статистики ДТП до и после проведения мероприятия по повышению уровня безопасности движения. Удельные показатели аварийности отражают процентную долю одного абсолютного показателя аварийности от другого. Они характеризуют

структуру свершившихся ДТП и позволяют сравнить различные участки между собой.

При оценке аварийности вероятностными методами автомобильная дорога рассматривается как сооружение, состоящее из сочетания отдельных участков, каждый из которых имеет различные значения геометрических параметров. Суть этих методов заключается в том, что на основании анализа статистических данных о ДТП выявляется, насколько каждый элемент плана и профиля дороги способствует росту вероятности возникновения ДТП по сравнению с эталонным участком. Если готовый показатель на каком-либо участке дороги превышает определенную величину, то участок относят к опасным, малоопасным, неопасным и т.д.

В некоторых странах, используется более подробный учет влияния отдельных факторов. В Великобритании, Норвегии, Швеции, США вместо коэффициентов вводились баллы, которые учитывали безопасность движения в зависимости от ширины проезжей части и обочин, видимости дороги, длинны и радиуса кривых, наличия пересечений, придорожной застройки и т.д.

Шведская система оценки безопасности движения включала три группы показателей с предельно возможными значениями суммы балов:

- прочность и состояние дорожной одежды……...25;
- условия движения для автомобилей (ширина проезжей части, радиусы кривых в плане, продольные уклоны и их протяженность, обеспечиваемая видимость)……..…35;
- степень обеспечения безопасности движения…….……..…..45.

Кроме этого, все факторы, влияющие на безопасность движения, были разделены на три группы: технические, эргономические, экономические.

В некоторых других странах из вероятностных методов практическое применение получил метод итогового коэффициента аварийности. Итоговый коэффициент аварийности K_{um} представляет собой произведение частных коэффициентов аварийности K_1, K_2, K_3, ... , K_m, каждый из которых характеризует относительную вероятность возникновения на рассматриваемом участке происшествий под влиянием отдельных элементов плана, продольного и поперечного профилей, придорожной полосы, интенсивности и состава движения по сравнению с эталонными дорожными условиями (прямой горизонтальный участок двухполосной дороги, ширина проезжей части 7,5 м с укрепленными обочинами и ровным шероховатым покрытием):

$$K_{um} = \prod_{i=1}^{n} K_i \cdot \qquad (1.19)$$

Небольшую опасность представляет участки, у которых итоговый коэффициент аварийности составляет 50–70. Исследования Дивочкина (1968) показали, что для небольших значений $K_{ит}$ существует достаточно устойчивая корреляционная связь между числом ДТП (У) на 1 млн. авт. км и значением $K_{ит}$.

$$У = 34{,}5 - 0{,}27\ K_{ит} + 0{,}0097\ K^{\ 1}{}_{ит}\ . \qquad (1.20)$$

Аналогичную зависимость установили для участков дорог на подходах к мостам:

$$У = 20{,}7 - 3{,}9\ K_{ит} + 0{,}02\ K^{\ 1}{}_{ит}. \qquad (1.21)$$

К вероятностным относятся также методы, основанные на теории надежности или теории риска, с помощью которых определяют либо вероятность безотказной работы системы «Водитель–Автомобиль–Дорога–Среда» (ВАДС), либо вероятность (риск) возникновения ДТП. Понятие «риск попадания автомобилей в ДТП» (r_v) при скорости движения v является качественной инженерной характеристикой опасности геометрического элемента дороги и имеет следующее математическое выражение:

$$r_v = \frac{n_v}{N_v}, \qquad (1.22)$$

где n_v – число ДТП при скорости v, возникающее по причине несовершенства геометрического элемента дороги; N_v – общее число автомобилей, прошедших по данному участку дороги со скоростью движения v.

Рассмотренные выше методы оценки уровня безопасности движения и выявления опасных участков основаны на учете и обработке статистических данных и имеют ряд общих недостатков, главными из которых являются:

- необходимость располагать надежными статистическими данными о ДТП за достаточно длительный период времени, не менее 3–5 лет;
- данные статистики ДТП на участке дороги могут считаться сопоставимыми только в том случае, если за весь рассматриваемый период на дороге не проводились работы, существенно повлиявшие на условия и безопасность движения;
- отчетные статистические данные о ДТП не отражают целый ряд мелких, не регистрируемых происшествий, а также конфликтных ситуаций, находящихся на грани возникновения ДТП;

- возможны искажения истинных причин возникновения ДТП из-за недостаточной квалификации либо незаинтересованности лиц, составляющих отчет о ДТП;
- за рассматриваемый период возможны существенные изменения характеристик транспортного потока (интенсивности и состава движения).

При оценке аварийности методами, основанными на анализе режимов движения автомобиля на оцениваемом участке, определяется коэффициент безопасности $K_{без}$. Анализ распределения ДТП показывает, что значительное их количество сосредоточено на сравнительно небольших, локальных участках, каждый из которых отличается от предыдущего участка резким ухудшением дорожных условий. Водители, проезжая такой участок, сталкиваются с необходимостью резкого снижения скорости движения и часто а результате несвоевременных или неадекватных по отношению к дорожной обстановке действий попадают в аварийную ситуацию или ДТП. В качестве критерия опасности принимается коэффициент безопасности, который представляет собой отношение скорости v, обеспечиваемой опасным участком дороги, к скорости $v_{вх}$, которая может быть развита в конце предыдущего участка:

$$K_{без} = \frac{v}{v_{вх}}. \qquad (1.23)$$

По величине значения коэффициента безопасности определяется степень опасности рассматриваемого участка дороги.

Степень опасности участка дороги по величине коэффициента безопасности ($K_{без}$):

- < 0,4 – очень опасный;
- 0,4–0,6 – опасный;
- 0,6–0,8 – малоопасный;
- < 0,8 – неопасный.

В проектах новых дорог не допускаются участки с коэффициентами безопасности не превышающими 0,8. При разработке проектов реконструкции и капитального ремонта автомобильной дороги коэффициент безопасности не должен превышать 0,6.

Классификация участков дорог по степени опасности в зависимости от сочетания коэффициента безопасности, начальной скорости и отрицательного продольного ускорения согласно исследований Васильева (2003) приведена в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Классификация участков дорог по степени опасности в зависимости от сочетания коэффициента безопасности, начальной скорости и отрицательного продольного ускорения
1.2 lentelė. Kelių ruožų klasifikavimas pagal rizikos laipsnį, priklausantį nuo saugos, pradinio greičio ir neigiamo išilginio pagreičio koeficiento derinio
Table 1.2. Classification of road sections according to the degree of risk depending on the combination of safety factor, initial speed and negative longitudinal acceleration

Степень опасности участка	Отрицательное ускорение, м/с^2			
	< 0,5	0,5–1,5	1,5–2,5	2,5–3,5
Начальная скорость движения 60-80 км/ч				
Не опасный	> 0,45	> 0,60	> 0,65	> 0,75
Опасный	0,35–0,45	0,45–0,60	0,50–0,65	0,55–0,75
Очень опасный	< 0,35	< 0,45	< 0,50	< 0,55
Начальная скорость движения 85–100 км/ч				
Не опасный	> 0,55	> 0,70	< 0,75	> 0,80
Опасный	0,45–0,55	0,55–0,70	0,60–0,75	0,65–0,80
Очень опасный	< 0,45	< 0,55	< 0,60	< 0,65
Начальная скорость движения 105–120 км/ч				
Неопасный	> 0,75	> 0,80	> 0,85	> 0,85
Опасный	0,60–0,75	0,65–0,80	0,70–0,85	0,70–0,85
Очень опасный	< 0,60	< 0,65	< 0,70	< 0,70

В последние годы для выявления и оценки опасных участков на дорогах получил распространение метод конфликтных ситуаций. Он возникает из предпосылки, что ДТП всегда предшествуют неоднократно возникающие опасные ситуации, для предотвращения которых один или оба участника движения должны изменить режим движения автомобиля. Считается, что конфликтной является возникшая на дороге ситуация, при которой автомобили настолько сближаются что, если их дальнейшее движение остается неизменным, риск столкновения резко возрастает. Опасность происшествия исключается водителями путем маневров или торможения.

Поэтому фактическое количество происшествий значительно меньше числа конфликтных ситуаций, но между этими характеристиками существует достаточно устойчивая корреляционная связь.

Метод конфликтных ситуаций может быть использован для обследования существующих дорог, при назначении мероприятий по их

реконструкции и разработки схемы организации движения, так и при проектировании новых дорог.

Различают конфликтные ситуации трех видов:

- легкие – когда возникновение опасности становится для водителя ясным на достаточно большом расстоянии от конфликтной точки и он имеет возможность своевременно оценить поведение других участников движения;
- средние – характеризующиеся чаще всего неожиданным появлением опасности или возникающие при неправильной первоначальной оценке складывавшейся ситуации;
- критические – при которых водитель может предотвратить происшествие лишь при максимально быстрой реакции на коротком участке дороги.

Отрицательные ускорения для разных видов ситуации согласно исследований Васильева (2003) приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Ускорения автомобиля при разных конфликтных ситуациях на дороге
1.3 lentelė. Automobilio pagreičiai esant įvairioms avarinėms situacijoms kelyje
Table 1.3. Accelerations of the car in different conflict situations on the road

Отрицательные ускорения, м/с	Скорость перед конфликтной ситуацией, км/ч	Ускорения, при конфликтной ситуации, м/с		
		легкой K_1	средней K_2	критической K_3
Продольные	> 100	0,5–0,9	0,9–1,9	1,9
	80–100	0,5–1,9	1,9–2,6	2,6
	60–80	0,5–2,3	2,6–3,2	3,2
	< 60	0,5–2,9	3,2–2,7	2,7
Поперечные	> 100	0–0,3	0,3–0,7	0,7
	6–0100	0,4–0,6	0,7–1,1	1,1
	< 60	0,8–1,2	1,2–1,5	1,5

Опасность участка дороги оценивают по значению эквивалентной критической конфликтной ситуации, определяемой по следующей формуле:

$$K_{экв} = 0,44\,K_1 + 0,83\,K_2 + K_3, \qquad (1.24)$$

где K_1 – количество легких конфликтных ситуаций на участке в 1 км в 1 ч; K_2 – количество средних конфликтных ситуаций на участке в 1 км в 1 ч;

K_3 – количество критических конфликтных ситуаций на участке в 1 км в 1 ч.

Коэффициент относительной аварийности определяется по формуле:

$$Y = 0{,}1 + K_{экв}\, NL \,/ 10^{6}\,, \qquad (1.25)$$

где N – интенсивность движения, авт/ч; L – длина участка дороги.

По степени опасности движения участки оцениваются исходя из следующих значений числа критических конфликтных ситуаций, приведенных в таблице 1.4.

Таблица 1.4. Степень опасности движения в зависимости от числа критических конфликтных ситуаций на дороге
1.4 lentelė. Eismo avaringumo laipsnis, priklausantis nuo kritinių konfliktinių situacijų skaičiaus kelyje
Table 1.4. The degree of severity of traffic depending on the number of critical conflict situations on the road

Число критических конфликтных ситуаций на 1 млн. авт. км	200	210–310	320–460	> 460
Характеристика участка	Неопасный	Малоопасный	Опасный	Очень опасный

В проектах строительства новых дорог количество приведенных критических ситуаций не должно превышать 210, а в проектах ремонта или реконструкции дорог количество конфликтных ситуаций не должно превышать 300.

1.3.2. Закономерности формирования участков концентрации дорожно-транспортных происшествий на дорожной сети

Исследования показывают, что предложенная методика идентификации участков концентрации ДТП позволяет в целом моделировать характер формирования таких участков, как в масштабах крупных дорожных сетей, так и применительно к конкретным дорогам. Можно считать, что распределение участков концентрации ДТП зависит от типа автомобильных дорог, рельефа проложения дороги на местности, интенсивности движения, наличия застроенной территории в придорожной полосе и многих других факторов. Учитывая, что характер проложения и параметры геометрических элементов трассы автомобильных дорог во

многом определяются рельефом местности, не случайно и то, что в целом, дороги, расположенные в различном рельефе местности имеют различную вероятность возникновения участков концентрации ДТП.

В качестве характерного момента следует отметить тенденцию к увеличению сокращения числа участков концентрации ДТП на дорогах в пересеченной местности, где условия движения отличаются повышенной сложностью. Как видно из рис. 1.1, участки концентрации ДТП в пересеченной местности составляют 47 % от общего числа всей сети дорог Украины.

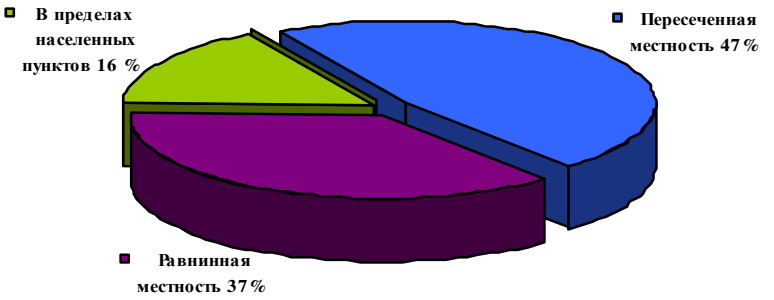


Рис. 1.1. Характер распределения участков концентрации дорожно-транспортных происшествий на дорогах, расположенных в различном рельефе местности
1.1 pav. Avaringų ruožų keliuose, esančiuose skirtingose reljefo vietovėse, pasiskirstymas
Fig. 1.1. The distribution of black spots on the roads located in various terrains

Одним из основных факторов, оказывающих влияние на вероятность возникновения участков концентрации ДТП является интенсивность движения. Это положение является не случайным, если учесть, что с ростом интенсивности движения в целом увеличивается вероятность возникновения ДТП. Однако характер этой взаимосвязи проявляется неоднозначно в различных диапазонах изменения интенсивности движения. Кроме того, исследования показывают, что зависимость вероятности возникновения участков концентрации ДТП от интенсивности движения следует рассматривать с учетом типа автомобильных дорог. Дорожная сеть Украины состоит в основном из двухполосных дорог, поэтому очень важно оценить вероятность возникновения участка концентрации ДТП на дорогах такого типа. Вероятность возникновения участков концентрации ДТП при различной интенсивности движения на двухполосных дорогах согласно исследований Красникова (1988) показана на рис. 1.2.

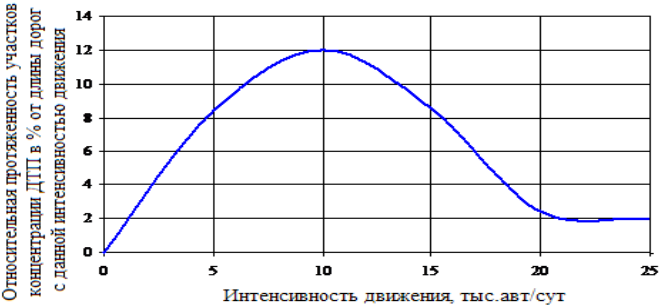


Рис. 1.2. Вероятность возникновения участков концентрации дорожно-транспортных происшествий при различной интенсивности движения на двухполосных дорогах
1.2 pav. Avaringų ruožų koncentracijos tikimybė įvairaus intensyvumo dviejų juostų keliuose
Fig. 1.2. Probability of black spots occurrence at different traffic volumes on two-lane roads

Зависимость, приведенная на рис. 1.2. свидетельствует, что увеличение интенсивности движения стимулирует формирование участков концентрации ДТП до определенных пределов. Наиболее высокая вероятность возникновения участков концентрации ДТП на двухполосных дорогах наблюдается при среднегодовой суточной интенсивности движения близкой к 10 тыс.авт./сут. При дальнейшем увеличении наблюдаемой интенсивности движения вероятность возникновения участков концентрации ДТП постоянно снижается. Данное обстоятельство находит свое объяснение, если принять во внимание качественные изменения в условиях движения транспортных потоков по мере роста интенсивности движения и ее соотношение с пропускной способностью дорожной сети, характеризуемом уровнем удобства движения.

Данные, приведенные в таблице 1.5 наглядно показывают, что наиболее высокая вероятность возникновения участков концентрации ДТП наблюдается при уровнях удобства движения 2 и 3, для которых характерно большое количество обгонов на фоне достаточно высокой средней скорости движения транспортного потока.

При уровне удобства движения 3, когда наблюдается наиболее высокая плотность транспортного потока и низкая скорость движения вероятность формирования участков концентрации ДТП существенно снижается. При низкой интенсивности движения и свободном режиме движения автомобилей, когда обгоны являются редким событием (уровень удобства 1) вероятность возникновения участков концентрации ДТП также минимальна.

Таблица 1.5. Зависимость участков концентрации дорожно-транспортных происшествий от разных уровней удобства движения
1.5 lentelė. Avaringų ruožų kocentracijos priklausomybė nuo įvairaus eismo patogumo lygio
Table 1.5. Dependency of the black spots upon different levels of riding comfort

Тип автомобильных дорог	Вероятность возникновения участков концентрации дорожно-транспортных происшествий при различных уровнях удобства движения, %			
	1	2	3	4
Двухполосные	5,3	9,0	7,6	6,0
Многополосные без разделительной полосы	13,8	26,4	17,1	19,6
Многополосные с разделительной полосой	8,2	12,6	13,7	9,4

Таким образом, вышеприведенный анализ показывает, что дорожные условия оказывают существенное влияние на вероятность возникновения участков концентрации ДТП. При этом меры, направленные на модернизацию участков с повышенным риском ДТП должны быть направлены на решение следующих основных задач:

- оптимизацию распределения транспортных потоков на дорожной сети на основе ее развития и совершенствования транспортно-эксплуатационного состояния;
- развитие дорог высокого качества в зоне крупных городов, повышение пропускной способности, уровня благоустройства дорог в населенных пунктах;
- реконструкцию ряда участков дорог с увеличением числа полос движения и повышением их класса;
- повышение уровня безопасности движения на многополосных дорогах в т.ч. за счет разделения транспортных потоков по направлениям;
- строительство автомобильных магистралей.

Вместе с тем, указанные капитальные меры должны сочетаться с мероприятиями проводимыми непосредственно на участках концентрации ДТП, в том числе, связанные с совершенствованием схем организации движения для снижения наблюдаемого высокого риска ДТП на таких участках дорожной сети.

1.3.3. Влияние зимней скользкости на безопасность дорожного движения

В зимний период наблюдается увеличение количества ДТП по сравнению с летними месяцами.

В Финляндии, занимающей на момент исследования четвертое место по уровню безопасности движения, относительная аварийность зимой также максимальна и колеблется от 0,62 до 0,90 ДТП на 1 млн.авт.км. Аварийность в зимний период времени превышает летнее число ДТП в 1,5 раза.

Одной из причин возникновения ДТП, в зимнее время является несоответствие дорожных условий требованиям современного движения. Доля дорожного фактора в причинах ДТП определяется путем сопоставления данных аварийности, приходящейся на единицу пробега автомобилей для автомагистралей, где дорожные условия наиболее благоприятны, с аналогичными данными для дорог низших категорий. Влияние дорожных условий на причины возникновения ДТП приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6. Влияние дорожных условий на причины возникновения дорожно-транспортных происшествий
1.6 lentelė. Eismo sąlygų įtaka avaringumo priežastims
Table 1.6. The effect of road conditions on the causes of road accidents

Автор, год исследований	Неудовлетворительные дорожные условия, %		Страна
	прямое влияние	косвенное влияние	
Бабков *et al.* (1967)	15–20	25–30	СССР
Лобанов (1978)	4,7	60–75	Литва
Лаврентьев, Лазебников (1992)	1,5	–	Россия, Московская область

Сопоставление этих данных показывает увеличение аварийности при неудовлетворительных дорожных условиях в несколько раз, что и отражает прямое и косвенное влияние дорожных условий на безопасность движения, поскольку и на тех, и на других дорогах эксплуатируются одни и те же автомобили, управляемые одними и теми же водителями.

В зависимости от времени года набор факторов, определяющих дорожные условия как неудовлетворительные, различен. В летний период времени процент, приходящийся на роль дорожного фактора, складывается

в основном, из наличия явных дефектов дороги (выбоины, колея) и дорожного обустройства (освещение).

В зимний период времени несоответствие дорожных условий определяется наличием на покрытии снежно-ледовых образований, которые снижают значение коэффициента сцепления и в большей степени влияют на увеличение аварийности, чем освещение, запроектированные геометрические характеристики дороги, ограждения и прочие дорожные факторы.

В ряде шведских исследований показано, что степень риска попадания в ДТП на полностью или частично покрытом снегом или льдом дорожном покрытии в 1,5–4,5 раза выше, чем на чистом сухом покрытии. В период с 2000 по 2003 гг.

В Финляндии с 2008 по 2010 Santos *et al.* (2010), Jia *et al.* (2009) подсчитали уровень ДТП на сухом и заснеженном покрытии в северной и южной части страны. Уровень ДТП в течение двух зимних периодов (ноябрь–март) на сухом покрытии повсеместно составил 0,09 ДТП на 1 млн. авт. км, т.е. при отсутствии скользкости уровень ДТП в разных частях Финляндии одинаков. На заснеженных покрытиях, а именно на дорогах, с наличием снежного наката, уровень ДТП по сравнению с сухим покрытием увеличился: в южной части до 0,39, в северной – 0,39–0,42 ДТП на 1 млн. авт. км. При этом в южной части процент дорог, эксплуатируемых при снежном накате, составляет 25 %, в северной – 50–70 % всей сети дорог. Неравномерное увеличение показателя ДТП объясняется частым образованием ледовой корки или снежного наката вследствие характерных для Южной Финляндии погодных условий и меньшей готовностью водителей к вождению по ледяной поверхности.

В Германии среднее число ДТП на дорогах, очищенных от снега и льда, составляет 1,6 на 1 млн. авт. км.

В США согласно Wang *et al.* (2011) относительный показатель аварийности на заснеженных дорогах составляет 4,6, на мокрых покрытиях – 2,3 и на сухих – 0,6 происшествий на 1 млн. авт. км пробега.

Результаты анализа статистических данных по аварийности на дорогах Украины, который был проведен Борисюком (2004), Гончаренко (2000) показали, что в зимний период на участках с заснеженным и обледенелым покрытием на 1 млн. авт. км совершается в 4,2 раза больше ДТП, чем на покрытиях в сухом и в 2,3 раза больше, чем в мокром состоянии. Аналогичная статистика получена Васильевым (2003) и на дорогах Московской области (Россия), где на покрытиях со слоем снега и льда совершается в 4,1 раз больше происшествий, чем на сухих. Графически статистика ДТП в зависимости от состояния покрытия приведена на рис. 1.3.

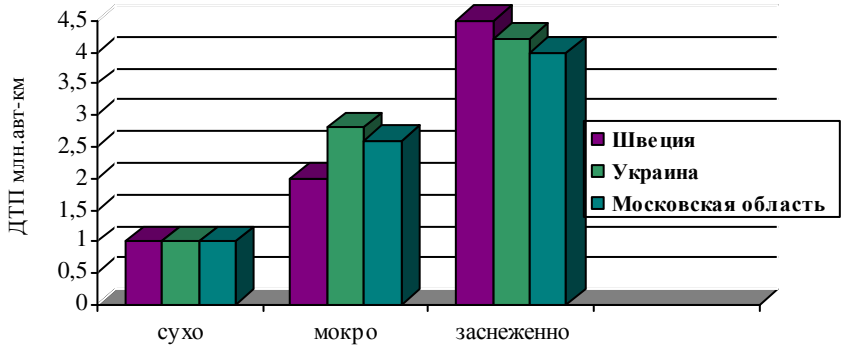


Рис. 1.3. Статистика дорожно-транспортных происшествий в зависимости от состояния покрытия
1.3 pav. Avaringumo statistika, priklausanti nuo dangos būklės
Fig. 1.3. Accident rate statistics depending on the pavement's state

По другим статистическим данным процент ДТП по причине зимней скользкости может составлять 80 % всех ДТП, зарегистрированных в зимний период.

Количество ДТП, фиксируемое на покрытиях со снежно-ледовыми образованиями, зависит как от продолжительности зимнего периода, так и от частоты образования зимней скользкости. При высокой частоте образования зимней скользкости число ДТП возрастает, но гораздо в меньшей степени, чем при редких образованиях скользкости на дороге.

Зависимость числа ДТП и тяжести последствий от скользкости может быть установлена на примере Украины, где на автомобильных дорогах общего пользования за 2010 г. зафиксировано 986 ДТП из-за недостатков в эксплуатационном содержании дорог, во время которых погибло 280 человек и 1 060 человек получили ранения. Как показал анализ, в 45 случаях из 100 основным недостатком эксплуатационного содержания, повлекшим за собой возникновение ДТП, была скользкость покрытия.

Степень тяжести ДТП в зимний период времени может, как превышать, так и не доходить до числа тяжелых ДТП в летние месяцы. Исследования, проведенные в Украине, показывают, что тяжесть ДТП на заснеженных и обледеневших покрытиях в 1,1–1,2 раза больше, чем на сухих и мокрых.

Уменьшить число ДТП по причине зимней скользкости можно одним из следующих способов: использование шипованных шин, ограничением скорости движения, удалением снежно-ледовых образований (на примере химического и фрикционного способа борьбы с зимней скользкостью),

высокой готовностью служб эксплуатации дорог к предотвращению и ликвидации зимней скользкости.

Исследования выполненные бельгийскими учеными Cristoforou *et al.* (2010) показывают, что автомобили, оснащенные шипованными шинами, имеют несколько меньший риск оказаться в ДТП зимой по сравнению с автомобилями, оснащенными зимними шинами без шипов. Однако полученная величина отличия является статистически ненадежной.

Исследования норвежских специалистов Руна *et al.* (2001) показали, что риск ДТП при переходе с шипованных шин на шины без шипов на дороге, покрытой снегом или льдом, возрастает на 25 % и уменьшается на 2 % на чистой проезжей части.

В среднем все исследования, касающиеся влияния шипованных шин на аварийность, показывают снижение при их применении количества происшествий приблизительно на 5 %.

Ограничение скорости в зимний период времени сдерживает рост аварийности на дорогах. Особенно эффективно уменьшение скорости движения на скользких дорогах. Согласно Харкянен (1981), снижение скорости на магистральных дорогах Финляндии на 4 км/ч зимой по сравнению со скоростью движения летом, уменьшило количество ДТП в среднем на 14 %. Сравнение уровня ограничения скоростей, действующих вне населенных пунктов в Финляндии и в Украине, свидетельствует, что украинское ограничение скорости в целом соответствует общему среднему уровню ограничений европейских стран. В зимнее время скорость движения на автомагистралях Украины не превышает 90 км/ч.

Удаление снежно-ледовых образований посредством распределения фрикционных материалов, традиционным из которых является песок, увеличивает значение коэффициента сцепления на дороге. Согласно анализа современного зарубежного опыта зимнего содержания дорог, проведенного Васильевым (2003), показано, что посыпка песком покрытий с коэффициентами сцепления 0,4–0,3 привела к увеличению коэффициента на 0,1. При этом скорость увеличилась в среднем на 2,4 км/ч. Одновременно было достигнуто снижение тормозного пути на 10 %.

Финским ученым Wahlgren (1967) было подсчитано, что 50 % случаев увеличение использования соли в качестве противогололедного материала (ПГМ), увеличит число километров, проезжаемых по заснеженной дороге, в среднем с 37 % до 60 %. Если же увеличить использование соли на 80 % от настоящего уровня, то пробег по заснеженному покрытию также увеличиться на 80 %.

В Германии в техническом университете в г. Дармштадте (The Darmstadt Technical University) согласно Huschek (2002) провели эксперимент, определяющий зависимость числа ДТП от наличия или

отсутствия ПГМ на покрытии в зимнее время. Число ДТП на сухом 650-ти километровом участке составило 4 700. Через 4 дня, в течение которых проезжая часть не обрабатывалась ПГМ, число ДТП возросло в 6 раз. После обработки проезжей части солью в течение 4-х часов аварийность снизилась в 2,6 раза.

Положительное влияние использования соли на аварийность в холодный период года отмечено и в США. Так, в Чикаго обработка покрытий технической солью предотвращает 15 тыс. ДТП ежегодно.

Васильевым (2003) отмечено снижение ДТП за счет улучшения и своевременности зимней уборки можно проследить на примере Скандинавских стран. В Скандинавских странах в зависимости от интенсивности движения и значения дороги в общей транспортной системе дорожная сеть делится на классы зимнего содержания. Как правило, выделяется 3–4 класса зимнего содержания. При увеличении класса содержания дороги (1, 2 класс) требования к зимнему содержанию проезжей части возрастают. Это позволяет для 1 и 2 классов сократить количество ДТП с травматизмом на 10 % и ДТП с материальным ущербом – на 30 %.

Шведские исследователи изучили влияние на количество ДТП в зимний период готовность службы эксплуатационного содержания дорог к принятию мер по уходу за дорогами. Было выбрано два способа готовности дорожных служб по устранению зимней скользкости. Один из них заключается в том, что автомобиль, посыпающий дорогу солью, патрулировал по дороге. Другой вид заключался в том, что дежурная бригада дорожных рабочих следила за условиями движения и принимала соответствующие меры. Эксперимент проводился на выбранных дорогах ночью между 3.00 и 7.00 часами. Опыт показал, что оба этих вида готовности служб к ликвидации зимней скользкости привели к сокращению количества ДТП. В период дежурства (с 3.00 до 7.00) бригады рабочих и в период патрулирования автомобиля количество ДТП сократилось на 30 % и 23 % соответственно. При меньшей готовности дорожных служб к ликвидации снежно-ледяных образований, количество ДТП снижалось только на 8 %.

1.4. Влияние погодно-климатических факторов на транспортно-эксплуатационное состояние дорожных покрытий

Одним из важных условий, которое предъявляется к автомобильным дорогам, есть их гарантированное функционирование в условиях действия

на них сложных и опасных погодных явлений. В связи с этим особенное значение получает состояние поверхности покрытия автодороги, то есть значение показателя ровности и сцепных свойств в неблагоприятные периоды года.

Наиболее неблагоприятным по погодным условиям является зимний период, для которого характерны сложные условия движения транспортных средств, которые вызваны выпадением дождя, снегопадами, метелями, гололедными явлениями, туманами, сильным ветром. Кроме того, зимний период самый сложный с точки зрения учета факторов, которые влияют на условия движения.

По данным Aussedat (2003), Dupuis, Hussain (1977), Beliatinski *et al.* (2009), Кона и Ефименко (1989), Самодуровой (2003), условия, которые характерны для зимнего периода, могут устанавливаться на автомобильных дорогах задолго до перехода среднесуточной температуры через 0 °С, то есть до формальных признаков зимы.

Анализ результатов исследований Бабкова (1988), Белятынского *et al*. (2009) Бялобжеского, Дюнина (1983), Гончаренко (2000), Глухова (1996), Михайлова (1981), Сильянова (1984), Подольского, Самодуровой (2003), Розова, Орлова (2003), Рябовой (1998), позволил выявить факторы, влияющие на транспортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорог в зимний период, которые представлены на рис. 1.3.

Таким образом, установлено, что ТЭП автомобильных дорог в зимний период в значительной степени зависят от погодно-климатических факторов, влияющих на состояние покрытия, сцепные качества, ровность, ширину проезжей части, видимость, а также на эмоциональное состояние водителя. Именно в зимний период, при неблагоприятных погодных условиях дорожное покрытие может быть мокрым, покрыто по всей его протяженности или на отдельных участках разными видами зимней скользкости.

Жданюк, Белятынский, Краюшкина *et al*. (СОУ 45.2-00018112-037:2009) разработали подробную классификацию видов зимней скользкости, которая разделяется по внешим признакам, физическим свойствам, условиям формирования, а также в зависимости от температуры покрытия.

Мокрым покрытие может быть при оттепеле, выпадении жидких осадков, во время выпадения снега при положительной температуре. При использовании противогололедных материалов (ПГМ) в жидком виде мокрым покрытие может быть и при отрицательной температуре.

Влияние мокрого покрытия на режим движения транспортных средств освещается во многих работах. Тут исследованы вопросы взаимодействия автомобиля с мокрым покрытием, а также ухудшение условий движения

транспортных средств в условиях выпадения дождя или мокрого снега. При дождях малой интенсивности, во время туманов, при повышенной влажности воздуха, увлажнение проезжей части возможно за счет проникновения влаги в материал дорожного покрытия. Во время дождей с достаточно высокой интенсивностью и при таянии снега на покрытии появляется слой стекающей воды. На неровных покрытиях вода накапливается в пониженнях местах: в колеях наката, и выбоинах. В этом случае резко снижается адгезионная составляющая силы трения, снижается коэффициент сцепления колеса с дорогой. Результаты наблюдений автора за снижением коэффициента сцепления, в зависимости от состояния проезжей части на разных типах покрытия приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7. Величина коэффициента сцепления в зависимости от состояния проезжей части
1.7 lentelė. Sukibimo koeficiento reikšmė, priklausanti nuo kelio būklės
Table 1.7. Value of friction coefficient depending on the roadway condition

Состояние дорожного покрытия	Коэффициент сцепления на покрытии		
	асфальтобетонном, цементобетонном	щебеночном	грунтовом
Сухое	0,70–0,80	0,70–0,80	0,50–0,60
Мокрое	0,40–0,50	0,40–0,50	0,30–0,40
Покрытое мокрым снегом	0,20–0,30	0,20–0,30	0,20–0,30
Покрытое снежным накатом	0,15–0,30	0,15–0,30	0,15–0,30
Обледенелое	0,08–0,15	0,08–0,15	0,08–0,15

По данным Еремина (2000), Зонова (1989), Немчинова (1985), влияние воды на взаимодействие пневматического колеса с покрытием дороги не ограничивается уменьшением коэфициента сцепления. Вода может также оказывать и гидродинамическое давление на шину, вызывая в зависимости от толщины слоя воды и скорости движения автомобиля явление аквапланирования (глиссирования). Появление аквапланирования приводит к потере управления автомобилем.

Во время осадков уменьшается скорость движения, как отдельного автомобиля, так и транспортного потока. Водители вынуждены снижать скорость как вследствии уменьшения коэффициента сцепления, так и вследствии ограничения видимости обстановки дороги.

В зимний период, по данным Васильева (2003), на транспортно-эксплуатационное состояние дорог влияют снегопады и метели, способствующие появлению на автомобильной дороге снежных

образований. С накоплением снега на покрытии уменьшается пропускная способность дороги вследствии уменьшения скорости движения автомобилей, которая зависит как от динамических качеств автомобиля, так и от соотношения сил сцепления и сопротивления качению, а также от толщины снежного покрова на проезжей части дороги. Зависимость скорости движения автомобиля от толщины слоя рыхлого снега была получена Дюниным (1985) и представлена на рис. 1.4.

Достаточно сложные условия для движения транспортных средств создаются при образовании на покрытии грязного снега, который часто остается на покрытии из-за несвоевременной его уборки. Аварийность на таких участках увеличивается при обгоне от попадания грязного снега на стекло автомобиля. Положение усложняется еще и тем, что снежная грязь может замерзнуть, создавая неровную скользкую поверхность и движение автомобилей по ней возможно только с небольшой скоростью.

Сложные условия движения автомобилей наблюдаются при снежном накате. Максимальную опасность представляет собой снежный накат в виде отдельных пятен на поверхности дороги, поскольку неравномерность его распределения по покрытию приводит к потере сцепных качеств, как вдоль дороги, так и по ее ширине, что отрицательно влияет на стойкость автомобиля при торможении.

Среди многих факторов, влияющих на коэффициент сцепления колеса автомобиля с дорожным покрытием, зимняя скользкость в виде стекловидного льда является наиболее опасной. Вероятность ее образования повышается на участках дорог защищенных от ветра лесополосами и формами рельефа местности, а также склонных к частым образованиям тумана. Наиболее опасно образование стекловидного льда на мостах, путепроводах, эстакадах, а также на высоких насыпях, где аварии, вызванные скользкостью, могут иметь особенно тяжелые последствия. При наличии на покрытии этого вида зимней скользкости качение колес переходит в скольжение, возрастает длина тормозного пути, что приводит к аварийным ситуациям.

