DOI: 10.22227/1997-0935.2018.3

ISSN 1997-0935 (Print)
ISSN 2304-6600 (Online)

ВЕСТНИК МГСУ
Vestnik MGSU

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering

Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture

Том 13 Выпуск 3 (114)

Основан в 2005 году,
1-й номер вышел в сентябре 2006 г.
Выходит ежемесячно

Учредители:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26;

Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 19, корп. 1.

Выходит при научно-информационной поддержке Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.

Founded in 2005,
1st issue was published in September, 2006.
Published monthly

Founders:

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337;

Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, build. 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.

The Journal enjoys the academic and informational support provided by the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV).

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.

Включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

Индексируется в **РИНЦ**, Научной электронной библиотеке **«КиберЛенинка»**, **UlrichsWeb Global Serials Directory**, **DOAJ**, **EBSCO**, **Index Copernicus**, **RSCI** (Russian Science Citation Index на платформе Web of Science)

Главный редактор
акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
Валерий Иванович Теличенко (НИУ МГСУ)

Зам. главного редактора
Евгений Валерьевич Королев,
советник РААСН, д-р техн. наук, проф. (НИУ МГСУ)
Елена Анатольевна Король,
чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф. (НИУ МГСУ)

Редакционная коллегия:
Х.Й.Х. Броуэрс (Технический университет Эйндховена, Нидерланды)
А.И. Бурханов (ВолГТУ, Волгоград, Россия)
И.В. Дуничкин (НИУ МГСУ, Москва, Россия)
Д.В. Козлов (НИУ МГСУ, Москва, Россия)
О.И. Поддаева (НИУ МГСУ, Москва, Россия)
Е.И. Пупырев (НИУ МГСУ, Москва, Россия)
А.П. Пустовгар (НИУ МГСУ, Москва, Россия)
Д.Н. Силка (НИУ МГСУ, Москва, Россия)
Н.В. Сироткина (ВГУ, Воронеж, Россия)
М.Ю. Слесарев (НИУ МГСУ, Москва, Россия)
А.З. Тер-Мартиросян (НИУ МГСУ, Москва, Россия)
А.В. Шамшин (Университет Центрального Ланкашира, Ланкашир, Соединенное Королевство)

Редакционный совет:
А.А. Волков (председатель)
Ю.В. Алексеев, Ю.М. Баженов, Н.Г. Верстина, А.В. Гинзбург, И.Г. Лукманова, А.А. Морозенко, Н.С. Никитина, В.А. Орлов, Н.П. Осмоловский, З.Г. Тер-Мартиросян (НИУ МГСУ, Москва, Россия)
Н.В. Баничук (ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия)
А.Т. Беккер (ДВФУ, Владивосток, Россия)
В.В. Беликов (Институт водных проблем РАН, Москва, Россия)
И.А. Бондаренко (НИИТИАГ, ф-л ЦНИИП Минстроя России, Москва, Россия)
Й. Вальравен (Технический университет Дельфта, Дельфт, Нидерланды)
Й. Вичан (Университет Жилина, Жилина, Словакия)
З. Войчицки (Вроцлавский технологический университет, Вроцлав, Республика Польша)
В.Г. Гагарин (НИИСФ РААСН, Москва, Россия)
М. Голицки (Институт Клокнера Чешского технического университета в Праге, Прага, Чешская Республика)
В.Т. Ерофеев (МГУ им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия)
Г.В. Есаулов (МАРХИ, Москва, Россия)
Р. Катценбах (Технический университет Дармштадт, Дармштадт, Федеративная Республика Германия)
Е.Ю. Куликова (МИСиС, Москва, Россия)
Л.С. Ляхович (ТГАСУ, Томск, Россия)
П.Я. Паль (Технический университет Берлина, Федеративная Республика Германия)
А.Б. Пономарев (ПНИПУ, Пермь, Росиия)
О.Г. Примин (АО «МосводоканалНИИпроект», Москва, Россия)
С.В. Соболь (ННГАСУ, Н. Новгород, Россия)
Ю.А. Табунщиков (МАРХИ, Москва, Россия)
В.И. Травуш (РААСН, Москва, Россия)
Дж. Харалл (Королевский институт Британских архитекторов, Кембриджский университет, Соединенное Королевство)
И.Л. Шубин (НИИСФ РААСН, Россия, Москва)

Адрес редакции:
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.
Тел./ факс +7 (499) 188-15-87, (499) 188-29-75,
e-mail: vestnikmgsu@mgsu.ru
Официальный сайт журнала
http://vestnikmgsu.ru
ISSN 2304-6600 (Online)

Периодическое научное издание
Вестник МГСУ. Том 13 Выпуск 3 (114)
Научно-технический журнал

Координатор журнальных проектов *И.С. Сковородина*
Зав. редакцией *Л.А. Шитова*
Редактор *А.В. Сахарова*
Корректор *А.А. Дядичева*
Верстка *А.П. Сильванович*
Перевод на английский язык
А.В. Сахарова, А.П. Суворов

Подписан в печать 12.03.2017. Подписан в свет 26.03.2017.
Формат 70x108/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Гарнитура Таймс. Усл.-печ. л. 13,7. Уч.-изд. л. 17,7.
Тираж 200 экз. (1-й з-д 1–100). Цена свободная.
Заказ № 58

Издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».
Издательство МИСИ—МГСУ
www.mgsu.ru, ric@mgsu.ru
(495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75.
Отпечатано в типографии Издательства МИСИ—МГСУ,
(499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

Перепечатка или воспроизведение материалов номера любым способом полностью или по частям допускается только с письменного разрешения Издателя.
Распространяется по подписке.
Подписка по каталогу агентства «Роспечать».
Подписной индекс 18077 (полугодовая),
36869 (годовая)

© НИУ МГСУ, 2018

Вестник МГСУ Том 13 Выпуск 3 (114)

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ. МЕХАНИКА ГРУНТОВ

З.Г. Тер-Мартиросян, А.З. Тер-Мартиросян, В.В. Сидоров
Опыт преобразования слабых водонасыщенных грунтов сваями конечной жесткости 271

Я.А. Пронозин, М.А. Степанов, Д.В. Волосюк, А.Н. Шуваев, Г.И. Рыбак
Опыт устройства фундаментов зданий повышенной этажности в условиях юга Тюменской области 282

Е.С. Соболев, В.В. Сидоров
Взаимодействие сваи и окружающего грунта при вибрационном погружении 293

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

К.Р. Азатян
Основные этапы развития процесса организации дворового пространства 301

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Ф.С. Замалиев
Численные и натурные эксперименты преднапряженных сталежелезобетонных балок 309

О.Н. Котлов, Р.Н. Орищук, Ф.И. Гуняшова
Полевые исследования по самозалечиванию трещин в противофильтрационном элементе из буросекущих глиноцементобетонных свай 322

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Е.А. Король, Н.С. Никифорова
Совершенствование конструктивно-технологических решений и методов расчета покрытий подземных сооружений 330

П.Н. Кострикин
Модель синхронизации комплексного развития многофункциональной городской среды 339

Н.С. Шушунова
Анализ технологических параметров при устройстве инверсионных кровельных покрытий с озеленением 349

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.М. Кириллов, М.А. Завьялов
Прогнозирование остаточного срока службы асфальтобетонных покрытий 356

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

П.А. Кетов
Разработка экологически безопасного энергоэффективного строительного ячеистого материала, соответствующего принципам зеленого строительства 368

О.Д. Самарин
Вероятностно-статистическое моделирование годового хода температуры наружного воздуха и ее значений в теплый период 378

ГИДРАВЛИКА. ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

В.А. Чухин, А.П. Андрианов
Волновая природа бугорковой коррозии в стальных и чугунных трубах систем водоснабжения 385

А.Л. Зуйков, В.А. Суцепин, Е.Ю. Жажа
Совершенствование математической модели ламинарного контрвихревого течения 400

Для авторов 413

CONTENT

BEDDINGS AND FOUNDATIONS, SUBTERRANEAN STRUCTURES. SOIL MECHANICS

Z.G. Ter-Martirosyan, A.Z. Ter-Martirosyan, V.V. Sidorov
Experience of transformation of weak water-saturated soils using piles of finite stiffness 271

Ya.A. Pronozin, M.A. Stepanov, D.V. Volosyuk, A.N. Shuvaev, G.I. Rybak
Experience of construction of high-rise building foundations in the conditions of the south of Tyumen region 282

E.S. Sobolev, V.V. Sidorov
Interaction of the pile and surrounding soil during vibratory pile driving 293

ARCHITECTURE AND URBAN DEVELOPMENT. RESTRUCTURING AND RESTORATION

K.R. Azatyan
Residential architecture of Yerevan in the 20th century. Main stages of development of the process of yard public space organization 301