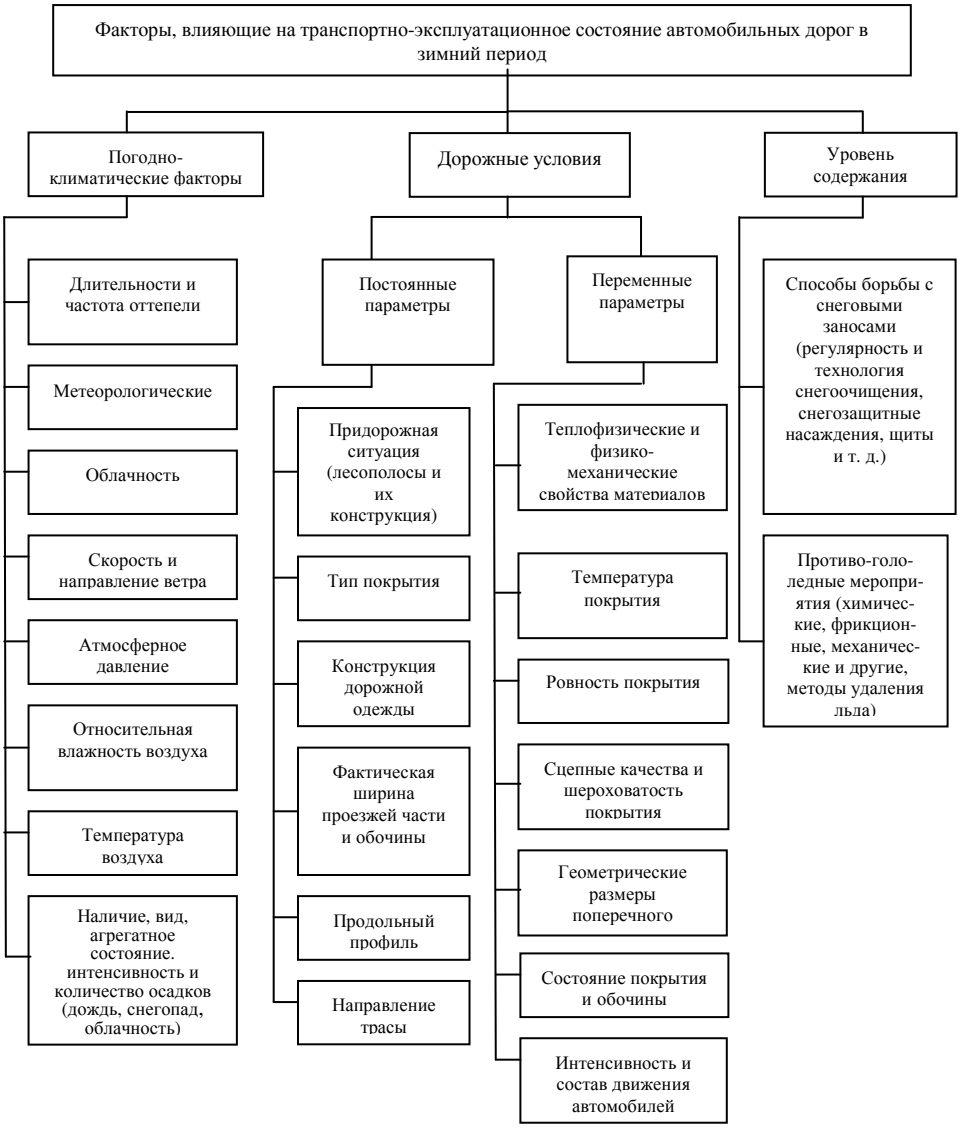


Рис. 1.4. Основные факторы, влияющие на транспортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорог в зимний период
1.4 pav. Pagrindiniai veiksniai, darantys įtaką automobilių kelių eksplotacinei būklei žiemą
Fig. 1.4. Basic factors affecting riding quality of roads in winter

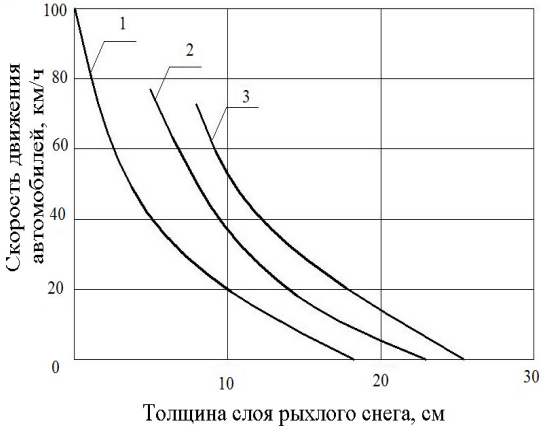


Рис. 1.5. Зависимость скорости движения автомобиля от толщины слоя рыхлого снега: 1 – легковые автомобили; 2 – легкие грузовики; 3 – средние грузовики
1.5 pav. Automobilio judėjimo greičio priklausomybė nuo puraus sniego storio:
1 – lengvieji automobiliai; 2 – lengvieji krovininiai automobiliai;
3 – vidutiniai krovininiai automobiliai
Fig. 1.5. Dependency of vehicle's speed on the thickness of loose snow layer:
1 – cars; 2 – light trucks, 3 – medium duty trucks

Таким образом, комплексная оценка ТЭП может быть получена только при учете особенностей работы разных типов покрытий автомобильных дорог в сложных погодных условиях.

1.5. Существующие конструктивные мероприятия по улучшению транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог в зимний период

Решить вопрос повышения транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог в зимний период можно благодаря разным конструктивным мероприятиям, направленным на уменьшение риска обледенения покрытия. К таким мепроприятиям можно отнести:

- строительство конструкций дорожной одежды с пониженным риском образования скользкости за счет оптимизации теплофизических свойств материалов конструктивных слоев;
- устройство покрытий с противогололедными свойствами, а также покрытий с повышенной шероховатостью.

Анализ результатов проведенных поисковых исследований свидетельствует, что до настоящего времени недостаточно внимания уделялось исследованию влияния дорожных одежд и разных типов покрытий на транспортно-эксплуатационное состояние дороги в зимний период эксплуатации. Поэтому отсутствует статистическая информация, необходимая для исследования и имеется сложность в получении адекватной математической модели.

Наибольшее количество работ посвящены теоретическому и экспериментальному исследованию условий и частоты образования зимней скользкости на покрытиях автомобильных дорог с теплоизоляционными конструктивными слоями. Специальные наблюдения, которые проводились на опытном полигоне с 42 разными конструкциями дорожной одежды, показали, что имеется существенное отличие вероятности их промерзания при одних и тех же метеорологических условиях. В ходе этих исследований были разработаны рекомендации по конструированию дорожной одежды с теплоизоляциоными слоями, которые имеют практическое значение в климатических условиях Швеции для создания наименьшей вероятности появления гололеда. Но в этих исследованиях не учитывался такой параметр, как разные виды дорожных покрытий.

Повысить ТЭП автомобильной дороги в зимний период можно путем обработки покрытия кремнийорганическими веществами, которые обладают гидрофобными свойствами и укладкой асфальтобетонных покрытий с разными противогололедными добавками.

В 80-е годы прошлого столетия получил распространение метод, который состоит в обеспечении противогололедных свойств поверхности покрытия путем введения в состав асфальтобетонной смеси специальных противогололедных химических веществ. Данный метод направлен на предупреждение сцепления льда с материалом покрытия. Начало этому направлению положил материал «Verglimit», разработанный в конце 70-х годов прошлого столетия швейцарской фирмой «Пластроуте».

В начале 80-х годов прошлого столетия в России начали проводить подобные исследования Михайлов et al. (1984), Михайлов, Кацюбинская (1986). Противогололедные компоненты: хлорид кальция, магния или натрия в дисперсном виде вводились при перемешивании в готовую асфальтобетонную смесь. Эти исследования не нашли широкого практического применения из-за ряда недостатков, связанных с высокой стоимостью смеси и тем, что противогололедные свойства покрытия сохранялись на протяжении всего 2–6 лет, что было вызвано интенсивным вымыванием хлоридов из поверхностного слоя.

Богородским (1980), Verburg (1997) проводились исследования по снижению адгезии льда к асфальтобетонному покрытию путем изменения

поверхностных свойств за счет введения в состав асфальтобетонной смеси водорастворимого шлака, который содержит хлориды.

В 1991 году в результате исследований, которые провели ученые Гриневич, Лысенко (1994), был разработан состав противогололедного материала «Грикол» для введения в асфальтобетонные смеси при их изготовлении.

В Воронежской государственной архитектурно-строительной академии Подольским *et al*. (2000) и Рябовой (1998) лабораторными и натурными исследованиями была подобрана рецептура смеси для поверхностной обработки покрытий автодорог с использованием «Грикола». Несмотря на позитивные результаты и оккупаемость расходов на протяжении двух лет, на сегодняшний день такие покрытия не нашли широкого применения.

В Украине на протяжении последних 10 лет также проводились работы по разработке состава и технологии устройства асфальтобетонного покрытия с противогололедными свойствами. ГосдорНИИ совместно с институтом химии и нефтехимии НАН Украины разработана противогололедная добавка, которая предупреждает образование гололеда и обеспечивает очистку покрытия от снежно-ледовых образований, безопасное движение транспорта по дороге.

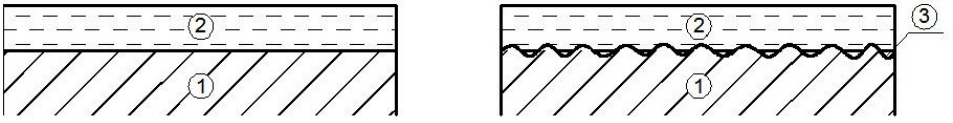
Повысить ТЭП автомобильной дороги в зимний период, за счет уменьшения количества случаев образования зимней скользкости, можно путем увеличения шероховатости поверхности покрытия. Взаимосвязь между шероховатостью поверхности покрытия и образованием на нем разных видов зимней скользкости отражены в работах Марьяхина (1984), Михайлова (1981), Немчинова (1985).

Если толщина слоя снега и льда на дорожном покрытии превышает высоту неровностей макрошероховатости, то структура поверхности не влияет на сцепные качества покрытия со снежно-ледовыми образованиями. Но макрошероховатость влияет на длительность формирования снежного наката и сложность его удаления с поверхности проезжей части, поскольку сначала снег находится в рыхлом состоянии, а потом под действием колес транспортных средств начинается его уплотнение.

На шероховатых покрытиях снег, который только что выпал, в первую очередь, откладывается между выступами каменных частиц и степень его уплотнения меньше, поскольку основную нагрузку от колес транспортных средств воспринимают каменные частички. Если во время снегопада выпадает небольшое количество осадков, то происходит постепенное самоочищение шероховатости дорожной поверхности от снега под действием движущихся транспортных средств и ветра. Маръяхиным (1984)

определена зависимость между макрошероховатостью поверхности покрытия, интенсивностью движения и степенью очистки покрытия.

Проведенными исследованиями определено, что структура уплотненного снега и льда на гладких и шероховатых покрытиях оказывается разной. На гладком покрытии слой уплотненного снега имеет плотную однородную структуру. На шероховатых покрытиях снег, уплотненный между выступами каменных частиц, имеет значительное количество воздуха. Поэтому между выступами образовывается пористая структура уплотненного снега, а над выступами – плотная. Пористая структура значительно облегчает удаление снежно-ледового слоя, поскольку его разрушение происходит на границе плотный снег – пористый снег (см. рис. 1.6), где сопротивление разрушению меньше, чем на поверхности снежный накат – покрытие.



а) б)

Рис. 1.6. Схема уплотнения снега на покрытии: а) – гладком; б) – шероховатом; 1 – покрытие; 2 – слабоуплотненный пористый снег; 3 – сильно уплотненный снег (Марьяхин, 1984)

1.6 pav. Sniego tankio schema ant dangos: a) lygios; b) šiurkščios; 1 – danga; 2 – lengvai sutankintas purus sniegas; 3 – stipriai sutankintas sniegas (Maryahin, 1984)

Fig. 1.6. Scheme of compacted snow on the pavement: a) – smooth; b) – rough; 1 – pavement; 2 – slightly compact porous snow; 3 – heavily compacted snow (Maryahin, 1984)

Шероховатость покрытия имеет влияние и на такое явление, как режеляция, при которой твердый предмет, который влияет на лед, проходит сквозь него, без видимого нарушения целостности самого льда. Этот эффект связан с тем, что под нагрузкой от транспортных средств изменяется точка плавления льда. Как твердый предмет выступает элемент поверхностной шероховатости – выступ.

При образовании скользкости в виде стекловидного льда скорость движения автомобилей резко снижается, время действия однократной нагрузки увеличивается и, поскольку, режеляция практически необратима, возможно, накопление деформаций изо льда.

Михайловым (1984) установлено, что на скорость режеляции влияют такие параметры, как: величина действующей нагрузки, теплопроводность

материала покрытия, форма и размер выступов макрошероховатости покрытия, и температура воздуха.

Данные ряда источников позволяют считать, что скорость режеляции близка к $1{,}10^{-4}$–$1{,}10^{-5}$ м/с. Это означает, что в период образования льда режеляция происходит немедленно, а на преодоление слоя льда, который уже сформировался, толщиной в миллиметры, будет необходим при средней интенсивности движения временной интервал, который оценивается в минутах.

В европейских странах были попытки решить проблему ликвидации зимней скользкости путем строительства автомобильных дорог с покрытиями из дренирующего асфальтобетона. По данным исследований, при зимнем содержании дорог покрытия из дренирующего асфальтобетона характеризуются более высокими свойствами чем плотные типы асфальтобетонов. Повышенная пористость асфальтобетона (до 30 %) способствует быстрому удалению влажности с поверхности дороги, уменьшая тем самым вероятность формирования льда при понижении температуры воздуха и появлении эфекта аквапланирования. Температура пористых покрытий может быть выше, чем у плотных покрытий, то есть, при превентивных мероприятиях и быстром начале работ по борьбе с зимней скользкостью их эффективность значительно увеличивается.

Практика зимней эксплуатации таких дорог за границей показала, что число ДТП уменьшилось на 34 % при замене плотного асфальтобетона на пористый, однако, эксплуатация покрытий из дренирующего асфальтобетона осложняется из-за загрязнения пор грязью, каменными частичками и продуктами износа. Технология эксплуатационного содержания таких покрытий пока еще недостаточно исследована.

Улучшение транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог и повышение уровня безопасности движения в сложных зимних условиях возможно путем усовершенствования конструкций дорожной одежды с целью предотвращения обмерзания покрытий. По данным Михайлова (1984) процесс образования зимней скользкости можно ослабить или полностью исключить путем подбора лучших в теплотехническом отношении материалов и конструктивных слоев дорожной одежды в целом. Снизить возможность образования зимней скользкости можно за счет учета природного радиационного нагрева дорожного покрытия, который поддается регулировке за счет использования материалов с повышенной способностью поглощать радиационное тепло и со сниженной способностью отдавать его. В результате таких конструктивных решений можно лучше использовать дневной нагрев покрытия за счет природной радиации и предотвратить

охлаждение поверхности в ночное время, что опасно в отношении образования гололеда.

Наблюдения в процессе эксплуатации за автомобильными дорогами с асфальтобетонными покрытиями из шлаковых материалов показали, что они обладают рядом свойств, присущих пористым покрытиям, а также повышенной шероховатостью и теплофизическими характеристиками, что отличает их от традиционных асфальтобетонных покрытий. Проведенные наблюдения позволяют выдвинуть гипотезу о том, что в зимний период будут наблюдаться отличия в состоянии покрытий при одних и тех же погодных условиях – есть одной из основных задач данного исследования.

1.6. Выводы по первой главе и задачи исследования

1. Асфальтобетон со шлаковыми материалами сохраняет закономерности, присущие асфальтобетону из традиционных материалов, а свойства асфальтобетона со шлаковыми материалами определяются типом шлака, его структурой и пористостью, от которых зависит характер его взаимодействия с битумом.
2. В зимнее время года для повышения трещиностойкости асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами, необходимо использовать битумы, которые без уменьшения прочности асфальтобетона повышают его деформационную способность и замедляют процессы старения.
3. Основной характеристикой для оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги является скорость движеня, по величине которой можно оценивать также степень обеспечения безопасности движения и экономичности перевозок.
4. Для изучения особенностей эксплуатации автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами, как основные ТЭП, следует выбирать: прочность дорожной одежды, ровность покрытия и коэффициент сцепления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

1. Провести анализ ранее проведенных исследований и определить наиболее значимые факторы, влияющие на изменение ТЭП

асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог на протяжении нормативного срока службы.

2. Разработать математическую модель для описания изменения ТЭП при длительном временном интервале в подсистеме «Дорога–Автомобиль–Среда» с определением погодно-климатических и дорожных показателей, влияющих на их изменение.

3. Разработать математическую модель для определения состояния покрытия на кототких временных интервалах в зимний период в подсистеме «Среда–Дорога» с определением метеорологических и дорожных показателей, влияющих на процессы образования зимней скользкости.

4. Усовершенствовать модель для исследования особенностей образования гололеда на дорогах с разными типами покрытий на основе уравнения нестационарной теплопроводности.

5. Провести экспериментальные исследования по определению основных закономерностей изменения ТЭП асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами от длительности влияния погодно-климатических факторов.

6. Провести расчет экономической эффективности от использования асфальтобетона со шлаковыми материалами;

7. Разработать рекомендации по ремонту и эксплуатационному содержанию автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами.

2

Методы моделирования транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог

Результаты исследований, представленные в данной главе, основаны на работах автора диссертации: Краюшкина *et al*. (1998, 2001, 2003, 2005, 2008), Краюшкина (2001, 2008, 2012), Krayushkina *et al*. (2012), Краюшкина и Белятынский (2012а, 2012б, 2013), Краюшкина и Химерик (1998), Краюшкіна и Вирожемський (2006), Краюшкіна и Бєлятинський (2010).

2.1. Математические модели, описывающие изменение транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог в период эксплуатации

Моделирование процессов изменения во времени ТЭП проводятся на основе анализа физических процессов, происходящих в слоях дорожной конструкции и, особенно, на покрытии в период эксплуатации.

Для исследования динамики процессов изменения ТЭП во времени они были разбиты на две группы. В первую группу включены прочность дорожной одежды, ровность покрытия и коэффициент сцепления, которые изменяются в период эксплуатации дороги при длительном временном интервале под влиянием погодно-климатических, дорожных и транспортных факторов. Изменение прочности рассматривалось в пределах межремонтного срока службы дорожной одежды ($t_{д.о.}$), а динамику изменения ровности покрытия и коэффициента сцепления – в пределах межремонтного срока службы дорожного покрытия ($t_{д.п.}$). В другую группу включены те ТЭП, которые изменяются на коротких интервалах времени в переходной и зимний периоды под влиянием погодных условий. К ним относятся ровность покрытия и коэффициент сцепления.

Соответственно результатам поисковых исследований, анализ которых проведен в п. 1.2.2, принято, что зависимость фактического модуля упругости дорожной конструкти ($Eф$) от времени (t) отвечает процессу изменения прочности дорожной одежды в межремонтные сроки службы. Изменение прочности дорожной одежды от различных факторов может быть представлено в виде математической модели:

$$E_{ф}(t) = f_1(N, S_{тр}, m, \nu, p), \qquad (2.1)$$

где N – интенсивность движения транспортного потока, авт/сут; $S_{тр}$ – состав транспортного потока; m – набор параметров, описывающих конструкцию дорожной одежды и прочностные свойства использованных материалов; ν – набор параметров, описывающих влияние погодно–климатических факторов; p – набор параметров, описывающих влияние мероприятий по строительству и эксплуатационному содержанию дороги.

Как показывают ранее проведенные исследования, изменение фактического модуля упругости дорожной одежды на стадии эксплуатации автомобильной дороги проходит в три этапа и его динамика может быть представлена виде графика, приведенного на рис. 2 1.

На первом этапе (I) после строительства или реконструкции дороги происходит интенсивное формирование стойкой коагуляционно-кристализационной структуры слоев из материалов, обработанных органическими вяжущими, и плотности контактной структуры слоев из зернистых материалов дорожной одежды. В результате движения транспортных средств происходит доуплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожной одежды, повышается жесткость и распределительная способность монолитных слоев. Это приводит к некоторому повышению фактического модуля упругости с последующей стабилизацией его значений. На втором этапе (*II*) происходит постепенное

снижение прочности дорожной одежды под влиянием транспортных средств и погодно-климатических факторов, связанное со старением минерального материала, износом покрытия и образованием микротрещин в верхних конструктивных слоях дорожной одежды. Потом наступает третий этап (*III*), сопровождаемый резкой потерей прочности и характеризующийся значительными деформациями на покрытии и в конструктивных слоях дорожной одежды. Величина фактического модуля упругости ($E_Ф$) снижается ниже необходимого значения ($E_{тр}$). После завершения третьего этапа, когда коэффициент надежности дорожной одежды становится меньше гранично-допустимых величин по условиям движения, необходимо проводить на автомобильной дороге ремонтные работы по усилению дорожной одежды.

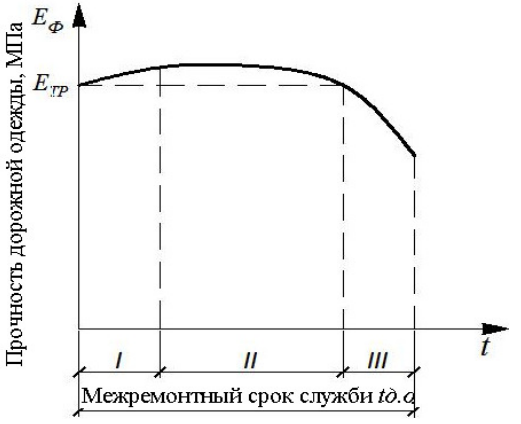


Рис. 2.1. Изменение прочности дорожной одежды в межремонтный срок службы
2.1 pav. Dangos stiprumo pokytis tarp eksploatavimo kapitalinių remontų
Fig. 2.1. Change in the strength of pavement during inter-rapair period

Соответственно анализу результатов исследований, проведенных в п. 1.2.3, процесс изменения ровности асфальтобетонного покрытия в межремонтные сроки, зависит от прочности дорожной одежды и земляного полотна, типа покрытия, качества использованных материалов, интенсивности и состава транспортного потока, погодно-климатических факторов, мероприятий проводимых по ремонту и содержанию.

Таким образом, динамику изменения ровности асфальтобетонного покрытия, $S(t)$ можно представить в виде математической модели:

$$S(t) = f_2(N, S_{tp}, E, m, \nu, p), \qquad (2.2)$$

где E – модуль упругости дорожной одежды, МПа.

Закономерность изменения ровности асфальтобетонных покрытий в межремонтные сроки службы ($t_{д.п.}$) представлена в виде графика, приведеного на рис. 2.2.

После строительства или ремонта автомобильной дороги, под влиянием погодно-климатических факторов и движения транспортных средств, происходит прогрессирующее ухудшение ровности, при чем процесс накопления деформаций наиболее сильно активизируется на дорожных покрытиях, сданных в эксплуатацию с ровностью более ее нормативных значений ($S_{норм.}$). С наличием на поверхности значительных неровностей, они начинают быстро развиваться за счет ударной формы взаимодействия колеса автомобиля с неровным покрытием. В определенные моменты времени (t_1, t_2, …), когда ровность покрытия становится больше допустимой величины ($S_{доп.}$) по условиям безопасности движения, необходимо проведение ремонтных работ по восстановлению ровности верхнего слоя покрытия.

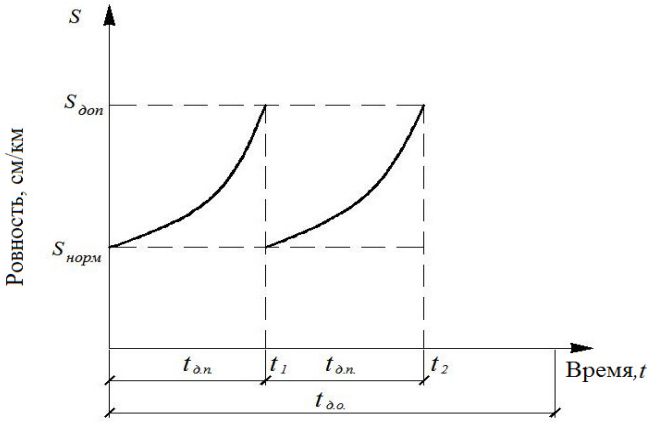


Рис. 2.2. Изменение ровности асфальтобетонного покрытия в период эксплуатации автомобильной дороги

2.2 pav. Automobilių kelių asfalto dangos lygumo pokytis eksploatacijos metu

Fig. 2.2. Change in asphalt pavement smoothness during the road's operation

Соответственно результатам исследований, анализ которых проведен в п. 1.2.4 и по аналогии с вышеприведенным, изменение величины коэффициента сцепления асфальтобетонного покрытия в период длительной эксплуатации после строительства или ремонта автомобильной дороги может быть представлен в виде графика (рис 2.3) и математической модели:

$$k_{сц} = f_3\left(N_p, S_{tp}, m, v, p\right), \quad (2.3)$$

где N_p – суммарное количество пройденных расчетных автомобилей за период эксплуатации, авт.

Изменение величины коэффициента сцепления от нормативных значений ($k_{норм.}$) до допустимых ($k_{доп.}$) происходит в результате действия на автомобильную дорогу механических и погодно-климатических факторов. Действие механических факторов проявляется за счет трения качения, трения скольжения и ударной нагрузки от колеса автомобиля, и зависит от интенсивности и состава транспортного потока. В результате действия механических факторов происходит постоянная шлифовка минеральных зерен асфальтобетона, способствующая снижению величины коэффициента сцепления. Действие погодно-климатических факторов, наоборот, способствует образованию в каменном материале микротрещин, которые постепенно увеличиваются и приводят к разрушению его поверхностного слоя, увеличивая тем самым величину коэффициента сцепления за счет возрастания микрошероховатости.

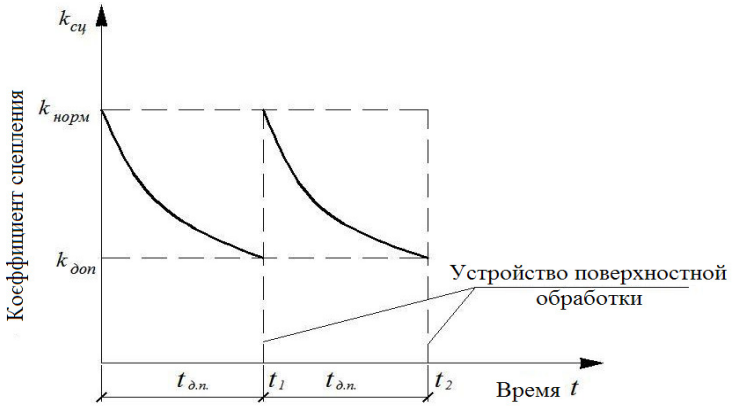


Рис. 2.3. Изменение величины коэффициента сцепления на асфальтобетонном покрытии в период эксплуатации автомобильной дороги
2.3 pav. Sukibimo koeficiento dydžio pokytis ant asfalto dangos eksploatacijos metu
Fig. 2.3. Change in friction coefficient values on asphalt concrete pavement during the road's operation

Степень влияния механических и погодно-климатических факторов на величину коэффициента сцепления зависит также от таких физико-механических свойств минерального материала, как зернистость, пористость и степень выветривания породы. После того, как величина коэффициента сцепления становится меньше допустимой величины ($k_{доп.}$), в определенный момент (t_1), необходимо проводить мероприятия по

восстановлению слоя шероховатости путем устройства поверхностной обработки.

Физические процессы изменения основных ТЭП автомобильных дорог на длительных временных интервалах с разными типами асфальтобетонных покрытий однотипные, но интенсивность протекания этих процессов отличается. Это отличие связано, прежде всего, с отличием прочностных и физико-механических свойств материалов дорожного покрытия, а также характером взаимодействия минерального материала с битумом.

По результатам научных исследований изменение величины коэффициента сцепления на коротких интервалах времени в переходный и зимний периоды возникает из-за ухудшения погодных условий, способствующих образованию на асфальтобетонном покрытии всех видов зимней скользкости.

Процесс изменения величины коэффициента сцепления в период формирования зимней скользкости и проведения работ по ее ликвидации можно представить в виде графика на рис. 2.4.

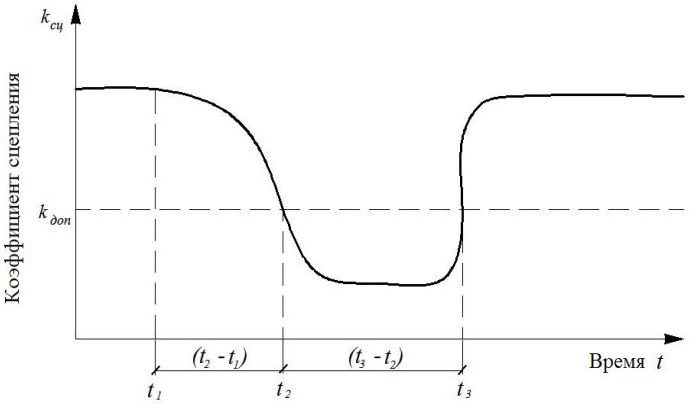


Рис. 2.4. Изменение коэффициента сцепления на асфальтобетонном покрытии в период формирования и ликвидации зимней скользкости
2.4 pav. Sukibimo koeficiento pokytis ant asfalto dangos susidarant slidumui žiemos metu ir jį likviduojant
Fig. 2.4. Change in friction coefficient values on asphalt concrete pavement during formation and elimination of winter slipperiness

В результате образования скользкости во время изменения погодных условий (период времени t_2–t_1) величина коэффициента сцепления снижается ниже допустимого значения ($k_{доп.}$), по условиям безопасности движения. При проведении работ по борьбе с зимней скользкостью

(период времени t_3–t_2), величина коэффициента сцепления остается ниже допустимого значения, а после «срабатывания» противогололедных материалов – увеличивается, тем самым, улучшая ТЭП автомобильной дороги. Длительность периода (t_2–t_1) зависит от вида зимней скользкости и от типа покрытия, а периода (t_3–t_2) – от уровня эксплуатационного содержания обслуживаемого участка дороги, использованных технологий работ и вида зимней скользкости. Интервал времени (t_3–t_2), соответствующий максимальному сроку ликвидации зимней скользкости, регламентируется.

Изменение ровности покрытия на коротких интервалах времени происходит в результате образования зимней скользкости в виде снежного наката и при несвоевременном выполнении работ по его ликвидации. Снежный накат образовывается в результате несвоевременной уборки дорожно-эксплуатационными организациями снежных образований. Под действием движущих транспортных средств и при определенных погодных условиях на покрытии образовывается колейность, которая приводит к резкому снижению ровности и негативно отражается на устойчивости автомобиля. Образование снежного наката зависит, в основном, от погодных условий и итенсивности движения транспорта, и не зависит от конструктивных слоев дорожной одежды, типа покрытия и его теплофизических характеристик. Поэтому, в данной работе, изменение ровности асфальтобетонного покрытия на коротких интервалах времени не рассматривалось.

На коротких временных интервалах, в зимний период при одних и тех же погодных условиях процесс формирования зимней скользкости в виде стекловидного льда на традиционных асфальтобетонных покрытиях и со шлаковыми материалами, может отличаться из-за разницы их теплофизических свойств, определяющих температурный режим покрытия, и отличий шероховатости поверхностей, которые определяют сцепление льда.

В общем виде задача исследования ТЭП автомобильных дорог и оценка их состояния решается в рамках анализа системы «Водитель–Автомобиль–Дорога–Среда» (В–А–Д–С), представленной на рис. 2.5, и теоретической основы решения задач эксплуатации автомобильных дорог.

Для исследования динамики изменения ТЭП на длительных временных промежутках проведем анализ взаимодействия подсистемы «Дорога–Автомобиль–Среда» (Д–А–С) (см. рис. 2.5). Изучение изменения состояния покрытий по сезонам года проводится в рамках анализа подсистемы «Среда–Дорога» (С–Д) (см. рис. 2.5).

Для того, что бы разобраться с бесконечностью взаимосвязей в подсистемах «Дорога–Автомобиль–Среда» (Д–А–С) и «Среда–Дорога» (С–

Д), необходим системный подход к выбору всех факторов, влияющих на данные ТЭП и математический аппарат, с помощью которого можно количественно оценить и прогнозировать их изменение во времени.

Соответственно общей теории сложных систем для решения поставленных заданий законы функционирования подсистем «Дорога–Автомобиль–Среда» (Д–А–С) и «Среда–Дорога» (С–Д) могут быть представлены обобщенными операторами $F_{Д-А-С}$ и $F_{С-Д}$, которые преобразуют набор внутренних, независимых параметров подсистем (погодно-климатических, метеорологических, дорожных и транспортных факторов) во внешние, зависимые.

В качестве внешних зависимых параметров подсистемы Д–А–С выступают параметры эксплуатационного состояния дороги: прочность дорожной одежды (2.1), ровность покрытия (2.2) и коэффициент сцепления (2.3).

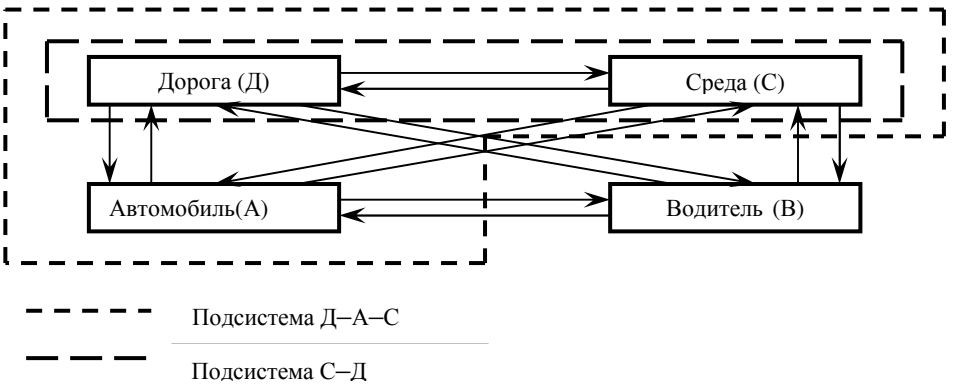


Рис. 2.5. Системный комплекс «Водитель–Автомобиль–Дорога–Среда» (ВАДС) и подсистемы, которые выделены для исследований
2.5 pav. Sisteminis kompleksas „vairuotojas–automobilis–kelias–aplinka“ (V–A–K–A) ir posistemiai, skirti moksliniams tyrimams
Fig. 2.5. System complex ‘Driver–Cars–Road–Environment’ (D–C–R–E) and subsystems that are made available for research

Как обобщающий показатель транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги подсистемы Д–А–С принимается скорость движения транспортного потока $V(t)$, от которой зависят все показатели эффективности работы автомобильного транспорта.

Как внешний зависимый параметр подсистемы С–Д выступает состояние покрытия проезжей части – наличие на дорожном покрытии зимней скользкости в виде стекловидного льда.

2.2. Внешние и внутренние параметры подсистемы «Дорога–Автомобиль–Среда» (Д–А–С)

Соответственно физической постановке задачи разработана схема взаимодействия внешних и внутренних параметров подсистемы Д–А–С, представленная на рис. 2.6.

Внутренние параметры подсистемы, влияющие на динамику изменения ТЭП, разделены на две группы:

- собственные параметры подсистемы, к которым отнесены дорожные $\overline{d(t)}$ и транспортные $\overline{h(t)}$ параметры;
- параметры воздействия внешней среды, к которым отнесены погодно–климатические $\overline{v(t)}$ факторы.

В качестве внешнего (исходного) параметра подсистемы Д–А–С выступают основные ТЭП автомобильной дороги такие, как: прочность дорожной одежды, ровность покрытия, коэффициент сцепления и обобщающий показатель – скорость движения транспортного потока. Для решения задачи необходимо рассмотреть динамику их изменения во времени.

Таким образом, математическая модель для описания изменений основных ТЭП на длительном временном промежутке в подсистеме Д–А–С имеет вид:

$$\overline{y(t)} = F_{Д-А-С}\left[\overline{v(t)}\,\overline{d(t)}\,\overline{h(t)}\,t\right], \qquad (2.4)$$

где $\overline{y(t)} = \{E_ф(t), S(t), k_{сц}(t), V(t)\}$ – вектор внешних параметров подсистемы; $F_{Д-А-С}$ – закон функционирования подсистемы; $\overline{v(t)} = \{E_ф(t), S(t), k_{сц}(t), V(t)\}$ – вектор действия внешней среды (погодно–климатические параметры); $\overline{d(t)} = \{m_1, m_2, E_0, S_0, R_0\}$ – вектор собственных параметров подсистемы (дорожные параметры); $\overline{h(t)} = \{N(t), N_p(t), S_{tp}(t)\}$ – вектор собственных параметров подсистемы (транспортные параметры); t – время.

Дорожные параметры (m_1, m_2, E_0, S_0, R_0) подсистемы Д–А–С формируются на стадии проектирования и строительства, а информация о них может быть получена из проектной документации, автоматического банка дорожных данных, технических паспортов или результатов инвентаризации.

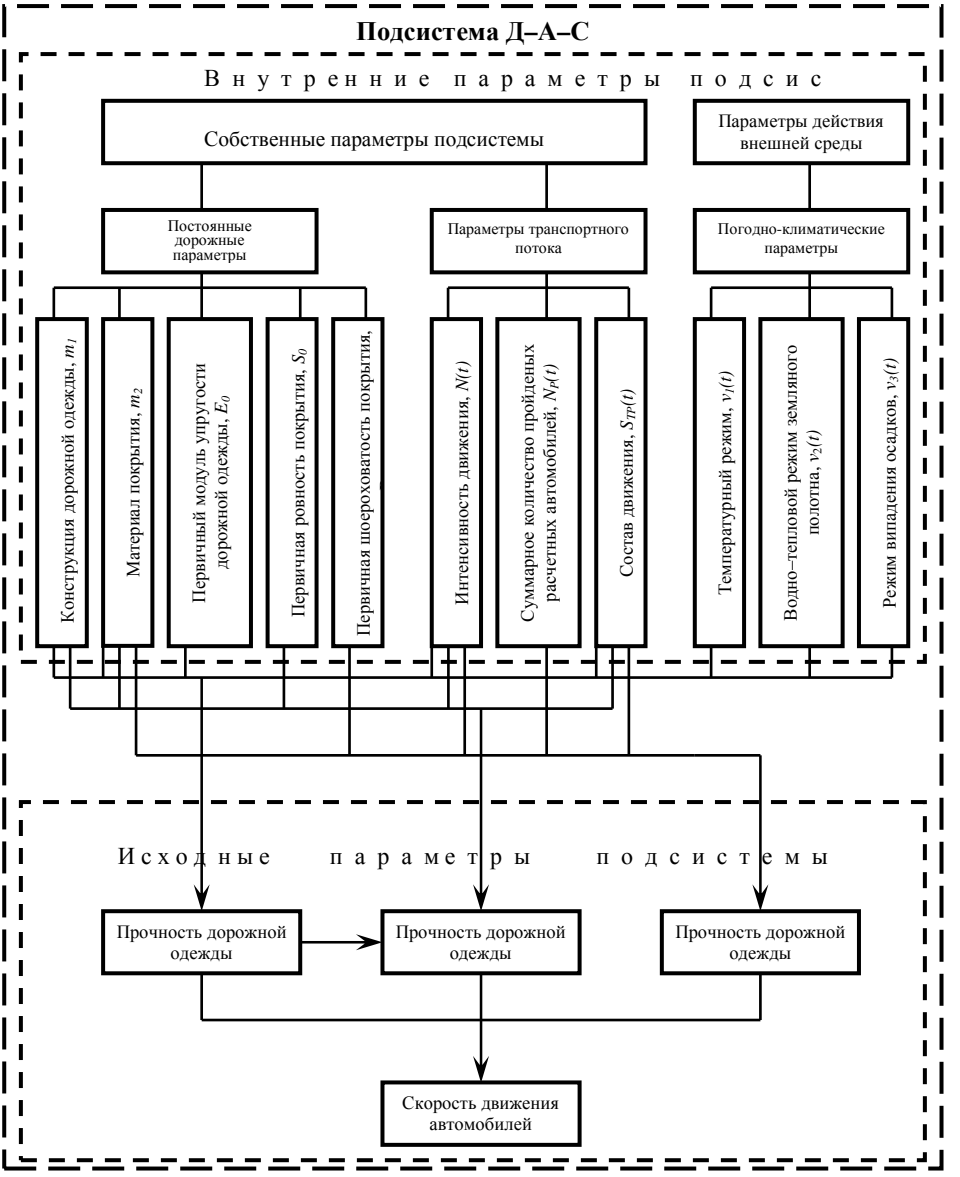


Рис. 2.6. Схема взаимодействия внешних и внутренних параметров подсистемы «Дорога–Автомобиль–Среда» (Д–А–С)
2.6 pav. Posistemio „vairuotojas–automobilis–kelias–aplinka“ (V–A–K–A) išorinių ir vidinių parametrų sąveikos schema
Fig. 2.6. Scheme of interaction of external and internal parameters of the subsystem ‘Driver–Cars–Road–Environment’ (D–C–R–E)

Для автомобильной дороги с асфальтобетонным покрытием со шлаковыми материалами дорожные параметры (E_0, S_0, R_0) определяются при проведении специального обследования дороги в первый год эксплуатации. Для автомобильной дороги с покрытием из традиционного асфальтобетона данные параметры принимаются такими же, как для дороги с асфальтобетонным покрытием со шлаковыми материалами.

Параметры транспортного потока ($N(t)$, $N_p(t)$, $S_{tp}(t)$) принимаются с учетом интенсивности движения.

Часть параметров действия внешней среды могут быть получены из климатических справочников или в результате статистической обработки данных таблиц ежедневных наблюдений на метеостанциях Государственной сети.

Внешние исходные параметры подсистемы такие, как прочность дорожной одежды, ровность покрытия и коэффициент сцепления для автомобильной дороги с покрытием из асфальтобетона с использованием традиционных минеральных материалов определяемы с помощью расчетного эксперимента по известным математическим моделям, полученным в ходе поисковых исследований, в основу которых положен общий анализ дорожной и транспортной информации. Для автомобильной дороги с покрытием из асфальтобетона со шлаковыми материалами внешние параметры системы определяются в ходе специальных опытно-экспериментальных исследований.

2.3. Внешние параметры подсистемы «Среда–Дорога» (С–Д)

Соответственно физической постановке задачи разработана схема взаимодействия внутренних и внешних параметров подсистемы «Среда–Дорога» (С–Д), представленная на рис. 2.7.

Внутренние параметры подсистемы С–Д, влияющие на образование зимней скользкости, разбиты на две группы: метеорологические $\overline{v'(t)}$ и дорожные $\overline{d(t)}$. Метеорологические параметры являются компонентами вектора действия внешней среды, а совокупность постоянных и переменных дорожных факторов составляет вектор собственных параметров подсистемы.

В качестве внешнего параметра подсистемы С–Д принято состояние поверхности дорожного покрытия в зимний период. Для решения задачи рассматривается скользкое состояние покрытия, то есть наличие на его поверхности скользкости в виде стекловидного льда.

Для решения поставленной задачи по определению особенностей образования зимней скользкости в виде стекловидного льда на асфальтобетонных покрытиях со шлаковыми материалами, из многочисленных метеорологических и дорожных параметров, определяющих процессы образования зимней скользкости на покрытиях дорог рассмотренных Самодуровой (1992), были отобраны температура воздуха, вид осадков и их количество (см. рис 2.7).

Таким образом, математическая модель для описания состояния покрытия на коротких интервалах времени в зимний период в подсистеме С–Д имеет вид:

$$\overline{y'(t)} = F_{\text{с-д}}\left[\overline{v'(t)}, \overline{d'(t)}, t'\right], \qquad (2.5)$$

где $\overline{y'(t)} = \{S_p\}$ – вектор, компонентами котрого есть состояние покрытия автомобильной дороги в зимний период; $F_{\text{с-д}}$ – закон функционирования подсистемы; $\overline{v'(t)} = \{T(t), v_1'(t), v_2'\}$ – вектор действия внешней среды (метеорологические параметры); $\overline{d'(t)} = \{m_1', m_2', \ldots, m_5'(t), T_n'(t)\}$ – вектор собственных параметров подсистемы (дорожные параметры); *t'* – время, на протяжении которого возможно образование зимней скользкости в виде стекловидного льда.

Некоторые, из представленных на рисунке параметров, прямо влияют на процессы образования зимней скользкости $T_в(t)$, $\nu_1'(t)$, $\nu_2'(t)$, другие влияют косвенно, формируя температуру дорожного покрытия.

Постоянные дорожные параметры (m_1', m_2') выбираются на стадии проектирования. Для любого участка дороги информация об этих параметрах может быть получена из проектной документации или технического паспорта. Теплофизические параметры конструктивных слоев (m_3', m_4', m_5') могут быть получены из нормативно-технических документов, учебных пособий, справочников и экспериментально при лабораторных испытаниях материалов.

Температура покрытия ($T'_n(t)$) – основной дорожный параметр, определяющий процессы образования зимней скользкости. Она формируется под влиянием всех дорожных параметров представленных на рис. 2.7, степень влияния которых разная и до настоящего времени еще недостаточно изучена. Температуру покрытия можно получить расчетным путем, используя математическую модель нестационарной теплопроводности Самодуровой (1992).

Поскольку уравнения (2.4) и (2.5) отражают поведение системы во времени, то они и есть динамическими математическими моделями в общем виде.

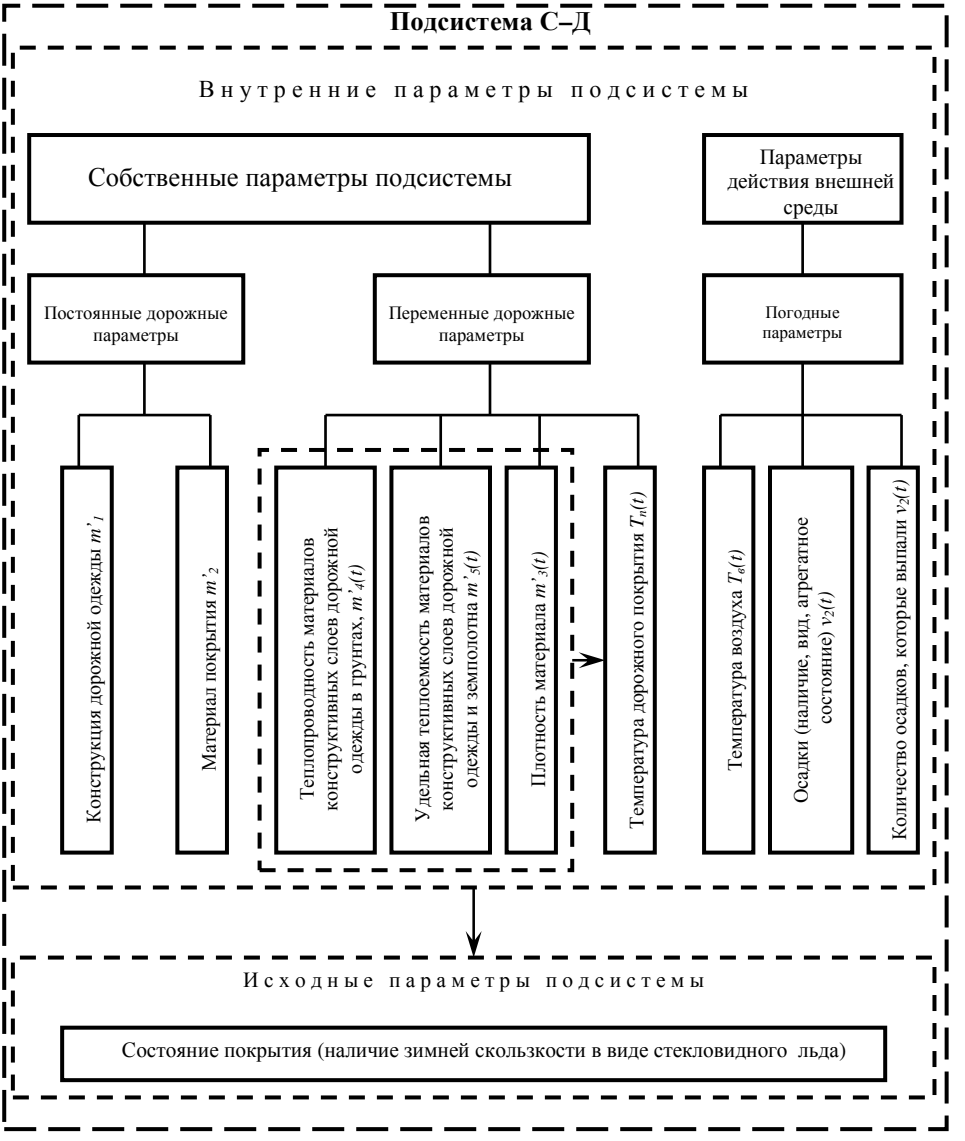


Рис. 2.7. Схема взаимодействия внешних и внутренних параметров подсистемы «Среда–Дорога» (С–Д)
2.7 pav. Posistemio „aplinka–kelias“ (A–K) išorinių ir vidinių parametrų sąveikos schema
Fig. 2.7. Scheme of interaction of external and internal parameters of the subsystem ‘Environment–Road’ (E–R)

Соответственно общих положений теории сложных систем задача исследования будет решаться в несколько этапов:

1. Установление законов функционирования подсистемы в целом и отдельных ее элементов, формирование математических моделей, разработка алгоритмов расчета и программного обеспечения для их реализации.
2. Расчет, с помощью средств вычислительной техники, динамики изменений ТЭП автомобильной дороги и моделирование состояния дорожного покрытия в зимний период.
3. Анализ и обработка результатов.

2.4. Математические модели, описывающие динамику изменений транспортно-эксплуатационных показателей автомобильной дороги

В связи с поставленными задачами исследования, получены математические модели, описывающие динамику изменения основных ТЭП автомобильных дорог с покрытиями из разных материалов.

Изучение динамики изменения прочности дорожной одежды, ровности покрытия и коэффициента сцепления для автомобильных дорог с покрытиями из традиционного асфальтобетона приведены с использованием тех математических моделей, что существуют на данный момент, не проводя экспериментальных исследований. Исследования изменений ТЭП автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами из-за отсутствия теоретических моделей проведены с помощью эмпирических моделей, полученных на основе обработки данных экспериментальных иследований, проведенных на протяжении нескольких лет на исследуемом участке.

Для оценки динамики изменения модуля упругости дорожной одежды с покрытием из асфальтобетона с использованием традиционных материалов использовали математические модели, разработанные Красиковым (2000).

При относительно небольших деформациях дорожной одежды, то есть на первом и втором этапах работы дорожной конструкции, ее прочность $E_{ф}(t)$ описана математической моделью:

$$E_{ф}(t) = E_0 \left\{1 - \left[a_m + b_m \left(\lg N_c(t) + \lg t\right)\right]\right\}, \qquad (2.6)$$

где E_0 – математическое ожидание модуля упругости в первый год службы дорожной одежды после окончания срока ее формирования, МПа; a_m и b_m – параметры уравнения, определенные на основе экспериментальных исследований; $N_c(t)$ – суммарная интенсивность движения, приведенная к расчетной нагрузке группы А, авт/сут.; t – прогнозируемый период службы дорожной одежды, лет.

Для прогноза изменения прочности дорожной одежды на этапе III, когда интенсивность движения превышает допустимую, исходя из существующей прочности дорожной одежды, принята для исследования математическая модель полученная Красиковым (2000) на основе предыдущей:

$$E_{ф}(t) = a_0 E_н t^{bo} \left\{1 - \left[a_m + b_m \left(\lg N_c(t) + \lg t\right)\right]\right\}, \qquad (2.7)$$

где a_0 и b_0 – параметры уравнения определенные на основе экспериментальных исследований; $E_н$ – математическое ожидание начального модуля упругости на третьем этапе, МПа; $N_c(t)$ – суммарная, приведенная к расчетной нагрузке группы А интенсивность движения на третьем этапе службы дорожной одежды, авт/сут.

Изучение динамики изменения ровности традиционных асфальтобетонных покрытий проведена на основе математической модели, так же предложенной Красиковым (2000):

$$S_t = S_0 \left[1 + c\ E_{\min}^{d}\ \ N_c(t)\, a\ E_{\min}^{b}\ \right], \qquad (2.8)$$

где S_0 – значение ровности по толчкомеру после сдачи дороги в эксплуатацию, см/км; E_{min} – минимальный модуль упругости, МПа; a, b, c, d – параметры уравнения, определенные на основе экспериментальных исследований.

Математическая модель (2.8), учитывает влияние качества выполнения строительных работ посредством величины начальной ровности покрытия S_0.

Для оценки динамики изменения коэффициента сцепления на асфальтобетонных покрытиях из традиционных материалов использована графическая зависимость предложенная Немчиновым (1985) и представленная на рис. 2.8. Графическая зависимость описывает изменение макрошероховатости покрытий в зависимости от интенсивности движения и состава транспортного потока.

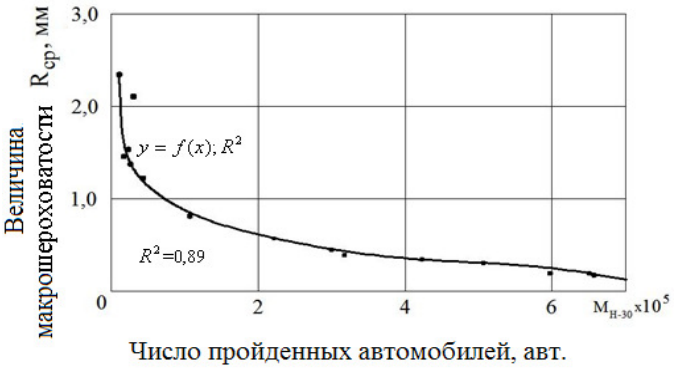


Рис. 2.8. График изменения макрошероховатости традиционных мелкозернистых асфальтобетонных покрытий в зависимости от числа расчетных автомобилей
2.8 pav. Tradicinio smulkiagrūdžio asfalto dangos makrošiurkštumo pokyčiai priklausantys nuo pravažiuojančių automobilių skaičiaus
Fig. 2.8. Graph of macro-roughness change of traditional fine bituminous concrete surfacing depending on the number of calculated vehicles

При сравнении действия разнородных транспортных средств на слои покрытия, Немчиновым (1985) использовался метод приведения фактической интенсивности движения к интенсивности движения расчетных автомобилей. Использование расчетной нагрузки позволяет более четко выделить закономерности, существующие в области взаимодействия транспортного потока и дорожного покрытия. За расчетную берется нагрузка Н-30, которая позволяет выполнить перерасчет автомобилей с нагрузкой на ось до 12 т, то есть практически всех автомобилей.

Общая закономерность изменения макрошероховатости покрытия во времени, представляется в виде:

$$R(t) = ae^{-b}N_p + c\ , \qquad (2.9)$$

где $R(t)$ – усредненная высота макрошероховатости, мм; N_p – количество пройденных автомобилей за период времени t, авт.; a, b, c – коэффициенты, зависящие от размера щебня, твердости покрытия и состава транспортного потока.

Изменение величины коэффициента сцепления в зависимости от макрошероховатости традиционных асфальтобетонных покрытий представлено на рис. 2.9.

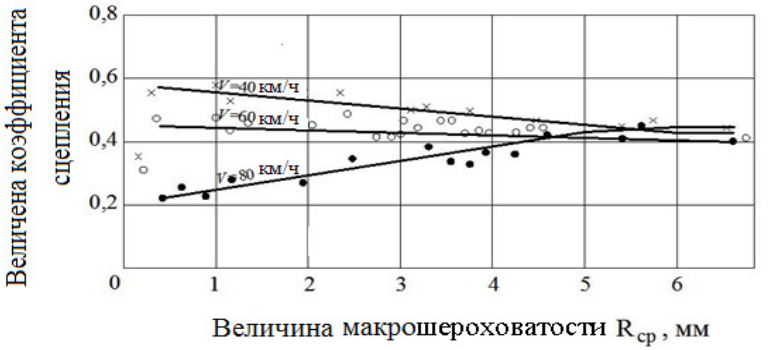


Рис. 2.9. График зависимости коэффициента продольного сцепления от макрошероховатости асфальтобетонных покрытий из традиционного асфальтобетона
2.9 pav. Išilginio sukibimo koeficiento, priklausančio nuo tradicinio asfalto dangos makrošiurkštumo, grafikas
Fig. 2.9. Graph of longitudinal friction coefficient on macro-roughness of asphalt concrete pavements produced of traditional asphalt concrete

Закономерности, отражающие связь величины коэффициента сцепления и шероховатости покрытия, позволяют определить динамику изменения коэффициента сцепления во времени для покрытий из традиционного асфальтобетона.

Рассмотренные математические модели Красикова (2000) (2.6), (2.7), (2.8) и модель предложенная Немчиновым (1985) использованы для дальнейшего проведения сравнительных оценок ТЭП конструкций дорожной одежды с покрытиями из традиционного асфальтобетона и асфальтобетона со шлаковыми материалами.

При изучении особенностей эксплуатации автомобильных дорог с покрытиями со шлаковыми материалами должны быть получены аналогичные зависимости, на основе положений регрессивного анализа по данным экспериментальных наблюдений. Модели необходимо получить для описания изменения прочности дорожной одежды $E_{ф.шл.}(t)$, ровности покрытия $S_{ф.шл.}(t)$, и коэффициента сцепления $k_{сц.шл.}(t)$.

2.5. Модель для определения скорости движения транспортного потока

Оценки ТЭП автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами и традиционными асфальтобетонными

покрытиями проведены через основной исходный параметр системного комплекса ВАДС – скорость движения транспортного потока, которая выступает как основной ТЭП работы автомобильного транспорта.

Для ее определения использовали методику, предложенную Васильевым (2003), в основу которой положена оценка влияния отдельных параметров, характеристик технического уровня и эксплуатационного состояния дороги на коэффициент обеспеченности расчетной скорости $k_{p.c.}$, который определяется по формуле:

$$k_{pc} = \frac{v_{\phi\ \max}}{v_p}, \qquad (2.10)$$

где $v_{\phi.max}$ – максимальная фактическая скорость движения единичного автомобиля, км/час; v_p – расчетная скорость движения, принятая соответственно нормативным документам, км/час.

Частные коэффициенты обеспеченности расчетной скорости ($k_{p.c.1}$, $k_{p.c.2}$,…,$k_{p.c.10}$) позволяют учесть влияние и вклад отдельных дорожных параметров на изменение скорости движения автомобилей, а также объединения дорожных условий в обобщенном коэффициенте $k_{p.c}^{итог}$. Так, коэффициенты обеспеченности расчетной скорости $k_{p.c.6}$, $k_{p.c.7}$, $k_{p.c.8}$, отвечают за величину таких ТЭП, как: ровность покрытия, коэффициент сцепления и прочность дорожной одежды, соответственно.

Итоговый коэффициент обеспеченности расчетной скорости на каждом характерном участке дороги определяется как средневзвешенный комплексный показатель:

$$k_{pc}^{итог} = \sum_{i=1}^{n} \frac{k_{pc}\, l_i}{L}, \qquad (2.11)$$

где l_i – длинна каждого участка с коэффициентом обеспеченности расчетной скорости $k_{p.c.i}$; L – общая протяженность обследованного участка, км.

Методика предусматривает выбор итогового коэффициента обеспеченности расчетной скорости $\left(k_{pc}^{итог}\right)$ по тому параметру, который дает его минимальное значение.

Средняя скорость свободного движения автомобиля определина через итоговые значения $k_{p.c}^{итог}$ по расчетным формулам Васильева (1976):

$$v_{св} = v_{\phi\ \max} - t\sigma_v = k_{pc}^{итог}\ v_p - t\left[a_0 + b\left(k_{pc}^{итог}\ v_p\right)^2\right], \qquad (2.12)$$

где t – величина доверительного интервала, соответствующая принятой для расчетов доверительной вероятности; σ_v – стандартное отклонение для скорости; a_0, b – эмпирические коэффициенты для определения σ_v .

Средняя скорость движения транспортного потока определена по формуле:

$$\overline{v} = \overline{v}_{св} - \Delta v = \overline{v}_{св} - \alpha\beta N \ , \qquad (2.13)$$

где α – коэффициент, учитывающий влияние интенсивности движения; β – коэффициент, учитывающий состав транспортного потока; N – интенсивность движения, авт/сут.

Проведение расчетов скорости движения транспортного потока по формулам (2.10)–(2.13) в зависимости от динамики изменения ТЭП автомобильных дорог и состояния дорожного покрытия позволит провести сравнительную характеристику изменения скоростного режима для автомобильных дорог с разными типами покрытий в период работы дорожной конструкции.

2.6. Моделирование процессов образования зимней скользкости на дорожных покрытиях

Оценить изменение ТЭП автомобильных дорог из покрытиями из шлаковых и традиционных асфальтобетонных материалов на коротких временных интервалах (зимний период) возможно путем изучения процессов образования на их поверхности разных видов зимней скользкости. Для этого необходимы данные наблюдений о частоте и длительности их образования, но статистическая информация о состоянии дорожных покрытий в зимний период в достаточном объеме отсутствует. Состояние дорожных покрытий не фиксируется на метеостанциях Государственной сети и в подразделениях дорожной службы. Для проведения исследований использована математическая модель, разработанная Самодуровой (1992), которая описывает образование разных видов зимней скользкости.

Основу математической модели составляет расчет температуры дорожного покрытия по метеорологическим данным.

Для расчета температуры дорожного покрытия используется уравнение нестационарной теплопроводности, позволяющее учесть резкую смену параметров внешней среды и отличие теплоинерционных свойств дорожных конструкций с разными материалами дорожных покрытий, исследуемыми в данной работе.

Математическая постановка задачи содержит дифференциальное уравнение и условия однозначности, включающие теплофизические параметры и геометрические размеры дорожной конструкции, а также граничные условия и начальное распределение температуры. Температурный режим дорожной конструкции на ее поверхности под действием температуры воздуха, которая периодически изменяется, для решаемой задачи описывается одноразмерным уравнением теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right] + q \ , \qquad (2.14)$$

где $T(x, t)$ – температура в дорожной конструкции или грунте земляного полотна на глубине x в момент времени t, °С; q – плотность теплового потока в конструкции, Вт/м^3; c – удельная теплоемкость, Дж/кг К; ρ – плотность материала, кг/м^3; λ – теплопроводность, Вт/м К.

Поскольку дорожная одежда – многослойная система, то уравнение (2.14) для решаемой задачи преобразовывается в систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} c_i\rho_i \dfrac{\partial T}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_i \dfrac{\partial T}{\partial x}\right) & H_{i-1} \le x \le H \\ c_м\rho_м \dfrac{\partial T}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_м \dfrac{\partial T}{\partial x}\right) & H_4 \le x \le H_ф \\ c_T\rho_T \dfrac{\partial T}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_T \dfrac{\partial T}{\partial x}\right) & H_ф \le x \le H \end{cases} , \qquad (2.15)$$

с условием на границе фазового перехода в ґрунте земляного полотна:

$$\lambda_m \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=H_ф} \lambda_T \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=H_ф} = Q_\rho \frac{\partial H_ф}{\partial t} , \qquad (2.16)$$

где $H_ф = H_ф(x,t)$ граница фазового перехода, м; Q – скрытая теплота плавления льда, кДж/кг.

Теплофизические свойства (c_i, λ_i, ρ_i) изменяются при переходе от одного конструктивного слоя к другому и при переходе от мерзлого ґрунта $(c_м, \lambda_м, \rho_м)$ к талому (c_T, λ_T, ρ_T). На границе промерзания или оттаивания ґрунта происходит фазовый переход с поглощением или выделением тепла, который описывается уравнением (2.16).

Для моделирования условий образования зимней скользкости на дорожном покрытии математическая модель (2.14)–(2.16) может быть упрощена.

Теоретические исследования показывают, что слой «резких» колебаний температур, в котором происходит аккумуляция всего, что поступает за период Δt тепла, определяется соотношением:

$$x = \sqrt{\frac{\lambda \Delta t}{2\pi c \rho}}, \tag{2.17}$$

Как показывают расчеты, проведенные по этой формуле, все тепло, что поступает на протяжении суток на дорожное покрытие, аккумулируется в верхнем слое толщиной 8–10 см. Таким образом, выделение тепла фазовых преобразований в грунтовом полупространстве не повлияет на результаты расчета температуры дорожного покрытия, и в зоне фазового перехода изменим теплофизические характеристики мерзлого грунта $(c_м, C_м)$ на характеристики талого грунта, без дополнительного решения дифференциального уравнения (2.16) в зоне фазового перехода. На поверхности дорожного покрытия происходит сложный теплообмен, определяемый граничными условиями II рода, при которых задана интенсивность теплового потока и III рода с определением условий теплообмена с окружающей средой. Граничное условие записывается в виде:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial T} = \alpha \left[T_n(t) - T_в(t) \right] + \rho_n q_n, \tag{2.18}$$

где $T_n(t)$ – температура дорожного покрытия, °С; ρ_n – коэффициент поглощения дорожным покрытием радиации; q_n – интенсивность падающего на покрытие излучения, Вт/м^2; α – коэффициент теплообмена, Вт/(м^2·К).

Другое граничное условие принимается из допущения постоянности температуры на некоторой глубине затухания амплитуды температурных колебаний:

$$T(H, t) = T_г = const. \tag{2.19}$$

Начальная температура T_{0x}, в любой точке x: по глубине конструкции определяется по формуле:

$$T(x,0) = T_{в.ср} + \left(T_г - T_{в.ср} \right) \frac{R_n + \sum R_x}{R}, \tag{2.20}$$

где $T_{в.ср}$ – температура воздуха, средняя, за период Δt, °С; $R_п$ – тепловое сопротивление, характеризующее теплообмен покрытия с воздухом (м^2·К)/Вт; $\sum R_x$ – тепловое сопротивление слоев, расположенных выше глубины x, (м^2·К)/Вт; R – суммарное тепловое сопротивление всех слоев дорожной конструкции и земляного полотна до глубины H, (м^2·К) /Вт.

Система уравнений (2.15) и условия (2.16), (2.18) и (2.19) – математическая модель расчета температуры дорожного покрытия.

Для получения рабочей модели в нее необходимо ввести данные с тепло-физическими параметрами асфальтобетона из традиционных и шлаковых материалов.

Рассмотренная модель используется для решения поставленной задачи – оценки транспортно-эксплуатационного состояния покрытий из разных асфальтобетонов в зимний период и исследования возможности образования на них зимней скользкости.

Для постановки задачи рассмотрены процессы образования зимней скользкости на дорожных покрытиях. Принятая в нормативной литературе классификация включает три вида зимней скользкости – рыхлый снег, уплотненный снег и стекловидный лед, при чем в группу стекловидного льда попадают все виды скользкости, которые образовывают на дорожном покрытии тонкий слой льда. Зимняя скользкость в виде снежного наката и рыхлого снега образовывается при выпадении осадков и не зависит от конструктивных особенностей дорожной одежды. Скользкость в виде стекловидного льда образовывается разными путями и зависит от температуры дорожного покрытия, в связи с этим принята классификация видов зимней скользкости, предложеная Самодуровой (1992), которая представлена в таблице 2.1. В ней вместо стекловидного льда рассмотрено четыре вида скользкости с отличием в условиях их образования.

Образование зимней скользкости в разные моменты времени возможно на любых типах покрытий, не зависимо от отличий теплофизических свойств асфальтобетона. Этот процесс можно проанализировать, представив его схематически на рис. 2.10. При снижении температуры воздуха, в определенный момент времени t_1 она становится отрицательной. Из-за тепловой инерции дорожной конструкции, температура верхнего слоя покрытия становится отрицательной во времени t_2. Временной интервал Δt зависит от скорости снижения температуры воздуха $\Delta T_в$ и от теплофизических свойств дорожных покрытий, которые определяют их температурный режим (m_3, m_4, m_5):

$$\Delta t = f\left(\Delta T_в, m_3, m_4, m_5\right). \qquad (2.21)$$

Таблица 2.1. Классификация разных видов зимней скользкости дорожных покрытий и условия их образования
2.1 lentelė. Kelio dangų įvairių tipų slidumo žiemą ir jo susidarymo sąlygų klasifikacija
Table 2.1. Classification of different types of slippery on the road surfaces in winter and conditions of their formation

Вид зимней скольз-кости	Условия образования				
	Температура воздуха, °С	Температура покрытия, °С	Осадки, их вид	Состояние покрытия	Дополни-тельные условия
Гололед	< 0 °С	< 0 °С	любые, выпадающие при температуре воздуха выше минус 3 °С	мокрое	Время после действия садков 12 часов
Твердый налет	> 0 °С	< 0 °С	жидкие	–	нет
	0–5 °С	< 0 °С	мокрый снег	–	Коли-чество осадков Q = 0 мм
Гололед	< 0 °С	< 0 °С	переохлажденные жидкие (дождь, морось)	–	нет

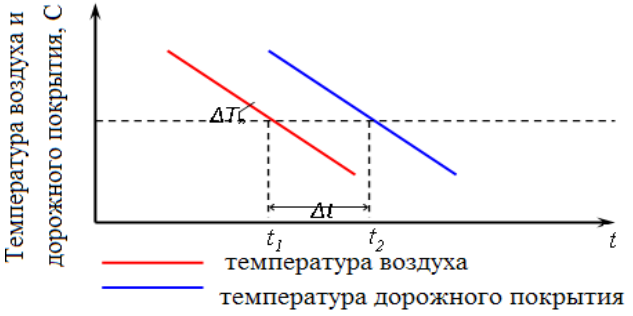


Рис. 2.10. Изменение температуры дорожного покрытия под влиянием изменения температуры воздуха
2.10 pav. Kelio paviršiaus temperatūros pokytis dėl oro temperatūros pokyčio
Fig. 2.10. Change in road surface temperature due to changes in air temperature

Аналогичные физические процессы происходят и при повышении температуры воздуха. Если процесс повышения или понижения

температуры воздуха проходит достаточно долго, то зимняя скользкость образуется на покрытиях различного типа, но в различные моменты времени t_2. Такие случаи не представляют интереса для иследования, так как не выявляют особенностей гололедообразования на дорожных покрытиях с различными материалами верхних конструктивных слоев.

Наиболее интересные случаи двойного краткосрочного перехода температуры воздуха от положительных значений к отрицательным и наоборот.

$$t_1 = t_{+(-)} \text{ и } t_2 = t_{-(+)}. \tag{2.22}$$

Из-за тепловой инерции дорожной конструкции возможны два случая образования зимней скользкости:

I – температура дорожного покрытия за интервал времени переходит в зону отрицательных значений, и в этом случае возможно образование скользкости, если дорожное покрытие влажное.

$$\Delta t = t_2 - t_1. \tag{2.22}$$

II – если дорожное покрытие на протяжении указанного интервала времени имеет положительную температуру, то образование зимней скользкости на нем физически невозможно. Величина интервала времени, на протяжени которого температура дорожного покрытия переходит в зону отрицательных значений, будет зависеть от градиента понижения температуры воздуха, длительности отрицательных температур воздуха и теплофизических свойств материалов дорожного покрытия.

Схема исследования описанных физических процессов может быть представлена следующим алгоритмом:

1. Формирование рабочей модели для расчета температуры дорожного покрытия (определение теплофизических свойств конструктивных слоев дорожной одежды).
2. Обработка данных метеостанций с целью получения расчетных значений и диапазона изменений градиента температуры воздуха при образовании разных видов зимней скользкости.
3. Проведение для разных значений градиента температуры воздуха расчетов интервала времени, на протяжении которого температура дорожного покрытия имеет положительное значение после перехода температуры воздуха от отрицательных к положительным значениям (2.21).

4. Обработка данных наблюдений метеостанций для выявления возможных случаев образования скользкости для дорог с разными типами асфальтобетонных покрытий.

Проведение иследований по предложенной схеме позволит определить особенности образования гололеда на дорогах с покрытием из асфальтобетона со шлаковыми и традиционными материалами.

2.7. Определение сцепления льда с поверхностью асфальтобетонных покрытий

Скорость разрушения ледообразований на покрытиях автомобильных дорог под действием движущегося транспорта и качество очистки во многом зависит от величины силы сцепления (адгезии) этих образований с поверхностью покрытия.

Адгезия льда к поверхности покрытия в свете современных знаний рассматривается как совокупность механического сцепления частичек льда с шероховатой поверхностью и сил межмолекулярного взаимодействия. Вода проникает в поры материала и заклинивается в них при расширении в процессе смерзания, и таким образом, возникает прочное сцепление льда с поверхностью покрытия дороги. Виды и интенсивность межмолекулярного взаимодействия между пленкой воды и поверхностью покрытия зависит от природы этой поверхности.

При разработке способов повышения гололедоопасности дорожных покрытий величина адгезии дорожного льда с материалом покрытия получает значение одной из основных начальных величин. Снижение силы сцепления до величины, при которой возможно полное разделение льда с материалом покрытия, даст качественное решение проблемы для дорожно-эксплуатационных служб при ликвидации снежно-ледовых образований.

Величина адгезии характеризуется разрывным усилием, а отсутствие общепринятой методики по ее определению приводит к использованию ряда способов: разрыва специальных образцов, балок, консолей, способа разрушения льда при кручении с использованием специальных устройств и др. Каждый из них имет определенные преимущества и недостатки и для получения величины разрывного усилия на границе «лед – поверхность асфальтобетона» преимущество в данное время отдается испытанию на изгиб. Полученная при этом величина не совсем точно совпадает с «чистым» разрывом, но можно не делать между ними различий, если влияние реологии материала не очень большое, иначе необходимо внесение поправки, определенной статистически – экспериментальным путем. Надежность полученных результатов в значительной степени

обусловлена тем, что испытанию подвергаются относительно однородные по своим объемам образцы, то есть между конкретными свойствами материала и отмеченной однородностью есть определенная связь.

Схема испытания асфальтобетона на изгиб представлена на рис 2.11.

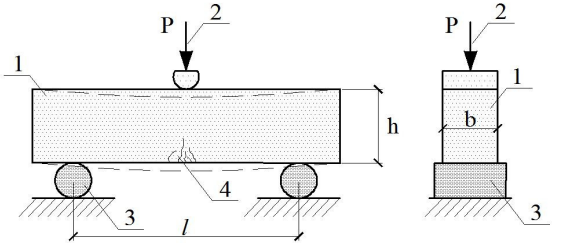


Рис. 2.11. Схема испытания балочек из афальтобетона на изгиб:
1 – образец размером 4×4×16 см; 2 – разрушающая нагрузка, которая прикладывается; 3 – опора; 4 – трещины, образовавшиеся после разрушения образца
2.11 pav. Asfalto bandinių lenkimo bandymų schema:
1 – bandinio dydis 4×4×16 cm; 2 – ardančioji apkrova, kuria apkraunama; 3 – atrama; 4 – įtrūkiai, susidarę suardžius bandinį
Fig. 2.11. Bending test circuit of asphalt concrete cross members:
1 – the sample's size 4×4×16 cm; 2 – applied failure load, 3 – a support; 4 – cracks formed after the destruction of the sample

Отличие от стандартного испытания асфальтобетонов на изгиб заключается в необходимости испытания параллельной серии образцов, подготовленных по разному, а также, в их температуре при испытании, которая для серии образцов должна быть одинаковой. Одни образцы подвергаются стандартному водонасыщению, другие – сушке, после чего все они замораживаются. Температура замораживания может быть любой и отвечать естественным условиям, но необходимо иметь некоторое стандартное ее значение, которое по аналогии с испытанием строительных материалов на морозостойкость целесообразно принять от минус 20 °С до минус 25 °С. Наличие подобного эталона облегчает сравнение результатов, полученных при других температурах замораживания. Необходимо учитывать и тот факт, что свойства льда, включая его сцепление с твердыми поверхностями, существенно зависят от температурного фактора.