DESIGNING AND DETAILING OF BUILDING SYSTEMS. MECHANICS IN CIVIL ENGINEERING

F.S. Zamaliev
Numerical and full-scale experiments of prestressed hybrid reinforced concrete-steel beams 309

O.N. Kotlov, R.N. Orischuk, F.I. Gunyashova
Field survey of self-healing of cracks in the impervious element of bored clay-cement concrete piles 322

ECONOMICS, MANAGEMENT AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION PROCESSES

E.A. Korol, N.S. Nikiforova
Improvement of structural-technological solutions and methods of analysis of roofs of underground structures 330

P.N. Kostrikin
Model of synchronization of integrated development of multifunctional urban environment 339

N.S. Shushunova
Analysis of technological parameters when constructing inverted roof structures with greenery 349

RESEARCH OF BUILDING MATERIALS

A.M. Kirillov, M.A. Zavyalov
Prediction of remaining service life of asphalt pavements 356

SAFETY OF BUILDING SYSTEMS. ECOLOGICAL PROBLEMS OF CONSTRUCTION PROJECTS. GEOECOLOGY

P.A. Ketov
Development of environmentally safe, energy efficient cellular construction material corresponding to the principles of green construction 368

O.D. Samarin
Probabilistic-statistical modeling of annual variation of outside temperature and its values in the warm season 378

HYDRAULICS. ENGINEERING HYDROLOGY. HYDRAULIC ENGINEERING

V.A. Chukhin, A.P. Andrianov
The wave nature of tubercle corrosion in steel and cast iron pipes of water supply systems 385

A.L. Zuikov, V.A. Sucepin, E.Yu. Zhazha
Improvement of the mathematical model of laminar flow with oppositely-rotating coaxial layers 400

For the authors 413

Editor-in-chief
Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), DSc, Prof. **V.I. Telichenko** (MGSU)
Advisor of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), DSc, Prof. **E.V. Korolev**
Corresponding Member, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), DSc, Prof. **E.A. Korol'** (MGSU)

Editorial board:
H.J.H. Brouwers (Eindhoven University of Technology, Netherlands)
A.I. Burkhanov (VSTU, Volgograd, Russian Federation)
I.V. Dunichkin (MGSU, Moscow, Russian Federation)
D.V. Kozlov (MGSU, Moscow, Russian Federation)
O.I. Poddaeva (MGSU, Moscow, Russian Federation)
E.I. Pupyrev (MGSU, Moscow, Russian Federation)
A.P. Pustovgar (MGSU, Moscow, Russian Federation)
A.V. Shamshin (University of Central Lancashire, Preston, United Kingdom)
D.N. Silka (MGSU, Moscow, Russian Federation)
N.V. Sirotkina (VSU, Voronezh, Russian Federation)
M.Y. Slesarev (MGSU, Moscow, Russian Federation)
A.Z. Ter-Martirosyan (MGSU, Moscow, Russian Federation)

Editorial council:
A.A. Volkov (Chairman)
Y.V. Alekseev, Yu.M. Bazhenov, A.V. Ginzburg, I.G. Lukmanova, A.A. Morozenko, N.S. Nikitina, V.A. Orlov, N.P. Osmolovskiy, Z.G. Ter-Martirosyan, N.G. Verstina, (MGSU, Moscow, Russian Federation)
N.V. Banichuk, (Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of RAS, Moscow, Russian Federation)
A.T. Bekker (Far Eastern Federal University, FERD RAASN, Vladivostok, Russian Federation)
V.V.Belikov (Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation)
I.A. Bondarenko (Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning, branch of the Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation)
V.T. Erofeev (Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation)
G.V. Esaulov (Moscow Institute of Architecture (State Academy)), Moscow, Russian Federation)
J. Harall (Royal Institute of British Architects, University of Cambridge, Cambridge)
M. Holický (Czech Technical University in Prague, Klokner Institute, Czech Republic)
R. Katzenbach (Technical University of Darmstadt, Germany)
E.Y. Kulikova (NUST MISIS, Moscow, Russian Federation)
L.S. Lyahovich (TSUAB, Moscow, Russian Federation)
P.J. Pahl (Technical University of Berlin, Germany)
A.B. Ponomarev (Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation)
O.G. Primin (Joint Stock Company «MosvodokanalNIIproject Institute», Moscow, Russian Federation)
I.L. Shubin (NIISF RAASN, Moscow, Russian Federation)
S.V. Sobol` (NNSAGU, N. Novgorod, Moscow, Russian Federation)
Yu.A. Tabunshchikov (Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russian Federation)
V.I. Travush (Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation)
J. Vican (Zilina University, Slovakia)
J.C. Walraven (Delft University of Technology, Netherlands)
Z. Wójcicki (Wroclaw University of Technology, Republic of Poland)

Address:
MGSU, 26, Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337, Russian Federation
Tel./ fax: +7 (499) 188-15-87, (499) 188-29-75,
e-mail: vestnikmgsu@mgsu.ru
online version of the journal
http://vestnikmgsu.ru/
ISSN 2304-6600 (Online)

Editorial team of issues:
Coordinator of magazine projects *I.S. Skovorodina*
Managing editor *L.A. Shitova*
Editor *A.V. Saharova*
Corrector *A.A. Dyadicheva*
Layout *A.P. Silvanovich*
Russian-English translation
A.V. Saharova, A.P. Suvorov

Reprint or reproduction of material numbers by any means in whole or in part is permitted only with prior written permission of the publisher — MGSU.
Distributed by subscription

Вестник МГСУ Том 13 Выпуск 3 (114)

УДК 625.73+625.85 DOI: 10.22227/1997-0935.2018.3.356-367

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО СРОКА СЛУЖБЫ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ

А.М. Кириллов, М.А. Завьялов[1]
Автомобильно-дорожный колледж, 354051, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Чекменева, д. 5;
[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ им. М.В. Ломоносова), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 51

Предмет исследования: методы прогнозирования остаточного срока службы асфальтобетонных покрытий, требующие разработки модели функционального состояния покрытия и установления пороговых значений критериальных показателей для каждого уровня деградации покрытия.
Цель: обоснование способа определения остаточного срока службы асфальтобетонных покрытий, базирующегося на показателях однородности их удельной теплоемкости.
Материалы и методы: показана возможность использования в качестве критерия состояния асфальтобетонного покрытия однородности удельной теплоемкости покрытия и введен критериальный параметр — индекс теплофизической однородности.
Результаты: обоснована возможность использования аппроксимирующей функции, описывающей временную эволюцию индекса теплофизической однородности, для оценки текущего состояния асфальтобетонного дорожного покрытия и прогноза его дальнейшего развития; получены расчетные формулы для определения остаточного срока службы покрытия.
Выводы: предложены способы определения остаточного срока службы асфальтобетонных покрытий, способствующие принятию решений в отношении стратегий реконструкции-ремонта дорог, что позволит эффективно использовать существующие ресурсы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожное покрытие, асфальтобетон, межремонтный срок службы, мониторинг функционального состояния, термодинамические характеристики

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кириллов А.М., Завьялов М.А. Прогнозирование остаточного срока службы асфальтобетонных покрытий // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 3 (114). С. 356–367.

PREDICTION OF REMAINING SERVICE LIFE OF ASPHALT PAVEMENTS

A.M. Kirillov, M.A. Zavyalov[1]
Automotive Road College, 5 Chekmeneva st., Sochi, Krasnodar region, 354051, Russian Federation;
[1]Lomonosov Moscow State University, bldg. 51, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

Subject: methods for predicting the remaining service life of asphalt pavements based on development of pavement's functional state model and established threshold values of benchmark parameters for each level of pavement degradation.
Research objectives: substantiate the method for predicting the remaining service life of asphalt pavements based on the uniformity of their specific heat values.
Materials and methods: the application of the uniformity of the specific heat values of pavement and the index of thermophysical uniformity as criterion parameters, was demonstrated.
Results: the use of approximating function describing the evolution of the index of thermophysical uniformity to assess the current condition of pavement and to predict its further deterioration is justified; calculation formulas were obtained to determine the remaining service life of pavements.
Conclusions: methods for determining the remaining service life of asphalt pavements are proposed. Knowledge of the remaining service life should facilitate strategic decision-making with regard to required road repair and maintenance, and thereby lead to a more efficient use of existing resources.

KEY WORDS: civil engineering, road construction, asphalt pavement, pavement evaluation, energy characteristics, thermodynamic framework

FOR CITATION: Kirillov A.M., Zavyalov M.A. Prognozirovanie ostatochnogo sroka sluzhby asfal'tobetonnykh pokrytiy [Prediction of remaining service life of asphalt-concrete pavements]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 3 (114), pp. 356–367.