Сила сцепления льда и материала покрытия ($R_{сц}$) определяется как разница прочностей на изгиб замороженных и испытанных при данной температуре водонасыщенных ($R_в$) и высушенных ($R_{сух}$) образцов:

$$R_{сц} = R_{в} - R_{сух} \tag{2.23}$$

или

$$R_{сц} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{bh^2} \left(R_{в} - R_{сух} \right), \tag{2.23}$$

где $P_{в}$, $P_{сух}$ – разрывная нагрузка; l – расстояние между опорами; b – ширина образца; h – высота образца.

Определение сил сцепления льда с поверхностью асфальтобетонных покрытий с использованием традиционных и шлаковых материалов по данной методике позволит определить отличия в образовании зимней скользкости, на этих типах покрытий.

2.8. Выводы по второй главе

1. Разработана математическая модель для описания изменения ТЭП на длительном временном интервале в подсистеме «Дорога – Автомобиль – Среда».
2. Разработана математическая модель для определения состояния покрытия на коротких интервалах времени в зимний период в подсистеме «Среда – Дорога».
3. Определены особенности образования гололеда на дорогах с разными типами покрытий на основе уравнения нестационарной теплопроводности.
4. Для выявления отличий в образовании гололеда определены силы сцепления льда с поверхностью покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами и асфальтобетона из традиционных материалов на основании уравнения нестационарной теплопроводности. Анализ особенностей образования гололеда на дорожных покрытиях позволил поставить задачи моделирования зимней скользкости для случая двукратного перехода температуры воздуха через 0 °С.

3

Экспериментальные исследования транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог с покрытиями из асфальтобетона со шлаковыми материалами

Результаты исследований, представленные в данной главе, основаны на работах автора диссертации: Краюшкина *et al*. (1998, 2001, 2003, 2005, 2008), Краюшкина (2001, 2008, 2012), Krayushkina *et al*. (2012), Краюшкина и Белятынский (2012а, 2012б, 2013), Краюшкина и Химерик (1998), Краюшкіна и Вирожемский (2006), Краюшкіна и Бєлятинський (2010).

3.1. Проведение экспериментальных исследований

Основной задачей экспериментальных исследований является оценка изменений во времени ТЭП автомобильных дорог с покрытиями из асфальтобетона со шлаковыми материалами и сравнение их с изменениями

ТЭП автомобильных дорог на асфальтобетонных покрытиях из традиционных материалов.

Для оценки ТЭП дорог контролировались:

– прочность дорожной одежды;

– ровность покрытия;

– коэффициент сцепления.

Для оценки ТЭП в зимне время исследовались отличия при образовании зимней скользкости, определялась сила сцепления (адгезия) льда с поверхностью покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами и покрытий из *традиционного* асфальтобетона, а также определялись теплофизические показатели асфальтобетона со шлаковыми материалами такие, как коэффициент теплопроводности λ и удельная теплоемкость C.

Изменения ТЭП автомобильных дорог на покрытии из асфальтобетона со шлаковыми материалами оценивались по результатам опытно-экспериментальных работ, которые проводились на участке автомобильной дороги II технической категории – «Подъездная автомобильная дорога к производственной базе ООО «Дорожное строительство Альтком», км 0+000–км 2+500 в Донецкой области.

Этот выбор обусловлен тем, что на данной автомобильной дороге есть участки с покрытиями из традиционного асфальтобетона и асфальтобетона со шлаковыми материалами.

Исследования по определению величины адгезии льда с асфальтобетонными поверхностями со шлаковыми материалами и асфальтобетона из традиционных материалов проводились в лабораторных условиях путем испытаний на изгиб образцов – балочек размером 4×4×16 см.

Схема проведения экспериментальных исследований представлена на рис. 3.1.

3.2. Описание участка автомобильной дороги

Строительство участка автомобильной дороги II технической категории – «Подъездная автомобильная дорога к производственной базе ООО «Дорожное строительство Альтком», км 0+000–км 2+500 в Донецкой области производилось в 2006 году по проекту, разработанному Донецким филиалом Государственного предприятия Украинский государственный институт по проектированию объектов дорожного хозяйства «Укргипродор» – «Донецкгипродор». Общая протяженность участка 2,5 км.

В первом варианте для строительства участка дороги II технической категории – «Подъездная автомобильная дорога к производственной базе ООО «Дорожное строительство Альтком», км 0+000–км 2+500 была разработана и предложена конструкция дорожной одежды представленная на рис. 3.2. В данной конструкции, на основании типовых решений, в основных конструктивных слоях дорожной одежды использован гранитный щебень.

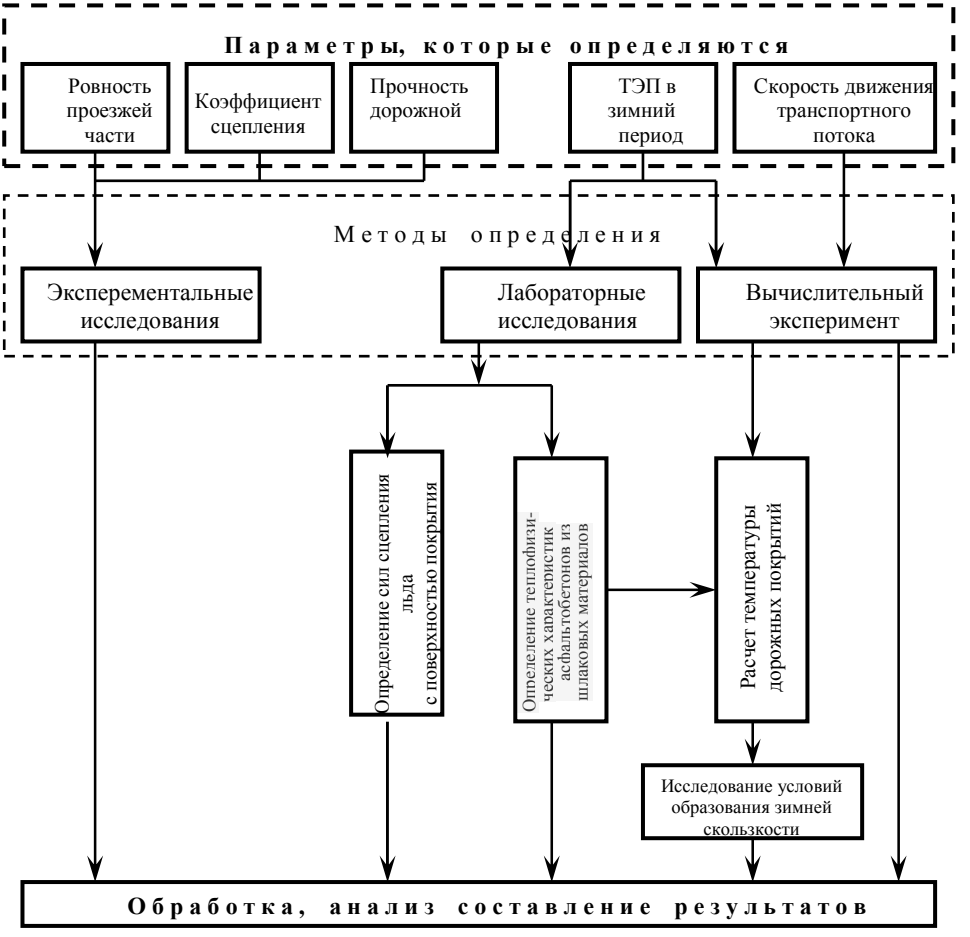


Рис. 3.1. Схема проведения экспериментальных иследований
3.1 pav. Eksperimentinių tyrimų schema
Fig. 3.1. Scheme of experimental research

Но, для условий Донецкой области гранитный щебень является привозным материалом, что приводит к значительному удорожанию дорожной конструкции в целом.

По просьбе Заказчика – Службы автомобильных дорог в Донецкой области и генерального подрядчика – ООО «Дорожное строительство Альтком» в Государственном дорожном научно-исследовательском институте ГосдорНИИ, автором, во время выполнения работы по научному сопровождению строительства участка автомобильной дороги II технической категории – «Подъездная автомобильная дорога к производственной базе ООО «Дорожное строительство Альтком», км 0+000–км 2+500 были разработаны рекомендации по использованию местных материалов – доменных шлаков. Рекомендации и два запроектированных варианта конструкций дорожных одежд были рассмотрены и утверждены Службой автомобильных дорог в Донецкой области в качестве экспериментального опытного участка автомобильной дороги.



Рис. 3.2. Конструкция дорожной одежды, предложенная по проекту «Донецкгипродором»
3.2 pav. Dangos konstrukcija, pasiūlyta pagal „Donetskgiprodor“ projektą
Fig. 3.2. Pavement design proposed according to the project of ‘Donetskgiprodor’

На участках автомобильной дороги от ПК 0+00 по ПК 20+00 как верхний слой покрытия уложен горячий плотный мелкозернистый асфальтобетон I марки тип А со шлаковыми материалами.

На участке от ПК 20+00 по ПК 25+00 для проведения научных исследований по определению деформационно-прочностных и ТЭП крупнозернистых асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами верхний слой из мелкозернистого асфальтобетона не устраивался.

При строительстве верхних слоев оснований и покрытий участков автомобильной дороги II технической категории – «Подъездная автомобильная дорога к производственной базе ООО «Дорожное строительство Альтком», км 0+000–км 2+500 использовались асфальтобетонные смеси, минеральная часть которых представлена доменными шлаками Макеевского металлургического комбината (ММК).

Доменные шлаки Макеевского металлургического комбината (ММК) по своему химическому составу, а также физико-механическим свойствам являются наиболее типичными представителями шлаков.

Шлаковые материалы (ММК) достаточно широко исследованы при использовании их в разных видах асфальтобетона. Это дает возможность проанализировать ранее полученные результаты, и провести необходимые дополнительные исследования ТЭП покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами (ММК).

Химический состав доменного шлака (ММК) представлен оксидами:

- CaO – 36,0 ÷ 38,2 % ;
- SiO_2 – 34,0 ÷ 36,0 % ;
- Al_2O_3 – 14,5 ÷ 16,0 % ;
- MgO – 0,7 ÷ 0,92 % ;
- MnO – 0,7 ÷ 0,92 % ;
- FeO – 0,30 ÷ 0,36 % .

и незначительным количеством серы (S–0,70–0,80 %).

В зависимости от соотношения основных оксидов $\left(M = CaO + MgO / SiO_2 + Al_2O_3\right)$ данный доменный шлак относится к категории кислых M = 0,92–0,93. Минералогический состав литых и отвальных шлаков (ММК) представлен, в основном, минералами группы менилитов – геленитом ($2CaOA1_2O_3SiO_2$) и окерматитом ($2CaOMgO_2SiO_2$). Шлаковая пемза, получаемая путем поризации шлакового расплава, состоит, в основном, из геленита ($2CaOAlOSiO_2$), псевдоволастонита ($2CaOSiO_2$) и шлакового стекла.

В результате, из одного и того же шлакового расплава выходит широкая гамма шлаковых материалов, характеризующаяся разной структурой, пористым строением и разными физико-механическими свойствами.

Показатели физико-механических свойств разных шлаковых материалов приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Физико-механические свойства шлаковых материалов
3.1 lentele. Šlako medžiagos fizinės ir mechaninės savybės
Table 3.1. Physical and mechanical properties of slag material

Наменование показателей	Единица измерения	Наменование шлакового материала			Требования по ДСТУ Б В.2.7-75
		Шлаковый щебень	Гранули–рованный шлак	Шлаковый отсев	
Прочность при сжатии материала	МПа	8,0–10,0	4,4	8,0–10,0	4,5–10,0
Плотность частичек	г/см^3	2,79	2,87	2,77	2,0–2,8
Пористость	% объему	4,8	6,06	4,4	7,8
Водопоглащение	%	4,6	5,1	1,55	5,4
Содержание водорастворимых соединений	% объему	–	0,32	0,25	–

Шлаковые материалы (ММК) проявляют гидравлическую активность. В воде, содержащейся в шлаковых материалах, протекают реакции гидролиза и гидратации, вызванные взаимодействием сульфидной серы с CaO_3 и образованием активного соединения *CaS,* влияющего на активизацию основных составляющих шлаковых материалов. Данное свойство также зависит от кинетики процессов кристаллизации шлакового расплава.

Подбор оптимальных составов асфальтобетонных смесей со шлаковыми материалами для опытного участка проводился по показателям физико-механических свойств исходя из подбора состава минеральной части и оптимального содержания битума.

Минеральная часть крупнозернистых смесей, что укладываются в верхнем слое основания и нижнем слое покрытия, состоит из 30 % шлакового щебня фракции 15–40 мм и 70 % шлакового отсева фракции 0–15 мм. Шлаковые материалы были получены на дробильно-сортировочной установке асфальтобетонного завода, путем дробления доменного

отвального шлака (ММК). По показателям свойств этот шлаковый щебень отвечает требованиям ДСТУ Б В.2.7-149 и относится к шлакам стойкой структуры и достаточно активным (А-28,52 кгс/см^2). Прочность щебня находится в пределах 800–1000 МПа. В качестве вяжущего использовался битум, полученный на безкомпрессорной установке АБЗ. Битум по показателям относится к марке БНД 90/130 и соответствует требования ДСТУ 4044. Оптимальное содержание битума в смеси составляет 6,5 % сверх 100 % минеральной части.

Для устройства верхнего слоя покрытия использовалась мелкозернистая шлаковая смесь фракции 0–15 мм, которая получена при дроблении доменного шлака (ММК) на фракционный щебень. По гранулометрическому составу данный отсев удовлетворяет требованиям для асфальтобетона типа А. Содержание битума марки БНД 60/90 находится в количестве 8,0 %. Подобранные зерновые составы минеральной части крупнозернистого и мелкозернистого асфальтобетона приведены в табл. 3.2 и табл. 3.3, соответственно.

Данные физико-механических свойств асфальтобетона со шлаковыми материалами получены по результатам научно-исследовательской работы в момент проведения контроля качества строительства и приведены в табл. 3.4.

3.3. Методики и результаты экспериментальных исследований транспортно-эксплуатационных показателей покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами

Оценка динамики изменения ТЭП на опытном участке проводилась на основе измерения таких показателей:

- модуля упругости дорожной одежды;
- ровности проезжей части;
- коэффициента сцепления колеса с покрытием.

Измерения проводились ежегодно на протяжении всего периода эксплуатации автомобильной дороги (с 2007 по 2011 г. г.).

3.3.1. Проведение визуальной оценки состояния дорожной одежды и исследования изменения прочности дорожной конструкции

Визуальная оценка состояния дорожной одежды – это способ получения предварительной информации, позволяющей определить участки, которые подлежат детальной инструментальной оценке местности.

Визуальную оценку проводили ежегодно, один раз в год с 2007 по 2011 г. г. осенью до начала периода ослабления дорожной одежды и оценивали в баллах.

Визуально оценку проводили комисионно – количество экспертов 3. Согласование мнений – 98,0 %.

В процессе визуальной оценки опытно - экспериментальный участок делили на отрезки длиной от 50 м до 500 м, границы которых назначались по однотипному состоянияю дорожной одежды.

На однотипном участке средний балл вычислялся по формуле:

$$Б_{ср} = \frac{Б_1 L_1 + Б_2 L_2 + \ldots + Б_n L_n}{L_1 + L_2 + \ldots + L_n}, \qquad (3.1)$$

где $Б_1$, $Б_2$, $Б_n$ – балл на соответствующем участке автомобильной дороги; L_1, L_2, L_n, – протяженность участков с практически одинаковым состоянием дорожной одежды в баллах.

График изменения балльной оценки состояния дорожной одежды в период эксплуатации автомобильной дороги за пять лет представлен на рис. 3.3.

Оценка прочности дорожной одежды проводилась путем определения модуля упругости на характерных участках ежегодно на протяжении пяти лет эксплуатации дороги. Модуль упругости определялся как упругий прогиб дорожной одежды, полученный методом статической нагрузки колесом автомобиля. Для испытания использовался нагруженный двухосный самосвал МАЗ-503А. Для измерения прогиба использовался прогибомер ПК-204 с точностью измерения прогиба ±0,01 мм. Оценка прочности дорожной одежды и обработка результатов исследований проводилась в соответствии с ВБН В.2.3-218-186.

Определение модуля упругости дорожной одежды проводилось на следующих участках:

участок №1 – ПК 0+00 – ПК 2+00;

участок №2 – ПК4+00 – ПК 7+00;

участок №3 – ПК 8+00 – ПК 12+00;

участок №4 – ПК 14+00 – ПК 16+00;

участок №5 – ПК 17+00 – ПК 20+00;

участок №6 – ПК 21+00 – ПК 23+00;

участок №7 – ПК 23+00 – ПК 25+00.

Обработка результатов определения упругого прогиба проводилась на основе методов математической статистики. Фактический прогиб дорожной одежды определялся для нормативного уровня надежности $K_н$=0,90. Модуль упругости на участке определялся по формуле:

$$E_{фл} = \frac{0,36\, Q_K}{l_ф}, \qquad (3.2)$$

где $E_{фл}$ – модуль упругости дорожной конструкции в контрольной точке в данный момент времени, МПа; Q_K – нагрузка на колесо автомобиля, кН; $l_ф$ – фактический прогиб при уровне надежности $K_н$=0,90, см.

Если полевые исследования проводились в нерасчетный период года, то для получения объективной характеристики о состоянии дорожной одежды проводилась соответствующая корректировка. Приведенный к расчетному периоду года и расчетной температуре фактический модуль упругости определялся соответственно ВБН В.2.3-218-186. Расчет проводился по формуле:

$$E_ф = E_{фл}\left[\frac{1}{K_\Theta} - \frac{1,5\, D\, K_Г}{H_K}\left(1 - \frac{W_{фл}}{W_p}\right)\right] K_Д\, K_T, \qquad (3.3)$$

где K_Θ – температурный коэффициент равный отношению прогиба при расчетной температуре покрытия к прогибу при температуре, соответствующей периоду проведения испытания; D – расчетный диаметр отпечатка колеса, 33 см; $K_Г$ – эмпирический коэффициент, зависящий от вида грунта земляного полотна в контрольной точке, принят $K_Г$=2,15 – для суглинков, супесков пылеватых; $Hк$ – толщина дорожной одежды, см; $W_ф$, W_p – измеренная и расчетная относительная влажность земляного полотна в период проведения испытаний; $K_д$ *и* $K_т$ – эмпирические коэффициенты.

Результаты измерения модуля упругости приведены в табл. 3.5 и представлены в виде графиков на рис. 3.4.

Таблица 3.2. Зерновой состав минеральной части крупнозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами
3.2 lentelė. Stambiagrūdžio asfalto su šlaku mineralinės dalies procentinė sudėtis
Table 3.2. Grading of mineral part of the coarse bituminous concrete produced of slag materials

Наименование материалов	Содер-жание, %	Прошло через сито (%) размером, мм										
		40	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071
1. Щебень шлаковый фр. 15 – 40 мм	30	30,0	10,3	0,7								
2. Шлаковая смесь (ММК) фр. 0 – 15 мм	70	70,0	70,0	64,7	49,0	33,7	26,0	18,9	14,0	9,7	5,1	3,0
Всего	100	100,0	80,3	65,4	49,0	33,7	26,0	18,9	14,0	9,7	5,1	3,0
Требования ДСТУ Б В.2.7-119		100-95	80-65	73-55	65-45	53-35	42-24	30-17	22-12	16-9	12-6	10-4

Таблица 3.3. Зерновой состав минеральной части мелкозернистого асфальтобетона типа А со шлаковыми материалами
3.3 lentele. A tipo smulkiagrūdžio asfalto su šlaku mineralinės dalies procentinė sudėtis
Table 3.3. Grading of mineral part of fine bituminous concrete of type A produced of slag materials

Наименование материалов	Прошло через сито (%) размером, мм										
	25	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071
Шлаковая смесь (ММК) фр.0 – 15мм	100	100,0	92,4	90,0	48,2	37,2	27,0	20,0	13,8	7,4	6,3
Требования ДСТУ Б В.2.7-119	100	100-95	92-83	81-67	55-45	42-27	33-18	26-12	20-9	14-6	11-5

Таблица 3.4. Физико-механические свойства асфальтобетона со шлаковыми материалами, полученные по результатам испытаний образцов-кернов
3.4 lentelė. Asfalto dangos su šlaku fizinės ir mechaninės savybės, remiantis duomenimis gautais atlikus tyrimus tiriant meginius-kernus
Table 3.4. Physical and mechanical properties of asphalt concrete produced of slag materials obtained on the results of core samples testing

Наименование слоев	Средняя толщина слоя, см	Плотность, г/см³	Водонасыщение, % объема	Набухание, % объема	Прочность при сжатии, МПа		Коэффициент водостойкости	Коэффициент уплотнения
					+ 20 °C	+ 50 °C		
Верхний слой основания:	7,92	2,22	6,98	0,91	–	–	–	0,96
– вырубки								
– переформованные образцы	–	2,32	6,46	0,51	4,55	1,22	0,82 / 0,85	–
Нижний слой покрытия:	6,62	2,23	7,70	0,90	–	–	–	0,96
– вырубки								
– переформованные образцы		2,31	6,06	0,22	3,67	1,89	0,95 / 0,78	
Верхний слой покрытия:	4,92	2,28	4,15	0,22	–	–	–	0,96
– вырубки								
– переформованные образцы	–	2,37	2,05	0,38	4,40	2,11	0,94 / 0,90	–

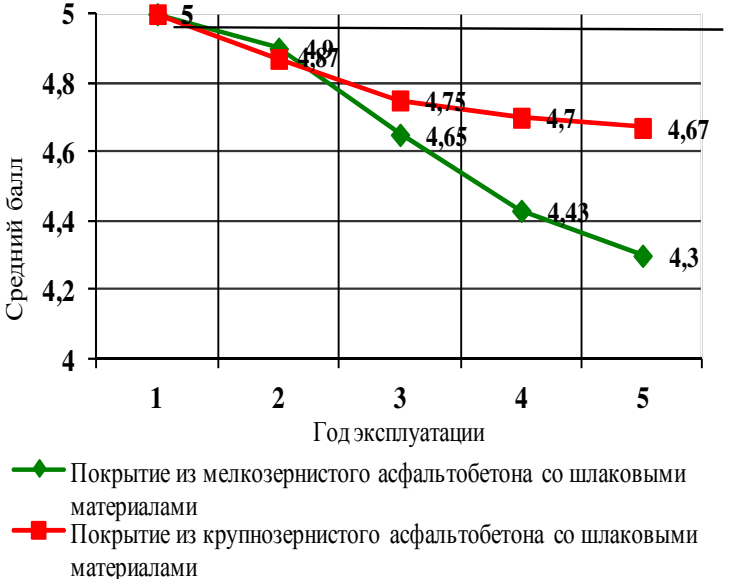


Рис. 3.3. Изменение балльной оценки состояния покрытия автомобильной дороги с покрытиями из мелкозернистого и крупнозернистого асфальтобетонов со шлаковыми материалами
3.3 pav. Automobilių kelių dangų iš smulkiagrūdžio arba stambiagrūdžio asfalto su šlaku vertinimo balais pokytis
Fig. 3.3. Change in scoring used for evaluation of road pavement condition with fine and coarse bituminous concrete surfacing produced of slag materials

Анализ полученных результатов показывает, что значения модулей упругости в 2007–2011 годах превышают необходимый, который по расчету принят равным 243 МПа. Минимальное значение модуля упругости, равное 226 МПа, наблюдалось в 2006 году на участке с ПК 0+00 по ПК 2+00, для которого испытания проводились практически сразу после окончания работ по укладке верхнего слоя покрытия из асфальтобетона со шлаковыми материалами. Необходимо отметить, что весь цикл работ по строительству данного участка проводился в период с августа по октябрь месяц, в то время когда на других участках насыпь земляного полотна отсыпалась в 2005 году, то есть имела год выдержки перед устройством дорожной одежды. Через год после эксплуатации значения модулей упругости на участках выравнивались и имели примерно одинаковые значения на обоих участках.



Рис. 3.4. Изменение модуля упругости дорожной одежды с покрытиями из мелкозернистого и крупнозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами
3.4 pav. Smulkiagrūdžio ir stambiagrūdžio asfalto su šlaku kelio dangos tamprumo modulio pokytis
Fig. 3.4. Change in the elastic modulus values of pavement with the surfacing of fine and coarse bituminous concrete produced of slag materials

При наблюдении за прочностью дорожной одежды в период эксплуатации было отмечено увеличение прочности дорожной конструкции. Эту особенность можно объяснить процессами гидратации, происходящими в слоях шлаковой основы, которые приводят к их омоноличиванию, и тем самым упрочнению этих слоев.

На основе проведенных исследований можно прогнозировать дальнейшее увеличение прочности конструкции, что обеспечит надежную работу дорожной одежды под действием возрастающих транспортных нагрузок.

3.3.2. Исследования процессов изменения ровности асфальтобетонного покрытия

Ровность поверхности асфальтобетонного покрытия определялась сразу после окончания строительства и один раз в год на протяжении четырех

лет после введения дороги в эксплуатацию путем измерения просветов под 3-х метровой универсальной рейкой согласно ДСТУ Б В.2.3-3 и исследованиям Белятынского (Белятынский, Краюшкина 2012).

Выборочный контроль ровности производился на участках длинной по 300–400 м. Измерения ровности проводились на неудовлетворительных по ровности участках, определенных визуальным осмотром.

Бальная оценка результатов измерений проведена соответственно ДБН В.2.3-4. Результаты измерений ровности на асфальтобетонном покрытии со шлаковыми материалами за пять лет эксплуатации приведены в таблице 3.6.

Анализ результатов измерений, приведенных в приложении 7, показывает, что на участках автомобильной дороги с верхним слоем покрытия из мелкозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами изменение ровности в период эксплуатации с 2007 по 2011 годы незначительное и результаты измерений отвечают оценке «отлично».

Существенные изменения ровности покрытия за пять лет эксплуатации дороги выявлены на участках ПК 21+00–ПК 23+00 и ПК 23+00–ПК 25+00 с верхним слоем покрытия из крупнозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами, где первичная ровность в момент строительства не была обеспечена. Все неровности, имеющие место при строительстве данного участка в результате нарушения технологического процесса, предполагалось исправить верхним слоем покрытия из мелкозернистого асфальтобетона. Но верхний слой покрытия на данном участке не был уложен. Таким образом, крупнозернистое асфальтобетонное покрытие со шлаковыми материалами работало на протяжении пяти лет без верхнего слоя и вся конструкция дорожной одежды была ослаблена. Вследствии этого, в процессе эксплуатации неровности начинали быстро развиваться за счет ударной формы взаимодействия колеса автомобиля с покрытием, что значительно ускорило процесс ухудшения ровности.

Результаты измерения ровности покрытий из мелкозернистого и крупнозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами, полученные не по трехметровой рейке, были переведены по известным корреляционным зависимостям в значения для прибора ПКРС-2У и представлены в приложении 7, а также в виде графика на рис. 3.5.

Таблица 3.5. Определение модуля упругости дорожной одежды
3.5 lentelė. Kelio dangos tamprumo modulis
Table 3.5. Determination of elasticity modulus of the pavement

№ участка	Дата испытания ПК+...	Дата испытания	Вид грунта согласно ДСТУ Б В.2.1-2 (ГОСТ 25100)	Прогиб дорожной одежды $l_{ф}$, мм	Фактический модуль упругости, $E_{фл}$, МПа	Измерянная относительная влажность грунта $W_{фл}$, %	Относительная расчетная влажность $W_{р}$, %	Приведенный модуль упругости, МПа
1	с ПК 0+00 по ПК 2+00	19.10.07 7.09.08 26.04.11	суглинок мягко-пластичный	0,77 0,42 0,03	246 451 847	0,91 0,56	0,86	226 415 491
2	с ПК 4+00 по ПК 7+00	19.10.07 7.09.08 26.04.11	суглинок мягко-пластичный	0,36 0,40 0,03	526 473 645	0,49 0,72	0,86	400 420 497
3	с ПК 8+0 по ПК 12+00	26.04.11	суглинок твердый	0,02	1409	0,47	0,86	472
4	с ПК 14+00 по ПК 16+00	26.04.11	суглинок твердый	0,02	982	0,50	0,86	453
5	с ПК 17+00 по ПК 20+00	19.10.07 7.09.08 26.04.11	суглинок твердый	0,34 0,32 0,02	557 592 1108	0,61 0,47	0,86	423 430 452
6	с ПК 21+00 по ПК 23+00	26.04.11	глина полутвердая	0,02	1296	0,54	0,86	422
7	с ПК 23+00 по ПК 25+00	19.10.07 7.09.09 26.04.11	суглинок твердый	0,53 0,48 0,01	357 395 1906	0,42 0,50	0,86	271 363 424

3.3.3. Исследования процессов изменения коэффициента сцепления

Определение коэффициента сцепления дорожных покрытий производилось маятниковым портативным прибором МП-3. Коэффициент сцепления определялся в прямом и обратном направлениях движения в пределах полос проезжей части, по левой полосе наката на расстоянии 1,0 м от оси проезжей части и правой полосе – 2,6 м от оси. Перед измерением коэффициента сцепления дорожное покрытие увлажнялось.

Значение коэффициента сцепления для мелкозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами определялись через три и десять дней после укладки асфальтобетона, а также раз в год на протяжении четырех лет после сдачи дороги в эксплуатацию. Для крупнозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами измерения проводились через один месяц после укладки, а следующие в те же сроки, что и для мелкозернистого асфальтобетона. Результаты измерений коэффициента сцепления приведены в приложении 8.



Рис. 3.5. График изменения ровности покрытий из мелкозернистого и крупнозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами по прибору ПКРС-2У

3.5 pav. Smulkiagrūdžio ir stambiagrūdžio asfalto su šlaku kelio dangų lygumo, matuoto prietaisu PKRS-2U, pokyčio grafikas

Fig. 3.5. Graph of measuring evenness of fine and coarse bituminous concrete surfacing produced of slag materials using device PKRS-2U

Анализ данных таблицы показывает, что значение коэффициента сцепления для мелкозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами (ПК 0+00–ПК 20+00) изменяется от 0,34 до 0,46. На участке с ПК 21+00 по ПК 25+00 величина коэффициента сцепления достигает значения 0,52.

По своим средним значениям коэффициент сцепления на покрытии из мелкозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами при открытии движения (через 3 дня после укладки) отвечает требованиям ДСТУ 3587. Минимально допустимое значение коэффициента сцепления на опасных участках – 0,3. Анализ приложения 8 позволяет также сделать вывод о том, что для мелкозернистого асфальтобетона наблюдается тенденция к повышению коэффициента сцепления в процессе эксплуатации покрытия. Через четыре года эксплуатации коэффициент сцепления на мелкозернистом асфальтобетоне со шлаковыми материалами достиг значения 0,46, то есть покрытия из асфальтобетона со шлаковыми материалами, как и покрытия из асфальтобетона из традиционных материалов, отличаются стабильностью сцепных свойств и не требуют устройства слоя поверхностной обработки.

Величина коэффициента сцепления на крупнозернистом асфальтобетонном покрытии со шлаковыми материалами по своим значениям близка к коэффициенту сцепления на поверхностной обработке, но в процессе эксплуатации наблюдается некоторое снижение его значений с 0,57 до 0,53, что может объясняться дробимостью некоторых выступов каменных частиц и стабилизации сцепных свойств покрытия.

График изменения коэффициента сцепления на мелкозернистом и крупнозернистом асфальтобетонном покрытии со шлаковыми материалами за пять лет эксплуатации представлен на рис. 3.6.

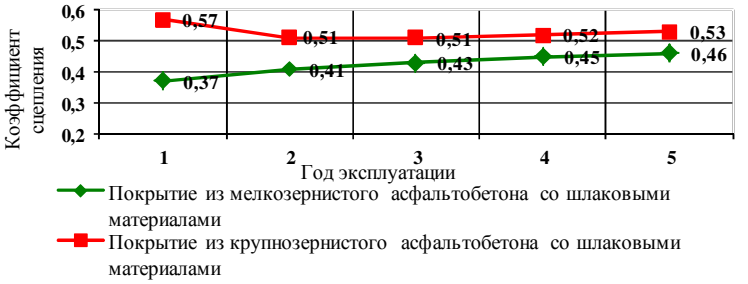


Рис. 3.6. Изменение коэффициента сцепления на покрытиях из мелкозернистого и крупнозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами
3.6 pav. Smulkiagrūdžio ir stambiagrūdžio asfalto su šlaku sukibimo koeficiento pokytis
Fig. 3.6. Change of friction coefficient of fine and coarse bituminous concrete surfacing produced of slag materials

3.4. Экспериментальные исследования транспортно-эксплуатационных показателей покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами

Для проведения исследований определялись теплофизические свойства асфальтобетонов со шлаковыми материалами: коэффициент теплопроводности λ и удельная теплоемкость C. Числовые значения этих характеристик для асфальтобетонов со шлаковыми материалами Макеевского металлургического комбината, в отличие от асфальтобетонов из традиционных материалов, в справочной и нормативной литературе не указаны, что привело к необходимости проведения отдельных лабораторных исследований.

Определение коэффициента теплопроводности λ для плотного мелкозернистого асфальтобетона марки I типа А со шлаковыми материалами, и пористого крупнозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами, отвечающих требованиям ДСТУ Б В.2.7-119 по методике согласно ГОСТ 7076. Исследования проводились на образцах цилиндрической формы размером 101×101 мм приготовленных соответственно требованиям ДСТУ Б В.2.7-89 (ГОСТ 12801). Зерновые составы асфальтобетонных смесей представлены в табл. 3.6, 3.7. Как органическое вяжущее использовался битум БНД 60/90 Кременчугского НПЗ, отвечающий требованиям ДСТУ 4044.

Для определения теплопроводности использовался прибор «Термис–СМ», предназначенный для оперативного неразрушительного контроля теплофизических свойств твердых строительных материалов, имеющих большую величину открытой пористости, а также неоднородных и дисперсных. Прибор прошел аттестацию.

Соответственно рекомендациям ГОСТ 7076 теплопроводность асфальтобетона определялась по пяти образцам. На каждом образце согласно ГОСТ 7076 проводилось по три измерения.

Точность измерения прибором «Термис–СМ» составила ±15 %. Испытания проводились при температуре воздуха в помещении 20±1 °С.

Результаты лабораторных испытаний представлены в табл.3.8 и 3.9.

При испытаниях значение теплопроводности материала вычислялось как среднее арифметическое значение результатов теплопроводности испытанных образцов.

Таблица 3.6. Зерновой состав минеральной части мелкозернистого асфальтобетона тип А со шлаковыми материалами
3.6 lentelė. Stambiagrūdžio asfalto A tipo su šlaku mineralinės dalies grūdinė sudėtis
Table 3.6. Grading of mineral part of fine bituminous concrete of type A produced of slag materials

Наименование материалов	Содержание %	Прошло через сито (%) размером, мм										
		25	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071
1. Щебень шлаковый фр. 5-20	50	50,0	46,0	36,0	24,0	5,3	1,72	0,48	0,36	0,32	0,23	0,12
2. Щебень шлаковый фр. 10-20	5	50,0	50,0	48,0	45,0	0	0	0	0	0	0	0
3. Шлаковый отсев ММК фр. 0-5	45	–	–	–	–	42,21	35,78	23,48	15,31	9,31	5,98	4,43
Всего	100	100	96,0	84,0	69,0	47,51	37,5	23,96	15,67	9,63	6,21	4,55
Требования ДСТУ Б В.2.7-119	–	100	100–95	92–83	81–67	55–45	42–27	33–18	26–12	20–9	14–6	11–5

Таблица 3.7. Зерновой состав минеральной части крупнозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами
3.7 lentelė. Stambiagrūdžio asfalto su šlaku mineralinės dalies grūdinė sudėtis
Table 3.7. Grading of mineral part of coarse bituminous concrete produced of slag materials

Наименование материалов	Содержание %	Прошло через сито (%) размером, мм										
		40	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071
1. Щебень шлаковый фр. 5-20	20	50,0	15,92	53,34	54,81	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0
2. Щебень шлаковый фр. 10-20	25	25	50,0	64,0	11,0	2,65	0,86	0,24	0,18	0,16	0,12	0,06
3. Шлаковый отсев НЛМК фр. 0-5	55	-	-	-	-	50,88	40,76	25,18	14,48	6,59	3,07	1,18
Всего	100	100	79,92	71,34	65,81	53,54	41,62	25,43	14,67	6,76	3,19	1,24
Требования ДСТУ Б В.2.7-119		100–95	80–65	73–55	65–45	55–35	42–24	30–17	22–12	16–9	12–6	10–4

Таблица 3.8. Результаты лабораторных исследований по определению коэффициента теплопроводности λ асфальтобетонов со шлаковыми материалами
3.8 lentele. Laboratorinių tyrimų rezultatai, nustatant asfalto su šlaku šilumos laidumo koeficientą λ
Table 3.8. Results of laboratory tests to determine thermal conductivity coefficient λ of asphalt concrete produced of slag materials

№ образца	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·К)			$\overline{\lambda_i}$, Вт/(м·К)	Дисперсия $\frac{\sum_{i=1}^{N=15}(\lambda_i-\overline{\lambda_i})^2}{N-1}$
	Номер испытания				
	1	2	3		
Плотный мелкозернистый асфальтобетон тип А со шлаковыми материалами					
1	0,37	0,42	0,40	0,40	0,0083
2	0,38	0,37	0,45	0,40	
3	0,37	0,37	0,36	0,37	
4	0,41	0,40	0,38	0,39	
5	0,39	0,41	0,38	0,39	
Пористый крупнозернистый асфальтобетон со шлаковыми материалами					
1	0,42	0,44	0,40	0,42	0,0094
2	0,37	0,39	0,40	0,39	
3	0,41	0,37	0,35	0,38	
4	0,44	0,43	0,41	0,43	
5	0,39	0,41	0,39	0,39	

Значение теплопроводности рассчитывалось по формуле:

$$\overline{\lambda_i} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i}{N}. \tag{3.3}$$

Стандартное отклонение с учетом малого объема измерений рассчитывалось по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(\lambda_i - \overline{\lambda_i}\right)^2}{N-1}}, \tag{3.4}$$

где λ_i – измеренная теплопроводность, Вт/(м·К); N – количество испытаний.

Погрешность измерения теплопроводности (как разница между результатом измерения и действительным значением величины) определялась по формуле:

$$\Delta\left(\overline{\lambda_i}\right) = \frac{t_p \sigma}{\lambda_i}, \qquad (3.5)$$

где t_p – коэффициент Стьюдента (для N = 15, t_p = 2,13 при доверительной вероятности P = 0,95); $\overline{\lambda_i}$ – среднее значение теплопроводности, Вт/(м·К); σ – стандартное отклонение случайной величины λ_i.

Результаты статистической обработки показали, что для плотного мелкозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами (согласно формулам 3.3 и 3.5):

- коэффициент теплопроводности λ_i = 0,39 Вт/(м·К);
- погрешность измерения $\Delta\left(\overline{\lambda_i}\right)$ = 13 %.

Для пористого крупнозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами:

- коэффициент теплопроводности λ_i = 0,40 Вт/(м·К);
- погрешность измерения $\Delta\left(\overline{\lambda_i}\right)$ = 14 %.

Полученные в ходе лабораторных исследований значения будут использоваться в качестве параметров для математической модели (2.15) и условий (2.16, 2.18 и 2.19), описывающих температурный режим в дорожной конструкции и на ее покрытии.

Таблица 3.9. Результаты лабораторных исследований по определению удельной теплоемкости асфальтобетонов со шлаковыми материалами
3.9 lentelė. Laboratorinių tyrimų rezultatai, nustatant asfalto su šlaku savitąją šilumą
Table 3.9. Results of laboratory tests to determine specific heat of asphalt concrete produced of slag materials

№ образца	Удельная теплоемкость C, Дж/(кг·К)			Опытные средние $\overline{C_i}$, Дж/(кг·К)	Дисперсия $\frac{\sum_{i=1}^{N=9}(C_i-\overline{C_i})^2}{N-1}$
	Номер испытания				
	1	2	3		
Плотный мелкозернистый асфальтобетон тип А со шлаковыми материалами					
1	1,71	1,73	1,69	1,71	0,0044
1	2	3	4	5	6
2	1,66	1,66	1,69	1,67	0,0044
3	1,67	1,67	1,68	1,67	
Пористый крупнозернистый асфальтобетон со шлаковыми материалами					
1	1,71	1,67	1,70	1,69	0,0034
2	1,71	1,71	1,74	1,72	
3	1,73	1,69	1,70	1,71	

3.5. Методика проведения расчетных экспериментов

3.5.1. Моделирование скорости движения транспортных потоков

Моделирование скорости движения транспортных средств проводилась в соответствии со схемой расчетного эксперимента, приведенной на рис. 3.7.

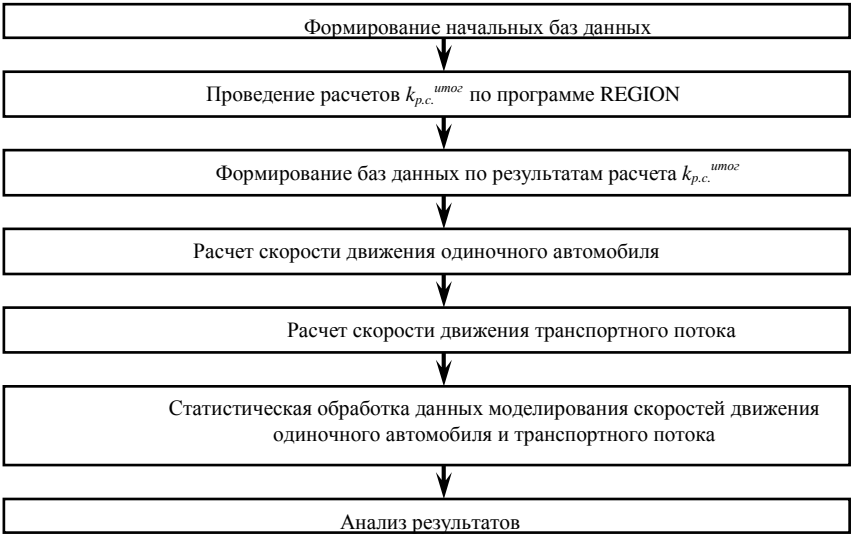


Рис. 3.7. Схема проведения расчетного эксперимента для расчета скорости движения транспортного потока на автомобильных дорогах с разными типами асфальтобетонных покрытий
3.7 pav. Transporto srauto automobilių keliuose su skirtingomis asfalto dangomis eismo greičio matavimų tyrimo schema
Fig. 3.7. Scheme of carrying out he design experiment to calculate speed of traffic flow on roads with different types of asphalt concrete pavements

Совокупность всех наиболее важных параметров и характеристик дороги, которые непосредственно влияют на величину скорости движения транспортных потоков, оценивается итоговым коэффициентом обеспеченности расчетной скорости $k_{р.с.итог}$. Для учета динамики изменения скорости движения автомобилей в процессе эксплуатации на покрытиях из асфальтобетона из традиционных материалов и покрытиях из

асфальтобетона со шлаковыми материалами в отдельные базы данных внесены изменения, указанные в таблице 3.10.

Как показали предварительные расчеты, наиболее на величину итогового коэффициента расчетной скорости влияют ДТП и уменьшение ширины проезжей части по отношению к нормативным значениям. Чтобы исключить влияние этих параметров на значение скорости движения транспортных средств при проведении расчетов в базы данных про ДТП (dtp. dbf) и ширину проезжей части (ukrep. dbf) были внесены изменения соответственно табл. 3.10.

Таблица 3.10. Изменение информации баз данных (БД) для моделирования скорости движения транспортного потока
3.10 lentelė. Duomenų bazių (DB) informacijos pokytis transporto srauto eismo greičiui modeliuoti
Table 3.10. Change of database (DB) information on simulation of traffic flow speed

Базы данных		Изменения, которые необходимо внести в БД для проведения расчетов
Название БД	Содержание информации	
dtp.dbf	Данные про ДТП	Исключить информацию о ДТП
intens.dbf	Интенсивность и скорость движения	Ввести данные наблюдений за каждый год эксплуатации
ukrep.dbf	Данные о ширине проезжей частии	Ввести нормативную ширину проезжей части дороги для участков II и III технических категорий согласно ДБН В.2.3-4
rown.dbf	Данные о ровности покрытия	Ввести данные экспериментальных исследований на опытном участке за каждый год эксплуатации для покрытия из асфальтобетона со шлаковыми материалами; для покрытия из асфальтобетона из традиционных материалов изменения внести по результатам исследований Красикова (2000) (формула (2.7), (2.8))
ball.dbf	Балльная оценка участков автомобильной дороги	То же самое
scepl.dbf	Данные о коэффициенте сцепления	То же самое. Для покрытия из асфальтобетона из традиционных материалов изменения внести по результатам исследований Немчинова (1985) (см. рис. 2.8, 2.9)

Расчеты $k_{р.с.итог}$ проведенные с использованием программы REGION и выполнением необходимых расчетов по результатам диагностики.

Как начальные данные для расчета скоростей движения на покрытиях из асфальтобетона со шлаковыми материалами принимались результаты экспериментальных работ, проводимых на опытном участе автомобильной дороги II технической категории – «Подъездная автомобильная дорога к производственной базе ООО «Дорожное строительство Альтком», км 0+000–км 2+500 в Донецкой области за пять лет эксплуатации. Результаты опытно–экспериментальных исследований приведены в п. 3.3. Для определения скоростей движения на покрытиях из асфальтобетона из традиционных материалов использовались данные, полученные в результате моделирования динамики изменения ТЭП. Временной интервал эксплуатации покрытий из асфальтобетона из традиционных материалов, взятый в расчеты, также составляет 5 лет, как для покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами, с целью проведения дальнейшей сравнительной характеристики этих покрытий.

Как начальный банк данных для определения коэффициента обеспеченности расчетной скорости по программе REGION приняты результаты диагностики автомобильной дороги подъезда к городу Донецку длиной 58 км за 2005 год. Дорога имеет участки как II, так и III технической категории.

Значения скоростей движения транспортного потока определялись с помощью kр.с.итог по формулам (2.12) и (2.13).

В результате расчетов сформированы базы данных с расчетными скоростями движения за пять лет эксплуатации для каждого исследованного типа дорожного покрытия. Все базы данных имеют одинаковую структуру, которая приведена в табл. 3.11.

Результаты расчета обрабатывались с использованием математических методов. Для автоматизации статистической обработки использовался табличный процессор EXCEL и программа STATISTICA.

В результате статистической обработки получены законы распределения скорости движения транспортного потока, которые и есть математическими моделями, описывающими динамику изменения исследуемого случайного параметра. Порядок и методика статистической обработки приведены в Приложении 1.

Таблица 3.11. Структура баз данных о скорости транспортных средств
3.11 lentelė. Transporto priemonių greičio duomenų bazių struktūra
Table 3.11. Structure of the databases on vehicles speed

Название поля	Содержание	Тип данных, длинна
KODDOR	Код дороги	C 7
KNADR	Адрес начала участка, км	N 4
MNADR	Адрес начала участка, м	N 5
KKADR	Адрес конца участка, км	N 4
MKADR	Адрес конца участка, м	N 5
KPI	Итоговый коэффициент обеспечения расчетной скорости	N 5.2
Va	Скорость движения одиночного автомобиля	N 5.1
VTP	Скорость движения транспортного потока на участке	N 5.1

3.5.2. Моделирование состояния дорожных покрытий в зимний период

Моделирование состояния дорожных покрытий проводилось в следующей последовательности:

- введение данных о конструкции дорожной одежды и теплофизических параметров конструктивных слоев;
- расчет начального распределения температуры в дорожной конструкции;
- введение метеорологических параметров суточных наблюдений на метеостанции, интерполяция информации в узлы сетки во времени;
- расчет граничных условий;
- расчет температуры дорожного покрытия;
- проверка с помощью логических отношений наличия условий для образования одного из видов скользкости (в соответствии с данными табл. 2.1);
- исследование динамики изменения параметров путем статистической обработки;
- получение количественной оценки изменений основных метеорологических параметров и температуры покрытия.

Температура дорожного покрытия измерялась в соответствии с метеорологическим данными, описывающими погодные условия в районе прохождения дороги.

Для определения температурного режима шлаковых и традиционных покрытий были рассмотрены два типа конструкции дорожной одежды, представленные в табл. 3.13.

В качестве исходных данных использовали данные наблюдений метеостанции г. Донецка, которая находится на расстоянии 5 км от начала опытного участка. В ходе расчетного эксперимента была сформирована база данных по перепадам температуры воздуха за период наблюдений 5 лет в течении зимного периода 3 месяца, всего 15 зимних периодов. База данных включает в себя параметры представленые в табл. 3.12.

Таблица 3.12. Структура баз данных по перепадам температур воздуха
3.12 lentelė. Oro temperatūros skirtumų duomenų bazių struktūra
Table 3.12. Options of pavement designs

Название поля	Содержание	Тип данных, длинна
DAT	Дата наблюдения	N 4.1
T1	Время окончания перехода температуры воздуха от положительных значений к отрицательным	N 4.1
T2	Время окончания перехода температуры воздуха от отрицательных к положительным значениям	N 5.1
TEM	Температура воздуха, измененная на протяжении всего времени перехода температуры с интервалом 3 часа	N 5.1
Tmin	Минимальная температура воздуха	N 5.1
Tmax	Максимальная температура воздуха, с которой началось снижение	N 5.1
GRAD	Скорость понижения температуры (температурный градиент)	N 4.2

По существующей базе проводились следующие расчеты:

– по данным времени перехода температуры воздуха через 0 °С определяли период отрицательной температуры воздуха по формуле:

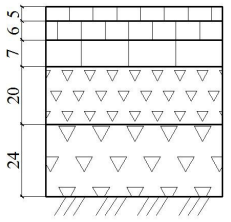
$$\Delta t = T2 - T1; \qquad (3.6)$$

– подсчитывали скорость снижения температуры воздуха (температурный градиент) как отношение разницы между

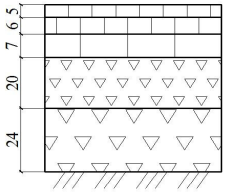
минимальной температурой воздуха и температурой, от которой началось снижение, до длительности снижения по формуле:

$$\Delta T_в = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{\Delta t}; \qquad (3.7)$$

Таблица 3.13. Варианты конструкций дорожных одежд
3.13 lentelė. Dangų konstrukcijų sprendimai
Table 3.13. Structure of the databases on air temperature drops

№	Конструкция дорожной одежды	Наименование слоя	Теплофизические показатели		
			Плотность, кг/м^3	Теплопроводность, Вт/м·К	Удельная теплоемкость, Дж/кг·К
1	2	3	4	5	6
1.		Горячий плотный мелкозернистый асфальтобетон I марки, тип А со шлаковыми материалами	2320	0,39	1,68
		Горячий пористый крупнозернистий асфальтобетон со шлаковыми материалами	2280	0,40	1,71
		Горячий пористый крупнозернистий асфальтобетон со шлаковыми материалами	2280	0,40	1,71
		Фракционированный доменный шлаковый щебень, устроенный по способу заклинки	800	0,19	1,10
		Отвальный доменный шлаковый щебень	800	0,19	1,10
		Грунт земляного полотна (суглинок и глина)	2000	1,62	1,45

Продолжение таблицы 3.13

1	2	3	4	5	6
2.		Горячий щебеночный плотный мелкозернистый асфальтобетон I марки, тип А	2400	1,40	1,65
		Горячий щебеночный пористый крупнозернистый асфальтобетон	2300	1,25	1,65
		Горячий щебеночный пористый крупнозернистый асфальтобетон	2300	1,25	1,65
		Фракционированный доменный шлаковый щебень, устроенный по способу заклинки	800	0,19	1,10
		Отвальный доменный шлаковый щебень	800	0,19	1,10
		Грунт земляного полотна (суглинок и глина)	2000	1,62	1,45

- вели статистику минимальной температуры воздуха и температурного градиента;
- проводили моделирование изменений температуры покрытия в зависимости от градиента температуры воздуха для разных типов покрытия;
- оценивали возможность образования зимней скользкости.

3.6. Определение сцепления льда с поверхностью асфальтобетонных покрытий

Соответственно теоретическим положениям, изложенным в п. 2.7, были проведены экспериментальные исследования с целью определения силы сцепления льда с разными типами асфальтобетонных покрытий.

Исследования проводились на образцах - балочках размером 4 см х 4 см х 16 см, приготовленных из традиционного мелкозернистого асфальтобетона и мелкозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами того же типа согласно ДСТУ Б В.2.7-89 (ГОСТ 12801). Размер максимальной фракции был ограничен 15 мм с целью получения более однородного материала при формировании структуры балочек. Зерновые составы асфальтобетонных смесей представлены в табл. 3.14, 3.15.

В качестве органического вяжущего использовался битум БНД 60/90 Кременчугского НПЗ, который отвечает требованиям ДСТУ 4044. Содержание битума согласно ДСТУ Б В.2.7-119. Так, для асфальтобетона со шлаковыми материалами было взято 6,7 %, а для мелкозернистого асфальтобетона с применением щебня – 5,5 %, более 100 % минеральной части.

Перед испытанием одна серия образцов в количестве 15 штук из традиционного и асфальтобетона со шлаковыми материалами подвергались стандартным методам сушки, а другая 6 штук – водонасыщению в вакуумной камере согласно ДСТУ Б В.2.7-89 (ГОСТ 12801).

Определение разрушающей нагрузки и, соответственно, прочности на разрыв проводилось по пятнадцати образцам. Результаты испытаний по определению показателей сцепления льда с поверхностью асфальтобетонных образцов приведены в табл. 3.16.

Средняя прочность на изгиб водонасыщенных и высушенных (замороженных) образцов составила соответственно:

- для асфальтобетона со шлаковыми материалами – 7,49 МПа и 6,30 МПа;
- для асфальтобетона из традиционных материалов – 6,36 МПа и 4,12 МПа.

Необходимо отметить, что прочность на растяжение при изгибе сухих образцов для асфальтобетона со шлаковыми материалами значительно выше (почти в 1,5 раза), чем у асфальтобетона из традиционных материалов. Данное обстоятельство при однотипном зерновом составе смеси может объясняться характером физико-химического взаимодействия на границе битум – минеральный порошок.

При близких значениях остаточной пористости и водонасыщения роль ледообразования более активно проявляется у образцов из асфальтобетона из традиционных материалов. Так, прочность на растяжение при изгибе у замороженных водонасыщенных образцов из асфальтобетона из традиционных материалов увеличилась на 51,1 %, тогда как у асфальтобетона со шлаковыми материалами только на 18,9 %. Данные отличия объясняются двумя факторами. Во-первых, разным

характером строения пор и во-вторых, химическим влиянием минеральной части на процессы ледообразования. В асфальтобетоне со шлаковыми материалами крупные открытые поры, из которых вода при замерзании может выдавливаться, и тонкие, капиллярные поры самого шлакового материала, в которых замерзание воды происходит при более низких температурах. В асфальтобетоне из традиционных материалов отсутствуют тонкие капиллярные поры и практически весь объем воды замерзает. В асфальтобетоне из традиционных материалов минеральные материалы являются инертными по отношению к воде (кроме минерального порошка, который практически весь связан с битумом), и потому отдельные обнажения минеральных частей не влияют на процесс ледообразования. В то же время обнаженная поверхность шлакового материала насыщена катионами, что создает на контакте с водой малонасыщенные рассолы, имеющие значительно низшую температуру замерзания.

Таблица 3.16. Результаты испытания образцов – балочек асфальтобетона со шлаковыми материалами и асфальтобетона из традиционных материалов
3.16 lentelė. Asfalto su šlaku ir tradicinio asfalto mėginių (sijų) bandymų rezultatai
Table 3.16. Results of samples testing – test beams of asphalt concrete produced of slag materials and asphalt concrete produced of traditional materials

Номер образца	Значение расчетного сопротивления при изгибе, R					
	для асфальтобетона со шлаковыми материалами			для асфальтобетона из традиционных материалов		
	Водонасыщенного $R_в$, МПа	Сухого $R_{сух}$, МПа	Сцепление льда с поверхностью $R_в$–$R_{сух}$, МПа	Водонасыщенного $R_в$, МПа	Сухого $R_{сух}$, МПа	Сцепление льда с поверхностью $R_в$–$R_{сух}$, МПа
1	7,73	6,42	1,31	6,55	4,35	2,20
2	7,15	6,02	1,13	6,38	4,17	2,21
3	7,87	6,41	1,46	5,90	4,15	1,75
1	2	3	4	5	6	7
4	7,21	6,24	0,97	6,11	4,26	1,85
5	7,48	6,39	1,09	6,88	4,14	2,74
Среднее значение	7,49	6,30	1,19	6,36	4,21	2,15

Таблица 3.14. Зерновой состав минеральной части мелкозернистого асфальтобетона тип Б со шлаковыми материалами
3.14 lentelė. B tipo smulkiagrūdžio asfalto su šlaku mineralinės dalies procentinė sudėtis
Table 3.14. Grading of mineral part of fine bituminous concrete of type B produced of slag materials

Наименование материала	Содержание, %	Прошло через сито (%) размером, мм								
		15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071
1. Щебень шлаковый фр. 5–20	40	50,00	42,29	34,60	21,55	18,12	16,04	14,57	8,31	6,74
2. Щебень шлаковый фр. 10–20	40	50,00	44,50	6,01	5,95	4,54	0,41	0,36	0,26	0,14
3. Шлаковый отсев (ММК) фр. 0–5	20	–	–	19,00	16,60	12,85	10,29	8,40	3,91	1,50
Всего	100	100,0	76,79	59,61	44,10	35,51	26,74	23,33	12,49	8,38
Требования ДСТУ Б В.2.7-119		100	100–90	65–55	53–43	43–33	33–23	25–16	18–11	14–8

Таблица 3.15. Зерновой состав минеральной части традиционного мелкозернистого асфальтобетона тип Б
3.15 lentelė. B tipo smulkiagrūdžio tradicinio asfalto mineralinės dalies procentinė sudėtis
Table 3.15. Grading of mineral part of traditional fine asphalt concrete of type B

Наименование материала	Содержание, %	Прошло через сито (%) размером, мм								
		15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071
1. Щебень фр. 5–20	46	100,00	89,50	9,70	6,92	0,15	0	0	0	0
2. Песок из отсева	40	–	5,5	37,18	28,22	24,69	14,06	9,57	6,67	4,46
3. Песок природный	10	–	–	9,90	9,80	9,55	9,00	3,85	0,53	0,10
4. Минеральный порошок	4	–	–	–	–	–	3,96	3,80	3,50	2,90
Всего	100	100,0	83,50	56,78	44,94	34,3	27,02	17,22	10,70	8,46

Все вышеприведенные данные обуславливают низкую силу сцепления льда с поверхностью асфальтобетона со шлаковыми материалами, которая почти в 2 раза ниже силы сцепления льда с поверхностью асфальтобетона из традиционных материалов (табл. 3.16).

Проведенные исследования позволяют сделать выводы, что на поверхности асфальтобетонов со шлаковыми материалами процессы ледообразования проходят в замедленном режиме, а сила сцепления льда с покрытием значительно ниже, чем с покрытием из асфальтобетона из традиционных материалов. Учет данных обстоятельств может позволить дорожным организациям получить граничный экономический эффект от снижения затрат на борьбу с зимней скользкостью на покрытиях из асфальтобетона со шлаковыми материалами. Но эта проблема выходит за рамки данных исследований и может стать задачей дальнейших научных исследований.

3.7. Экономическая эффективность использования асфальтобетона со шлаковыми материалами

Главным источником снижения стоимости дорожного строительства является широкое использование местных дорожно-строительных материалов, в том числе природных материалов, отходов и побочных продуктов промышленности, находящихся в отвалах, расположенных вблизи строящихся дорог.

При этом необходимо иметь в виду, что в связи с увеличением темпов строительства автомобильных дорог постоянно будет увеличиваться потребность в дорожно-строительных материалах, особенно в щебеночных материалах.

Использование шлаков способствует обеспечению дорожно-строительных организаций этими материалами. Кроме этого, необходимо учитывать, что массовое использование шлака, находящегося в отвалах для устройства покрытий автомобильных дорог даст значительный эффект по следующим составляющим:

- уменьшение стоимости строительства за счет меньшей стоимости шлаковых материалов;
- снижение затрат на приготовление и укладку асфальтобетонных смесей с минеральной частью из шлаковых материалов;
- продление сроков службы покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами;

– повышение безопасности движения автомобилей за счет обеспечения значений ТЭП (прочности, ровности, коэффициента сцепления) согласно требованиям действующих нормативных документов;
– улучшение экономичности и технологичности зимнего содержания дорог с покрытием из асфальтобетона со шлаковыми материалами.

Расчет экономической эффективности использования асфальтобетона со шлаковыми материалами производится согласно действующих нормативных документов, ИН 218 УССР 003, методических указаний по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительство и реконструкцию автомобильных дорог местного значения (1975), по формуле:

$$E = \left[З_1 \cdot \frac{y_1}{y_2} + \frac{\left(U_1^{'} - U_2^{'}\right) - E_м \left(K_2^{'} - K_1^{'}\right)}{y_2} - З_2 \right] A_2 \cdot \qquad (3.8)$$

Для возможности выполнения расчета экономического эффекта были проведены вспомогательные расчеты:

определена удельная капиталоемкость при производстве гранитного щебня по формуле:

$$k_1 = \frac{\Phi_i}{V_1}, \qquad (3.9)$$

где Φ_i – стоимость работ по добыче и переработке (дроблению) для получения гранитного щебня, необходимых фракций; k_1 = 6,74 по даным ООО «Дорожное строительство Альтком»;

рассчитана себестоимость изготовления 1 т асфальтобетонной смеси без стоимости материалов по формуле:

$$U_1 = C_3 - C_4, \qquad (3.10)$$

где C_3 – себестоимость 1т мелкозернистой асфальтобетонной смеси, грн/т. По данным ООО «Дорожное строительство Альтком» на 2011 год. C_3 = 968,34 грн/т; C_4 – стоимость составляющих 1 т асфальтобетонной смеси материалов при использовании традиционного гранитного щебня:

щебень фракции 5–20 – 40% – 43,30 грн;

щебень фракции 5–10 – 15% – 17,32 грн;

щебень фракции 0–5 – 38% – 48,01 грн;

известняковый минеральный порошок – 7% – 25,20 грн;

битум нефтяной марки БНД 90/130 – 5,5% – 404,59 грн;

с добавлением в битум:

Бутанол NC – 3,2 % (от веса битума)
Witfiks – 0,4 % (от веса битума)

Итого **538,42 грн/т.**

Официальный курс Национального банка Украины гривны к Евро на 15 октября 2012 года составлял: 1 Евро = 10,25 грн.

Примечание: Состав асфальтобетона и стоимость составляющих материалов взяты по данным ООО «Дорожное строительство Альтком».

$$U_1^1 = 968{,}34 - 538{,}42 = 429{,}92 \text{ грн.}$$

При использовании шлакового щебня:

$$U_2^{'} = C_3 - C_5 , \tag{3.11}$$

где C_5 – стоимость составляющих смесь материалов при использовании шлакового минерального материала, грн:

шлаковый щебень фракции 5–20 – 40 % – 13,36 грн;

шлаковый щебень фракции 5–10 – 15 % – 5,24 грн;

шлаковый щебень фракции 0–5 – 33 % – 15,97 грн;

известняковый минеральный порошок – 12 % – 25,20 грн;

битум нефтяной марки БНД 90/130 – 5,8 % – 426,66 грн;

с добавлением в битум:
Бутанол NC – 3,2 % (от веса битума)
Witfiks – 0,4 % (от веса битума)

Итого **486,43 грн/т.**

Примечание: Стоимость составляющих асфальтобетонную смесь материалов взяты по данным ООО «Дорожное строительство Альтком».

Тогда $U_1^1 = 968{,}34 - 486{,}43 = 481{,}91$ грн.

Капитальные вложения при производстве гранитного щебня $k_1^1 = 3{,}26$ – по данным ООО «Дорожное строительство АЛЬТКОМ».

Приведенные затраты на производство одной тонны гранитного щебня $З_1$ и шлакового щебня $З_2$ определены по формулам:

$$З_1 = C_1 + E_н \cdot k_1; \tag{3.12}$$

$$З_2 = C_2 , \tag{3.13}$$

где $E_н$ – нормативный коэффициент эффективности, равный 0,15.

Тогда $З_1 = 134{,}15 + 0{,}15 \cdot 6{,}74 = 135{,}16$ грн /т; $З_2 = 39{,}94$ грн/т.

Результаты выполненных расчетов при определении экономической эффективности использования шлакового материала при приготовлении асфальтобетонной смеси приведены в таблице 3.17.

Таблица 3.17. Результаты выполненных расчетов при определении экономической эффективности использования шлакового материала при приготовлении асфальтобетонной смеси
3.17 lentelė. Ekonominio efektyvumo naudojant šlaką asfalto mišinių gamybai atliktų skaičiavimų duomenys
Table 3.17. Results of the calculations at determining cost-effectiveness of slag materials usage at the preparation of asphalt concrete mix

Показатели	Ед. измерения	Условные обозначения		Наименование материала		Обоснование
		гранитный щебень	шлаковый щебень	гранитный щебень	шлаковый щебень	
Себестоимость производства материалов	грн / т	C_1	C_2	135,16	39,94	Данные ООО «Дорожное строительство Альтком»
Удельная капиталоемкость при производстве материалов	грн / т	K_1	K_2	6,74		Данные ООО «Дорожное строительство Альтком»
Удельный расход старого и нового материала на 1 т асфальтобетонной смеси	т	y_1	y_2	0,93	0,88	Данные ООО «Дорожное строительство Альтком»
Себестоимость изготовления 1 т асфальтобетонной смеси без стоимости материалов	грн	U_1^1	U_2^1	429,92	481,91	Расчетные данные
Капитальные вложения в стоимость завода по производству щебня в расчете на 1 т	грн	k_1^1	k_2^1	3,26	–	Данные ООО «Дорожное строительство Альтком»
Объем производства шлакового щебня при полной замене гранитного щебня	тыс. т	–	A_2	–	380,00	Данные ООО «Дорожное строительство Альтком»

Экономический эффект от замены гранитного щебня шлаковым, при использовании полного годового объема потребления щебня 380,0 тыс. тонн определяется по формуле:

$$E = \left[135,16 \cdot \frac{0,93}{0,88} + \frac{(429,92 - 481,91) - 0,15 \cdot (3,26)}{0,88} - 39,94 \right] \cdot 380 = 16,4 \text{ млн.грн.}$$

Таким образом, в результате выполненных расчетов установлено, что экономический эффект при полном использовании годового объема потребления шлакового щебня составляет 16,4 млн. грн.

Расход шлакового щебня при производстве 1 т асфальтобетонной смеси составляет 88%, следовательно, используя все потребляемое количество шлакового щебня, можно выпустить порядка 300 тыс. т асфальтобетонной смеси и получить экономический эффект на 1 км дорожного асфальтобетонного покрытия – 54 тыс. грн.

3.8. Экономическая эффективность содержания дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами в зимний период эксплуатации

Кроме подсчитанного экономического эффекта от применения асфальтобетона со шлаковыми материалами, необходимо рассчитать экономическую эффективность содержания дорог с асфальтобетонным покрытием со шлаковыми материалами в зимний период эксплуатации.

Изучение особенностей процесса ледообразования на асфальтобетонных покрытиях с использованием традиционных материалов и покрытиях со шлаковыми материалами показывает, что количество случаев образования стекловидного льда на покрытиях с использованием асфальтобетона со шлаковыми материалами на 15% ниже, чем на покрытиях из асфальтобетона из традиционных материалов. Поэтому, экономический эффект от эксплуатации покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами в зимний период времени состоит из экономического эффекта от сокращения расходов противогололедных материалов за счет снижения количества случаев образования зимней скользкости, уменьшения отрицательного экологического действия на придорожную полосу хлоридов, и выхлопов транспортных средств, снижения количества ДТП и увеличения скорости движения.

Экономический эффект от сокращения расходов противогололедного материала – технической соли (хлористого натрия *NaCl*) определяется по формуле:

$$Э_{NaCl} = C_{NaCl} \cdot \Delta Q\,, \tag{3.14}$$

где C_{NaCl} – отпускная цена 1т соли, (C_{NaCl} = 341,02 грн/т, г. Солидар, объединение «Артемсоль»); ΔQ – сокращение расхода соли рассчитывается по формуле:

$$\Delta Q = Q_{трад.} - Q_{шлак.}, \tag{3.15}$$

где $Q_{трад.}$ и $Q_{шлак}$ – общий расход соли на покрытии из асфальтобетона с использованием традиционных и шлаковых материалов, т.

$$Q_{\text{град. (шлак)}} = 10^{-6} \cdot B \cdot L \cdot \sum_{i=1}^{n} q_i\,, \tag{3.16}$$

где B – ширина обрабатываемого участка, м; L – длинна обрабатываемого участка, м; n – количество обработок за зимний период; q_i – норма расхода противогололедного материала, г/м^2.

Для расчетов учитывалось только количество обработок на дороге с наличием гололеда. Для Донецкой области количество случаев с гололедом и снежным накатом составляет около 54 % от общего количества возможных случаев образования зимней скользкости (около 82 случаев).

Экономический эффект от увеличения скорости движения транспортных средств вследствие проведения мероприятий по зимнему содержанию дорог определяется по формуле:

$$P_{ск} = 24\, t_3 \left(\frac{L}{V_3} - \frac{L}{V_0} \right) \cdot \left(\frac{E_н}{T \cdot P} \sum_{j=1}^{m} N_j k_j^a + \sum_{j=1}^{m} N_j c_j^{\text{пост}} \right), \tag{3.17}$$

где t_3 – продолжительность зимнего периода, сутки; L – длинна участка дороги, км; V_3 – средняя скорость движения автомобилей на заснеженной или обледенелой проезжей части из-за некачественного выполнения работ по зимнему содержанию дороги, км/час; V_0 – средняя скорость движения автомобилей при эффективном зимнем содержании, км/час; $E_н$ – нормативный коэффициент экономической эффективности, $E_н$=0,15; T – срок работы одного автомобиля на протяжении года, час; P – коэффициент выпуска автомобилей на линию; N_j – интенсивность движения автомобилей j-го типа, авт/час; k^a_j – удельные капитальные затраты на один автомобиль, учитываются затраты на создание автотранспортных и авторемонтных предприятий, грн; $c_j^{\text{пост}}$ – постоянная составляющая часть себестоимости перевозок, грн на авт/час.

Экономический эффект от исключения перерывов в движении из-за снеговых заносов и гололеда определяется по формуле:

$$P_{пер} = 24 \frac{t_{пер}}{365} \bar{Ц} \cdot \bar{j} \cdot \bar{\beta} \cdot \sum_{j=1}^{m} N_j \Gamma_j , \quad (3.18)$$

где $t_{пер}$ – срок перерывов движения на дороге вследствие снеговых заносов и гололеда, час; $\bar{j}$ – средняя стоимость 1 т грузов, грн; $\bar{Ц}$ – средний коэффициент использования грузоподъемности автомобилей; $\bar{\beta}$ – средний коэффициент использования пробега; Γ_j – грузоподъемность автомобиля j–го типа, т.

Экономический эффект от уменьшения убытков от ДТП определяется по формуле:

$$P_{ДТП} = (Z_3 – Z_0) \cdot g_3 \cdot L, \quad (3.19)$$

где Z_3 – среднее количество ДТП на дорогах с неудовлетворительным состоянием, вследствии неэффективного зимнего содержания дорог, ДТП/км; Z_0 – среднее количество ДТП при эффективном зимнем содержании дорог, ДТП/км; g_3 – средние экономические затраты, вследствие одного отчетного ДТП в зимний период, грн; L – длина участка дороги, км.

Экономический эффект от увеличения скорости движения на покрытии из асфальтобетона со шлаковыми материалами за счет уменьшения количества случаев образования зимней скользкости, в сравнении с асфальтобетонным покрытием из традиционных материалов рассчитывается по формуле:

$$Э_v = S \cdot L \cdot t \cdot N \cdot \left(\frac{1}{V_1} – \frac{1}{V_2} \right), \quad (3.20)$$

где S – стоимость авт/час (принимается равной 35 грн по данным ООО «Дорожное строительство Альтком»); V_1 – средняя скорость движения автомобилей на обледенелой проезжей части, (V_1 = 15 км/час); V_2 – средняя скорость движения автомобилей на чистой проезжей части при эффективном зимнем содержании, (V_2 = 45 км/час);

Результаты расчета экономической эффективности от качественного зимнего содержания дорог представлены в таблице 3.18.

Таким образом, общий экономический эффект при замене годового объема потребления гранитного щебня ООО «Дорожное строительство Альтком» шлаковым щебнем составляет 16,4 млн. грн. На один километр асфальтобетонного дорожного покрытия – 54 тыс. грн. Общий экономический эффект от зимнего содержания дорог при использовании асфальтобетона со шлаковыми материалами составляет на 1 км – 4 080,0 грн, на весь участок дороги – 52 498,0 грн.