 © А.М. Кириллов, М.А. Завьялов

ВВЕДЕНИЕ

Управление в широком смысле сегодня затрагивает все сферы человеческой жизнедеятельности, в том числе и эксплуатацию автомобильных дорог. Управление дорожным покрытием можно понимать как процесс, который помогает поддерживать дорожную сеть в безопасном и исправном состоянии экономически эффективным способом. Ключевым компонентом эффективной системы управления дорожным покрытием является возможность прогнозировать оставшийся срок службы покрытия, так как грамотное прогнозирование выступает отправной точной для эффективного управления.

Остаточный срок службы покрытия можно прогнозировать, основываясь на данных о состоянии покрытия и последних ремонтных мероприятиях, поскольку определяется количество лет, в течение которых покрытие будет функционально и структурно в приемлемом состоянии, при условии регулярного технического обслуживания. Остаточный срок службы также отражает и точность оценки степени различных разрушений и темпов ухудшения состояния дорожного покрытия. В связи с этим определение остаточного срока службы требует разработки модели функционального состояния покрытия и установления пороговых значений критериальных показателей для каждого уровня деградации покрытия. Тогда на основании текущего уровня разрушения и модели функционального состояния покрытия может быть вычислено время, необходимое для достижения порогового значения. Следует отметить, что вычисление остаточного срока является крайне многофакторной задачей.

Для разрешения диалектического противоречия между параметрами, состоянием системы и необходимостью разработки модели функционального состояния путем применения эвристических методов и математического моделирования в данной статье предлагается рассмотреть изменение функционального состояния покрытия через призму изменения его теплофизических свойств, анализируя такой критериальный параметр, как индекс теплофизической однородности.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Существующие методы оценки остаточного срока основываются на различных концепциях и колеблются от чисто эмпирических до общетеоретических подходов. Авторам представляется, что логичнее опираться на структурный и функциональный подходы в силу следующих обстоятельств: структурный подход основан на структурной стабильности дорожного покрытия, при этом для оценки остаточного срока используются принципы усталости, которые требуют знания эффективной толщины покрытия или модуля, полученного из измерений *in situ*. А при функциональном подходе остаточный срок службы рассчитывается исходя из таких характеристик покрытия, как удобство эксплуатации, ремонтопригодность и скорость движения, вычисляется показатель снижения производительности, который учитывает время эксплуатации и грузонапряженность в сочетании с критерием функционального отказа. И, таким образом, отказ покрытия можно квалифицировать как структурный или функциональный сбой.

Состояние покрытия — достаточно общий термин, описывающий способность покрытия поддерживать определенный уровень потребительских свойств при заданных условиях эксплуатации. В мировой практике состояние покрытия оценивают различными индексами состояния, такими как PCI, PCR, PSI, PSR, RN, PI, IRI и др. [1–4]. Все эти индексы можно разбить на две категории: основанные на оценке степени ровности покрытия и разрушении. В свою очередь, методы прогнозирования состояния дорожного покрытия в общем случае можно разделить на три категории в соответствии с форматом математического представления: детерминированные [5, 6], вероятностные [7] и комбинированные [8–16] (метод нейронной сети, марковские цепи, байесовская модель, кривые выживаемости). Детерминистическая регрессия, пожалуй, самая популярная математическая модель в исследованиях прогнозирования состояния дорожного покрытия, которая обычно выражается уравнением регрессии [2, 17, 18], при этом зависимая переменная является индексом состояния покрытия, а независимыми переменными выступают возраст, тип покрытия и другие параметры.

Несмотря на то, что линейный и нелинейный регрессионный анализ часто используется при разработке моделей детерминистического прогнозирования, он имеет ряд недостатков: невысокая точность прогноза (в основном — интерполяция данных); произвольный характер выбора вида конкретной зависимости (формальная подгонка модели под эмпирические данные); невозможность объяснения причинно-следственной связи между переменными.

В отличие от детерминированных моделей вероятностные модели с определенной вероятностью прогнозируют состояние дорожного покрытия. Результатом вероятностной модели обычно является распределение вероятности, а не фиксированное число. При построении вероятностной модели можно учитывать предыдущее состояние для прогнозирования текущего состояния покрытия. Таким образом, она имеет некоторые преимущества перед детерминированной моделью. Недостатком вероятностных моделей является сложность и трудоемкость их применения. Кроме того, необходимость принятия базового распределения является основным ограничением применения этих моделей,

поскольку форма данных может не описываться известным распределением.

На практике в настоящее время остаточный срок службы покрытия оценивают разными способами. Некоторые исследователи предлагают оценивать оставшийся срок службы дорожного покрытия, используя тест на усталость, другие — сопоставлять количество выбоин на единицу длины покрытия к оставшемуся числу нагружений колесом автомобиля (ESAL) [4]. Во второй половине прошлого века был предложен способ оценки остаточного срока службы по критерию упругого прогиба конструкции. Для этого рассчитывается значение текущего модуля упругости слоя дорожного покрытия как параметра состояния, а затем функциональное состояние покрытия сопоставляют с его структурным состоянием с помощью этого параметра.

С экономической точки зрения, знание остаточного срока службы способствует принятию решений в отношении стратегий реконструкции-ремонта дорог, что ведет к эффективному использованию существующих ресурсов. Следует отметить, что применение адекватных моделей прогнозирования остаточного срока службы может служить обоснованием для выделения средств и ресурсов на обслуживание и ремонт асфальтобетонных покрытий. Из приведенного выше повествования можно сделать вывод, что для вычисления остаточного срока службы дорожного покрытия необходимо знать его текущее состояние, параметры исправного состояния покрытия и механизм изменения его функционального состояния. В то же время отсутствие адекватных моделей функционального состояния покрытия будет являться основным препятствием в прогнозировании оставшегося времени жизни, необходимого для определения момента проведения ремонтных мероприятий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве критерия состояния строительного материала может служить пространственная однородность его некоторого выбранного свойства. Так как в качестве основного базового параметра в термодинамической теории дорожного асфальтобетонного покрытия служит удельная теплоемкость[19], то можно ввести такой критериальный параметр, как индекс теплофизической однородности (*ITU*), определяемый в виде

$$ITU = \frac{\Delta C_{\text{in}}}{\Delta C_{\text{cu}}}, \qquad (1)$$

где ΔC_{in}, ΔC_{cu} — начальное и текущее распределение теплоемкости соответственно.

Распределение теплоемкости, согласно центральной предельной теореме А.М. Ляпунова, ожидаемо подчиняется нормальному закону (рис. 1). Данная зависимость отражает характер отклонения теплоемкости покрытия относительно нормативного значения, соответствующего центру кривой. Для функции распределения это нормативное значение соответствует математическому ожиданию значения теплоемкости. На рис. 1 показано, что в процессе эксплуатации происходит «расплывание» зависимости. Динамика развития процесса такой трансформации отражена на рис. 2. Так если в начальный период эксплуатации (см. рис. 1, кривая 1) отклонения от нормативного значения невелики, то спустя некоторое время после начала эксплуатации отклонения от нормы становятся более существенными (см. рис. 1, кривая 2). Величины ΔC_{in} и ΔC_{cu} определяют ширину распределения на одинаковом уровне относительно максимума (на рисунке это уровень 0,7). Здесь индексы in (initial) и cu (current) означают начальное и текущее распределение теплоемкости. Свойства нормального распределения таковы, что отношение *ITU* имеет одинаковое значение по каждому уровню (т.е. не обязательно рассматривать определенный уровень, например, равный 0,7), а также

$$\frac{\Delta C_{\text{in}}}{\Delta C_{\text{cu}}} = \frac{f_{\text{cu}}^{\max}}{f_{\text{in}}^{\max}}, \qquad (2)$$

где $f_{\text{in}}^{\max}$, $f_{\text{cu}}^{\max}$ — максимальные значения плотности распределения теплоемкости в начальный и текущий моменты времени, соответственно.

При экспериментальных исследованиях график, представленный на рис. 1, заменяется гистограммой относительных частот распределения теплоемкости на частичных интервалах (рис. 3). Эта гистограмма подтверждает «нормальность» распределения теплоемкости и справедливость дальнейших выкладок и рассуждений.

Кроме того, свойства нормального распределения позволяют получить более удобное выражение для практического использования:

$$ITU = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(C_{\text{in}} - \left(C_{\text{in}}\right)_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(C_{\text{cu}} - \left(C_{\text{cu}}\right)_i\right)^2}}. \qquad (3)$$

Введенная величина положительна и не превосходит единицу. В начальный момент времени ($t = 0$) $\Delta C_{\text{in}} = \Delta C_{\text{cu}}$ и, следовательно, $ITU = 1$.