Таблица 3.18. Экономический эффект от эксплуатации покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами
3.18 lentelė. Ekonominis efektas eksploatuojant asfalto dangas su šlaku
Table 3.18. Economic effect from the operation of asphalt concrete pavements produced of slag materials

Наименование составляющих экономического эффекта	Величина экономического эффекта, грн	
	на 1 км	на весь участок
Экономический эффект от сокращения затрат противогололедных материалов	161,5	1 599,0
Экономический эффект от увеличения скорости движения транспортных средств, вследствие проведенных мероприятий по зимнему содержанию дорог	580,0	4 702,5
Экономический эффект от исключения перерывов в движении из-за снеговых заносов и гололедицы	378,5	16 892,5
Экономический эффект от уменьшения убытков от ДТП	475,0	4 702,5
Экономический эффект от увеличения скорости движения на покрытии из асфальтобетона со шлаковыми материалами	2 485,0	24 601,5
Общий экономический эффект за весь зимний период	4 080,0	52 498,0

3.9. Итоговые значения параметров, влияющих на уровень транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог с разными типами асфальтобетонных покрытий

На основе проведенных исследований и результатов опытно-экспериментальных работ получены значения наиболее важных параметров, отвечающих за транспортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорог с покрытиями из асфальтобетона из традиционных материалов и асфальтобетона со шлаковыми материалами, которые сведены в табл. 3.19. Такое группирование параметров позволяет

комплексно оценить транспортно-эксплуатационное состояние и прогнозировать срок службы дорожных покрытий с определенным уровнем содержания.

Основные ТЭП, такие как прочность дорожной одежды, ровность покрытия, величина коэффициента сцепления и скорость движения транспортного потока были выбраны на основе анализа исследований разных авторов, изложенного в главе 1. Благодаря данным о величине прочности дорожной одежды, ровности покрытия и коэффициенте сцепления, можно прогнозировать работоспособность и долговечность дорожных конструкций, а также обосновывать виды ремонтных работ и их периодичность.

Теплофизические параметры асфальтобетонных покрытий (коэффициент теплопроводности и удельная тепллоемкость) были введены в таблицу, как впервые полученные, на основе проведенных в диссертационной работе исследований и важны для изучения гололедообразования в переходной и зимний периоды на разных типах асфальтобетонных покрытий. Эти параметры позволяют определить температурный режим дорожных покрытий, давать оценку эксплуатационному состоянию дорог в зимний период и выбирать методы борьбы с зимней скользкостью.

По итоговым значениям ТЭП автомобильных дорог, приведенным в табл. 3.19 видно, что по величине ровности и коэффициента сцепления, у покрытий из мелкозернистых асфальтобетонов со шлаковыми материалами по сравнению с покрытиями из мелкозернистых асфальтобетонов из традиционных материалов есть некоторые преимущества, проявляющиеся в динамике их изменения.

На автомобильных дорогах с покрытиями из мелкозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами за пять лет эксплуатации наблюдается незначительное ухудшение ровности, а прочность дорожной одежды и величина коэффициента сцепления наоборот возрастают по сравнению с автомобильными дорогами, где в покрытие уложен мелкозернистый асфальтобетон из традиционных материалов.

Ухудшение ровности на крупнозернистом асфальтобетонном покрытии со шлаковыми материалами происходит более интенсивно чем на асфальтобетонных покрытиях из традиционных материалов. Это можно объяснить некоторыми нарушениями технологии строительства и отсутствием верхнего слоя покрытия на опытном участе, что свидетельствует о необходимости проведения дополнительных исследований по изучению изменения ТЭП при строительстве опытных участков с покрытиями из крупнозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами.

Таблица 3.19. Значения характеристик, влияющих на транспортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорог II технической категории с разными типами асфальтобетонных покрытий

3.19 lentelė. Parametrų reikšmės, kurios turi įtakos asfalto dangos su įvairių tipų transporto ir kelių ii techninės kategorijos veiklos būklę

Table 3.19. Values of parameters affecting riding qualities of motor roads of ii technical category with different types of asphalt concrete pavements

Наименование параметров	Нормативное значение	Нормативная литература	Фактическое значение					
			Для покрытия из традиционного мелкозернистого асфальтобетона		Для мелкозернистого асфальтобетонного покрытия со шлаковыми материалами		Для крупнозернистого асфальтобетонного покрытия со шлаковыми материалами	
			1 год эксплуа-тации	5 год эксплуа-тации	1 год эксплуа-тации	5 год эксплуа-тации	1 год эксплуа-тации	5 год эксплуа-тации
Прочность дорожной одежды, МПа	243	ДБН В.2.3-4 ДСТУ Б В.2.3-3 ДСТУ 3587	243	216	243	480	271	423
Ровность покрытия по ПКРС–2У, см/км	660		275	365	275	300	290	375
Величина коэффициента сцепления	0,3		0,45	0,37	0,37	0,46	0,57	0,53
Скорость движения транспортного потока, м/час	–		79,3	68,7	73,9	79,3	79,7	65,7
Сила сцепления льда с поверхностью асфальтобетонного покрытия, МПа	–		2,15	2,15	1,19	1,19	–	–
Коэффициент теплопроводности асфальтобетона, Вт/(м·К)	–		1,4	1,4	0,39	0,39	0,4	0,4
Удельная теплоемкость асфальтобетона, Дж/(кг·К)	–		1,65	1,65	1,68	1,68	1,71	1,71
Частота случав образования стекловидного льда при переходе температуры воздуха от положительных значений к отрицательным и на оборот	–		100	100	85	85	–	–

Отличия в поровой структуре и теплофизических параметрах асфальтобетонных покрытий приводят к снижению величины сцепления стекловидного льда и уменьшения количества случаев его образования на покрытиях из мелкозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами в сравнении с покрытиями из мелкозернистого асфальтобетона из традиционных материалов.

Высокие и стабильные ТЭП автомобильных дорог с покрытиями из мелкозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами позволяют значительно сократить расходы на эксплуатационное содержание, а так же поддерживать скоростной режим транспортных потоков на достаточно высоком уровне в период длительной эксплуатации в разные периоды времени по сравнению с автомобильными дорогами с покрытиями из асфальтобетонов из традиционных материалов.

3.10. Выводы по третьей главе

1. Визуальная оценка состояния дорожной одежды и экспериментальные исследования динамики изменения прочности дорожной конструкции с покрытиями из мелкозернистого и крупнозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами, показывает, что асфальтобетонные покрытия на основе шлаковых материалов характеризуются на протяжении 5 лет эксплуатации увеличением величины модуля упругости во времени на 15 %.
2. Динамика изменения ровности покрытия из мелкозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами в процессе 5 лет эксплуатации автодороги не превышает 10 %, а значение ровности отвечает оценке – «отлично».
3. Коэффициент сцепления на протяжении пяти лет эксплуатации для мелкозернистого асфальтобетона сохраняет значение выше 0,51, для сухого покрытия. Асфальтобетонные покрытия со шлаковыми материалами вследствии стабильности величины коэффициента сцепления не требуют устройства шероховатых слоев износа в межремонтный срок службы покрытия способами поверхностной обработки.
4. Значения ТЭП автомобильной дороги с покрытиями из крупнозернистого и мелкозернистого асфальтобетона со шлаковыми материалами, полученные при проведении опытно-экспериментальных исследований в длительный период времени,

отвечают нормативным требованиям, которые предъявляются для покрытий автомобильных дорог I и II технических категорий.

5. Экспериментально определены отсутствующие в справочной и нормативной литературе теплофизические характеристики для крупнозернистого и мелкозернистого асфальтобетона из доменного шлака, такие, как коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость.

6. Результаты экспериментальных исследований по определению сил сцепления льда с поверхностью асфальтобетонных покрытий из традиционных материалов и асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами показали, что величина сцепления льда с поверхностью покрытия из асфальтобетона со шлаковыми материалами почти в 2 раза ниже сцепления льда с поверхностью покрытия из асфальтобетона из традиционных материалов. Это обусловлено разным характером строения пор и химическим влиянием минеральной части на процессы образования гололеда.

7. Строительство и эксплуатация покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами в районах с развитой металлургической промышленностью позволяет получить экономический эффект в пределах 54,0 тыс грн. (5 268 Евро) на 1 км дороги в ценах 2012 года. За один зимний период при эксплуатации покрытий из асфальтобетона со шлаковыми материалами благодаря уменьшению количества случаев образования зимней скользкости в виде стекловидного льда, экономический эффект составляет 4,08 тыс. грн (398 Евро) на 1 км дороги в ценах 2012 года.

Общие выводы и рекомендации

Общие выводы

1. Проведенное определение наиболее значимых факторов, влияющих на изменение транспортно-эксплуатационных показателей (ТЭП) асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами показало, что для оценки изменения прочности дорожной одежды, ровности покрытия и коэффициента сцепления может быть принят межремонтный срок службы, а для оценки состояния дорожного покрытия в зимний период – интервал времени, отвечающий образованию зимней скользкости.
2. Впервые разработана математическая модель, описывающая изменение ТЭП при длительном временном интервале в подсистеме «Дорога–Автомобиль–Среда» с учетом погодно-климатических, дорожных и транспортных факторов.
3. Впервые разработана математическая модель для определения состояния покрытия на коротких интервалах времени в зимний период в подсистеме «Среда–Дорога» с учетом метеорологических и дорожных параметров.

4. Экспериментальными исследованиями подтверждено, что возможность образования зимней скользкости в виде стекловидного льда на асфальтобетонных покрытиях со шлаковыми материалами вследствии большей тепловой инерции до 15 % ниже, чем на асфальтобетонных покрытиях из традиционных материалов, а величина сцепления льда почти в 2 раза ниже сцепления льда с поверхностью покрытия из традиционных материалов.
5. Впервые теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что ТЭП, а именно, прочность, оцениваемая модулем упругости на протяжении 5 лет эксплуатации для крупнозернистого и мелкозернистого асфальтобетонов из шлаковых материалов увеличивается на 55 % в сравнении с начальной, ровность увеличивается на 10 %, коэффициент сцепления остаетсяпрактически остался без изменения для крупнозернистого асфальтобетона (исходное значение 0,57, через 5 лет эксплуатации – 0,53) и увеличивается для мелкозернистого асфальтобетона (соответственно 0,37 и 0,46).
6. Расчитанная экономическая эффективность использования асфальтобетона со шлаковыми материалами составляет при замене годового объема использования гранитного щебня шлаковым составляет 16,4 млн. грн. (≈1,6 млн. Евро). На один километр асфальтобетонного покрытия – в пределах 54 тыс. грн. (≈5268 Евро) Экономическая эффективность от зимнего содержания дорог при использовании асфальтобетона со шлаковыми материалами составляет на 1 км дороги – около 4 080 грн (≈398 Евро), на всю протяженность опытного участка дороги – около 52 498 грн. (≈5121 Евро)

Рекомендации

1. Сроки между капитальными ремонтами автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями из шлаковых материалов необходимо назначать такими, как для автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями из асфальтобетона из традиционных материалов, но с учетом интенсивности движения транспортного потока, типа дорожной одежды, коэффициента надёжности и дорожно-климатической зоны.

2. Срок службы асфальтобетонного покрытия со шлаковыми материалами необходимо оценивать по величине износа поверхности покрытия и снижения модуля упругости дорожной одежды более чем на 25 % от значений, полученных на основе диагностических испытаний.
3. Для ремонта асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами рекомендуется использовать наиболее эффективные и экономически выгодные технологии, основанные на принципах регенерации.
4. Основным дефектом асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами являются трещины. В процессе эксплуатационного содержания необходимо в обязательном порядке осуществлять заливку трещин мастикой или вязким битумом при переходе от летнего к зимнему периоду эксплуатации.
5. При борьбе со стекловидным льдом на мелкозернистых асфальтобетонных покрытиях со шлаковыми материалами из-за повышенной их шероховатости (свыше 0,3 мм) возможно применения хлористого кальция и хлористого магния, что не приведёт к резкому снижению коэффициента сцепления.

Список используемой литературы

Анализ норм проектирования полотна автомобильных дорог зарубежных стран на примере последних норм и правил Федеративной Республики Германии. 2003. Приложение I+II. Москва. 116 с.

Апестин, В. К.; Тулаев, И. А. 1986. Оценка и учет влияния выравнивания покрытия при среднем ремонте на эксплуатационное состояние нежестких дорожных одежд. *Сб. науч. тр. ГипродорНИИ: Совершенствование методов оценки и повышения технико-эксплуатационных качеств автомобильных дорог* 53: 14–21.

Бабков, В. Ф. 1982. *Дорожные условия и безопасность движения*: учеб. пособие. Транспорт, Москва, 288 с.

Бабков, В. Ф. 1974. *Дорожные условия и режимы движения автомобилей*. Транспорт, Москва, 278 с.

Бабков, В. Ф. 1988. Пути обеспечения безопасности движения по дорогам, в *Проектирование автомобильных дорог в сложных условиях: Труды МАДИ*, 4–16.

Баришпол, А. І. 1997. Високоефективні дренажні шари дорожніх та аеродромних покриттів, *Автошляховик України* 3: 47–47.

Белятынский, А. А. 2000. Застосування космічної зйомки для аналізу дорожньої мережі з метою підвищення безпеки руху, *Безпека дорожнього руху України* 1(6): 9–11.

Белятынский, А. А.; Белятынский, А. А. 2006. Геоінформаційні технології на автомобільних дорогах, в *Тезисы докладов 62 научной конференции НТУ*, 105–106.

Белятынский, А. О.; Белятынский, О. А.; Бакулич, О. А. 2006. Застосування транспортної логістики в геоінформаційних системах автомобільних доріг, *Весник НТУ* 11: 239–241.

Белятынский, А. О.; Краюшкина, К. В. 2012. Використання відвальних шлаків різних виробництв в дорожньому будівництві, *Дороги і мости* 12: 24–30.

Белятынский, А. О.; Кужель, Н. В. 2009. Критерии необходимости реконструкции автомобильных дорог с учетом теории транспортных потоков по сроку окупаемости, в *Сборник докладов 12-й конференции молодых ученых Литвы «Наука – будущее Литвы. Транспорт»* (CD).

Белятынский, А. О.; Никитенко, А. И. 1999. Застосування методів фотограмметрії для вивчення дорожніх умов з метою покращення безпеки руху, *Безопасность дорожного движения Украины* 4(5): 101–105.

Белятынский, А. О.; Пилипенко, О. И.; Силищук, Т. О.; Клименко, И. С. 2009. Вплив експлуатаційного стану автодоріг на акустичне забруднення пришляхового простору та визначення основних шумових характеристик транспортних потоків, *Весник Инженерной академии Украины* 2: 172–174.

Белятынский, А. О.; Утеченко, Т. О. 2008. Разработка проектов транспортных сооружений с помощью комплекса CREDO, в *Сборник докладов 10-й конференции молодых ученых Литвы «Наука – будущее Литвы. Транспорт»* (CD).

Бируля, А. К. 1962. Эксплуатационные качества автомобильных дорог, *Исследование закономерностей автомобильного движения для установления расчетных характеристик проектируемых дорог: Сборник трудов КАДИ* 9: 15–15.

Бируля, А. К.; Михович, С. И. 1968. *Работоспособность дорожных одежд*. Транспорт, Москва, 172 с.

Богомольный, И. Н.; Богородский, В. В. 1980. *Влияние свойств каменных материалов на изменение скользкости асфальтобетонных покрытий. Лед. Физические свойства: Современные методы гляциологии.* Гидрометеоиздат, Ленинград, 384 с.

Боровский, Б. Е. 1984. *Безопасность движения автомобильного транспорта. Анализ ДТП.* Лениздат, Ленинград, 304 с.

Борисюк, Н. В. 2004. Влияние вязкости растворов реагентов на величину коэффициента сцепления шины с дорожным покрытием, в *Сборник науч. трудов: Строительство и эксплуатацияция авт. дорог: проблемы и перспективы развития*, 108–108.

Бялобжеский, Г. В.; Дюнин, А. К. 1983. *Зимнее содержание автомобильных дорог.* Транспорт, Москва, 197 с.

Васильев, А. П.; Ушаков, В. В. 2003. *Анализ современного зарубежного опыта зимнего содержания дорог и разработка предложений по его использованию в условиях России*. Информавтодор, Москва, 60 с.

Васильев, А. П. 1986. *Исследование состояния дорог и безопасности движения в сложных погодных условиях*. Транспорт, Москва, 248 с.

ВБН В.2.3-218-186-2004. *Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу*.

ВБН Г.1-218-182:2006. *Класифікація робіт з ремонтів автомобільних доріг загального користування*.

ВСН 25-76: Указание по организации и обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах. 1977. Минавтодор РСФСР. Транспорт, Москва, 176 с.

Глухов, А. Т. 1987. Классификация форм рельефа по гололедообразованию на автомобильных дорогах, в *Повышения эффективности строительства и эксплуатации автомобильных дорог: Труды СибАДИ*, 95–99.

Глухов, А. Т. 1996. Условия образования гололеда и безопасности движения по автомобильным дорогам, в *Проблемы автодорожного комплекса Саратовской области и пути их решения: Материалы региональной научно-практической конференции*, 16–17 мая 1996 г. Ч. 1, 72–75.

Гончаренко, Ф. П. 2000. Повышение безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах общего пользования в Украине, в *Научно-технические проблемы дорожной отрасли стран СНГ/МСД*, 178–182.

ГОСТ 7076-99. *Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности*.

Гриневич, С. В.; Лысенко, В. Е. 1994. Антигололедный наполнитель для асфальтобетонных смесей, *Труды РосдорНИИ* 7: 93–98.

ГСТУ 218.02070915-102-2003. *Автомобільні дороги. Визначення транспортно–експлуатаційних показників дорожніх покриттів*.

Гезенцвей, Л. Б. 1985. *Дорожный асфальтобетон.* Транспорт, Москва, 350 с.

ДБН В.2.3-4-2007. *Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Частина І. проектування.*

ДБН В.2.3-4-2007. *Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Частина ІІ. Будівництво*.

Дивочкин, О. А.; Дуюнов, П. К.; Мохамед, Я. 1988. Расчет аварийных съездов, в *Проектирование автомобильных дорог в сложных условиях: Сборник научных трудов МАДИ*, 133–140.

ДСТУ 3587-97. *Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану*.

ДСТУ 4044-2001. *Бітуми нафтові дорожні в'язкі. Технічні умови*.

ДСТУ Б В.2.1-2-96 (ГОСТ 25100-95). *Основи та підвалини будинків і споруд. Грунти. Класифікація*.

ДСТУ Б В.2.3-3-2000. *Споруди транспорту. Дороги автомобільні та аеродроми. Методи вимірювань нерівностей основ та покриттів*.

ДСТУ Б В.2.3-8-2003. *Споруди транспорту. Дорожнє покриття. Методи вимірювання зчіпних якостей*.

ДСТУ Б В.2.7-89-99 (ГОСТ 12801-98). *Будівельні матеріали. Матеріали на основі органічних в'яжучих для дорожнього і аеродромного будівництва. Методи випробувань*.

ДСТУ Б В.2.7-119-2003. *Будівельні матеріали. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови*.

ДСТУ Б В.2.7-149:2008. *Будівельні матеріали. Щебінь і щебенево–піщані суміші із шлаків металургійних для дорожніх робіт. Технічні умови*.

Дюнин, А. К. 1983. *Зимнее содержание автомобильных дорог*. Транспорт, Москва, 197 с.

Елисеев, Б. М. 1974. Связь между оценками ровности при измерении рейкой, установкой ПКРС-2 и толчкомером ТХК-2, *Сборник научных трудов Союздорнии: Ровность дорожных покрытий и их сопротивление скольжению автомобильных шин* 72: 73–76.

Еремин, А. В. 2000. *Эксплуатационно-прочностные свойства шлаковых асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог:* дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 201 с.

Еремин, В. Г. 1995. Комплексное применение шлаковых материалов в конструкциях нежестких дорожных одежд, в *Научно-технические достижения в области дорожных строительных материалов, строительства, реконструкции, содержания автомобильных дорог и искусственных сооружений*, 46–50.

Еремин, В. Г. 1987. *Холодный асфальтобетон на шлаковых материалах и его применение в покрытиях автомобильных дорог*: дис.... канд. техн. наук. Воронеж, 212 с.

Зонов, Ю. Б. 1989. *Выбор методов борьбы с зимней скользкостью автомобильных дорог с целью повышения безопасности движения автомобиля:* дис. канд. техн. наук: 05.23.14. МАДИ, Москва, 212 с.

ИН 218 УССР 003-84. *Определение экономической эффективности использования в дорожном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. Инструкция*. Киев, 111 с.

Кац, А. В. 1986. *Дорожное проектирование в условиях неполной информации.* Транспорт, Москва, 93 с.

Клинковштейн, Г. И.; Афанасьев, М. Б. 2001. *Организация дорожного движения*. Транспорт, Москва, 247 с.

Ковалев, Н. С. 1991. *Адгезионная прочность*. Химия, Москва, 159 с.

Коганзон, М. С. 1998. Основные направления обеспечения работоспособности дорожной одежды, в *Особенности проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог в Восточно-Сибирском регионе: Сборник научных трудов*, 56–60.

Коганзон, М. С. 1997. Повышение сроков службы дорожных одежд, в *Сборник докладов международной конференции «Промышленность стройматериалов и стройиндустрия, энерго- и ресурсоснабжение в условиях рыночных отношений»*. Белгород, 316–317.

Коганзон, М. С. 2001. Проблемы развития автомобильных дорог и повышение сроков службы дорожных одежд, в *Строительство и эксплуатация автомобильных дорог: задачи и решения: Сборник научных трудов МАДИ (ГТУ)*, 20–29.

Кон, Д. Д.; Ефименко, В. Н. 1989. Изменчивость транспортно-эксплуатационных качеств с учетом водно-теплового режима автомобильных дорог, в *Проектирование автомобильных дорог в сложных условиях Сибири: Сборник научных трудов*. Омск, 49–52.

Коноплянко, В. И. 2007. *Организация и безопасность дорожного движения*. Высшая школа, Киев, 304 с.

Кравченко, Л. А. 2003. *Повышение безопасности дорожного движения методами регулирования скоростного режима автомобилей:* диссертация кандидата технических наук. Москва, 171 с.

Королев, И. В. 1986. *Пути экономии битума в дорожном строительстве*. Транспорт, Москва, 147 с.

Красиков, О. А. 1986. Исследование взаимосвязи между показателями толчкомера и трехметровой рейкой, в *Технико-экономическое обоснование параметров автомобильных дорог: Сборник научных трудов СибАДИ*. Омск, 70–74.

Красиков, О. А.; Павловская, Е. П. 1998. Исследование изменения прочности дорожных одежд в годовом периоде, в *Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации дорог: Сборник научных трудов*. Алматы, 204–210.

Красиков, О. А. 2000. *Обоснование стратегии ремонта нежестких дорожных одежд: автореф. дис.... д-ра техн. наук.* Москва, 45 с.

Красников, А. Н. 1988. *Закономерности движения на многополостных автомобильных дорогах*. Транспорт, Москва, 112 с.

Красников, А. Н. 1974. Скорость движения потоков автомобилей на автомагистралях с шестью полосами движения, *Проектирование дорог и безопасность движения: Труды МАДИ* 72: 71–75.

Лобанов, Е. М. 1978. *Пропускная способность автомобильных дорог.* Транспорт, Москва, 247 с.

Марьяхин, Л. Г. 1981. Требования к шероховатости покрытий зимой, *Сборник научных трудов ГипродорНИИ: Современные методы организации и повышения безопасности движения на автомобильных дорогах* 34: 57–64.

Методические указания по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительство и реконструкцию автомобильных дорог местного значения. 1975. Москва, 96 с.

Михайлов, А. В. 1984. Увеличение длительности противогололедного эффекта при введении хлоридов в дорожный асфальтобетон, *Повышение безопасности движенияна автомобильных дорогах: Труды ГипродорНИИ* 44: 73–80.

Михайлов, А. В. 1981. О создании гололедобезопасных дорожных одежд, *Автомобильные дороги* 11: 11–13.

Михайлов, А. В.; Кацюбинская, Т. А. 1986. *Строительная теплотехника дорожных одежд*. Транспорт, Москва, 160 с.

Немчинов, М. В. 1985. *Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобилей.* Транспорт, Москва, 231 с.

Немчинов, М. В.; Косарев, Б. М. 1984. *Оценка и прогнозирование сцепных качеств покрытий автомобильных дорог.* МАДИ, Москва, 91 с.

Нефедов, А. Ф. 1970. *Расчет режимов движения автомобилей на вычислительных машинах.* Техника, Киев, 172 с.

П.Г.1-218-113-2009. *Технічні правила ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування України.*

ПГ.1-218-118-2004. *Єдині правила зимового утримання автомобільних доріг*.

Подольский, В. П., Самодурова, Т. В., Федорова, Ю. В. 2000. *Экологические аспекты зимнего содержания дорог.* ВГАСА, Воронеж, 152 с.

Подольский, В. Л.; Самодурова, Т. В. 2003. *Экология зимнего содержания автомобильных дорог*. Информавтодор, Москва, 96 с.

Расников, В. П.; Карих, Ю. С.; Казанский, В. Д. 1984. Учитывать в проектах магистралей условия зимнего содержания, *Автомобильные дороги* 3: 5–6.

Расстегаева, Г. А. 1970. *Исследование процессов структурообразования смеси из гранулированного доменного шлака и вязкого битума при строительстве покрытий автомобильных дорог: автореф. дис. канд. техн. наук.* Ленинград, 24 с.

РВ.2.3-218-02071168-385-2004. *Рекомендації щодо оцінки дорожніх покриттів у відповідності з міжнародним індексом рівності IRI 25,00*.

Розов, Ю. С.; Орлов, Ю. Н. 2003. Требования к противогололедным материалам для борьбы с зимней скользкостью, в *Сборник тезисов и докладов 5-ой Московской международной выставки Доркомэкспо* 2003, 27–30 мая 2003 г., 234–234.

Руденский А.В. 1992. *Дорожные асфальтобетонные покрытия.* Транспорт, Москва, 253 с.

Рябова, О. В. 1998. *Научно-практические основы снижения адгезии снежно-ледяных образований в процессе эксплуатации автодорог: дис. ... канд. техн. наук.* Воронеж, 176 с.

Самодуров, С. И. 1984. *Асфальтовый бетон с применением шлаковых материалов.* Воронежский государственный университет, 108 с.

Самодурова, Т. В. 2003.*Оперативное управление зимним содержанием дорог: научные основы.* Воронежский государственный университет, 168 с.

Самодурова, Т. В. 1992. *Организация борьбы с зимней скользкостью на автомобильных дорогах по данным прогноза: дис. ... канд. техн. наук.* Москва, 235 с.

Сиденко, В. М.; Михович, С. И. 1976. *Эксплуатация автомобильных дорог.* Транспорт, Москва, 287 с.

Сидоренко, Н. Н.; Подрезов, А. В. 1989. Обоснование сроков ремонтов дорожных покрытий на городских магистралях, в *Проектирование автомобильных дорог в сложных условиях Сибири: сборник научных трудов.* Омск, 65–72.

Сильянов, В. В.; Ситников, Ю. М.; Сапегин, Л. Н. 1978. *Расчеты скоростей движения на автомобильных дорогах.* МАДИ, Москва, 115 с.

Сильянов, В. В. 1977. *Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения*. Транспорт, Москва, 307 с.

Сильянов, В. В. 1984. *Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог.* Транспорт, Москва, 287 с.

Сильянов, В. В. 1977. *Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения.* Транспорт, Москва, 304 с.

Слободчиков, Ю. В. 1987. *Влияние ровности на работоспособность битумоминеральных дорожных покрытий Северного Казахстана.* Транспорт, Москва, 128 с.

СОУ 45.2-00018112-037:2009. *Матеріали протиожеледні для боротьби із зимовою слизькістю. Класифікація. Технічні вимоги. Методи випробувань*.

Сухоруков, Ю. М. 1989. Оценка фрикционных свойств каменных материалов, в *Эксплуатация автомобильных дорог: сборник научных трудов.* Омск, 127–132.

Тулаева, А. Я.; Королёв, И. В. 1986. *Дорожные одежды с использованием шлаков*. Транспорт, Москва, 221 с.

Харкянен, К. 1981. Зимнее содержание автомобильных дорог в Финляндии, *Автомобильные дороги* 7.

Хорошилов, Н. Ф. 1986. Транспортно-эксплуатационная оценка основных элементов автомобильных дорог при разработке проектно-сметной документации, *Труды СоюздорНИИ* 19: 3–46.

Христолюбов, И. Н. 1989. Рациональное использование каменных материалов при строительстве шероховатых слоев износа, в *Эксплуатация автомобильных дорог: сборник научных трудов.* Омск, 23–31.

Элвик, Р; Уаа, Т. 2001. *Справочник по безопасности дорожного движения*: перевод с норвеж (под ред. В.В. Сильянова). МАДИ, Москва, 745 с.

Юдина, Л. В.; Юдин, А. В. 1995. *Металлургические и топливные шлаки в строительстве.* Ижевск, 160 с.

Юмашев, В. М. 1982. Повышенная долговечность шероховатых покрытий путем подбора каменных материалов, в *Повышение транспортно-эксплуатационных качеств новых дорожных и аэродромных покрытий: сборник научных трудов*, 39–45.

Яковлев, Ю. М. 2000. Оценка прочности нежестких дорожных одежд с учетом их фактического состояния, в *Проблемы строительства и эксплуатации автомобильных дорог в начале XXI века: сборник научных трудов*, 97–103.

Яковлев, Ю. М.; Лугов, С. В. 2001. Прогнозирование состояния нежестких дорожных одежд с учетом визуальной оценки, в *Строительство и эксплуатация автомобильных дорог: задачи и решения: сборник научных трудов*, 57–68.

Gustafson, K. 1981. *Road icing on different pavements structures. Investigation at Fest–Field Lincoping 1976–1980*. Rapp. Statens vogjch tratikinst 216A(12). 174 p.

Huschek, S.; Dames, J.; Kanyi, J.; Lindner, J. 2002. Untersuchungen zum Griffigkeitsverhalten von Splittmastixasphalt–Deckschichten, *Forschung, Strassenbau und Strassenverkchrstechnik* 837: 1–53.

Wahlgren, O. 1967. *The dependence of Vehicle Speeds on Different Factors–Particularly Road Geometry on Two-Lane Highways in Finland*. Helsinky. 135 p.

Ahmedzade, P.; Sengoz, B. 2009. Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete, *Journal of Hazardous Materials* 165(1–3): 300–305. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.105

Antov, D.; Abel, K.; Sorje, P.; Ruk, H.; Rivas, T. 2009. Speed reduction effects of urban roundabouts, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4(1): 22–26. http://dx.doi.org/10.3846/1822-427X.2009.4.22-26

Asi, I. M.; Qasrawi, H. Y.; Shalabi, F. I. 2007. Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes, *Canadian Journal of Civil Engineering* 34(8): 902–911. http://dx.doi.org/10.1139/107-025

Aussedat, G.; Barbiero, A.; Baudon, A.; Bellanger, J.; Caroff, G.; Minh, T. D., Dupont, P.; George, L.-A.; Gothie, M.; Irastorza, M.; Le Duff, M.; Lemonnier, G. 2003. Aide au choix des couches de roulement vis-à-vis de l'adherence, *Revue Generale des Routes* 813: 59–61.

Beliatinski, A.; Kuzhel, N.; Bakulich, O.; Klimenko, I. 2009. Road reconstruction criteria taking into account the theary of traffic flows and repay time, *Mokslas – Lietuvos ateitis – Science – Future of Lithuania* 1(6): 25–28.

Chaurand, P.; Rose, J.; Briois, V.; Olivi, L.; Hazemann, J.L.; Proux, O.; Dornas, J.; Bottero J. Y. 2007. Environmental impacts of steel slag reused in road construction: A crystallography and molecular (XANES) approach, *Journal of Hazardous Materials* 139(3): 537–542. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.060

Cristoforou, Z.; Cohen, S.; Karlaftis, M. G. 2010. Vehicle occupant injury severity on highways: an empirical investigation, *Accident Analysis and Prevention* 42(6): 1606–1620. http://dx.doi.Org/10.1016/j.aap.2010.03.019

Čygas, D.; Mučinis, D.; Sivilevičius, H.; Abukauskas, N. 2011. Dependence of the recycled asphalt mixture physical and mechanical properties on the grade and amount of rejuvenating bitumen, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 6(2): 124–134. http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2011.17

Dargužis, A.; Sapragonas, J.; Pilkauskas, K. 2011. Dynamic processes of a vehicle moving over step-shaped obstacles, *Journal of Vibroengineering* 13(3): 536–543.

Dell'Acqua, G.; Russo, F. 2011. Safety performance functions for low-volume roads, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 6(4): 225–234. http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2011.29

Deniz, D.; Tutumluer, E.; Popovics, J. S. 2010. Evaluation of expansive characteristics of reclaimed asphalt pavement and virgin aggregate used as base materials, *Transportation Research Record* 2167: 10–17. http://dx.doi.org/10.3141/2167–02

Discetti, P. 2010. Experimental analysis on hairpin curves, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5(3): 148– 155. http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2010.21

Dupuis I., Hussain, N. 1977. Glatteishemmender Strassenbelag auf der Umfahrugsstrasse vonValangin, *Strasse und Verkehr* 64(4).

Emery, J. 1999. Stylink polymer modified asphalt cementpavement performance evalution, in *Geotechnical Engineering Limited (JEGEL)* 12: 1–27.

Emery, J. 1995. Styrelf pavement performance evalution, *Geotechnical Engineering Limited (JEGEL)* 8: 1–45.

Haritonovs, V.; Smirnovs, J.; Naudžuns, J. 2010. Prediction of rutting formation in asphalt concrete pavement, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5(1): 38–42. http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2010.05

Hassan, H. F.; Al-Jabri, K. 2011. Laboratory evaluation of hot-mix asphalt concrete containing copper slag aggregate, *Journal of Materials in Civil Engineering* 23(6): 879–885. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943–5533.0000246

Hunt, L.; Boyle, G. E. 2000. Steel Slag in Hot Mix Asphalt Concrete. *Final Report State Research Project #511. Oregon Department of Transportation.* USA. 19 p. Available from Internet: http://www.oregon.gov/ODOT/TD/TP_RES/

Jia, P.; Kato, H.; Hayashi, Y. 2009. Network impact evaluation of the introduction of road and rail to a transport corridor for developing cities, *International Journal of Urban Sciences* 13(1): 81–101. http://dx.doi.org/10.1080/12265934.2009.9693647

Kandhal, P. S.; Hoffman, G. L. 1997. Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures, *Transportation Research Record* 1583: 28–36. http://dx.doi.org/10.3141/1583–04

Keršys, A.; Pakalnis, A.; Lukoševičius, V. 2011. Investigation of occupant fatalities and injuries during the impact of vehicle and road safety barrier, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 6(1): 5–11. http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2011.01

Lazda, Z.; Smirnovs, J. 2011. Impact of permitted driving speed on the design of urban street network in Latvia, *The Baltic Journal of Road and BridgeEngineering* 6(4): 283–288. http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2011.36

Li, W.; Sun, P.; Zhang, C. 2012. Laboratory test study on asphalt concrete with steel slag aggregates, *Applied Mechanics and Materials* 152–154: 117–120.

Miandoabchi, E.; Farahani, R. Z. 2011. Optimizing reserve capacity of urban road networks in a discrete network design problem, *Advances in Engineering Software* 42(12): 1041–1050. http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.07.005

Mučinis, D.; Sivilevičius, H.; Oginskas, R. 2009. Factors determining the inhomogeneity of reclaimed asphalt pavement and estimation of its components content variation parameters, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4(2): 69–79. http://dx.doi.org/10.3846/1822-427X.2009.4.69-79

Pečeliūnas, R.; Prentkovskis, O. 2006. Influence of shock-absorber parameters on vehicle vibrations during braking, *Solid State Phenomena* 113: 235–240.

Santos, B. F.; Antunes, A. P.; Miller, E. J. 2010. Interurban road network planning model with accessibility and robustness objectives, *Transportation Planning and Technology* 33(3): 297–313. http://dx.doi.org/10.1080/03081061003732375

Sapragonas, J.; Dargužis, A. 2011. Model of radial deformations of protector of vehicle tire, *Mechanika* 17(1): 21–29.

Sapragonas, J.; Makaras, R. 2011. Investigation of movement of the off-road vehicles under roadless conditions, *Journal of Vibroengineering* 13(2): 334–341.

Sivilevicius, H. 2011. Application of expert evaluation method to determine the importance of operating asphalt mixing plant quality criteria and rank correlation, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 6(1): 48–58. http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2011.07

Sivilevičius, H.; Podvezko, V.; Vakrinienė, S. 2011. The use of constrained and unconstrained optimization models in gradation design of hot mix asphalt mixture, *Construction and Building Materials* 25(1): 115–122. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.050

Sivilevičius, H.; Šukevičius, S. 2007. Dynamics of vehicle loads on the asphalt pavement of European roads which cross Lithuania, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2(4): 147–154.