Практика показывает, что чем выше качество строительства дорожного асфальтобетонного покрытия и однородность его физико-механических параметров, тем выше и теплофизическая однородность, т.е. $ITU \to 1$. По мере старения и деградации покрытия индекс *ITU* снижается. В результате обработки и анализа результатов экспериментальных исследований установлено, что изменение *ITU* в течение времени можно адекватно аппроксимировать следующей функцией [20]:

$$ITU = e^{-at^2}, \qquad (4)$$

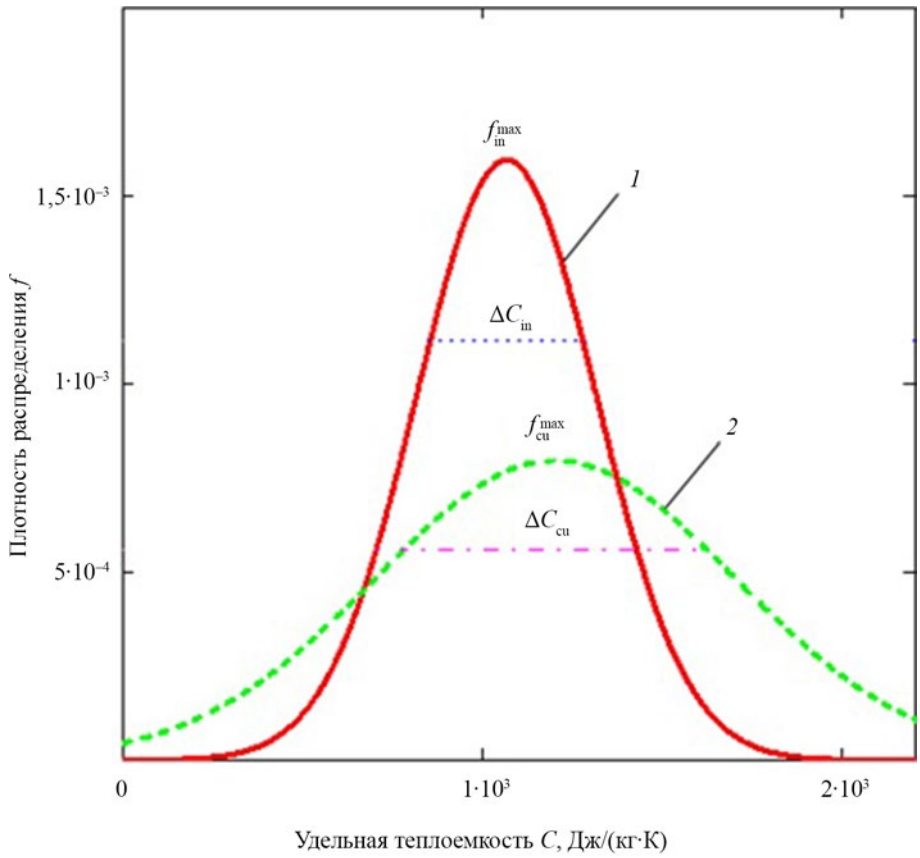

Рис. 1. Распределения удельной теплоемкости покрытия: *1* — в начальный период эксплуатации; *2* — в текущий

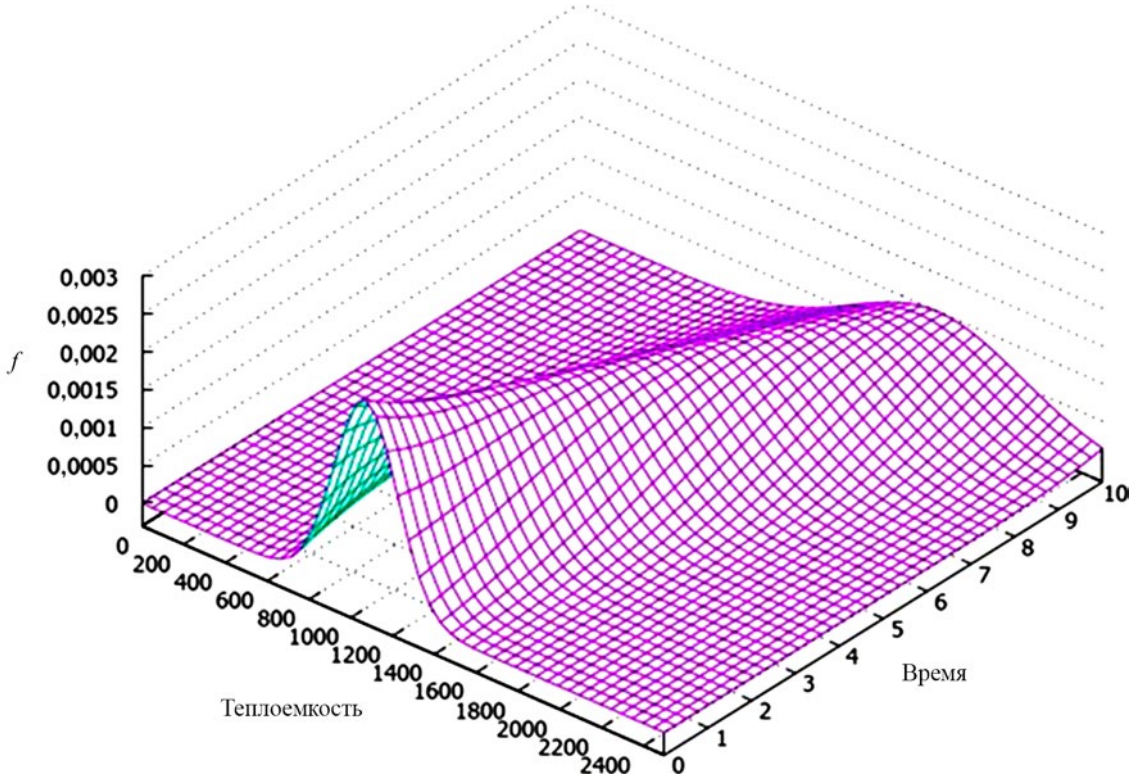

Рис. 2. Зависимость плотности вероятности распределения удельной теплоемкости от времени

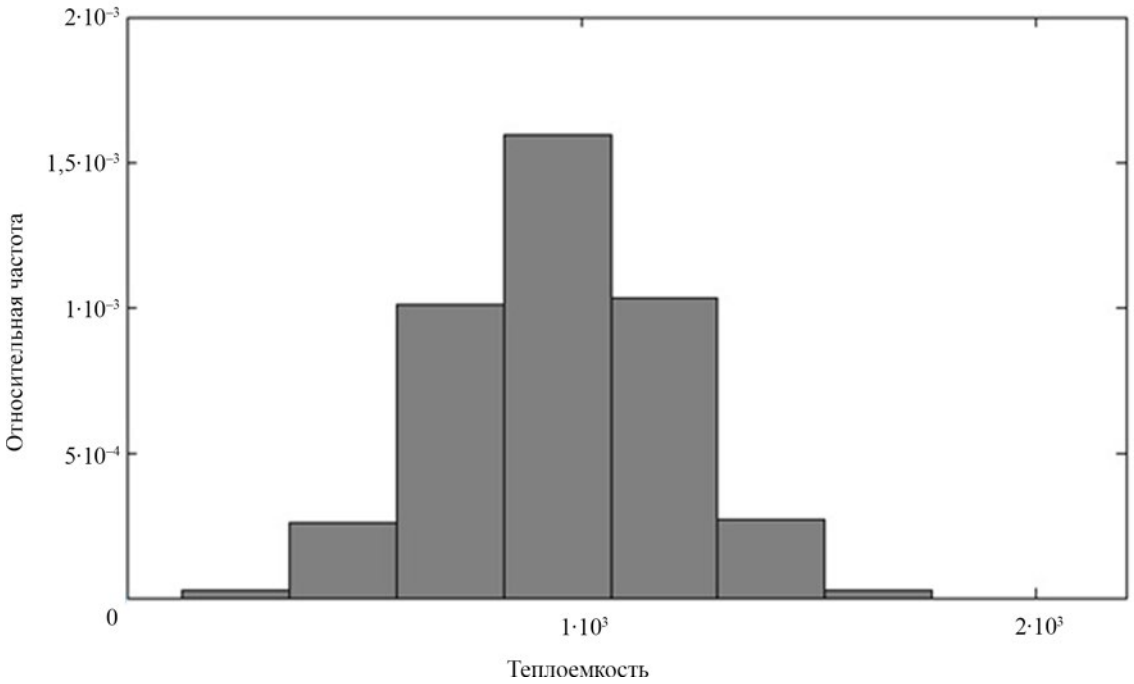

Рис. 3. Гистограмма относительных частот распределения теплоемкости на частичных интервалах

где a — параметр, зависящий от типа и вида асфальтобетона и условий эксплуатации покрытия, $0 < a < 1$; t — время в годах. Как будет показано ниже, коэффициент a вполне может быть назван коэффициентом качества покрытия.

Также можно представить зависимость ITU от времени в виде

$$ITU = e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2}, \qquad (5)$$

где τ — постоянная времени (время за, которое ITU уменьшается в e раз). Тогда параметр a выразим в виде

$$a = \frac{1}{\tau^2}. \qquad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ зависимости (4) показывает, что резкое снижение индекса теплофизической однородности завершается с момента времени, являющегося точкой перегиба графика функции (рис. 4). После точки перегиба скорость уменьшения индекса ITU падает. Этот момент времени и целесообразно принять за время начала ремонтных работ. Это время, из условия равенства нулю второй производной ITU, определится как

$$t_r = \sqrt{\frac{1}{2a}}. \qquad (7)$$

Кроме того, поскольку $\ln(ITU) = -at_2$, то, используя график на рис. 5, можно определить значение a как отношение приращений значений $\ln(ITU)$ и t_2:

$$a = \frac{\ln ITU_1 - \ln ITU_2}{t_2^2 - t_1^2} = \frac{\ln\left(\frac{ITU_1}{ITU_2}\right)}{t_2^2 - t_1^2}, \qquad (8)$$

где ITU_1, и ITU_2 — значения теплофизической однородности в моменты времени t_1 и t_2 соответственно.

Для определения времени ремонта по формуле (7) необходимо знать значение параметра a, который можно определить на любом этапе эксплуатации покрытия, используя равенство правых частей формул (3) и (4).

Следует также отметить, что рис. 4 позволяет наглядно продемонстрировать озвученные выше тезисы о том, что: 1) чем выше качество строительства, тем ближе индекс теплофизической однородности к единице (зависимость на рис. 1 в этом случае будет более «острая»); 2) индекс теплофизической однородности с течением времени эксплуатации стремится к нулю.

Еще один вариант определения времени ремонта — это задаться граничным значением ITU, например $ITU = 0{,}5$. Тогда из выражения (4) следует

$$t_r = \sqrt{\frac{\ln 2}{a}}. \qquad (9)$$

Или в качестве времени ремонта можно задать значение промежутка времени, в течение которого ITU уменьшается e раз:

$$t_r = \sqrt{\frac{1}{a}}. \qquad (10)$$

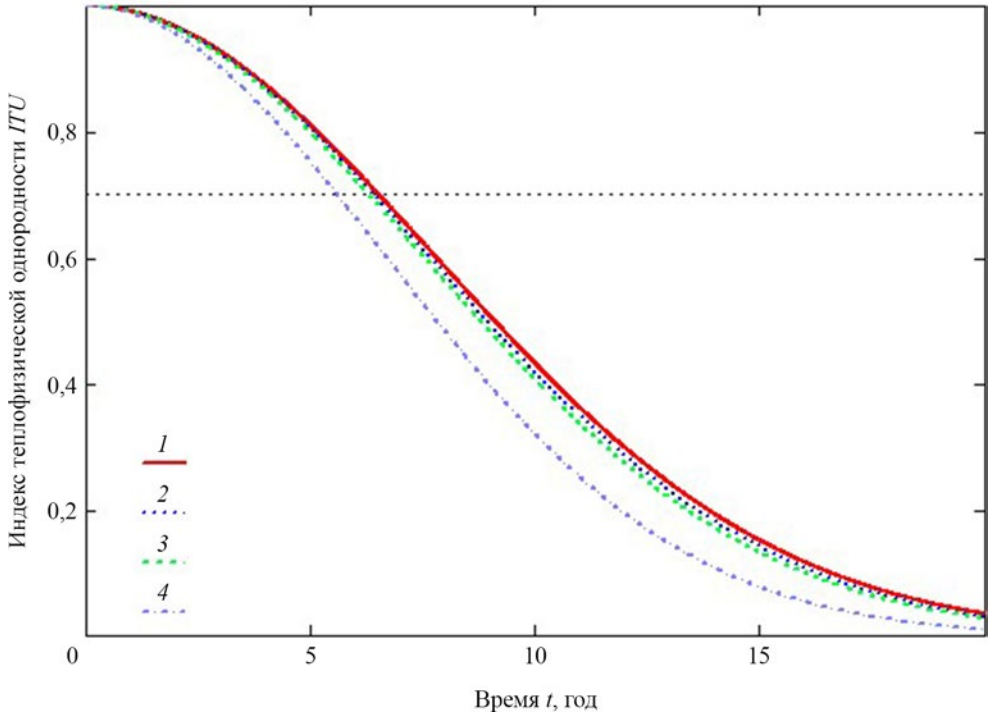

Рис. 4. Характер изменения индекса теплофизической однородности во времени: линии *1*, *2*, *3*, *4* построены для значений *a*, равных 0,0084; 0,0087; 0,0090; 0,0114, соответственно

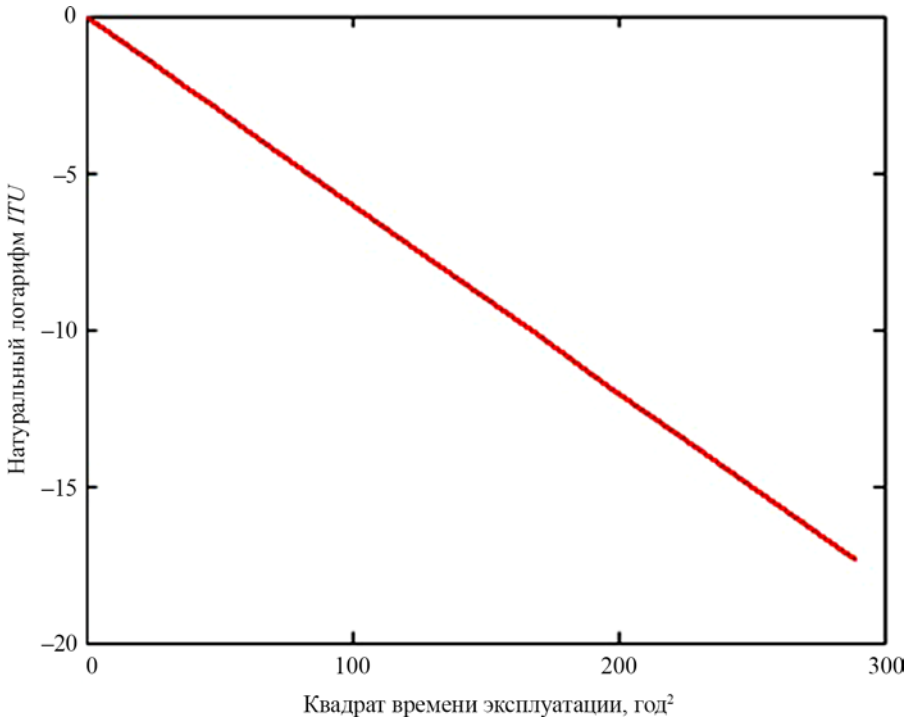

Рис. 5. Зависимость натурального логарифма индекса теплофизической однородности от квадрата времени эксплуатации покрытия

При a = 0,04 по формуле (7) $t_r = 3,5$ года, по формуле (9) $t_r = 4,2$ года и, наконец, по формуле (10) $t_r = 5$ лет.

В статье [21] также предложены два альтернативных метода оценки срока службы покрытия. Удобство первого метода заключается в том, что не требуется громоздкой статистической обработки. Необходимо определить наиболее вероятное значение теплоемкости (значение на которое приходится максимум плотности вероятности), а также начальные значения молярных масс вяжущей и минеральной составляющих асфальтобетонной смеси. Второй метод требует «растянутых» во времени измерений теплоемкости для определения коэффициентов в аппроксимированной зависимости [19]

$$C(t) = k(t - t_0)^2 + C_0, \qquad (11)$$

где k — коэффициент пропорциональности, определяющий быстроту возрастания скорости изменения теплоемкости; t_0 — момент времени начала возрастания теплоемкости; C_0 — значение теплоемкости в момент времени (минимальное значение теплоемкости).

Если задаться некоторым критическим значением возрастания удельной теплоемкости, то из (11) можно получить формулу для расчета «критического» времени:

$$t_{\text{cr}} = \left(\sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta C}{C_0}\right)\Delta C_0}{k}} + t_0 \right). \qquad (12)$$

Например, если допустить возрастание теплоемкости на 100 %, (т.е. $\frac{\Delta C}{C_0} = 1$), то получим

$$t_{\text{cr}} = \left(\sqrt{\frac{C_0}{k}} + t_0 \right). \qquad (13)$$

После определения «критического» времени, можно задаться временным порогом начала ремонтных работ. Если выбрать $t_r = 0,5 t_{\text{ñr}}$, то расчетная формула для определения времени ремонта будет иметь вид

$$t_r = 0,5\left(\sqrt{\frac{C_0}{k}} + t_0 \right). \qquad (14)$$

Полученное выражение (14), можно использовать для расчета параметра a. Например, по пороговому уровню ITU = 0,7:

$$a = -\frac{ln 0,7}{t_r^2}. \qquad (15)$$

Результаты расчетов времени ремонта и параметра a для различных категорий дорог с использование данных по теплоемкости из работы [19] приведем в табл. 1.

Анализируя графическое представление кривых изменения индекса состояния покрытия от времени, полученных в результате применения различных моделей прогнозирования [18], можно сделать вывод, что если значение индекса PCI (Pavement Condition Index) определяется на уровне 55 (состояние покрытия между «fair» и «poor», в соответствии со стандартом ASTM D 6433–07[1]), мы получаем возраст покрытия равный 6,5–7 годам. Согласно типичной стратегии технического обслуживания и ремонта (Maintenance and Rehabilitation strategy) асфальтобетонное покрытие с индексом состояния PCI равным 55 и ниже нуждается в ремонтных мероприятиях. Сравнение рассчитанных сроков службы дорожного покрытия с уровнем ремонтопригодности и определением требуемых ремонтных мероприятий может являться перспективным направлением дальнейших исследований.

Учитывая корреляцию между значением PCI и остаточным сроком службы асфальтобетонных покрытий [22], мы рассчитываем приблизительно 4,5 года остаточного полезного срока службы для дорожного покрытия с индексом PCI, равным 90. Таким образом, для новых покрытий с возрастом от 1 до 1,5 лет мы также получаем значения общего (суммарного) возраста, довольно близкие к значениям, приведенным в таблице.

Анализ изменения значений индекса PSI (Present Serviceability Index) как функции от времени [23] также позволяет определить приблизительно 6–7-летние циклы межремонтного срока службы.

Рассматривая возможный сценарий жизненного цикла дорожного покрытия, при котором с каждым новым ремонтом увеличивается коэффициент

[1] ASTM D 6433-07. Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys.

Табл. 1. Результаты расчетов времени ремонта t_r и параметра a для различных категорий дорог

Параметр	Тип асфальтобетона (категория дороги) / удельная теплоемкость, Дж/(кг · К)			
	Крупнозернистый пористый асфальтобетон марки II (I-Б) / $C_1 = 7,82(t - 0,9)^2 + 1065$	Мелкозернистый плотный асфальтобетон типа А, марки I (I-Б) / $C_2 = 7,91(t - 1,35)^2 + 1033$	Мелкозернистый плотный асфальтобетон типа Б, марки I (I-А) / $C_3 = 9,8(t - 1,25)^2 + 965$	Мелкозернистый плотный асфальтобетон типа Б, марки I (II) / $C = 7,02(t - 1,2) + 1000$
t_r	6,3	6,4	5,6	6,5
a	0,0090	0,0087	0,0114	0,0084

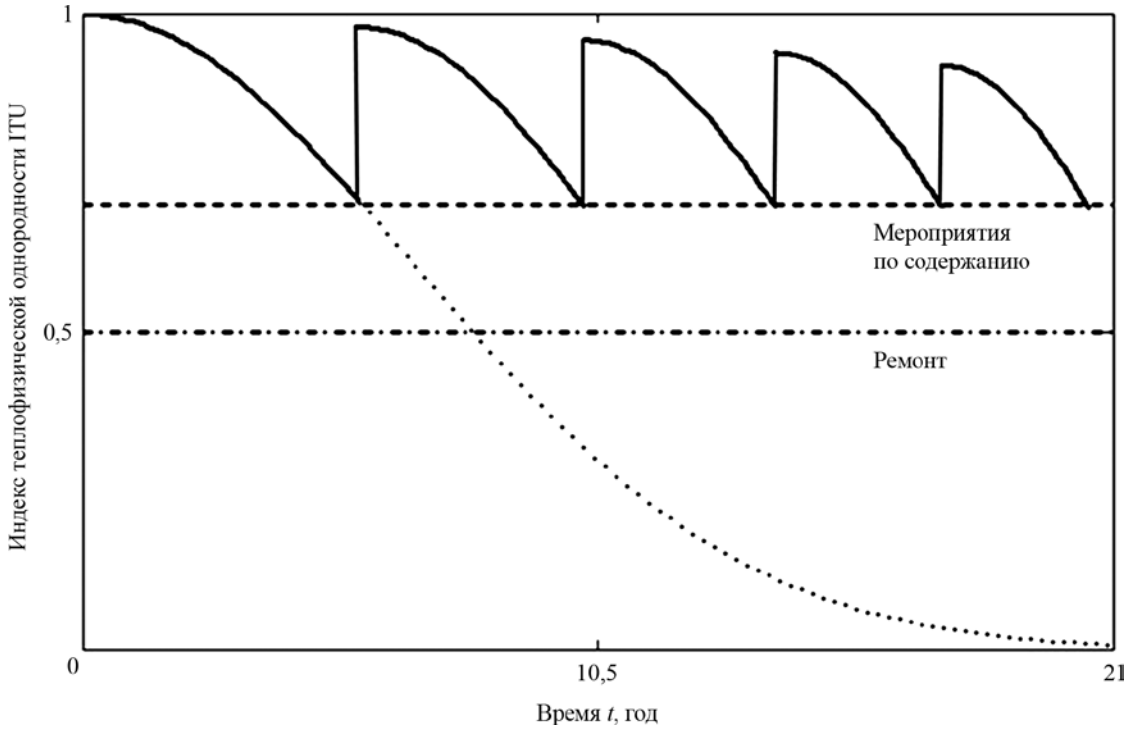

Рис. 6. Зависимость критериального параметра — индекса теплофизической однородности от времени на последующих межремонтных сроках службы дорожного покрытия

a, что в графической интерпретации выражается в уменьшающихся по ширине и высоте зубчиках (рис. 6), можно заключить, что с каждым новым ремонтом понижаются эксплуатационные параметры (высота зубчиков) и уменьшается межремонтный срок (ширина зубчиков). Схематически это можно изобразить на рис. 7.

Также на рис. 6 и 7 изображены условные пороговые уровни, соответствующие значениям показателей, когда необходимо проводить профилактические операции по ремонту и содержанию и мероприятия ремонта.

Рассматриваемый сценарий согласуется с результатами работы [24]. Несмотря на то, что общая продолжительность жизни покрытия была увеличена в результате осуществления каждого мероприятия по ремонту и содержанию, темп ухудшения функционального состояния покрытия ускорился со временем.

Графически характер изменения эксплуатационных параметров покрытия (см. рис. 6 и 7) аналогичен характеру изменения функции свободной энергии (энергии Гельмгольца) от времени [21], которая отражает компенсационную роль в различных деформационных процессах при эксплуатации дорожного покрытия.

Рис. 8 демонстрирует зависимость производной ITU по времени. Физический смысл данной зависимости заключается в том, что она характеризует скорость уменьшения ITU со временем. Анализ графика функции позволяет сделать вывод, что после каждого очередного ремонта скорость уменьшения ITU и, соответственно, скорость деградации дорожного покрытия, возрастает (см. наклон кривых на рис. 8).

ВЫВОДЫ

1. Показана возможность использования в качестве критерия состояния асфальтобетонного покрытия однородности некоторого выбранного физического свойства. В качестве примера рассмотрена однородность удельной теплоемкости покрытия и введен критериальный параметр — индекс теплофизической однородности (*ITU*).

2. Предложена аппроксимирующая функция (4), описывающая временную эволюцию индекса теплофизической однородности. Функция содержит в себе коэффициент *a*, зависящий от типа и вида асфальтобетона и условий эксплуатации покрытия. Так как данный коэффициент определяет скорость деградации покрытия, то с этой точки зрения он может быть назван коэффициентом качества покрытия.

3. Предложены способы определения остаточного срока службы асфальтобетонного покрытия.