Sivilevičius, H.; Vislavičius, K. 2008. Stochastic simulation of the influence of variation of mineral material grading and dose weight on the homogeneity of hot-mix asphalt, *Construction and Building Materials* 22(9): 2007–2014. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.001

Shen, D.-H.; Wu, C.-M.; Du, J.-C. 2009. Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture, *Construction and Building Materials* 23(1): 453–461.

Sofilid, T.; Mladenovic, A.; Sofilic, U. 2011. Defining of EAF steel slag application possibilities in asphalt mixture production, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 19(2): 148–157. http://dx.doi.org/10.3846/16486897.2011.580910

Sokolovskij, E.; Prentkovskis, O.; Pečeliūnas, R.; Kinderytė-Poškienė, J. 2007. Investigation of automobile wheel impact on the road border, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2(3): 119–123.

Takahashi, F.; Shimaoka, T.; Gardner, K.; Kida, A. 2011. Size-dependent enrichment of waste slag aggregate fragments abraded from asphalt concrete, *Journal of Hazardous Materials* 194: 209–215. http://dx.doi.Org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.086

Verburg, D. J. 1997. Voorkomen is beter dan genzen [Борьба с гололедом на дорогах Нидерландов], *Otar* 82(9): 322–323.

Verhasselt, A. et al. 1998. Enrobe's drainants en Belgigue: leur employ et leur entreitien hivernal [Зимнее содержание дорог с дренирующими покрытиями в Бельгии], *Revue Generaledes Routes et des Aerodroes* 758: 68–69.

Wang, G.; Thompson, R. G.; Wang, Y. 2011. Hot-mix asphalt that contains nickel slag aggregate, *Transportation Research Record* 2208: 1–8.
http://dx.doi.org/ 10.3141/2208-01

Wang, Y.-G.; Bai, H.; Xiang, W.–S. 2011. *Traffic safety performance assessment and multivariate treatments for intersection locations, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 6(1): 30–38. http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2011.05

Wu, S.; Xue, Y.; Ye, Q.; Chen, Y. 2007. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures, *Building and Environment* 42(7): 2580–2585. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.008

Zariijs, A. 2011. System analysis of information reception and processing for driving task, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 6(1): 12–16. http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2011.02

Список научных публикаций автора по теме диссертации

В научных журналах:

Краюшкина, Е. В.; Павлюк, Д. О.; Булах, О. І.; Прокопчук, В. М.; Терещенко, Т. В. 1998. Уточнення витрат кам'яних матеріалів при влаштуванні поверхневих обробок [Уточнение расхода каменных материалов при устройстве поверхностных обработок], *Автошляховик України* 4: 43–45.

Краюшкина, Е. В. 2001. Визначення експлуатаційного стану поверхонь, призначених для руху пішоходів [Определение эксплуатационного состояния поверхностей, предназначенных для движения пешеходов], *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* 62: 33–35.

Krayushkina, K.; Prentkovskis, O.; Bieliatynskyi, A.; Junevičius, R. 2012. Use of steel slags in automobile road construction, *Transport* 27(2): 129–137.

Краюшкина, Е. В.; Белятынский, А. А. 2013. Применение трехмерных георешеток для стабилизации переувлажненных грунтов на Украине, *Дороги* 25: 50–52.

В других изданиях:

Краюшкина, Е. В.; Химерик, Т. Ю. 1998. Базальтоволоконні сітчасті прошарки для підсилення проїзної частини і узбіч [Базальтоволокнистые сетчастые прослойки для усиления проезжей части и обочин], в *Збірник «Автодорожній комплекс України в сучасних умовах: проблеми і шляхи розвитку»*, 229–231.

Краюшкина, Е. В.; Вирожемський, В. К.; Химерик, Т. Ю. 2001. Дисперсно армований асфальтобетон – довговічний матеріал для руху транспорту і пішоходів [Дисперсно армированный асфальтобетон – долговечный материал для движения транспорта и пешеходов], *Автошляховик України: Вісник центрального наукового центру транспортної академії України* 4: 101–103.

Краюшкина, Е. В.; Химерик, Т. Ю.; Рева, В. П. 2003. Підвищення транспортно-експлуатаційного стану доріг шляхом використання сучасних матеріалів [Повышение транспортно-эксплуатационного состояния дорог путем использования современных материалов], *Дороги і мости: Збірник наукових праць* 1: 189–194.

Краюшкина, Е. В.; Вырожемский, В. К.; Химерик, Т. Ю. 2005. Повышение трещиностойкости и шероховатости дорожных покрытий путем использования битумно-полимерных композици, в *Проблемы надежности дорожных одежд городских улиц и дорог: Сборник трудов международной научно-практической конференции*, 30 июня – 1 июля 2005 года, г. Минск, 187–194.

Краюшкіна, Е. В.; Вирожемський В. К. 2006. Поверхневі обробки з армованих цементобетонних сумішей типу НРСМ [Поверхностные обработки из армированных ц/б смесей типа НРСМ], *Вестник ХНАДУ* 34–35: 57–59.

Краюшкина, Е. В.; Вирожемський, В. К.; Кожушко, В. П.; Химерик, Т. Ю. 2008. Деякі особливості використання хлоридів при зимовому утриманні автомобільних доріг [Некоторые особенности хлоридов при зимнем содержании автомобильных дорог], *Дороги і мости* 8: 48–53.

Краюшкина, Е. В. 2008. Підвищення міцності та довговічності бетонних плит і фігурних елементів мостіння [Повышение прочности и долговечности бетонных плит и фигурных элементов мощения], *Дороги і мости: Збірник наукових праць* 8: 166–168.

Краюшкіна, Е. В.; Бєлятинський, А. О. 2010. Використання відвальних шлаків різних виробництв в дорожньому будівництві [Использование отвальных шлаков разных производств в дорожном строительстве], *Дороги і мости: Збірник наукових праць* 12: 24–30.

Краюшкина, Е. В. 2012. Підвищення шорсткості та довговічності покриттів автомобільних доріг за рахунок застосування бітумно-полімерних композицій [Повышение шероховатости и долговечности покрытий автомобильных дорог за счет использования битумно-полимерных композиций], *Проблеми розвитку міського середовища: Наук.-техн. збірник* 7: 122–126.

Краюшкина, Е. В.; Белятынский, А. А. 2012. Исследование транспортно-эксплуатационных показателей дорожных покрытий из асфальтобетона из шлаковых материалов в зимний период, в *Сборник статей 15-й конференции молодых ученых Литвы «Наука-будущее Литвы»*, 4 мая 2012 г., Вильнюс, Литва, 183–186.

Краюшкина, Е. В.; Белятынский, А. А. 2012. Использование отвальных шлаков разных производств в дорожном строительстве, *Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник* 45(3): 10–18.

Summary in Lithuanian

Įvadas

Problemos formulavimas

Nuolat besivystant automobilių transportui, sparčiai daugėja automobilių, didėja automobilių krova ir dinaminės charakteristikos, transporto priemonių efektyvus darbas daugiausia priklauso nuo automobilių kelių eksploatacinės būklės, kuri vertinama stipriu, lygumu ir šiurkštumu. Pagrindinis vaidmuo tenka asfalto dangoms, kurios apsaugo kelių konstrukciją nuo tiesioginių klimato veiksnių įtakos ir nusako projektinius eismo greičius.

Asfalto dangos pasirodė esančios geros sunkiausiu kelių priežiūros tarnyboms darbo metu, t. y. žiemą, kai dėl slidumo, atsirandančio ant kelio dangos, sumažėja transporto priemonių greitis, sumažėja eismo greitis ir padidėja kelių eismo įvykių skaičius, o tai neigiamai veikia ekonominius valstybės rodiklius.

Vienas iš prioritetinių kelių transporto sektoriaus uždavinių – didinti automobilių kelių eksploatacinį patikimumą visais metų laikais. Pagrindiniai šio uždavinio sprendimo būdai – asfalto dangų naudojimas. Šios dangos yra ilgaamžės, leidžia užtikrinti normatyvinius automobilių transporto ir kelių eksploatacinius rodiklius (TER), tobulinti kelio dangų konstrukcijas, siekiant sumažinti slidumo susidarymą žiemą.

Darbo aktualumas

Pastaruoju metu, kylant statybinių medžiagų, naudojamų keliams tiesti, kainoms, aktualiausiu uždaviniu kelių tiesyboje tapo platus vietinių medžiagų naudojimo mastas.

Tose srityse, kuriose išvystyta metalurgijos pramonė, labiausiai paplitusios vietinės medžiagos yra šalutiniai juodosios ir spalvotosios metalurgijos produktai – šlakai. Atliktais tyrimais nustatyta jų naudojimo galimybė asfalto mišiniams ruošti.

Asfalto dangų su šlaku naudojimas III techninės kategorijos ir žemesniems keliams ribojamas galiojančiais normatyviniais dokumentais. Tai paaiškinama tuo, kad asfalto su šlaku, kaip kelių statybos medžiagos, savybės yra lyginamos su tradicinio asfalto (su granitiniais mineralais) savybėmis ir nepakankamai skiriama dėmesio asfalto dangų su šlaku eksploatacinių ir deformacinių bei stiprio savybių tyrimui, ypač aukštesnės kategorijos automobilių keliuose.

Tyrimuose, kurie buvo atlikti anksčiau, neatsispindi automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių pasikeitimai: ilgai eksploatuojant asfaltą su šlaku dangų stiprio, lygumo, šiurkštumo, priklausančių nuo klimatinių sąlygų, neištirtos slidumo žiemą ant dangų paviršiaus susidarymo ypatybės.

Todėl automobilių kelių asfalto dangų su šlaku automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių pokyčių dinamikos tyrimas yra aktualus uždavinys.

Nagrinėjamos problemos aktualumas aiškinamas tuo, kad rajonuose, kuriuose išvystyta metalurgijos pramonė, asfalto su šlaku naudojimas automobilių kelių dangoms sumažina jų statybos ir eksploatacijos kainą, išsprendžia metalurgijos pramonės atliekų naudojimo klausimą.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimo objektas – automobilių kelių asfalto dangų su šlaku automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių (TER) pokytis laikui einant, priklausomai nuo klimato sąlygų, eismo ir transporto veiksnių, slidumo žiemą susidarymo procesų ant asfalto dangų su šlaku.

Darbo tikslas

Nustatyti automobilių kelių asfalto dangų su šlaku automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių reikšmes ir prognozuoti šių parametrų pokytį eksploatuojant, veikiant klimato veiksniams, transporto priemonių intensyvumui ir spūstims.

Darbo uždaviniai

Nurodytam tikslui pasiekti būtina išspręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti ankstesnių tyrimų analizę ir nustatyti svarbiausius veiksnius, darančius įtaką automobilių kelių asfalto dangų TER pokyčiams per visą normatyvinį jų naudojimo laiką.
2. Sukurti matematinį modelį, kuris apibūdintų TER pokyčius ilguoju laikotarpiu posistemyje „kelias–automobilis–aplinka“ ir įvertinant klimato ir kelių rodiklius, darančius poveikį jų pokyčiams.
3. Sukurti matematinį modelį, siekiant nustatyti dangos būklę trumpuoju laiko intervalu žiemą posistemyje „aplinka–kelias“, nustatant meteorologinius ir kelių rodiklius, veikiančius slidumo susidarymo procesą žiemą.

4. Patobulinti modelį plikledžio susidarymo ypatybėms tirti keliuose su įvairia danga, pritaikius šilumos laidumo lygtį.
5. Atlikti eksperimentinius tyrimus, siekiant nustatyti esminius asfalto dangų su šlakais TER pasikeitimus dėl ilgo klimatinių veiksnių poveikio.
6. Atlikti asfalto su šlaku naudojimo ekonominio efektyvumo skaičiavimus.
7. Parengti automobilių kelių asfalto dangos su šlaku eksploatacinės priežiūros ir remonto rekomendacijas.

Tyrimo metodika

Darbe matematiniams modeliams kurti taikomi moksliškai pagrįsti matematinės statistikos ir regresinės analizės metodai, kurių tinkamumas patvirtintas eksperimentiniais tyrimais, taikant duomenis ir naudojant šiuolaikinę įrangą.

Darbo mokslinis naujumas

Sprendžiant iškeltus uždavinius atliekant tyrimus, gauti šie mokslo rezultatai transporto inžinerijos srityje:

1. Remiantis gautais eksperimentiniais ir teoriniais tyrimais, nustatyti veiksniai, darantys įtaką pagrindiniams automobilių kelių automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių pokyčiams eksploatavimo metu.
2. Pirmą kartą, remiantis atliktais asfalto dangų su šlaku teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais, įvertinant šilumos laidumo lygtį, gauta automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių teorinė ir empirinė priklausomybė nuo klimato veiksnių ir plikledžio susidarymo ypatybių, esant įvairiems asfalto tipams.
3. Pirmą kartą sukurtas matematinis modelis, kuris aprašo posistemio „kelias–automobilis–aplinka“ sąveiką ilgą laikotarpį ir leidžia nustatyti kelio dangos, dangos lygumo, sukibimo koeficiento ir transporto srautų eismo greičio pokyčius.
4. Pirmą kartą sukurtas matematinis modelis, aprašantis posistemio „aplinka–kelias“ sąveiką susidarant slidumui žiemą trumpais laiko intervalais.
5. Patobulinta termofizikinių asfalto su šlaku charakteristikų nustatymo mechanizmo teorija, įvertinanti ledo adheziją su kelio paviršiumi žiema ir slidumo žiemą susidarymo procesus ant asfalto dangų su šlaku.
6. Patobulinti modeliavimo procesai kelių asfalto dangų su šlaku dangos stiprio, lygumo ir sukibimo koeficiento pokyčiams prognozuoti.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Praktinė darbo rezultatų įgyvendinimo esmė – gauti matematinius modelius, kurie padėtų rengti automobilių kelių asfalto dangų su šlaku remonto ir priežiūros rekomendacijas, kurti asfalto dangų automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių prognozavimo algoritmą ir programinę įrangą, leidžiančius plėtoti šlako

medžiagų taikymo sritį visų kategorijų ir reikšmių kelių statyboje visose kelių klimato zonose.

Tyrimo rezultatus taikė Donecko srities Automobilių kelių tarnyba, klodama privažiuojamąjį kelią prie UAB „Kelių statyba Altkom“ gamybinio baro, rengdama automobilių kelių asfalto dangoms su šlaku remonto ir priežiūros rekomendacijas. Rezultatai taip pat buvo taikyti Nacionalinio aviacijos universiteto Oro uostų ir Automobilių kelių rekonstrukcijos katedrų mokymo procese, studentams rengiant baigiamuosius darbus ir atliekant mokslinius darbus.

Rezultatų aprobavimas

Pagrindiniai teiginiai ir tyrimų rezultatai aptarti šiose mokslinėse konferencijose:

- Tarptautinė mokslinė konferencija „Miesto gatvių ir kelių dangų patikimumo problemos“ (Minskas, BNTU, 2005 m. birželio 30 d. – liepos 1 d.);
- Tarptautinė mokslinė konferencija „Šiuolaikinės technologijos ir medžiagos kelių transporto sektoriuje“ (Charkovas, ChNAKU, 2006 m lapkričio 16–17 d.);
- III tarptautinė konferencija „Архітектура та екологія: проблеми міського середовища“ / „Architektūra ir aplinka: miesto aplinkos iššūkiai“ (Kijevas, NAU, 2011 m. lapkričio 15–16 d.);
- 14-oji jaunųjų mokslininkų konferencija Lietuvoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ (Vilnius, Lietuva, 2011 m.);
- 15-oji jaunųjų mokslininkų konferencija Lietuvoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ (Vilnius, Lietuva, 2012 m.);
- II tarptautinė mokslinė techninė konferencija „Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей“ / „Moksliniai ir taikomieji aspektai automobilių ir kelių pramonės šakose“ (Luckas, LNTU, 2012 m. gegužės 30 d. – birželio 3 d.);
- Tarptautinė mokslinė konferencija „Современные компьютерно–инновационные технологии проектирования, строительства, эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов“ / „Šiuolaikinės kompiuterinės technologijos ir novatoriškas dizainas, statyba, priežiūra, kelių ir oro uostų kilimo takų tiesimas bei statyba“ (Charkovas, HNADU, 2012 m. spalio 24–26 d.).

Disertacijos struktūra

Darbą sudaro įvadas, trys skyriai, pagrindinės išvados, literatūros sąrašas, priedai. Disertacijos apimtis – 180 puslapiai, tekste pateiktos 35 lentelės ir 43 paveikslai.

1. Šlakų naudojimo tiesiant kelius mokslinių tyrimų analizė

Pirmajame skyriuje pateikta problema, atlikta pagrindinių rezultatų tyrimų analizė taikant metalurgijos šlakus asfalto mišiniuose.

Asfaltas su šlaku – tai dirbtinis statybos konglomeratas, sudarytas iš įvairių tipų metalurgijos šlakų ir bitumo mišinio, pagamintas laikantis tam tikrų technologinių režimų, paklotas ir sutankintas viršutiniuose dangos sluoksniuose.

Metalurgijos šlako asfalte naudojimo galimybes tyrė daugelis mokslininkų. Analizuojant literatūrą buvo apžvelgta gana daug metalurgijos šlakų. Remiantis fizinių ir mechaninių savybių tyrimu įrodyta, kad galima naudoti įvairių tipų metalurgijos šlakus karšto ir šalto asfalto gamybai.

Moksliniuose tyrimuose daug dėmesio buvo skiriama automobilių kelių TER tyrimui. Kaip TER apibendrinimas yra transporto srauto eismo greitis. Apžvelgti įvairūs TER pokyčių dinamikos tyrimų metodai eksploatuojant ilgą laiką.

Automobilių kelių asfalto dangų su šlaku eksploatacijos ypatybėms tirti, pagrindiniais TER būtina pasirinkti: kelio dangos stiprį, dangos lygumą ir sukibimo koeficientą. Rodikliu, rodančiu automobilių kelių eksploatacinę būklę, imtas transporto srauto eismo greitis.

Atlikta darbų, kuriuose tirti ilgai eksploatuojamų kelių pagrindinių TER dinamikos pokyčiai, analizė leido padaryti išvadą, kad galiojančios metodikos, įvertinančios kelio dangos stiprio pokyčius, dangos lygumą ir sukibimo koeficiento dydį, buvo autorių išbandytos automobilių keliuose su tradicinėmis asfalto dangomis. Visi asfalto su šlaku moksliniai tiriamieji darbai buvo skirti jų naudojimo kelių dangos konstrukcijose galimybei pagrįsti.

Automobilių kelių asfalto dangų su šlaku, ilgai eksploatuojamų ir skirtingais metų laikais, integruoto TER vertinimo tyrimų mokslinėje literatūroje nėra.

2. Automobilių transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių modeliavimo metodai

Antrajame skyriuje apžvelgtas sisteminis požiūris į matematinių modelių kūrimą, siekiant nustatyti kelių pagrindinių TER su tradicinėmis ir asfalto dangomis su šlaku pokyčius.

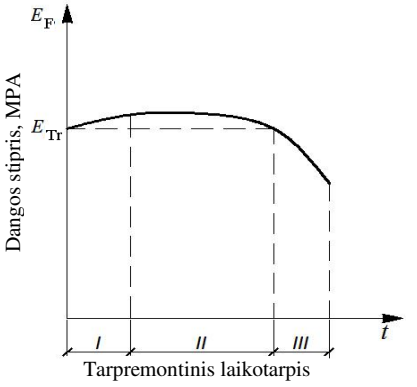
Kelių dangos stiprio pokyčiai nuo įvairių veiksnių gali būti pateikti kaip matematinis modelis:

$$E_{\phi}(t) = f_1(N, S_{tp}, m, \nu, p), \quad (1)$$

čia N – transporto eismo srauto intensyvumas, aut./parą; S_{tp} – transporto srauto sudėtis; m – parametrų rinkinys, apibūdinantis kelio paviršiaus konstrukciją ir mechanines naudojamų medžiagų savybes; ν – parametrų rinkinys, apibūdinantis klimato veiksnių

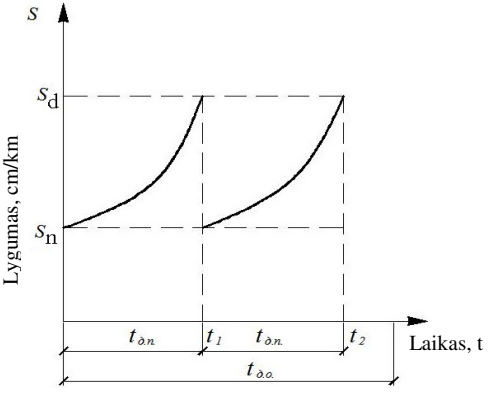
įtaką; *p* – parametrų rinkinys, apibūdinantis priemonių poveikį kelio tiesybai ir eksploatacinei priežiūrai.

Kaip rodo atlikti tyrimai, automobilių kelio dangos faktinio tamprumo modulio pokytis eksploatavimo metu pereina tris etapus ir jo dinamika gali būti pateikiama diagrama (1A pav.).



1A pav. Dangos stiprio pokytis tarpremontiniu laikotarpiu

Asfalto dangos lygumo pokyčio dėsningumas tarpremontiniu laikotarpiu ($t_{д.п.}$) pavaizduotas grafiku (2A pav.).



2A pav. Automobilių kelio asfalto dangos lygumo pokytis eksploatacijos metu

Asfalto dangos lygumo pokyčių dinamika *S*(*t*) gali būti išreikšta šiuo matematiniu modeliu:

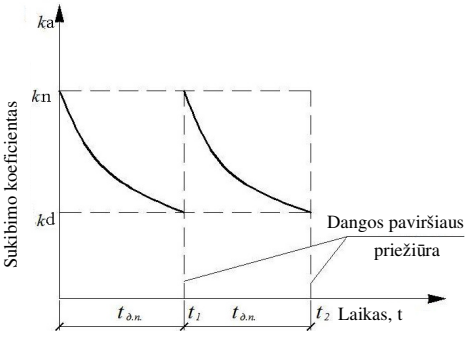
$$S(t) = f_2(N, S_{tp}, E, m, \nu, p), \quad (2)$$

čia E – dangos tamprumo modulis, MPa.

Remiantis tyrimų rezultatais, ilgai eksploatuojant asfalto dangą po automobilių kelių tiesybos ar remonto, sukibimo koeficiento dydžio pokytis gali būti pateikiamas grafiku (3A pav.) ir matematiniu modeliu:

$$k_{cų} = f_3\left(N_p, S_{tp}, m, v, p\right), \quad (3)$$

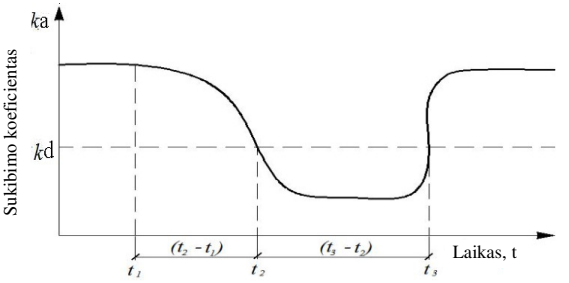
čia N_p – suminis leidžiamasis automobilių skaičius per eksploatacijos laikotarpį, aut.



3A pav. Asfalto dangos sukibimo koeficiento dydžio kitimas eksploatuojant automobilių kelią

Sukibimo koeficiento dydis kinta nuo norminių ($k_{норм.}$) iki leidžiamųjų ($k_{ðon.}$) reikšmių, veikiant automobilių kelią mechaniniams ir klimatiniams veiksniams.

Sukibimo koeficiento dydžio pokyčio, kuris susidaro žiemą slidumo metu ir atliekant jo šalinimo darbus, procesą galima pavaizduoti grafiškai (4A pav.).



4A pav. Sukibimo koeficiento pokytis ant asfalto dangos susidarant slidumui žiemą ir jį šalinant

Susidarant slidumui dėl besikeičiančių oro sąlygų (laiko tarpas t_2–t_1) sukibimo koeficiento dydis sumažėja žemiau leidžiamosios reikšmės ($k_{ðon.}$), remiantis saugaus eismo sąlygomis. Kovos su slidumu metu (laikas t_3–t_2) sukibimo koeficiento dydis lieka

mažesnis nei leidžiamoji reikšmė, o suveikus medžiagoms prieš plikledį, padidėja, tuo pagerindamas automobilių kelių TER.

Todėl iškeltam uždaviniui buvo sukurta išorinių ir vidinių parametrų posistemio D–A–C sąveikos schema.

Vidiniai posistemio parametrai, darantys poveikį TER pokyčių dinamikai, suskirstyti į dvi grupes:

- savi posistemio parametrai, kuriems priskiriami kelių $\overline{d(t)}$ ir transporto $\overline{h(t)}$ parametrai;
- aplinkos poveikio parametrai, kuriems priskiriami klimato $\overline{v(t)}$ veiksniai.

Posistemio D–A–C išorės (pradinis) parametras – automobilių kelių pagrindiniai TER, kaip antai: kelio dangos stipris, dangos lygumas, sukibimo koeficientas ir apibendrinamasis rodiklis – transporto srauto eismo greitis. Norint išspręsti šią problemą, būtina apžvelgti pokyčių dinamiką per tam tikrą laiką.

Todėl matematinis modelis, pagrindiniams TER pokyčiams ilgam laiko intervalui / tarpui posistemyje D–A–C aprašyti yra toks:

$$\overline{y(t)} = F_{Д-А-С}\left[\overline{v(t)}\,\overline{d(t)}\,\overline{h(t)}\,t\right], \tag{4}$$

čia $\overline{y(t)} = \left\{E_{\phi}(t), S(t), k_{сц}(t), V(t)\right\}$ – posistemio išorinių parametrų vektorius; $F_{Д\text{-}А\text{-}С}$ – posistemio veikimo dėsnis; $\overline{v(t)} = \left\{v_1(t), v_2(t), v_3(t)\right\}$ – aplinkos (klimato parametrai) poveikio vektorius; $\overline{d(t)} = \left\{m_1, m_2, E_0, S_0, R_0\right\}$ – posistemio (kelio parametrai) savų parametrų vektorius; $\overline{h(t)} = \left\{N(t), N_p(t), S_{tp}(t)\right\}$ – posistemio (transporto parametrai) savų parametrų vektorius; t – laikas.

Posistemio C–D išoriniu parametru imama kelio paviršiaus būklė žiemą. Norint išspręsti šį uždavinį, tariama, kad dangos būklė yra slidi, t. y. ant jos paviršiaus susidaro permatomas ledas.

Todėl matematinis modelis dangos būklei aprašyti trumpam laikotarpiui žiemos metu C–D posistemyje turi tokį pavidalą:

$$\overline{y'(t)} = F_{с\text{-}д}\left[\overline{v'(t)}, \overline{d'(t)}, t'\right], \tag{5}$$

čia $\overline{y'(t)} = \left\{S_p\right\}$ – vektorius, kurio komponentai yra automobilių kelio dangos būklė žiemą; $F_{с\text{-}д}$ – posistemio veikimo dėsnis; $\overline{v'(t)} = \left\{T(t), v_1'(t), v_2'\right\}$ – išorinės aplinkos poveikio (meteorologiniai parametrai) vektorius; $\overline{d'(t)} = \left\{m_1', m_2', \ldots, m_5'(t), T_n'(t)\right\}$ – posistemio (kelio parametrai) savų parametrų vektorius; t' – laikas, per kurį gali susidaryti slidumas permatomo ledo pavidalu.

Dangos iš asfalto su tradicinėmis medžiagomis tamprumo modulio pokyčiui įvertinti buvo taikomi matematiniai modeliai, sukurti Krasikovo (2000).

Esant palyginti mažoms kelio dangos deformacijoms, t. y. pirmame ir antrame kelių konstrukcijos darbų etapuose, jos stipris $E_{\phi}(t)$ aprašytas matematiniu modeliu:

$$E_{\phi}(t) = E_0 \{1 - [a_m + b_m (\lg N_c(t) + \lg t)]\}, \quad (6)$$

čia E_o – tamprumo modulio matematinė viltis pirmaisiais dangos eksploatavimo metais, pasibaigus jos suformavimo laikui, MPa; a_m ir b_m – lygčių parametrai, nustatyti remiantis eksperimentiniais tyrimais; $N_c(t)$ – bendras eismo intensyvumas, atsižvelgiant į A grupės apkrovą, aut./parą; t – prognozuojama dangos eksploatavimo trukmė, metais;

Tradicinių asfalto dangų lygumo pokyčio dinamikos tyrimas atliktas remiantis matematiniu modeliu, taip pat pasiūlytu Krasikovu (2000):

$$S_t = S_0 \left[1 + c\ E_{\min}^{d}\ \ N_c(t)\, a\ E_{\min}^{b}\right], \quad (7)$$

čia S_o – lygumo, remiantis smūgiamačio rodmenimis, reikšmė pradėjus eksploatuoti kelią, cm/km; E_{min} – minimalus tamprumo modulis, MPa; a, b, c, d – lygčių parametrai, nustatomi eksperimentiniais tyrimais.

Įvertinti automobilių kelių asfalto su šlaku ir tradicinėmis priemaišomis trumpais laiko intervalais (žiemą) TER pokyčius galima tiriant įvairių tipų slidumo ant dangų paviršiaus susidarymą.

Matematinis uždavinio sprendimas turi diferencialinę lygtį ir vienaženkliškumo sąlygas, įskaitant kelio konstrukcijos termofizikinius parametrus ir geometrinius matmenis, taip pat ribines sąlygas ir pradinį temperatūros pasiskirstymą.

Kelio konstrukcijos temperatūros diapazonas jos paviršiuje, kurią veikia oro temperatūra ir kuri nuolat kinta, iškeltam uždaviniui aprašyti naudojama vieno dydžio šilumos laidumo lygtis:

$$c\rho \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right] + q, \quad (8)$$

čia $T(x, t)$ – kelio konstrukcijos ar sankasos grunto temperatūra x gylyje laiko metu t, °C; q – šilumos srauto tankis konstrukcijoje, W/m^3; c – specifinė šiluminė talpa, J/kg K; ρ – medžiagos tankis, kg/m^3; λ – šilumos laidumas, W/m² K.

Kadangi kelio danga – daugiasluoksnė sistema, tai (8) lygtis šiam uždaviniui pertvarkoma į diferencialinių lygčių sistemą:

$$\begin{cases} c_i\rho_i \dfrac{\partial T}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_i \dfrac{\partial T}{\partial x}\right) & H_{i-1} \le x \le H \\ c_м\rho_м \dfrac{\partial T}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_м \dfrac{\partial T}{\partial x}\right) & H_4 \le x \le H_\phi \\ c_T\rho_T \dfrac{\partial T}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_T \dfrac{\partial T}{\partial x}\right) & H_\phi \le x \le H \end{cases}, \quad (9)$$

su sąlyga dėl sankasos grunto fazinio virsmo ribos:

$$\lambda_m \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=H_\phi} \lambda_T \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=H_\phi} = Q_\rho \frac{\partial H_\phi}{\partial t}, \quad (10)$$

čia $H_\phi = H_\phi(x, t)$ – fazinio virsmo riba, m; Q – paslėpta ledo tirpimo šiluma, kJ/kg.

Susidariusio ledo ant automobilių kelių dangų suirimo greitis nuo judančių transporto priemonių ir valymo kokybė priklauso nuo dangos paviršiaus sukibimo jėgos (adhezijos) dydžio.

Ledo ir paviršiaus medžiagos sukibimo jėga ($R_{cų}$) nustatoma užšaldytų ir išbandytų tam tikroje temperatūroje prisotintų vandens ($R_в$) ir išdžiovintų (R_{syx}) mėginių lenkimo jėgų skirtumu:

$$R_{cų} = R_в - R_{syx} \quad (11)$$

arba

$$R_{cų} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{bh^2}\left(R_в - R_{syx}\right), \quad (12)$$

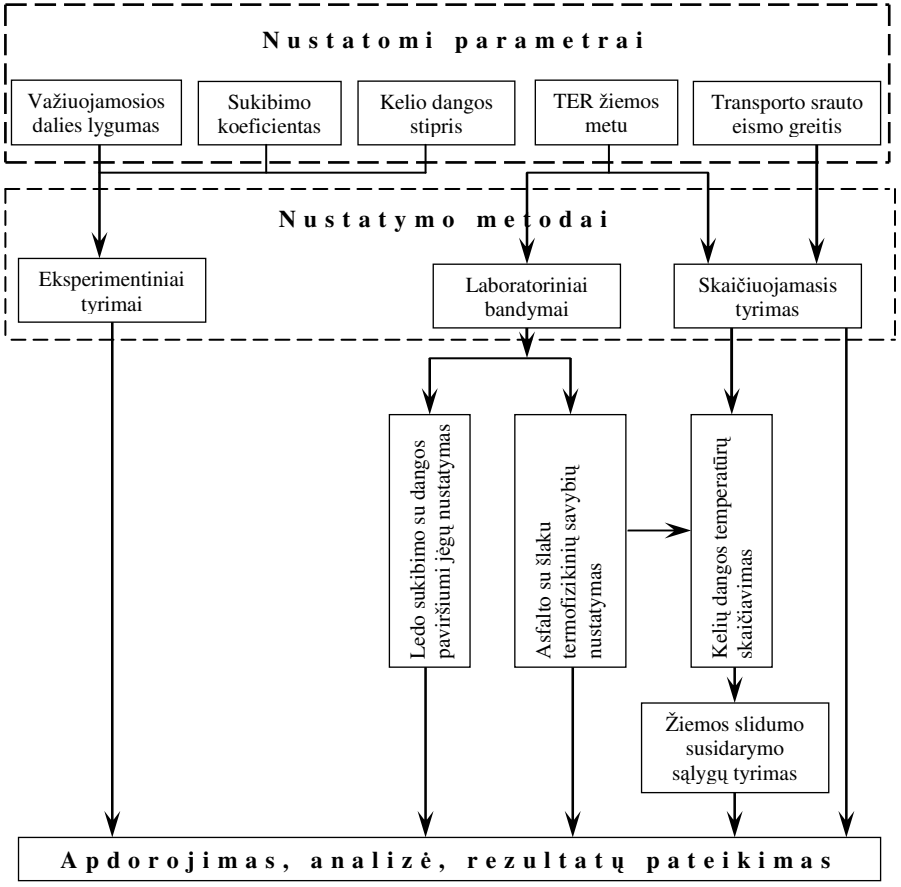
čia $P_в$, P_{syx} – plyšimo apkrova; l – atstumas tarp atramų; b – mėginio plotis; h – mėginio aukštis.

Ledo sukibimo (adhezijos) jėgų su asfalto dangų paviršiumi, naudojant tradicines medžiagas ir šlaką, nustatymas taikant šią metodiką leis nustatyti slidumo žiemą susidarymo ant šių tipų dangų skirtumus.

3. Automobilių kelių dangų su šlaku transporto ir kelių eksploatacinių rodiklių eksperimentiniai tyrimai

Trečiajame skyriuje pateikiami eksperimentinių tyrimų, atliktų siekiant įvertinti automobilių kelių dangų su smulkiagrūdžiais arba stambiagrūdžiais asfaltais su šlaku TER rodiklių pokyčius, metodika ir rezultatai. Remiantis teoriniais teiginiais, pateiktais 2 skyriuje, išskirti tiriamieji parametrai ir pasirinkti eksperimentiniai darbo metodai, kurių schema parodyta 5A pav.

Pagrindiniai eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami II techninės kategorijos automobilių kelio ruože – automobilių privažiuojamajame kelyje prie UAB „Kelių statyba Altkom“ gamybinio baro, 0+00 km – 2+500 km Donecko srityje penkerius eksploatacijos metus. Automobilių kelyje yra ruožai, kurių viršutinio sluoksnio danga yra iš smulkiagrūdžio ir stambiagrūdžio asfalto su šlaku.



5A pav. Eksperimentinių tyrimų atlikimo schema

Statant II techninės kategorijos automobilių kelių ruožų viršutinius pagrindo ir dangų sluoksnius – automobilių privažiuojamasis kelias prie UAB „Kelių statyba Altkom“ gamybinio baro, 0+00 km – 2+500 km, buvo naudojami asfalto mišiniai, kurių mineralinė dalis sudaryta iš Makejevkos metalurgijos kombinato aukštakrosnių šlakų (MMK).

Buvo atlikti šie eksperimentiniai tyrimai:

- vizualus kelio dangos paviršiaus bendros būklės įvertinimas ir vietų, kuriose reikia atlikti stiprio matavimą prietaisais pagal VBN V.2.3-218, nustatymas;
- kelio dangos stipris įvertintas nustačius tamprumo modulį, taikant MAZ-503 A rato statinės apkrovos metodą tampriajam įlinkiui pagal B.2.3 VBN-218. Įlinkiams matuoti buvo naudojamas ilgos bazės svertinis deflektometras PC-204;

- asfalto dangos paviršiaus lygumui matuoti naudota išilginių ruožų po 3 m universali sija pagal DSTU B B.2.3-3, žinomomis koreliacinėmis priklausomybėmis pritaikant reikšmes prietaisui PKRS-2U;
- kelių dangos sukibimo koeficientas nustatytas švytuokliniu nešiojamuoju prietaisu MP-3, remiantis DSTU3587.