Суть первого способа заключается в следующем: вначале (например, по формуле (3)) определяется индекс теплофизической однородности, затем с помощью выражений (4) – (6) определяется коэффициент качества покрытия *a*. После этого, задавшись каким-либо пороговым значением *ITU*, можно

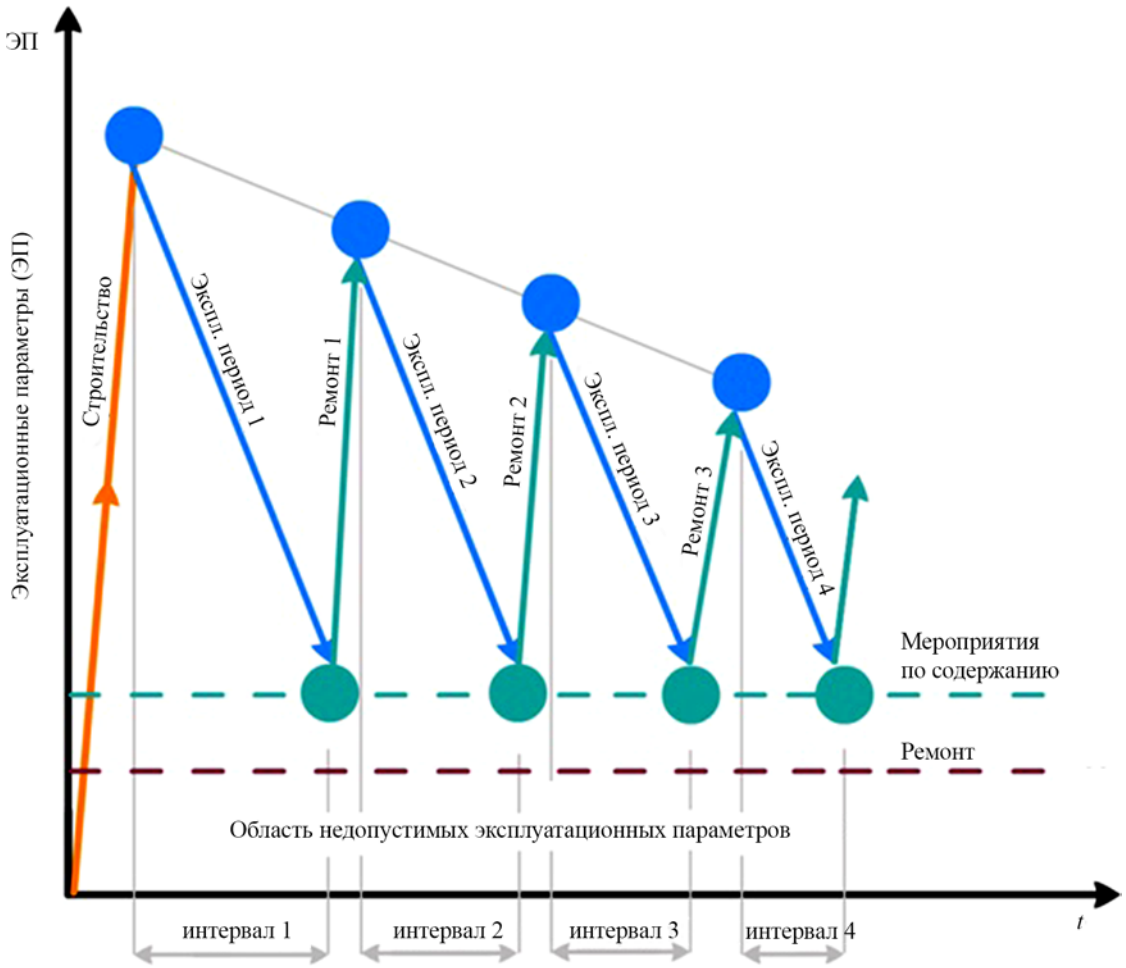

Рис. 7. Схема жизненного цикла дорожного покрытия

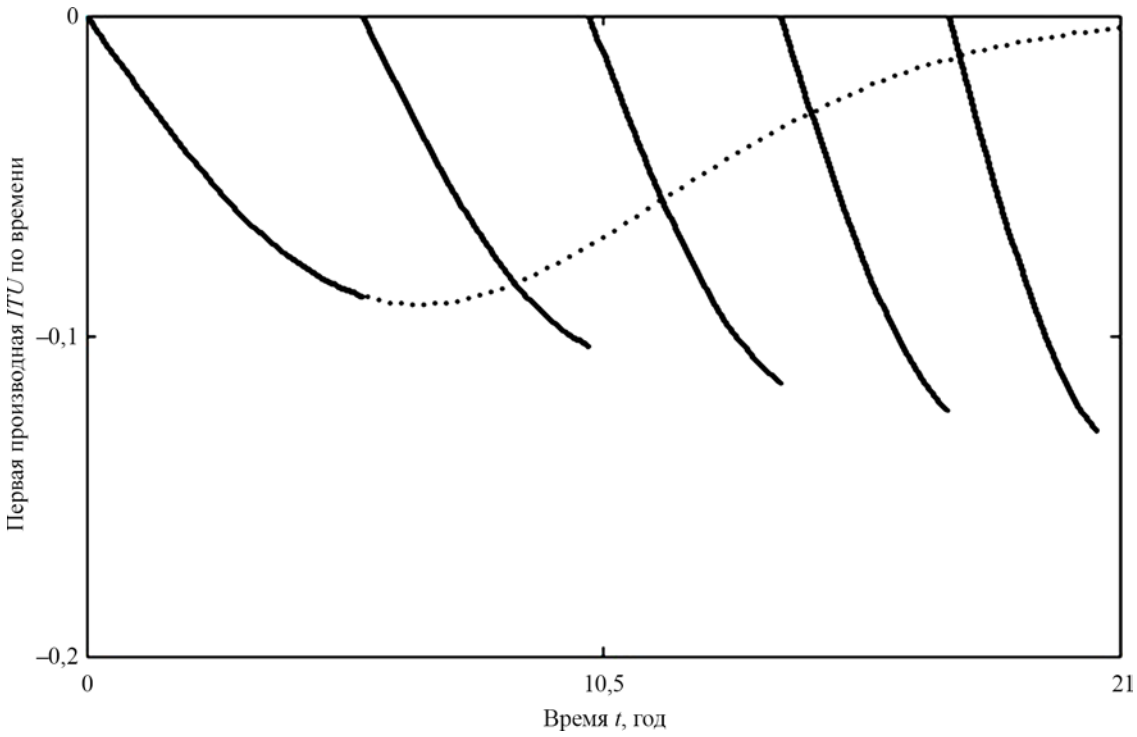

Рис. 8. Скорость изменения ITU от времени на последующих межремонтных сроках службы дорожного покрытия

получить расчетные формулы (например, (7), (9), (10)) для определения времени ремонта покрытия.

Второй способ заключается в том, что для расчета времени ремонта используется выражение (11), аппроксимирующее зависимость удельной теплоемкости от времени. Также данное выражение можно использовать для расчета коэффициента качества покрытия *a*. В итоге для определения остаточного срока службы покрытия получены выражения (14) и (15).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ziari H., Sobhani J., Hartmann T., Ayoubinejad J.* Prediction of IRI in short and long terms for flexible pavements: ANN and GMDH methods // International Journal of Pavement Engineering. 2016. Vol. 17. No. 9. Pp. 776–788.

2. *Luo Z.* Pavement performance modelling with an auto-regression approach // International Journal of Pavement Engineering. 2013. Vol. 14. No. 1. Pp. 85–94.

3. *Sarwar M.T., Anastasopoulos P.C.* The effect of long term non-invasive pavement deterioration on accident injury-severity rates: A seemingly unrelated and multivariate equations approach // Analytic Methods in Accident Research. 2017. Vol. 13. Pp. 1–15.

4. *Yu J.* Pavement service life estimation and condition prediction: thesis of doctor of Philosophy in Engineering. University of Toledo, 2005. 113 p.

5. *Abaza K.A.* Deterministic performance prediction model for rehabilitation and management of flexible pavement // International Journal of Pavement Engineering. 2004. Vol. 5. No. 2. Pp. 111–121.

6. Amin M.S.R. The pavement performance modeling: deterministic vs. stochastic approaches // Numerical methods for reliability and safety assessment / S. Kadry and A. El Hami eds. Springer International Publishing, 2015. Pp. 179–196.

7. *Lytton R.L.* Concepts of pavement performance prediction and modeling // Proceedings of the 2nd North American Conference on managing pavements. 1987. Vol. 2. Pp. 4–19.

8. *Suman S.K., Sinha S.* Pavement Performance Modelling Using Markov Chain // Proceedings of the International Symposium on Engineering under Uncertainty: Safety Assessment and Management (ISEUSAM-2012). Springer India, 2013. Pp. 619–627.

9. *Kobayashi K., Kaito K., Lethanh N.* A statistical deterioration forecasting method using hidden Markov model for infrastructure management // Transportation Research Part B. 2012. Vol. 46. No. 4. Pp. 544–561.

10. *Butt A.A., Shahin M.Y., Feighan K.J., Carpenter S.H.* Pavement performance prediction model using the Markov process // Transportation Research Record. 1987. No. 1123. Pp. 12–19.

11. *Lethanh N., Adey B.T.* Use of exponential hidden Markov models for modelling pavement deterioration // International Journal of Pavement Engineering. 2013. Vol. 14. No. 7. Pp. 645–654.

12. *Jha M.K., Abdullah J.A.* Markovian approach for optimizing highway life-cycle with genetic algorithms by considering maintenance of roadside appurtenances // Journal of the Franklin Institute. 2006. Vol. 343. No. 4. Pp. 404–419.

13. *Abaza K.A.* Empirical Markovian-based models for rehabilitated pavement performance used in a life cycle analysis approach // Structure and Infrastructure Engineering. 2017. Vol. 13. No. 5. Pp. 625–636.

14. *Liu L., Gharaibeh N.* Bayesian model for predicting the performance of pavements treated with thin hot-mix asphalt overlays // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2014. No. 2431. Pp. 33–41.

15. *Amador-Jimenez L.E., Mrawira D.* Reliability-based initial pavement performance deterioration modelling // International Journal of Pavement Engineering. 2011. Vol. 12. No. 02. Pp. 177–186.

16. *Vepa T.S., George K.P., Raja Shekharan A.* Prediction of pavement remaining life // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 1996. No. 1524. Pp. 137–144.

17. *Prozzi J.A., Madanat S.M.* Incremental nonlinear model for predicting pavement serviceability // Journal of transportation Engineering. 2003. Vol. 129. No. 6. Pp. 635–641.

18. *Kırbaş U., Karaşahin M.* Performance models for hot mix asphalt pavements in urban roads // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 116. Pp. 281–288.

19. *Завьялов М.А., Завьялов А.М.* Теплоемкость асфальтобетона // Строительные материалы. 2009. № 7. С. 6–9.

20. *Завьялов М.А., Завьялов А.М.* Аналитические методы определения сроков ремонтных работ дорожного асфальтобетонного покрытия // Наука и техника в дорожной отрасли. 2012. № 3. С. 35–38.

21. *Zavyalov M.A., Kirillov A.M.* Evaluation methods of asphalt pavement service life // Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 2. Pp. 42–56.

22. *Setyawan A., Nainggolan J., Budiarto A.* Predicting the remaining service life of road using pavement condition index // Procedia Engineering. 2015. Vol. 125. Pp. 417–423.

23. *Jorge D., Ferreira A.* Road network pavement maintenance optimisation using the HDM-4 pavement performance prediction models // International Journal of Pavement Engineering. 2012. Vol. 13. No. 1. Pp. 39–51.

24. *Khattak M.J., Landry C., Veazey J., Zhongjie Zhang* Rigid and composite pavement index-based performance models for network pavement management system in the state of Louisiana // International Journal of Pavement Engineering. 2013. Vol. 14. No. 7. Pp. 612–628.

Поступила в редакцию 1 декабря 2017 г.
Принята в доработанном виде 26 февраля 2018 г.
Одобрена для публикации 28 февраля 2018 г.

Об авторах: **Кириллов Андрей Михайлович** — кандидат физико-математических наук, преподаватель, **Автомобильно-дорожный колледж**, 354051, Краснодарский кр., г. Сочи, ул. Чекменева, д. 5; kirill806@gmail.com;

Завьялов Михаил Александрович — доктор технических наук, доцент, доцент факультета глобальных процессов, **Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ им. М.В. Ломоносова)**, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 51; zavyalov.m.a@gmail.com.

REFERENCES

1. Ziari H., Sobhani J., Hartmann T., Ayoubinejad J. Prediction of IRI in short and long terms for flexible pavements: ANN and GMDH methods. *International Journal of Pavement Engineering*. 2016, vol. 17, no. 9, pp. 776–788.

2. Luo Z. Pavement performance modelling with an auto-regression approach. *International Journal of Pavement Engineerin*g. 2013, vol. 14, no. 1, pp. 85–94.

3. Sarwar M.T., Anastasopoulos P.C. The effect of long term non-invasive pavement deterio-ration on accident injury-severity rates: A seemingly unrelated and multivariate equations approach. *Analytic Methods in Accident Research*. 2017, vol. 13, pp. 1–15.

4. Yu J. *Pavement service life estimation and condition prediction: thesis of doctor of Philosophy in Engineering*. University of Toledo, 2005. 113 p.

5. Abaza K.A. Deterministic performance prediction model for rehabilitation and management of flexible pavement. *International Journal of Pavement Engineerin*g. 2004, vol. 5, no. 2, pp. 111–121.

6. Amin M.S.R. The pavement performance modeling: deterministic vs. stochastic approaches. *Numerical methods for reliability and safety assessment*. Springer International Publishing, 2015, pp. 179–196.

7. Lytton R.L. Concepts of pavement performance prediction and modeling. *Proceedings of the 2nd North American Conference on managing pavements*. 1987, vol. 2, pp. 4–19.

8. Suman S.K., Sinha S. Pavement Performance Modelling Using Markov Chain. *Proceedings of the International Symposium on Engineering under Uncertainty: Safety Assessment and Management (ISEUSAM-2012).* Springer India, 2013, pp. 619–627.

9. Kobayashi K., Kaito K., Lethanh N. A statistical deterioration forecasting method using hid-den Markov model for infrastructure management. *Transportation Research Part B*. 2012, vol. 46, no. 4, pp. 544–561.

10. Butt A.A., Shahin M.Y., Feighan K.J., Carpenter S.H. Pavement performance prediction model using the Markov process. *Transportation Research Record*. 1987, no. 1123, pp. 12–19.

11. Lethanh N., Adey B.T. Use of exponential hidden Markov models for modelling pavement deterioration. *International Journal of Pavement Engineering*. 2013, vol. 14, no. 7, pp. 645–654.

12. Jha M.K., Abdullah J.A. Markovian approach for optimizing highway life-cycle with genetic algorithms by considering maintenance of roadside appurtenances. *Journal of the Franklin Institute*. 2006, vol. 343, no. 4, pp. 404–419.

13. Abaza K.A. Empirical Markovian-based models for rehabilitated pavement performance used in a life cycle analysis approach. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2017, vol. 13, no. 5, pp. 625–636.

14. Liu L., Gharaibeh N. Bayesian model for predicting the performance of pavements treated with thin hot-mix asphalt overlays. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2014, no. 2431, pp. 33–41.

15. Amador-Jimenez L.E., Mrawira D. Reliability-based initial pavement performance deterioration modelling. *International Journal of Pavement Engineering*. 2011, vol. 12, no. 02, pp. 177–186.

16. Vepa T.S., George K.P., Raja Shekharan A. Prediction of pavement remaining life. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* 1996, no. 1524, pp. 137–144.

17. Prozzi J.A., Madanat S.M. Incremental nonlinear model for predicting pavement serviceability. Journal of Transportation Engineering. 2003, vol. 129, no. 6, pp. 635–641.

18. Kırbaş U., Karaşahin M. Performance models for hot mix asphalt pavements in urban roads. *Construction and Building Materials.* 2016, vol. 116, pp. 281–288.

19. Zavyalov M.A., Zavyalov A.M. Teploemkost' asfal'tobetona [Heat capacity of asphalt concrete]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2009, no 7, pp. 6–9. (In Russian)

20. Zavyalov M.A., Zavyalov A.M. Analiticheskie metody opredeleniya srokov remontnykh rabot dorozhnogo asfal'tobetonnogo pokrytiya [Analytical methods for determining the timing of repair works of road asphalt concrete cover]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli* [Science and technology in the road industry]. 2012, no 3, pp. 35–38. (In Russian)

21. Zavyalov M.A., Kirillov A.M. Evaluation methods of asphalt pavement service life. *Magazine of Civil Engineering*. 2017, no. 2, pp. 42–56.

22. Setyawan A., Nainggolan J., Budiarto A. Predicting the remaining service life of road using pavement condition index. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 125, pp. 417–423.

23. Jorge D., Ferreira A. Road network pavement maintenance optimisation using the HDM-4 pavement performance prediction models. *International Journal of Pavement Engineering*. 2012, vol. 13, no. 1, pp. 39–51.

24. Khattak M.J., Landry C., Veazey J., Zhongjie Zhang. Rigid and composite pavement index-based performance models for network pavement management system in the state of Louisiana. *International Journal of Pavement Engineering*. 2013, vol. 14, no. 7, pp. 612–628.

Received on December 1, 2017.
Adopted in final form on February 26, 2018.
Approved for publication on February 28, 2018.

About the authors: **Kirillov Andrey Mikhailovich** — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lecturer, **Automotive-road college**, 5 Chekmeneva st., Sochi, 354051, Russian Federation, kirill806@gmail.com;

Zavyalov Mikhail Aleksandrovich — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Global Processes, **Lomonosov Moscow State University**, 1, bdg 51, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation; zavyalov.m.a@gmail.com.