Laboratoriniais bandymais nustatytos asfalto su Makejevkos metalurgijos kombinato (MMK) aukštakrosnių šlakais termofizikinės charakteristikos, tokios kaip šilumos laidumas (λ) ir specifinė šiluma (c), kurių nėra žinynuose ir norminiuose dokumentuose.

Buvo nustatomos tankaus smulkiagrūdžio asfalto su I markės A tipo šlaku ir akytojo stambiagrūdžio asfalto su šlaku termofizikinės charakteristikos. Laboratorinių bandymų duomenys pateikti 1A lentelėje.

Ledo sukibimo jėga su įvairiais asfalto dangų tipais buvo nustatyta naudojant mėginius – 4×4×16 cm dydžio sijas, pagamintas iš tradicinio smulkiagrūdžio asfalto su šlaku. Ledo sukibimo su medžiaga jėga ($R_{cų}$) buvo apibrėžiama skirtumu tarp jėgų lenkiant sušaldytus ir išbandytus tam tikroje temperatūroje vandens prisotintus ($R_в$) ir sausus (R_{cyx}) mėginius: $R_{cų} = R_в - R_{cyx}$.

1A lentelė. Laboratorinių tyrimų duomenys nustatant asfalto dangų su šlaku termofizikines savybes

Termofizikiniai parametrai	Asfalto su šlaku rūšis	
	Smulkiagrūdis	Stambiagrūdis
Šiluminio laidumo koeficientas, W/(m · K)	0,39	0,40
Savitoji šiluminė talpa, J/(kg · K)	1,68	1,71

Atlikus laboratorinius bandymus, ledo sukibimo jėga su smulkiagrūdžio asfalto su šlaku paviršiumi buvo 1,19 MPa, o su tradicinio smulkiagrūdžio asfalto paviršiumi – 2,15 MPa, tai beveik du kartus didesnė sukibimo jėga. Tai leidžia sumažinti darbo sąnaudas, skiriamas kovai su slidumu žiemą.

Bendros išvados ir rekomendacijos

Išvados

1. Nustatyti reikšmingiausi veiksniai, darantys įtaką asfalto dangų su šlaku TER pokyčiams, atskleidė, kad kelio dangos stiprio, dangos lygumo ir sukibimo koeficiento pokyčiams įvertinti gali būti imamas tarpremontinis eksploatavimo laikotarpis, o kelio dangos būklei įvertinti žiemą – laiko intervalas, per kurį susidaro slidumas žiemą.
2. Sukurtas matematinis modelis, apibūdinantis TER pokyčius, esant ilgam laiko intervalui posistemyje „kelias–automobilis–aplinka“ ir įvertinantis meteorologines sąlygas, kelių būklę bei transporto ypatybes.

3. Sudarytas matematinis modelis dangos būklei nustatyti trumpam laiko tarpui žiemą posistemyje „aplinka–kelias“, esant įvairioms meteorologinėms sąlygoms ir įvairiai kelio dangos būklei.
4. Eksperimentiniais tyrimais patvirtinta, kad plikledis žiemą ant asfalto dangos su šlaku gali susidaryti dėl didelės šiluminės inercijos, kuris 15 % mažesnis nei ant asfalto dangos su tradicinėmis medžiagomis, o sukibimo su ledu reikšmė yra beveik du kartus mažesnė nei ledo sukibimo su dangos paviršiumi iš tradicinių medžiagų.
5. Pirmą kartą teoriškai pagrįsta ir eksperimentiškai patvirtinta, kad TER, o būtent stambiagrūdžio ir smulkiagrūdžio asfalto su šlaku stipris, vertinamas elastingumo moduliu, eksploatuojant penkerius metus, padidėjo 55 %, lyginant su pradiniu; lygumas padidėjo 10 %; stambiagrūdžio asfalto sukibimo koeficientas beveik nepakito (pradinis 0,57, po penkerių eksploatavimo metų – 0,53), bet padidėjo smulkiagrūdžio asfalto (atitinkamai 0,37 ir 0,46).
6. Pakeitus per metus sunaudojamą smulkintą granitą šlaku, apskaičiuotas asfalto su šlaku ekonominis efektyvumas – jis sudaro 16,4 mln. grivinų (54 tūkst. eurų); vieno kilometro asfalto dangos – 54 tūkst. grivinų (5 268 eurai). Asfalto su šlaku kelių priežiūros žiemą ekonominis efektyvumas sudaro 4 080 grivinų (398 eurai) 1 km kelio, viso tiriamo kelio ruožo – 52 498 grivinų (5 121 euras).

Rekomendacijos

1. Terminus tarp kapitalinių automobilių kelių asfalto dangos su šlaku remontų būtina nustatyti tokius, kaip keliams su asfalto dangomis iš tradicinių medžiagų, tačiau įvertinant transporto eismo srautą, kelių dangos tipą, patikimumą koeficientą ir kelio klimatinę zoną.
2. Asfalto dangos su šlaku naudojimo laiką būtina vertinti pagal dangos paviršiaus nusidėvėjimo dydį ir dangos tamprumo modulio sumažėjimą daugiau nei 25 % nuo verčių, gautų diagnostiniais tyrimais.
3. Asfalto su šlaku dangoms remontuoti siūloma naudoti efektyviausias ir ekonomiškas technologijas, remiantis jų atkūrimo principais.
4. Pagrindinis asfalto su šlaku dangų defektas – įtrūkiai. Eksploatacinės priežiūros metu privaloma užpildyti įtrūkius glaistu arba lipniu bitumu pereinant nuo vasaros prie žiemos eksploatavimo periodo.
5. Susidarius stiklo pavidalo ledui ant smulkiagrūdžio asfalto su šlaku dangos dėl padidėjusio jų paviršiaus šiurkštumo (daugiau kaip 0,3 mm), galima naudoti kalcio chloridą ir magnio chloridą, kurie staigiai nesumažina trinties koeficiento.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

In conditions of constant development of the road transport followed by fast increase in the scope of truck fleet, increase in carrying capacity and dynamic features of cars, overall performance of vehicles to a great extent depends on riding qualities of motor roads which is assessed with regard to strength, evenness and roughness. The dominant role here belongs to asphalt pavements protecting road structure from direct effect of climatic factors impact and ensuring design speeds.

Asphalt pavements well proved themselves in the most complicated activity of road operational services during winter period when due to slipperiness formed on the surface of the road pavement, significant reduction in vehicles speed, traffic intervals and increase in the number of road accidents took place that negatively affected economic parametres of the state.

One of priority tasks of road branch is increasing operational reliability of motor roads during different seasons of the year. The main ways of of this task solution is application of asphalt pavements having sufficient durability that allows to ensure standard riding qualities and improvement of of road pavement design for the purpose of reduction of winter slipperiness formation.

Relevance of the work

Recently, in connection with increasing cost of road-building materials, the most actual problem in highway engineering was a wide application of local materials. In the regions with well developed iron and steel industry the most widespread local materials are coproducts of black and nonferrous metallurgy, that are the slags. Numerous researches define possibility of their use for preparation of asphalt mixes.

Use of asphalt concrete with slag materials is restricted for the pavements of the III-rd technical category highways and for lower road categories by existing regulations. This results from the fact that the properties of asphalt concrete with slag materials as road-building materials are considered in comparison with the properties of asphalt concrete on traditional (granite mineral) materials and insufficientl attention is given to studying operational and deformatsion-strength properties of asphalt pavements with slag materials, especially on the highways of the highest categories.

In the researches conducted earlier, the question of riding qualities change is not reflected including the following: strengths, evenness, roughness of asphalt pavements with slag materials in the course of long maintenance depending on suitable-environmental conditions is not studied, the features of formation winter slipperiness on their surface are not studied either.

Therefore, studying of dynamics of riding qualities changes of highways with asphalt pavements with slag materials is an actual problem.

The urgency of the problem which is considered can be explained by the fact that in the regions with highly developed iron and steel industry the use of asphalt concrete with slag materials in the pavements of highways allows to gain certain economy of funds at their construction and maintenance, and also helps to solve the problem of metallurgical industry waste use.

The object of research

The object of research of the thesis is change in time of riding qualities of highways with asphalt pavements with slag materials depending on weather–climatic, road and transport factors, and also the processes of winter slipperiness formation on asphalt pavements with slag materials.

The aim of the thesis

The work purpose consists in the definition of riding qualities values of highways with asphalt pavements with slag materials and forecasting the changes of these parametres while in service under the influence of weather–climatic factors, intensity and traffic volume of trasport vehicles.

The tasks of the thesis

For the achievement of the specified purpose it is necessary to solve the following research problems:

1. To carry out the analysis before the research fulfillment and to define the most significant factors influencing riding qualities change of asphalt pavements of highways throughout standard service life.

2. To develop mathematical model for the description of riding qualities change at a long time interval in the subsystem 'Road–Car–Environment' with the definition of weather–climatic and the road parametres influencing their change.
3. To develop mathematical model for the definition of the pavement's condition for the short time intervals during the winter period in the subsystem 'Environment–Road' with the definition of the meteorological and road parametres influencing processes of winter slipperiness formation.
4. To update the model for the research of ice formation features on the roads with different types of pavements on the basis of the equation of non-stationary heat conductivity.
5. To spend experimental research for defining basic regularity of riding qualities change for asphalt pavements with slag materials depending on the duration of weather-climatic factors influence.
6. To carry out calculation of economic efficiency of useing asphalt concrete with slag materials.
7. To develop recommendations on the repair and operational maintenance of highways with asphalt pavements with slag materials.

The research methods

Scientifically-proved methods of mathematical statistics and regressive analysis are used in this thesis for the development of mathematical models which adequacy is confirmed by experimental researches, results implementation and the use of modern equipment.

Scientific novelty

At the solution of posed tasks in the course of researches fulfillment the following results were gained:

1. On the basis of experimentally-theoretical researches the factors influencing the change of basic riding qualities of the highways at maintenance were defined;
2. For the first time on the basis of theoretical and experimental researches of asphalt pavements behaviour produced of slag materials and taking into account the equation of non-stationary heat conductivity, theoretical-empirical dependence of riding qualities on wether-climatic factors and features of ice formation for different types of asphalt concrete was determined;
3. For the first time the mathematical model presenting interaction of the subsystem 'Road–Car–Environment' for short time intervals was developed allowing to define the change of road pavement strength, evenness of the pavement, cohesion factor and speed of traffic flows;

4. For the first time the mathematical model presenting interaction of the subsystem 'Environment–Road' for short time intervals in the course of winter slipperiness formation was developed.
5. A theory of the mechanism of definition thermal characteristics of asphaltic concrete with slag materials taking into account adhesion of ice to their surface during winter period and processes of winter slipperiness formation on the surface of asphalt pavements with slag materials was developed.
6. Processes of modelling for the prediction of road pavement strength change, evenness of the pavement, cohesion factor of road asphalt pavements with slag materials were developed.

Practical significance of the obtained results

The practical result of this work consists in obtaining mathematical models which can be the tool for working out the recommendations on the repair and operational maintenance of highways with asphalt pavements produced of slag materials, and also for the creation of algorithm and software on forecasting riding qualities of asphalt pavements allowing to expand the area of using slag materials in highway engineering on the roads of all classes and significance in all road-climatic zones of Ukraine.

The research results were introduced by Road Service of the Donetsk region at the construction of the Access road to the industrial basis of LLC 'Road Constuction Altkom' in the Donetsk region with the use of recommendations on the repair and operational maintenance of highways with asphalt pavements produced of slag materials, and also in educational process of the National Aviation University on the Chair of the Airports and Highways Reconstruction at degree designing works and performance of scientific works of the students.

Approval of research results

Basic provisions and results of researches were discussed and approved during the following events:

- International scientific practical conference 'Problems of reliability of pavements of urban streets and roads' (Minsk, БНТУ (Byelorussain National Transport University, June, 30th, 2005);
- International scientific and technical conference 'Modern production engineering and materials in a road industry' (Kharkiv, ХНАДУ (Kharkiv National Automative Road University), November, 16-17th, 2006);
- The III-rd International conference 'Architecture and ecology: проблемs of urban environment' (Kyiv, НАУ (National Aviation University), November, 15-16th, 2011);
- The 14-th Conference of young scientists of Lithuania 'Science is the future of Lithuania' (Vilnius, Lithuania, 2011);
- The 15-th Conference of young scientists of Lithuania 'Science is the future of Lithuania' (Vilnius, Lithuania, 2012);

- The II-nd International scientific and technical conference ‘Scientific applied aspects of automobile and road transport branches’ (Lutsk, ЛНТУ (Lutsk National Transport University), May, 30th June, 2012);
- International scientific and technical conference ‘Modern computer-innovative technologies of designing, construction, and operationof highways and aerodromes’ (Kharkiv, ХНАДУ (Kharkiv National Automative Road University), October, 24–26th, 2012).

Thesis structure

The thesis consists of the introduction, four chapters and the body matter with the presented results of researches, basic conclusions, the list of used references and 10 annexes. The scope of the thesis is 180 pages, including 35 tables and 43 figures.

1. Analysis of research and objectives in the construction of roads

In this chapter current status of the issue is stated, the analysis of basic research results in the area of metallurgical slags placation in asphalt mixes is made.

Asphalt concrete with slag materials is an artificial building conglomerate which represents a mix of different kinds of metallurgical slags and bitumen prepared using certain technological regimes, laid and compacted in the top layers of road pavement.

The studies of many scientists are devoted to the research of possibility of using metallurgical slags in asphaltic concrete. During the literary analysis a wide spectrum of metallurgical slags has been considered. On the basis of studying physical- mechanical properties, the possibility of using different types of metallurgical slags for the preparation of hot and cold asphalt concrete has been proved.

In scientific researches great attention is paid to studying riding qualities of highways. As a generalising riding qualities indicator the speed of traffic flow is considered. Various methods of studying the dynamics of riding qualities change in the course of long maintenance have been considered.

For studying thr features of highways maintenance with asphalt pavements produced of slag materials it is necessary to choose the following riding qualities as cores: strength of pavement, evenness of a pavement and cohesion factor. Speed of traffic flow is accepted as a parametre which reflects riding qualities condition of highways.

The fulfilled analysis of works on studying the dynamics of basic riding qualities of roads during a long-term maintenance allowed to draw to the conclusion that existing techniques on the assessment of change of strength, evenness and cohesion factor of the pavement have been approved by the authors on the highways with traditional asphalt pavements. All works on studying asphalt concrete with slag materials have been directed at the substantiation of the opportunity of their application in road pavement designs.

The researches on complex assessment of riding qualities of highways with asphalt pavements produced of slag materials in the course of a long-term maintenance and during various seasons of the year are missing in scientific literature.

2. Modelling methods of exploitation parameters of automobile roads

In this chapter the system approach to the construction of mathematical models for the definition of basic riding qualities highways changes with traditional and asphalt pavements produced of slag materials is considered.

Change of strength of a pavement due to various factors can be presented in the form of the following mathematical model:

$$E_{\phi}(t) = f_1(N, S_{tp}, m, \nu, p), \quad (1)$$

where N – is a traffic volume, vehicle/day; S_{tp} – composition of traffic flow; m – a set of the parametres describing pavement design and strength properties of used materials; v – a set of the parametres describing the influence of weather–climaticfactors; p – a set of the parametres describing the influence of measures on construction and operational maintenance of road.

Accoding to the results of conducted researches, the change of an actual modulus of the pavement's strength at the stage of highway maintenance can be described as a three stages process, and its dynamics can be presented as a graph in Fig. 1A.

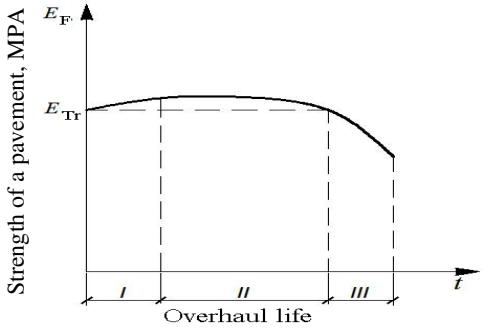


Fig. 1A. Change of strength of a pavement during inter-repair period

The dynamics of evenness of an asphalt pavement, $S(t)$ can be presented in the form of the following mathematical model:

$$S(t) = f_2(N, S_{tp}, E, m, \nu, p), \quad (2)$$

where E – pavement modulus, MPa.

Regularity of change of evenness of asphalt pavements during inter-repair periods ($t_{\partial.n.}$) is presented in the form of a graph in the Fig. 2A.

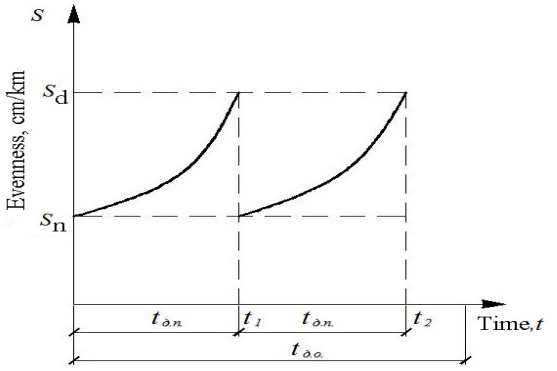


Fig. 2A. Change of evenness of asphalt pavement during highway operation

According to the research results, change of cohesion factor value of an asphalt pavement in the course of a long-term maintenance after the construction or repair of a highway can be presented in the form of the graph (see Fig. 3A) and the following mathematical model:

$$k_{cu} = f_3\left(N_p,\ S_{tp},\ m,\ v,\ p\right), \tag{3}$$

where N_p – total number of passed design vehicles during operation.

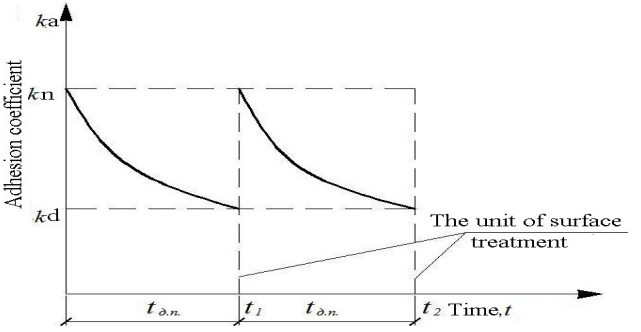


Fig. 3A. Change of cohesion factor value of asphalt pavement during highway operation

Change of cohesion factor value from standard values (k) to admissible ($k_{\partial on.}$) ones, results from the impact of mechanical and natural-climatic factors on a highway.

The process of cohesion factor value change during the period of winter slipperiness formation and in terms of works on its liquidation can be presented in the form of the graph on Fig. 4A.

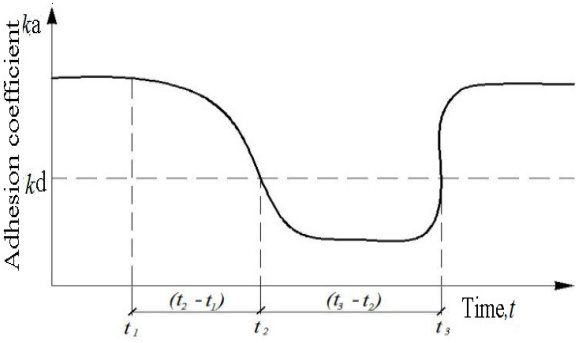


Fig. 4A. Change of cohesion factor value on asphalt pavement during the period of winter slipperiness formation and its liquidation

As a result of slipperiness formation during the change of weather conditions (time span $t_2 - t_1$) cohesion factor value decreases below admissible value ($k_{don.}$), with regard to traffic safety requirements. When taking the anti-slipperiness measures (time span $t_3 - t_2$), cohesion factor remains below admissible value, and after 'the effects' produced by de-icing materials – its value increases, thereby improving riding qualities of a highway.

According to the statement of a problem, an interaction scheme of external and internal parametres of the subsystem 'Road–Car–Environment' was developed.

Internal parametres of the subsystem influencing the dynamivs of riding qualities change are divided into two groups:

- Inherent parametres of the subsystem to which refer road $\overline{d(t)}$ and $\overline{h(t)}$ transport parametres;
- Parametres affecting the environment to which refer weather-climatic $\overline{v(t)}$ factors.

As an external (initial) parameter of the subsystem 'Road–Car–Environment' the following basic riding qualities of a highway can be mentioned: strength of road pavement, evenness of a pavement, cohesion factor and a generalising parameter – traffic flow speed. For the problem solution it is necessary to consider the dynamics of their change in time.

Thus, mathematical model for the description of changes of basic riding qualities in a long-term gap in the subsystem 'Road–Car–Environment' looks like that:

$$\overline{y'(t)} = F_{Д-А-С}\left[\overline{v'(t)}, \overline{d'(t)}, \overline{t'}\right], \qquad (4)$$

where $\overline{y(t)} = \{E_{\phi}(t), S(t), k_{сц}(t), V(t)\}$ – Vector of external parameters of the subsystem; $F_{Д\text{-}А\text{-}С}$ – the law of operation of the subsystem; $\overline{v(t)} = \{v_1(t), v_2(t), v_3(t)\}$ – vector of external environment impact (weather and climatic parameters); $\overline{d(t)} = \{m_1, m_2, E_0, S_0, R_0\}$ – vector of parameters of their own subsystems (traffic specification); $\overline{h(t)} = \{N(t), N_p(t), S_{tp}(t)\}$ – vector of inherent parameters of the subsystems (road parameters); t – time.

As an external parameter of the subsystem «Environment–Road» the state the road surface in winter is accepted. To solve the problem slippery condition of the pavement is considered, i. e. presence of slipperiness as a glassy ice on its surface.

Thus, mathematical model for describing the state of the pavement for shor intervals of time during winter in the subsystem 'Environment–Road' is as follows:

$$\overline{y'(t)} = F_{с\text{-}д}\left[\overline{y'(t)}, \overline{d'(t)}, t'\right], \tag{5}$$

where $\overline{y'(t)} = \{S_p\}$ – vector which components are the state of the road pavement in winter; $F_{с\text{-}д}$ – the law the subsystem operation; $\overline{v'(t)} = \{T(t), v_1'(t), v_2'\}$ – vector of environmental impact (weather parameters); $\overline{d'(t)} = \{m_1', m_2', \ldots, m_5'(t), T_n'(t)\}$ – vector of inherent parameters of the subsystem (road parameters); t' – time during which winter slipperiness formation as a glassy ice is possible.

To assess the dynamics of elastic modulus change of road pavement with the surfacing of asphalt concrete produced using traditional materials, mathematical models developed by Krasikov (2000) were used.

For a relatively small deformations of road pavement, that is,during the first and the second stages of road design work, its strength $E_{\phi}(t)$ is described using the following mathematical model:

$$E_{\phi}(t) = E_0\left\{1 - \left[a_m + b_m\left(\lg N_c(t) + \lg t\right)\right]\right\}, \tag{6}$$

where E_0 – mathematical expectation of elasticity modulus during the first year of road pavement life after the completion of its formation, MPa; a_m and b_m – the parameters of the equation defined on the basis of experimental studies; $N_c(t)$ – total traffic volume calculated to the design load of the group A, vehicles / day; t – predicted period of service of the pavement, in years.

The study of dynamics of evenness of traditional asphalt pavemenst had been based on the following mathematical model, also proposed by Krasikov (2000):

$$S_t = S_0\left[1 + c\ E_{\min}^{d}\ \ N_c(t)\, a\ E_{\min}^{b}\ \right], \tag{7}$$

where S_0 – the value of evenness according to impact measuring device after putting the road into operation, cm/km; E_{min} – the minimum modulus of elasticity, MPa; a, b, c, d – parameters of the equation defined on the basis of experimental studies.

It is possible to assess the change of riding qualities of the roads with the surfaces made from slag and traditional asphalt materials during short time intervals (in winter) through the study of the processes of various types of winter slipperiness formation on their surfaces.

Mathematical formulation of the problem contains the differential equation and single-valuedness condition including thermal parameters and dimensions of the road structure, as well as the boundary conditions and the initial temperature distribution. Temperature conditions of the road structure on the surface under the influence of temperature, which changes periodically, for the issue under consideration can be described as a monospaced heat conductivity equation:

$$c\rho\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right]+q\ , \tag{8}$$

where $T(x, t)$ – temperature inside the road structure and subgrade soil at the depth of x at time t, ° C; q – heat flow density in the structure, W/m^3; c – specific heat capacity, J/kg K; ρ – density of the material, kg/m^3; λ – thermal conductivity, W/m K.

As road pavement is a multilayered system, equation (8) for the issue under consideration is transformed into a system of differential equations:

$$\begin{cases} c_i\rho_i\dfrac{\partial T}{\partial t}=\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_i\dfrac{\partial T}{\partial x}\right) & H_{i-1}\le x\le H \\ c_м\rho_м\dfrac{\partial T}{\partial t}=\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_м\dfrac{\partial T}{\partial x}\right) & H_4\le x\le H_ф \\ c_T\rho_T\dfrac{\partial T}{\partial t}=\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_T\dfrac{\partial T}{\partial x}\right) & H_ф\le x\le H \end{cases}\ . \tag{9}$$

On condition on the boundary of the phase transition in the soil of subgrade:

$$\lambda_m\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=H_ф}\lambda_T\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=H_ф}=Q_\rho\frac{\partial H_ф}{\partial t}\ , \tag{10}$$

where $H_ф$=$H_ф(x,t)$ of the phase transition, m; Q – latent heat of ice melting, kJ / kg.

The rate of destruction of ice formation on the surfaces of pavements under the impact of passing vehicles and the quality of cleaning depends on the force of adhesion (adhesion) of these formations to the surface of the pavement.

Bond strength of ice and material of the surface ($R_{сц}$) is defined as the difference of bending strength of frozen and tested at a given temperature saturated ($R_в$) and dried ($R_{сух}$) samples:

$$R_{сц}=R_в-R_{сух}\ , \tag{11}$$

or

$$R_{сц} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{bh^2}\left(R_в - R_{сух}\right), \quad (12)$$

where $P_в$, $P_{сух}$ – breaking load; l – distance between the supports; b – width of the sample; h – height of the sample.

Determination of bonding strength of ice with asphalt pavement surface produced using traditional materials and slag according to this method allows to determine the differences in winter slipperiness formation on these types of pavements.

3. Experimental researches TER automobile road with pavement from asphalt concrete with slag materials

The third chapter presents the methodology and the results of experimental studies conducted to assess changes in riding qualities indicators of roads with pavements of fine-grained and coarse-grained asphalt concrete with slag materials. According to the theories presented in Chapter 2, the studied parameters are highlighted and the methods of experimental work are selected and represented in the diagram of Figure 5A.

Basic experimental studies were conducted on the road section of the II-nd technical category – an access road to the production basis of LLC 'Road Construction Altcom' km 0 +00–km 2+500 in the Donetsk region in the course of five years of operation. On the road there are the areas with the top layer of pavement produced of fine and coarse-grained asphalt concrete with slag materials.

During the construction of the base courses and the surfaces of the road section of the II-nd technical category – an access roads to the production basis of LLC 'Road Construction Altcom' 0 +00–km 2+500 asphalt mixtures, the mineral part of which was represented in the form of blast furnace slag of Makeyevka Metallurgical Works (MMW) were used.

The experimental research program included the following:

1. Visual assessment of the general state of the road surface and identification of places subject to the instrumental measurements of strength in accordance with ВБН В.2.3-218 (Departmental construction norms);
2. Assessment of strength of the pavement by determining the modulus of elasticity thriugh elastic deflection by the method of static loading by the wheel of a vehicle MAZ–503A in accordance with ВБН В.2.3-218. To measure the deflections a long-baseline lever deflectometer РК-204 was used;
3. Determination of surface evenness of asphalt c pavement by measuring the clearance of 3 m under the universal rack in accordance with ДСТУ Б В.2.3-3 (State Standard) with the translation basing on the known correlation dependencies in the unit values for the device ПКРС-2У;
4. Determination of cohesion factor of road surfaces using a pendulum portable device МП-3 according to ДСТУ3587.

During laboratory tests thermal characteristics of asphalt with blast furnace slag Makeyevka Steel Works (MMW) were determined, such as e thermal conductivity λ and specific heat c, which are missing in the reference and regulatory literature.

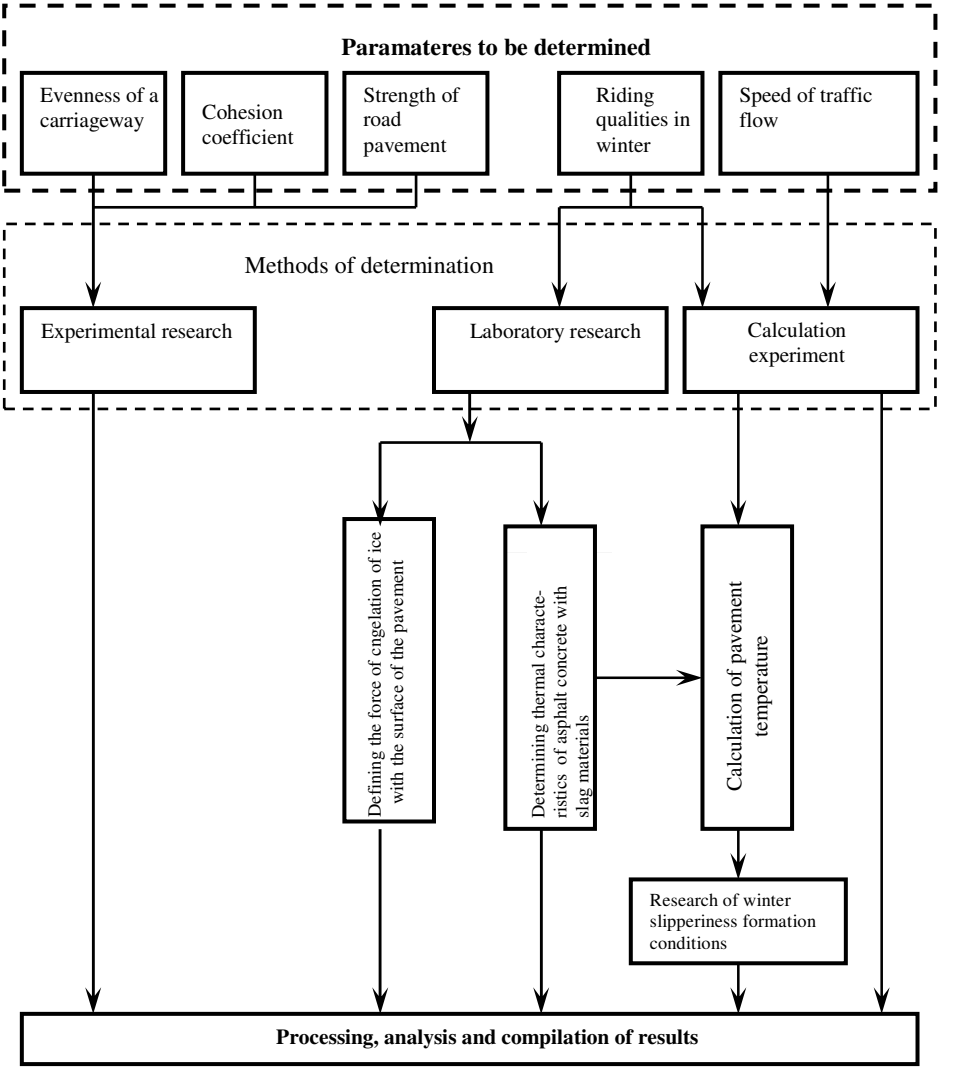


Fig. 5A. The scheme of experimental researches

Thermal characteristics were determined for dense fine-grained asphalt concrete with slag materials of brand I type A and for porous asphalt with coarse–grained asphalt concrete with slag materials. The results of laboratory tests are shown in Table 1A.

Table 1A. Laboratory tests results on determining thermcal properties of asphalt pavements with slag materials

Thermal parameters	Kind of asphalt with slag materials	
	Fine-grained	Coarse-grained
Heat conductivity coefficient, W/(м·K)	0,39	0,40
Specific heat, J/(kg·K)	1,68	1,71

Determination of bonding strength of ice with different types of asphalt pavement was conducted on the test beams of the size 4×4×16 cm, made of fine-grained traditional asphalt concrete with slag materials. Bond strength of ice with material ($R_{сц}$) was defined as the difference between the flexural strength of frozen and tested at a given temperature, water saturation ($R_в$) and dry ($R_{сух}$) samples: $R_{сц=} R_в – R_{сух}$

As a result of laboratory tests, bonding strength of ice with the surface of fine-grained asphalt concrete with slag materials was 1.19 MPa, and with the surface of traditional fine-granied asphalt concrete was 2.15 MPa, which is almost 2 times higher. This fact allows reducing labor costs to combat winter slipperiness.

General conclusions and recommendation

Conclusions

1. The fulfilled study aimed at determining the most important factors that affect the change of riding qualities of asphalt pavements with slag materials proved that for the assessment of changes in the strength, evenness and cohesion factor of the pavement overhaul life can be adopted, and to assess the road conditions in winter – the time interval, corresponding to the formation of winter slipperiness can be used.
2. Mathematical model that describes the change in riding qualities during a long time interval in the subsystem ‘Road–Vehicle–Environment’ was developed.
3. Mathematical model for determining the state of the pavement for short intervals of time during winter in the subsystem ‘Environment–Road’ was developed.
4. Experimental research has confirmed that the possibility of winter slipperiness formation as a glassy ice on the asphalt pavement with slag materials due to higher thermal inertia – is by 15% lower than on the asphalt pavements produced of traditional materials, and the value of bonding strength with ice is almost 2 times lower than it is for the surface pavements produced of traditional materials.
5. For the first time it was theoretically substantiated and experimentally confirmed that the riding qualities, namely, strength, modulus of elasticity estimated for 5 years of operation for coarse and fine–grained asphalt from slag

materials increased by 55% compared with the initial ones; evenness increased by 10%, cohesion factor remained virtually unchanged for the coarse-grained asphalt (initial value was 0.57, and after 5 years of operation -0.53) and it increased for fine-grained asphalt concrete (respectively 0.37 and 0.46).

6. Calculated economic efficiency of asphalt slag materials use at the replacement of the annual volume of crushed granite slag makes 16.4 mln UAH (1600 Euro). One kilometer of asphalt pavement costs 54 thousand UAH (5268 Euro). The economic efficiency of winter road maintenance due to using asphalt with slag materials for 1 km of road makes 4080 UAH (398 Euro), and for the whole length of the test road section – 52498 UAH (5121 Euro).

Recommendations

1. Overhaul life for the highways with asphalt pavements produced of slag materials should be of the same duration as for the roads with asphalt pavements produced of traditional materials but taking into consideration intensity of traffic flow, type of pavement, safety factor and road-climatic zone.
2. Service life of asphalt pavement produced of slag materials should be evaluated by the degree of surface pavement wear and reduction of the modulus of elasticity of the pavement by more than 25% of the values obtained on the basis of diagnostic tests.
3. For the repair of asphalt pavements produced of slag materials it is recommended to use the most efficient and cost-effective technologies based on the principles of regeneration.
4. The main defect of asphalt pavement with slag materials are cracks. At its operational maintenance it is necessary to fill the cracks with mastic or viscous bitumen during the transition from summer to winter operational period.
5. When fighting with glassy ice forming on fine-grained asphalt surfaces with slag materials due to their increased surface roughness (over 0.3 mm), it is possible use of calcium chloride and magnesium chloride that will not lead to a sharp decrease in the friction coefficient.

Приложения[1]

Приложение 1. Статистическая обработка результатов вычислительных экспериментов

Приложение 2. Фрагмент журнала визуальной оценки состояния дорожной одежды на автомобильной дороге II технической категории

Приложение 3. Рекомендации по ремонту и эксплуатационному содержанию автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми материалами

Приложение 4. Оценка динамики изменения транспортно-эксплуатационных показателей

Приложение 5. Результаты моделирования скорости движения транспортных потоков на автомобильных дорогах с асфальтобетонными покрытиями со шлаковыми и традиционными материалами

Приложение 6. Результаты моделирования процессов образования зимней скользкости

Приложение 7. Результаты измерений и оценка ровности асфальтобетонного покрытия со шлаковыми материалами

[1] Приложения записаны на компакт-диск и приложены к диссертационной работе

Приложение 8. Результаты измерений величины коэффициента сцепления покрытия на опытном участке автомобильной дороги II технической категории
Приложение 9. Согласие соавторов научных публикаций
Приложение 10. Копии публикаций автора

Катерина КРАЮШКИНА

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ
ПОКРЫТИЙ СО ШЛАКОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ
НА ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ
ПОКАЗАТЕЛИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Докторская диссертация
Технологические науки, инженерия транспорта (03 Т)

Kateryna KRAYUSHKINA

ASFALTO DANGŲ SU ŠLAKAIS SAVYBIŲ ĮTAKA
AUTOMOBILIŲ TRANSPORTO IR
KELIŲ EKSPLOATACINIAMS RODIKLIAMS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, transporto inžinerija (03T)

Kateryna KRAYUSHKINA

INFLUENCE OF ASPHALT PAVEMENTS WITH SLAG
ADDITIVES ON EXPLOITATION PARAMETERS
OF AUTOMOBILE ROADS

Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Transport Engineering (03T)

2013-04-22. 18,35 sp. l. Tiražas ****** egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
http://leidykla.vgtu.lt
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius