

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал

Издается с января 2002 года
Периодичность издания –
один раз в два месяца

Учредитель
Белорусский
национальный технический
университет



Science and Technique

International
Scientific and Technical Journal

Published from January 2002
Publication frequency –
bimonthly

Founder
Belarusian
National Technical
University

Vol. 20 / No 6 / 2021

Журнал включен в базы данных:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

- Пантелеенко Ф. И., Карпец М. Н.,
Белоцерковский М. А., Сосновский А. В.**
Определение адгезионной и когезионной
прочности металлических покрытий,
нанесенных гиперзвуковой металлизацией 459
- Константинова А. А., Ивченко В. И.,
Бохонко В. В., Соловьев Н. В., Мойсей О. Н.**
Методические основы применения технологий
виртуальной реальности
в промышленном дизайне 465

Механика деформируемого твёрдого тела

- Степаненко Д. А., Бунчук К. А.**
Моделирование составных кольцевых
ультразвуковых волноводов
с помощью метода конечных элементов 476

CONTENTS

Mechanical Engineering and Engineering Science

- Panteleenko F. I., Karpets M. N.,
Belotserkovsky M. A., Sosnovsky A. V.**
Determination of Adhesive and Cohesive
Strength in Metal Coatings Deposited
by Hypersonic Metallization 459
- Konstantinova A. A., Ivchenko V. I.,
Bakhonka V. V., Salauyeu M. V., Maisei V. N.**
Methodological Basis
of Virtual Reality Technology
Application in Industrial Design 465

Deformation in Solid Mechanics

- Stepanenko D. A., Bunchuk K. A.**
Modelling of Ring-Shaped Compound
Ultrasonic Waveguides by Means
of Finite Elements Method 476

Приборостроение

- Иванов В. А., Красовский В. В.,
Гременок В. Ф., Постнова Л. И.**
Получение методом «горячей стенки»
тонких пленок $Pb_xSn_{1-x}Te$
для создания ИК-фотоприемников 482
- Раджабова М. А., Ешматова Б. И.,
Бабаназарова Н. К.**
Восстановление аппаратной функции
спектральных колориметров с помощью
методов регуляризации 487

Строительство

- Ковалев Я. Н., Яглов В. Н., Чистова Т. А.,
Гиринский В. В.**
Применение фосфогипса
в дорожном строительстве 493
- Goncharenko D. F., Aleinikova A. I., Yesakova S. V.,
Hudilin R. I.**
Development of Technological Solutions
for Sewer Rehabilitation Using Clinker Brick
(Гончаренко Д. Ф., Алейникова А. И.,
Есакова С. В., Гудилин Р. И.)
Разработка технологических решений
восстановления канализационного коллектора
с использованием клинкерного кирпича) 499

Транспорт

- Зедгенизов А. В., Капский Д. В., Лагерев Р. Ю.**
Оценка влияния объектов капитального
строительства на прилегающую
улично-дорожную сеть при организации
дорожного движения
средством регулируемых пересечений 506
- Доля В. К., Доля К. В., Доля Е. Е.**
Определение параметров функционирования
маршрутов пассажирского транспорта
средствами компьютерного моделирования
процессов 514
- Leontiev D. N., Ihnatenko A. V., Synkovska O. V.,
Ryzhikh L. A., Smirnova N. V., Aleksandrov Yu. V.,
Rudenko N. V.**
Fuel Consumption of Wheeled Vehicle
and Transportation Costs during Highway
Construction/Reconstruction
(Леонтьев Д. Н., Игнатенко А. В.,
Синьковская Е. В., Рыжих Л. А.,
Смирнова Н. В., Александров Ю. В.,
Руденко Н. В.)
Расход топлива колесного транспортного
средства и транспортные издержки
при строительстве/реконструкции
автомобильной дороги) 522
- Абрамова Л. С., Птица Г. Г., Капинус С. В.,
Харченко Т. В.**
Разработка моделей экспресс-анализа
безопасности дорожного движения 528

**ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ
В ЖУРНАЛЕ «НАУКА И ТЕХНИКА»
В 2021 г.**

- Тематический указатель 539

Instrumentation Engineering

- Ivanov V. A., Krasovskii V. V.,
Gremenok V. F., Postnova L. I.**
Production of Thin $Pb_xSn_{1-x}Te$ Films
by “Hot Wall” Method
for Creating IR-Photodetectors 482
- Radjabova M. A., Eshmatova B. I.,
Babanazarova N. K.**
Restoration of Hardware Function
of Spectral Colorimeters Using
Regularization Methods 487

Civil and Industrial Engineering

- Kovalev Ya. N., Yaglov V. N., Chistova T. A.,
Girinsky V. V.**
Application of Phosphogypsum
in Road Construction 493
- Goncharenko D. F., Aleinikova A. I., Yesakova S. V.,
Hudilin R. I.**
Development of Technological Solutions
for Sewer Rehabilitation Using Clinker Brick 499

Transport

- Zedgenizov A. V., Kapskiy D. V.,
Lagerev R. Yu.**
Estimation Impact of Capital Development
Projects on Adjacent Street and Road Network
in Organization of Traffic by Means
of Signal Controlled Intersections 506
- Dolia V. K., Dolia K. V., Dolia O. E.**
Determining Parameters of Functioning
of Passenger Transport Routes
by Means of Computer Simulation
of Processes 514
- Leontiev D. N., Ihnatenko A. V., Synkovska O. V.,
Ryzhikh L. A., Smirnova N. V., Aleksandrov Yu. V.,
Rudenko N. V.**
Fuel Consumption of Wheeled Vehicle
and Transportation Costs during Highway
Construction/Reconstruction 522

- Abramova L. S., Ptitsia H. H., Kapinus S. V.,
Kharchenko T. V.**
Development of Models for Express Analysis
of Road Safety 528

**LIST OF PAPERS PUBLISHED
IN “SCIENCE AND TECHNIQUE” JOURNAL
IN 2021**

- Thematic Index 539

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

- Алексеев Ю. Г.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Белый А. В.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Бисби Л.** (Эдинбургский университет, Эдинбург, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии),
- Виттманн Ф. Х.** (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Цюрих, Швейцарская Конфедерация),
- Дидерихс У.** (Ростокский университет, Росток, Федеративная Республика Германия),
- Дмитриев С. М.** (Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексева, Нижний Новгород, Российская Федерация),
- Згуровский М. З.** (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина),
- Кондерс А. Б.** (Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Федеративная Республика Германия),
- Косёр-Казберук М.** (Белостокский технический университет, Белосток, Республика Польша),
- Леонович С. Н.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Лю Тингуо** (компания «Гаююань», провинция Хэнань, Китайская Народная Республика),
- Макнами Р. Я.** (Консультационное агентство по вопросам пожарной безопасности, Стокгольм, Королевство Швеция),
- Максаров В. В.** (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
- Нгуен Тху Нга** (Научный энергетический институт, Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
- Одиназода Х. О.** (Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан),
- Опяляк М.** (Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша),
- Пенязьков О. Г.** (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

- Aliakseyeu Yu. G.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- Byeli A. V.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- Bisby L.** (University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland),
- Wittmann F. H.** (ETH – Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Zürich, Swiss Confederation),
- Diederichs U.** (University of Rostock, Rostock, Federal Republic of Germany),
- Dmitriev S. M.** (Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation),
- Zgurovsky M. Z.** (National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine),
- Koenders A. B.** (Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Federal Republic of Germany),
- Kosior-Kozberuk M.** (Bialystok University of Technology, Bialystok, Republic of Poland),
- Leonovich S. N.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- Liu Tingguo** (Gaoyuan Company, Henan Province, People’s Republic of China),
- McNamee R. J.** (Brandskyddslaget AB, Stockholm, Kingdom of Sweden),
- Maksarov V. V.** (Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation),
- Nguyen Thu Nga** (Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
- Odinazoda H. O.** (Tajik Technical University named after Academic M. S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan),
- Opielak M.** (Lublin University of Technology, Lublin, Republic of Poland),
- Penyazkov O. G.** (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

Пимьента П. (Научно-технический центр строительной отрасли, Сен-Мартен-д'Эр, Французская Республика),

Родригес Ж. П. К. (Коимбрский университет, Коимбра, Португальская Республика),

Романюк Ф. А. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),

Сидерис К. (Фракийский университет имени Демокрита, Комотини, Греческая Республика),

Соболев К. (Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, Соединенные Штаты Америки),

Сумров В. В. (компания «Интернет Коммуникация Девелопмент Групп Лимитед», Рига, Латвийская Республика),

Феличетти Р. (Миланский технический университет, Милан, Итальянская Республика),

Чжао Цзи (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),

Чижик С. А. (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Шелег В. К. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,

Ши Ли И (Научно-технологический парк Шанхайского университета, Шанхай, Китайская Народная Республика),

Эберхардштайнер Й. (Венский технический университет, Вена, Австрийская Республика),

Янковский А. (Технологический институт ВВС, Варшава, Республика Польша)

Ответственный секретарь редакционной коллегии
В. Г. Горбаш

Pimienta P. (Scientific and Technical Centre for the Building – CSTB Department, Saint-Martin-d'Hères, French Republic),

Rodrigues J. P. C. (University of Coimbra, Coimbra, Portuguese Republic),

Romaniuk F. A. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),

Sideris K. (Democritus University of Thrace, Komotini, Hellenic Republic),

Sobolev K. (University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, United States of America),

Sumrov V. V. (Internet Communication Development Group Ltd – ICD, Riga, Republic of Latvia),

Felicetti R. (Polytechnic University of Milan, Milan, Italian Republic),

Zhao Ji (Northeastern University, Shenyang, People's Republic of China),

Chizhik S. A. (National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

Sheleg V. K. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,

Shi Li Yi (Science and Technology Park of Shanghai University, Shanghai, People's Republic of China),

Eberhardsteiner J. (Vienna University of Technology, Vienna, Republic of Austria),

Jankowski A. (Air Force Institute of Technology, Warsaw, Republic of Poland)

Executive Secretary of Editorial Board
V. G. Gorbash

Ведущий стилистический редактор

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by
<http://sat.bntu.by>

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.
Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 30.11.2021. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 11,75. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2021

Leading Style Editor

V. N. Guryanchyk

Address

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by
<http://sat.bntu.by>

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-459-464>

УДК 621.793

Определение адгезионной и когезионной прочности металлических покрытий, нанесенных гиперзвуковой металлизацией

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾, асп. М. Н. Карпец²⁾,
докт. техн. наук, доц. М. А. Белоцерковский³⁾, канд. техн. наук А. В. Сосновский³⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾ОАО «Беларуськалий» (Солигорск, Республика Беларусь),

³⁾ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Известно, что в настоящее время для восстановления и упрочнения различных изношенных деталей машин широко применяются методы газотермического напыления. Как правило, металлические покрытия, нанесенные газотермическим напылением, обладают худшими прочностными характеристиками, чем сплошные материалы. Считается, что прочность покрытий пропорциональна их адгезионной и когезионной прочности. Величины последних зависят от различных факторов, связанных в том числе с природой материалов и технологией нанесения покрытий. Важным показателем, характеризующим возможность применения металлических покрытий в различных отраслях промышленности, является прочность сцепления (адгезия) покрытий с основным металлом. В статье представлено определение адгезионной и когезионной прочности покрытий из разных материалов, нанесенных методом гиперзвуковой металлизации. Приведены результаты испытаний прочности металлических покрытий из проволоки марки ER316LSi, нихрома (X20H80) и молибденовой проволоки. По результатам металлографических исследований определена доля участия когезионной и адгезионной составляющих в прочности покрытий, а также описаны некоторые особенности разрушения покрытий. Установлено, что участие когезионной и адгезионной составляющих в прочности покрытий отличается в зависимости от применяемого материала. В прочности покрытий из высоколегированной проволоки марки ER316LSi преобладает когезионная составляющая, при которой разрушение в основном происходит по границе покрытие – основа. Для покрытий из нихрома и особенно из молибдена преобладающей является когезионная составляющая прочности, при которой разрушение происходит не по границе покрытие – основа, а между слоями покрытия.

Ключевые слова: прочность покрытий, адгезия покрытий, испытание покрытий, гиперзвуковая металлизация, металлические покрытия

Для цитирования: Определение адгезионной и когезионной прочности металлических покрытий, нанесенных гиперзвуковой металлизацией / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 459–464. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-459-464>

Адрес для переписки

Пантелеенко Федор Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-99
panteleyenkof@tut.by

Address for correspondence

Panteleenko Fiodor I.
Belarusian National Technical University
24, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-99
panteleyenkof@tut.by

Determination of Adhesive and Cohesive Strength in Metal Coatings Deposited by Hypersonic Metallization

F. I. Panteleenko¹⁾, M. N. Karpets²⁾, M. A. Belotserkovsky³⁾, A. V. Sosnovsky³⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾JSC “Belaruskali” (Soligorsk, Republic of Belarus),

³⁾The State Scientific Institution “The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. It is known that at present, methods of thermal spraying are widely used to restore and strengthen various worn-out machine parts. As a rule, metal coatings applied by thermal spraying have lower strength characteristics than solid materials. It is believed that the strength of coatings is proportional to their adhesive and cohesive strength. The value of adhesive and cohesive strength depends on various factors, including the nature of the materials and the technology of coating. An important factor characterizing the possibility of using metal coatings in various industries is the strength of adhesion of coatings to the base metal. The paper presents the determination of the adhesive and cohesive strength of coatings from different materials, applied by the method of hypersonic metallization. The results of testing the strength of metal coatings made of ER316LSi-grade wire, nichrome (Cr20Ni80) and molybdenum wire are given in the paper. Based on the results of metallographic studies, the proportion of the participation of cohesive and adhesive components in the strength of coatings has been determined, and some features of coating destruction have been described. It has been found that the participation of the cohesive and adhesive components of the coating strength differs depending on the material used. The cohesive component prevails in the strength of coatings made of high-alloy wire of the ER316LSi-grade, at which destruction mainly occurs along the coating-base boundary. For nichrome coatings and especially for coatings made of molybdenum, the cohesive component is predominant, in which the destruction of the coating occurs not along the coating-base boundary, but between the coating layers.

Keywords: strength of coatings, coating adhesion, coating testing, hypersonic metallization, metal coatings

For citation: Panteleenko F. I., Karpets M. N., Belotserkovsky M. A., Sosnovsky A. V. (2021) Determination of Adhesive and Cohesive Strength in Metal Coatings Deposited by Hypersonic Metallization. *Science and Technique*. 20 (6), 459–464. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-459-464> (in Russian)

Введение

Известно, что прочность металлических покрытий пропорциональна их адгезионной и когезионной прочности. Величина адгезионной прочности зависит от механического, физического и химического взаимодействия между частицами и подложкой; когезионная – от взаимодействия частиц между собой, фазового и химического состава напыленного слоя, размера зерна напыленного слоя, пористости покрытия. Развитие механических связей между напыляемыми частицами и подложкой достигается повышением шероховатости последней. Для этого производится предварительная подготовка поверхности путем нарезания резьбы, струйно-абразивной и электроискровой обработки, химического травления и другими способами. Химическому взаимодействию способствует подготовка поверхности под напыление – активация поверхности, удаление оксидной пленки и создание наклепа. Теплопроводность покрытий ниже, чем у сплошного материала. За счет разницы коэффициентов теплопроводности температура контакта между слоями покрытия выше, чем между слоем по-

крытия и компактной основой. Более того, температура в покрытии при напылении без подогрева выше, чем контактная температура, необходимая для прочного соединения частиц с компактным материалом. Поэтому в большинстве случаев когезионная прочность покрытия больше адгезионной [1].

Разрушение покрытия может происходить, если внешние нагрузки или остаточные напряжения превысят его прочность. В случае превышения адгезионной прочности будет иметь место отслоение покрытия, когезионной – растрескивание или отделение слоев покрытия [1].

Цель исследований – определение адгезионной и когезионной составляющих прочности покрытий из разных материалов, нанесенных методом гиперзвуковой металлизации (ГМ).

Подготовка образцов

Для проведения исследований применялись штифтовые образцы из низкоуглеродистой стали марки Ст3, диаметр контактной поверхности штифта составлял 2,0–4,0 мм. В качестве материалов для нанесения покрытий использовали

сварочную проволоку марки ER316LSi диаметром 1,2 мм, проволоку марки X20H80 (нихром) диаметром 1,8 мм, молибденовую проволоку диаметром 1,6 мм, химический состав которых приведен в табл. 1.

Выбор метода ГМ обусловлен тем фактом, что данная технология позволяет наносить высокоплотные металлические покрытия, используя в качестве присадочного материала проволоочные электроды [2, 3], что значительно дешевле по сравнению с порошками. В процессе ГМ расплытие жидкого металла, образующегося в результате теплового воздействия электрической дуги на торцы двух проволоочных электродов, производится струей продуктов сгорания пропано-воздушной смеси. При этом скорость струи на выходе из сопла достигает 1500 м/с при температуре 2200 К, а скорость полета распыляемых частиц, формирующих покрытие, – около 500 м/с [4]. Нанесение покрытий на образцы выполнялось при режимах, указанных в табл. 2.

Для активации поверхности перед нанесением покрытий рабочая поверхность образцов подвергалась абразивно-струйной обработке смесью, состоящей из корунда (~50 %) и колотой дроби (~50 %), при рабочем давлении сжатого воздуха 0,6 МПа.

Проведение механических испытаний

Испытания прочности покрытий выполнялись по штифтовому методу на разрывной машине KASON WDW-50 (максимальная разрывная нагрузка 50 кН, погрешность измерений $\pm 0,5\%$). После нанесения покрытий их минимальная толщина на образцах составляла 0,4 мм, чего достаточно для оценки прочности сцепления покрытия с основой с помощью штифтового метода [8]. Измерение толщины покрытия выполняли штангенциркулем ШЦ-125 с погрешностью 0,01 мм. Испытаниям подвергали серию из пяти образцов для каждого материала. За результат принимали среднеарифметическое значение (табл. 3).

Таблица 1

Химический состав применяемых проволок [5–7]

Chemical composition of applied wires [5–7]

Марка проволоки	Массовая доля химических элементов, %								
	Mo	Mn	Cu	C	Si	Ni	Cr	Ti	Al
ER316LSi	2,60	1,80	0,12	0,01	0,9	12,2	18,4	–	–
X20H80	–	≤0,70	–	0,10	0,9–1,5	Остальное – Ni	20–23	≤0,3	≤0,2
Молибден	99,92–99,96	Остальное – примеси							

Таблица 2

Режимы нанесения покрытий

Coating modes

Марка проволоки	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость подачи проволоки, м/мин	Давление, МПа		Дистанция напыления, мм
				сжатого воздуха	пропан-бутановой смеси	
ER316LSi	117–130	32,0	4,6	0,40	0,40	100–150
X20H80	130–140	32,0	2,0	0,40	0,40	100–150
Молибден	165–170	32,5	1,2	0,35	0,35	100–150

Таблица 3

Результаты испытаний прочности покрытий

Testing results of coating strength

Материал покрытия	Диаметр проволоки, мм	Толщина покрытия, мм	Диаметр штифта, мм	Разрывное усилие, кН	Прочность покрытия, МПа
ER316LSi	1,2	0,7–0,8	4,0	0,343	27,34
X20H80	1,8	0,6–0,7	4,0	0,442	35,16
Молибден	1,6	0,5–0,6	2,0	0,094	29,94

Более наглядно результаты испытаний представлены на рис. 1.

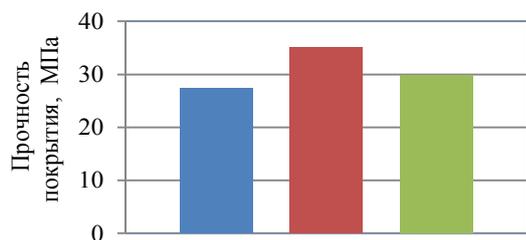


Рис. 1. Прочность покрытий из различных проволочных материалов: ■ – ER316LSi; ■ – X20H80; ■ – молибден

Fig. 1. Durability of coatings from various wire materials: ■ – ER316LSi; ■ – X20H80; ■ – molybdenum

Проанализировав представленные данные, можно отметить, что наибольшей прочностью обладают покрытия из проволоки марки X20H80, прочность которых превышает прочность покрытий из проволоки марки ER316LSi на 29 %, из молибденовой проволоки – на 17 %. При этом прочность покрытий из молибденовой проволоки на 10 % превышает прочность покрытий из проволоки ER316LSi.

Металлографические исследования образцов

Для определения доли участия когезионной и адгезионной составляющих в прочности покрытий выполнили металлографический анализ микрошлифов. Микрошлифы представляли собой поперечное сечение штифтового образца после отрыва штифта от покрытия (рис. 2).

В процессе экспериментов на микрошлифе были различимы контактные поверхности штифта и шайбы с остатками покрытия на

торцевой поверхности штифта. Исследование проводили с использованием микроскопа «Альтами МЕТ П». Для анализа изображений применяли программное обеспечение Altami Studio. Травление образцов не выполняли. Долю участия адгезии и когезии определяли по отношению суммарной длины участков с частицами покрытия, оставшимися после отрыва, а также без них к условной длине торцевой поверхности штифта (рис. 3).



Рис. 2. Поперечное сечение штифтового образца: 1 – покрытие; 2 – шайба (основа); 3 – штифт

Fig. 2. Cross-section of pin sample: 1 – coating; 2 – washer (base); 3 – pin

По результатам исследования микрошлифов определено, что участие когезионной и адгезионной составляющих прочности отличается в зависимости от применяемого материала (табл. 4).

При испытании покрытий из проволоки марки ER316LSi в большинстве случаев преобладает адгезионное разрушение, т. е. отрыв покрытия происходит по границе покрытие – основа (рис. 3а). Разрушение покрытий из нержавеющей стали (X20H80) проходило как между слоями, так и по границе покрытие – основа, но здесь преобладало когезионное разрушение (рис. 3б).

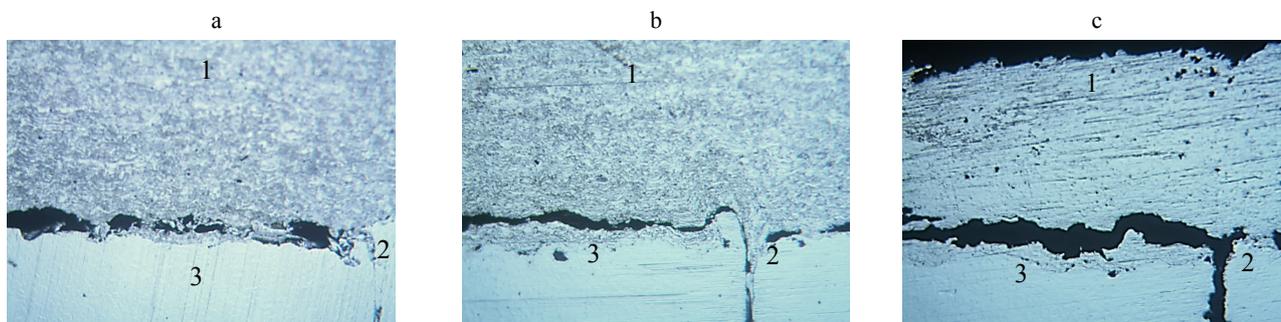


Рис. 3. Фрагмент поперечного сечения штифтового образца после отрыва покрытия (×100) для проволок марок ER316LSi (а), X20H80 (б) и молибденовой проволоки (с): 1 – покрытие; 2 – шайба; 3 – штифт

Fig. 3. Fragment of cross-section of pin sample after tearing off the coating (×100) for wire brands ER316LSi (a), X20H80 (b) and molybdenum wire (c): 1 – coating; 2 – washer; 3 – pin

Таблица 4

**Доля участия когезионной
и адгезионной составляющих
в прочности покрытий из различных материалов**
**Share of cohesive and adhesive component participation
in strength of coatings from various materials**

Марка проволоки	Адгезия, %	Когезия, %
ER316LSi	20–50	50–80
X20H80	55–65	35–45
Молибден	95–100	До 5

Более высокая адгезионная прочность покрытий из нихрома связана с его свойством практически не окисляться при высоких температурах [9] и, вероятнее всего, способностью демпфировать остаточные напряжения в покрытии за счет относительно высокой пластичности материала покрытия. Адгезионная прочность частиц молибдена превысила когезионную прочность самих частиц, поэтому разрушение покрытий из молибдена происходило между слоями покрытия (рис. 3с). Высокая адгезионная прочность покрытий из молибдена связана с его более высокой температурой плавления, что приводит к возникновению химического взаимодействия на контактных поверхностях основы и напыляемого материала. Химическое взаимодействие происходит за счет местного повышения температуры материала основы или предварительно осажденной частицы, при котором частицы и основа получают избыток энергии, необходимой для совершения процесса химической реакции, – энергии термической активации [1, 10]. Кроме того, температура плавления молибдена выше, чем температура кипения его оксида, а это вызывает испарение оксида в процессе напыления. Поэтому на поверхности частиц молибдена при взаимодействии с основой практически отсутствуют оксиды, что способствует сплавлению частиц молибдена с основой и образованию металлических связей [9].

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что участие когезионной и адгезионной составляющих прочности по-

крытий отличается в зависимости от применяемого материала. В прочности покрытий из высоколегированной проволоки марки ER316LSi преобладает когезионная составляющая, при которой разрушение в основном происходит по границе покрытие – основа.

2. Для покрытий из нихрома (X20H80) и особенно молибдена преобладающей является когезионная составляющая, при которой разрушение происходит не по границе покрытие – основа, а между слоями покрытия. Из этого следует, что такой немаловажный фактор, как прочность сцепления, характеризующий возможность применения металлических покрытий, для покрытий из нихрома и особенно молибдена будет превышать представленные в исследовании результаты прочности.

3. Чтобы повысить прочность сцепления покрытий из высоколегированной проволоки марки ER316LSi, нужно увеличить адгезионную составляющую. Для покрытий из нихрома и молибдена требуется увеличение когезионной составляющей. Температура контактной поверхности основы и напыляемых частиц – важный фактор, оказывающий влияние на прочность сцепления покрытий. Поэтому увеличение адгезионной и когезионной составляющих в прочности покрытий может быть достигнуто подбором оптимальных режимов напыления покрытий для каждого применяемого материала. При этом оптимальные режимы не должны способствовать чрезмерному окислению расплавленного материала, выгоранию легирующих элементов и увеличению остаточных напряжений в покрытии.

4. В некоторых случаях потребуется применение предварительного подогрева основы до оптимальных температур, не способствующих образованию поверхностной оксидной пленки и возникновению чрезмерных остаточных напряжений. В то же время не менее эффективным способом увеличения прочности покрытий может быть принудительное охлаждение основы для уменьшения остаточных напряжений в покрытии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коробов, Ю. С. Анализ свойств газотермических покрытий. Ч. 2. Оценка параметров покрытий / Ю. С. Коробов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 92 с.
2. Устройство для высокоскоростного напыления покрытий (варианты): пат. 4365 Респ. Беларусь, МПК7 В05В7/20 / М. А. Белоцерковский, А. С. Прядко, А. Е. Черепко. Опубл. 30.03.2002.
3. Сравнительный анализ физико-механических свойств покрытий, нанесенных способами электродуговой и гиперзвуковой металлизации / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2019. Т. 49, № 4. С. 48–54.
4. Способ гиперзвуковой металлизации и устройство для его осуществления: Евраз. пат. 024778, МПК В05В7/18, В05В7/22 / М. А. Белоцерковский, А. А. Дюжев, А. С. Прядко, А. Е. Черепко, В. А. Скворцов, А. В. Сосновский. Опубл. 31.10.2016.
5. Компания ESAB. Продукция и решения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.esab.ru/ru/ru/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/stainless-steel-wires/ok-autrod-316lsi.cfm>. Дата доступа: 29.09.2019.
6. Сплавы прецизионные. Марки: ГОСТ 10994–74. М.: Изд-во стандартов, 1989. 27 с.
7. Проволока молибденовая для источников света. Технические условия: ГОСТ 27266–87. М.: Изд-во стандартов, 2004. 18 с.
8. Методы исследований материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л. И. Тушинский [и др.]. М.: Мир, 2004. 384 с.
9. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Мorigaki; пер. с яп. В. Н. Попова; под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
10. Газотермическое напыление / под общ. ред. Л. Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.

Поступила 04.11.2020

Подписана в печать 05.01.2021

Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. Korobov Yu. S. (2016) *Analysis of gas Thermal Coating Properties. Part 2. Estimation of Coating Parameters*. Ekaterinburg, Publishing House of the Ural University. 92 (in Russian).
2. Belotserkovsky M. A., Pryadko A. S., Cherepko A. E. (2002) *Device for High-Speed Coating Spraying (Options)*. Patent No 4365 Republic of Belarus (in Russian).
3. Panteleenko F. I., Belotserkovskii M. A., Karpets M. N., Sosnovskii A. V. (2019) Comparative Analysis of Physical and Mechanical Properties of Coatings Applied by Methods of Electric arc and Hypersonic Metallization. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 49 (4), 48–54 (in Russian).
4. Belotserkovsky M. A., Dyuzhev A. A., Pryadko A. S., Cherepko A. E., Skvortsov V. A., Sosnovsky A. V. (2016) *Hypersonic Metallization Method and Device for its Implementation*. Eurasian Patent No 024778 (in Russian).
5. *ESAB Company. Products and Solutions*. Available at: <https://www.esab.ru/ru/ru/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/stainless-steel-wires/ok-autrod-316lsi.cfm>. (Accessed 29 September 2019) (in Russian).
6. State Standard 10994–74. *Precision Alloys. Grades*. Moscow, Publishing House of Standards, 1989. 27 (in Russian).
7. State Standard 27266–87. *Molybdenum Wire for Light Sources. Technical Conditions*. Moscow, Publishing House of Standards, 2004. 18 (in Russian).
8. Tushinsky L. I., Plokhov A. V., Tokarev O. A., Sindeev V. I. (2004) *Materials Research Methods: Structure, Properties and Processes of Inorganic Coating Application*. Moscow, Mir Publ. 384 (in Russian).
9. Hasui A., Morigaki O. (1985) *Surfacing and Spraying*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 240 (in Russian).
10. Baldaev L. Kh., Borisov V. N., Vakhalin V. A., Gannochenko G. I., Zatoka A. E., Zakharov B. M., Ivanov A. V., Ivanov V. M., Kalita V. I., Kudinov V. V., Puzryakov A. F., Sborshchikov Yu. P., Khamitsev B. G., Shkol'nikov E. Ya., Yaroslavtsev V. M. (2007) *Gas-Thermal Spraying*. Moscow, Market DS Publ. 344 (in Russian).

Received: 04.11.2020

Accepted: 05.01.2021

Published online: 30.11.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-465-475>

УДК 004.946

Методические основы применения технологий виртуальной реальности в промышленном дизайне

А. А. Константинова¹⁾, В. И. Ивченко¹⁾, В. В. Бохонка¹⁾, Н. В. Соловьев¹⁾, О. Н. Мойсей¹⁾

¹⁾Республиканский компьютерный центр машиностроительного профиля ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Разработаны методические основы применения технологий виртуальной реальности (VR-технологий) на различных этапах проектирования автомобилей и продвижения их на рынке, в частности при выполнении дизайн-проектирования, прототипирования, разработке обучающих и рекламных продуктов. Проанализированы основные направления использования технологий виртуальной реальности в промышленном дизайне в машиностроении. Выполнен обзор возможностей специализированного программного обеспечения Unreal Engine 4 и комплекта аппаратных средств HTC Vive, применяемых для создания и демонстрации виртуальных проектов. Сформированы системные требования к компьютерному программно-аппаратному обеспечению для разработки виртуальных проектов. Обобщен собственный опыт использования технологий виртуальной реальности при проектировании электромобиля с кузовом каркасно-панельной конструкции. Описана методика применения средств виртуальной реальности в целях создания виртуальных проектов для демонстрации дизайнерских решений и функционала изделий машиностроения. Рассмотрены вопросы выбора программно-аппаратных средств, их характеристик, а также дано описание этапов создания виртуального проекта. Процесс разработки виртуального проекта разделен на этапы подготовки и преобразования трехмерной компьютерной модели демонстрируемого изделия в его виртуальный цифровой прототип, создания для него виртуальной среды с присвоением среде и объекту материалов и текстур с необходимыми свойствами, задания освещения, параметров навигации и анимированных действий, оптимизации отображения теней и финализации проекта. Представлены основные результаты апробации разработанной методики на примере создания виртуальных проектов для демонстрации электромобиля в городской виртуальной среде и виртуальном павильоне.

Ключевые слова: VR-технологии, виртуальная реальность, виртуальный проект, виртуальная среда, промышленный дизайн, устройства виртуальной реальности, виртуальный прототип, визуальное программирование

Для цитирования: Методические основы применения технологий виртуальной реальности в промышленном дизайне / А. А. Константинова [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 465–475. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-465-475>

Methodological Basis of Virtual Reality Technology Application in Industrial Design

А. А. Konstantinova¹⁾, V. I. Ivchenko¹⁾, V. V. Bakhonka¹⁾, M. V. Salauyeu¹⁾, V. N. Maisel¹⁾

¹⁾The Republican Computer Center of Mechanical Engineering of the State Scientific Institution “The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper is devoted to the development of methodological foundations for the application of virtual reality technologies (VR-technologies) at various stages of car design and their promotion on the market, in particular, when performing

Адрес для переписки

Ивченко Вадим Иванович
Республиканский компьютерный центр
машиностроительного профиля
ул. Академическая, 12,
220072, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 320-40-61
bats@ncpmm.bas-net.by

Address for correspondence

Ivchenko Vadim I.
The Republican Computer Center
of Mechanical Engineering
12, Akademicheskaya str.,
220072, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 320-40-61
bats@ncpmm.bas-net.by

design, prototyping, development of educational and advertising products. The paper analyzes the main areas of application of virtual reality technologies in industrial design in mechanical engineering. An overview of the parameters of the specialized software Unreal Engine 4 and the HTC Vive hardware set used to create and demonstrate virtual projects is performed. System requirements for computer software and hardware for creating virtual projects have been formed. A generalization of our own experience of using virtual reality technologies in the design of an electric vehicle with a frame-panel structure is carried out. The technique of using virtual reality tools in order to create virtual projects for demonstration of design solutions and functionality of mechanical engineering products is described. The issues of choosing software and hardware, their characteristics are considered, as well as a description of the stages of creating a virtual project is given. The process of developing a virtual project is divided into the stages of preparing and transforming a three-dimensional computer model of the demonstrated product into its virtual digital prototype, creating a virtual environment for it, assigning materials and textures with the necessary properties to the environment and the object, setting lighting, navigation parameters and animated actions, optimizing the display of shadows and finalizing the project. The main results of approbation of the developed methodology are presented on the example of creating virtual projects for demonstrating an electric vehicle: in an urban virtual environment and in a virtual pavilion.

Keywords: VR-technologies, virtual reality, virtual project, virtual environment, industrial design, virtual reality devices, virtual prototype, visual programming

For citation: Konstantinova A. A., Ivchenko V. I., Bakhonka V. V., Salauyeu M. V., Maisei V. N. (2021) Methodological Basis of Virtual Reality Technology Application in Industrial Design. *Science and Technique*. 20 (6), 465–475. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-465-475> (in Russian)

Введение

В последние годы технологии виртуальной реальности (VR-технологии) находят все большее применение в машиностроении, в частности в автомобилестроении. Они используются на различных этапах жизненного цикла автомобиля для: оценки принятых или поиска наилучших стилистических и цветографических решений при разработке дизайн-проекта; проведения анализа эргономики и обзорности рабочего места водителя на ранних стадиях проектирования; виртуальной презентации машины потенциальным потребителям с целью продвижения на рынке; обучения персонала, осуществляющего техническое обслуживание и ремонт техники, и т. п. [1–5]. В недавнем прошлом продукция автомобилестроения имела длительный жизненный цикл, характеризовалась небольшим разнообразием моделей, а стадия разработки нового автомобиля занимала до 10 лет. В настоящее время жизненный цикл продукта значительно сократился, ассортимент продукции существенно увеличился, а смена модели происходит в среднем каждые четыре-шесть лет. В будущем можно ожидать сохранения тенденций сокращения жизненного цикла машины и роста разнообразия предлагаемых дизайнерских решений, повышающих уровень персонализации товара. Динамично меняющиеся требования рынка вынуждают изготовителей искать новые, более эффективные способы и процессы разработки и модернизации автомобилей, в первую очередь касающиеся их стиля и внешнего вида. Ожидается, что в том числе

технологии виртуальной реальности будут способствовать решению таких задач [2].

Как показывают исследования, применение виртуальной реальности на различных этапах разработки автомобиля и его компонентов, например в дизайн-проектировании, прототипировании и других, повышает качество работ, сокращает финансовые затраты и время вывода на рынок новых решений [3]. Таким образом, использование VR-технологий становится одним из актуальных трендов в развитии промышленного дизайна.

VR-технологии базируются на применении специализированных программных и аппаратных средств разработки и демонстрации виртуального проекта (VR-проекта). В самом простом варианте данная технология может быть реализована на базе шлема с помещенным в него смартфоном, на котором установлено необходимое программное обеспечение (Google Cardboard, Samsung Gear VR и т. д.) для демонстрации VR-проекта. С целью более полного и качественного погружения в виртуальную среду (VR-среда) используются шлемы виртуальной реальности, работающие в паре с современными консолями или персональными компьютерами. Они оснащены одним или двумя экранами, перед которыми находятся две линзы, обеспечивающие увеличение поля зрения за счет корректировки геометрии изображения; контроллерами движения и лазерными датчиками позиционирования, позволяющими отслеживать положение пользователя в пространстве в реальном времени. В данных

устройствах применяются экраны высокого разрешения, обеспечивающие реалистичную графику. Лидирующие позиции на рынке занимают следующие модели: Oculus Rift, HTC Vive, Lenovo Explorer и Sony PlayStation VR [6]. Среди получивших наибольшее распространение программных средств разработки VR-проектов можно отметить Unreal Engine 4, SteamVR и Unity. Указанное программное обеспечение обладает необходимым набором средств создания и настройки виртуальных сред, а также широким перечнем подключаемых устройств взаимодействия, что позволяет реалистично отображать в среде виртуальной реальности цифровые модели различных объектов, в том числе мобильных машин, включая демонстрацию их отдельных функциональных возможностей [1–6].

Для успешного и эффективного применения VR-технологий на практике нужно иметь четкое описание последовательности и состава действий, выполняемых с применением конкретных технических средств, т. е. необходимо наличие методики создания VR-проекта. Проведенный обзор и анализ имеющихся в широком доступе материалов и публикаций по применению VR-технологий в автомобилестроении [1–5] не выявили работ, содержащих систематизированное описание процесса прикладного применения конкретных методов и средств виртуальной реальности. В связи с этим возникла необходимость разработки методологической базы создания VR-проектов по машиностроительной тематике, учитывающей нарабатанный опыт по применению VR-технологий в области промышленного дизайна.

VR-технологии в процессе цифрового проектирования изделий машиностроения

Одна из главных тенденций развития современного производства – это повсеместное внедрение цифровых технологий. Ключевая особенность такого производства – обмен информацией на всех стадиях процесса, организованный исключительно в цифровом виде. Преимуществом цифрового производства является минимизация материальных издержек и времени выхода на рынок новой, индивидуализированной (персоно-ориентированной) продукции.

Цифровизация привела к существенной трансформации процесса разработки изделия. Теперь проектирование машин и их компонентов выполняется с применением компьютерного моделирования, в результате чего создаются соответствующие цифровые модели. Развитие VR-технологий и наличие таких моделей позволяют на стадии дизайн-проектирования автомобиля осуществлять цифровое прототипирование путем помещения в создаваемую VR-среду разрабатываемых объектов (рис. 1) и проведения там эргономических, стилистических и цветографических исследований.

Трехмерная компьютерная модель автомобиля или его кузовных элементов, созданная с применением традиционных программных средств CAD-моделирования, передается в VR-среду, где с ней проводится ряд манипуляций и преобразований по ее позиционированию, заданию необходимых функциональных и эстетических свойств.



Рис. 1. Цифровая модель электромобиля в VR-среде: а – экстерьер; б – интерьер
Fig. 1. Digital model of electric vehicle in VR-environment: a – exterior; b – interior

Таким образом появляется виртуальный прототип машины, реализованный в масштабе 1:1. С помощью средств виртуальной реальности в эту же VR-среду «помещается» человек, который может: проводить с различных позиций и ракурсов оценку габаритов, пропорций, выразительности и эстетичности внешнего вида и его формы; выполнять анализ обзорности, эргономики, оценивать выбор цветовых решений и материалов изделия и т. п. При этом есть возможность выявления таких недостатков или ошибок проектирования, как: наличие в модели недоработанных либо нестыкующихся поверхностей, диспропорций, визуальное несоответствие облика объекта среде эксплуатации, недочеты в эргономике и обзорности (применительно к автомобилям) и т. п. В ряде случаев эти ошибки можно выявить только после создания физического прототипа. Таким образом, применение VR-технологий позволяет сократить затраты времени и средств на разработку изделия. С учетом изложенного применение VR-технологий целесообразно осуществлять начиная с самых ранних стадий проектирования.

Виртуальное прототипирование как один из способов объемно-пространственной демонстрации дизайн-идеи имеет ряд преимуществ перед физическим макетированием, давая возможность за относительно короткое время создавать и оценивать различные виртуальные прототипы, отличающиеся конструктивными особенностями, комбинациями цветов, материалов, компоновок и т. п. Благодаря применению VR-технологий ведущим автомобильным концернам удается сократить до 50 % количество прототипов, необходимых для разработки новой модели автомобиля, и до 30 % – затраты времени на изготовление прототипов [4]. Также важное преимущество VR-технологий – возможность обеспечения дистанционного доступа к VR-проекту с помощью интернета [7], что позволяет заказчику и исполнителю одновременно в общей VR-среде проводить изучение, оценку и обсуждение решений по разрабатываемому объекту, при этом оба могут находиться в различных точках мира. Основными условиями здесь являются наличие доступа в интернет и оснащенность необходимыми техническими средствами виртуальной реальности. Это дает возможность, помимо отказа от изготовления

физического прототипа изделия или его макета, сэкономить затраты времени и средств на перемещение людей и объектов.

Программно-аппаратные средства реализации VR-технологий

Широкому распространению VR-технологий в автомобилестроении способствовало активное развитие вычислительных, аппаратных и программных средств. В современных программах виртуальной реальности реализован обширный набор инструментов, а также готовых модулей, адаптированных или разработанных специально для постобработки и визуализации автомобильной техники.

Выбор программных средств для разработки и демонстрации VR-проекта обусловлен следующими ключевыми факторами: обеспечением требуемого уровня реалистичности графического представления, удобством использования инструментов и интерфейса программы для пользователя, наличием вариативности методов решения поставленной задачи посредством разнообразия функционала.

В качестве основного программного средства для реализуемых VR-проектов было выбрано программное обеспечение для разработки компьютерных игр (игровой движок) Unreal Engine 4 (UE4), главными преимуществами которого являются: высокий уровень реалистичности визуализации, интуитивно понятный пользовательский интерфейс, большое количество встроенных функций и отдельных редакторов, наличие возможности написания скриптов – как посредством кода, так и с помощью инструментов визуального программирования [8]. В качестве альтернативы UE4 рассматривалась программа Unity, существенные минусы которой в нашем случае – необходимость использования языка программирования C#, а также более низкий уровень реалистичности визуализации.

В процессе создания VR-проекта как вспомогательные могут использоваться программы для подготовки и преобразования 3D-моделей (3ds Max, Siemens NX и т. п.), программы создания растровой и векторной графики (Adobe Photoshop, CorelDRAW и т. п.). Для запуска VR-проекта применена среда SteamVR,

объединяющая в себе программно-аппаратные средства виртуальной реальности.

Поскольку характеристики VR-проекта в значительной степени определяются параметрами и возможностями используемых аппаратных и программных средств, были установлены минимальные и рекомендуемые системные требования к операционной системе, графическому процессору, оперативной памяти и видеокарте персонального компьютера (табл. 1).

Минимальные системные требования составлены для проектов, включающих: модели объектов с простой геометрией (с преимущественно плоскими поверхностями) и низкой полигональностью, с минимальным набором задаваемых параметров материалов, текстур и источников освещения VR-среды.

Рекомендуемые системные требования составлены для проектов, включающих модели объектов со сложной геометрией, большим количеством деталей с высокой полигональностью, скруглениями ребер, широким набором задаваемых параметров материалов (зеркальность, металлизированность, прозрачность и т. п.), текстур и источников освещения (естественных и искусственных), а также наличием эффектов анимации.

Выполнение приведенных рекомендуемых требований способствует оптимизации работы аппаратных средств с максимальной реализацией возможностей применяемых программных продуктов в рамках VR-проектов различной сложности.

Аппаратные средства виртуальной реальности для решения профессиональных задач могут быть представлены комплектом оборудования и программных средств, таким как:

- шлем виртуальной реальности (HTC Vive, Oculus Rift, Lenovo Explorer, Sony PlayStation VR и т. п.);
- базовые станции отслеживания положения пользователя в пространстве и стойки-штативы для них (в зависимости от комплектации);
- джойстики (манипуляторы-контроллеры);
- адаптеры питания;
- коммуникационный модуль для подключения к компьютеру;
- встроенное программное обеспечение.

Характеристики наиболее распространенных в применении шлемов виртуальной реальности представлены в табл. 2.

Таблица 1

Системные требования к компьютерному программно-аппаратному обеспечению для создания VR-проектов
System requirements for computer software and hardware for creating VR-projects

Наименование	Системное требование	
	Минимальное	Рекомендуемое
Операционная система	Windows 7/8/8.1/10 (64 Bit)	
Процессор	Intel Core i5-4590, или AMD FX 8350, или их аналоги	Intel Core i5-4590, или AMD FX 8350, их аналоги или более новые модели
Оперативная память	4 ГБ ОЗУ	4 ГБ ОЗУ и более
Графический процессор	NVIDIA GeForce GTX 970, или AMD Radeon R9 290, или их аналоги	NVIDIA GeForce GTX 970, или AMD Radeon R9 290, их аналоги или более новые модели

Таблица 2

Характеристики шлемов виртуальной реальности
Characteristics of virtual reality helmets

Показатель	Характеристика		
	HTC Vive OPJT100 VR	Oculus Rift S	Lenovo Explorer
Датчики	Акселерометр, гироскоп, датчик положения, фронтальная камера	Акселерометр, гироскоп	Акселерометр, гироскоп, датчик положения
Разрешение дисплея (для каждого глаза)	1080×1200	1440×1280	1440×1440
Связь	Bluetooth, USB 3.0 Type A, mini jack 3,5 мм, HDMI, DisplayPort	USB 3.0 Type A, mini jack 3,5 мм	Bluetooth, USB 3.0 Type A, mini jack 3,5 мм, HDMI
Частота обновления	90 Гц	80 Гц	90 Гц
Угол обзора	110°	115°	110°

Методика создания VR-проекта

Рассмотрим сформированные в отделе промышленного дизайна Объединенного института машиностроения НАН Беларуси методические основы применения технологий виртуальной реальности в промышленном дизайне на базе следующих аппаратных и программных средств: комплекса виртуальной реальности HTC Vive OPJT100 VR, программно-аппаратного комплекса в составе рабочей станции (процессор Intel Core i7-7700K, память 32 ГБ ОЗУ, графический процессор NVIDIA RTX 2080, SSD-накопитель 1 ТБ, дисплей, устройства ввода), операционной системы Windows 10 (64 Bit) и программных средств (Unreal Engine 4, Steam VR и др.).

Методика создания VR-проекта включает следующие этапы:

- подготовку и преобразование модели представляемого объекта;
- разработку виртуальной среды для размещения объекта;
- присвоение материалов и текстур составляющим VR-проекта;
- создание и настройку источников освещения;
- создание и настройку параметров навигации;
- разработку и реализацию сценариев анимации;
- оптимизацию отображения теней;
- финализацию проекта.

Общее описание указанных методических рекомендаций приведено ниже на примере создания VR-проектов для демонстрации электромобиля с кузовом каркасно-панельной кон-

струкции (далее – электромобиль) в городской VR-среде и виртуальном павильоне.

Подготовка и преобразование модели представляемого объекта. Для преобразования трехмерной модели электромобиля в виртуальный цифровой прототип изделия были осуществлены ее подготовка и экспорт в программу UE4. Подготовка модели предусматривает выполнение операций по проверке и устранению ошибок, понижению размерности модели и заданию толщин оболочечным телам.

Подготовка и преобразование модели осуществлялись в пакете 3ds Max путем снижения количества полигонов, что позволило оптимизировать VR-проект под более низкие характеристики используемых аппаратных средств без потери качества визуализации. На рис. 2 приведены примеры полигональных сеток трехмерной модели плафона освещения салона электромобиля до и после ее преобразования.

Для выявления и устранения ошибок исходной трехмерной модели объекта в CAD-приложении проводили проверку корректности ориентации и редактирование внешних нормалей к лицевым поверхностям, а также задавали толщины оболочечным телам. Для перевернутых нормалей производилось их реверсирование. Необходимость выполнения данной операции связана с тем, что поверхности с некорректно заданными нормальями и нулевой толщиной в программе UE4 будут отображаться прозрачными с лицевой стороны (рис. 3). Экспорт модели электромобиля в UE4 осуществлялся в масштабе 1:1 в формате .stp (может выполняться в любом формате, поддерживаемом применяемыми программами).



Рис. 2. Полигональная сетка трехмерной модели плафона освещения салона электромобиля: а – до преобразования (260400 полигонов); б – после понижения размерности (5276 полигонов)

Fig. 2. Polygonal mesh of three-dimensional model of ceiling light for interior of electric vehicle: а – before conversion (260400 polygons); б – after dimension reduction (5276 polygons)



Рис. 3. Корректировка нормалей, обращенных от пользователя (а) и на пользователя (б), в трехмерной модели обшивки двери электромобиля

Fig. 3. Adjusting normals facing away from user (a) and towards user (b) in three-dimensional model of electric vehicle door trim

Разработка виртуальной среды для размещения объекта. VR-среда для размещения модели объекта может формироваться следующими способами:

- установкой HDR-изображения (HDR – технология объединения нескольких изображений и создания на их основе среды [9]);
- размещением моделей различных объектов оформления среды (помещения, архитектурные формы и т. д.) в VR-проекте;
- созданием комбинированной среды из моделей объектов оформления среды и HDR-изображений.

В рассматриваемом примере (рис. 1) формирование объектов оформления VR-среды реализовано в пакете UE4 комбинированным способом. Применение данного варианта предусматривало присвоение соответствующих материалов и текстур моделям объектов оформления VR-среды. Особенности этой операции приведены в описании следующего этапа методики.

Присвоение материалов и текстур составляющим VR-проекта. После формирования VR-среды и размещения в ней 3D-модели электромобиля им были присвоены необходимые визуальные свойства материалов и текстур. Для более реалистичного отображения пластического формообразования, создания световых эффектов, а также имитации некоторых природных явлений для указанных материалов и текстур заданы настройки свойств: шероховатости, цветовых каналов, в том числе яркости, контрастности, насыщенности цветов; металлизированности, отражения, прозрачности и др. (рис. 4).

Благодаря широкой вариативности настроек свойств материалов и текстур UE4 позволяет задать необходимые визуальные свойства, обеспечивающие требуемую реалистичность восприятия. Возможно использование свойств

материалов и текстур, полученных из специализированных ресурсов, а также текстур собственной разработки, созданных в графических редакторах [9].



Рис. 4. Настройки свойств материалов и текстур элементов экстерьера электромобиля

Fig. 4. Material property settings and textures of electric vehicle exterior elements

Импортированные в UE4 текстуры используются как обычный рисунок, рельефная карта или карта шероховатости (рис. 5). Их применение в качестве текстуры рисунков, рельефных карт или карт шероховатости позволяет визуально представить элементы VR-проекта в виде как гладких поверхностей, так и рельефных или шероховатых. Импортированные в проект описания материалов дополняют встроенную в UE4 базу материалов.

Создание и настройка источников освещения. Для более точной передачи формы модели и создания реалистичного окружения электромобиля в рассматриваемых VR-проектах были созданы и настроены естественные и искусственные источники освещения. В UE4 имеется возможность задания следующих источников освещения: рассеянного (небесного), направленного, точечного и прожекторного, а также различных атмосферных явлений, таких как туман, облака и т. д., формирующих атмосферный свет.

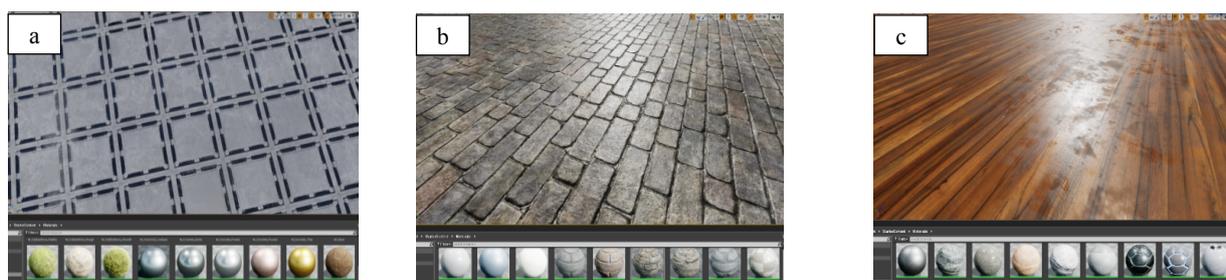


Рис. 5. Примеры текстур в качестве: а – рисунка; б – рельефной карты; с – карты шероховатости

Fig. 5. Examples of textures as: a – picture; b – bump map; c – roughness map

Основным видом освещения в рассматриваемых VR-проектах является солнечное, которое задается небесным источником, освещающим всю сцену (рис. 6). С помощью изменения настроек солнечного освещения можно более детально передать или подчеркнуть форму модели, а также имитировать время суток в VR-сцене [10].

Искусственные источники освещения (различного вида лампы, световые эффекты, а также некоторые виды материалов) в VR-среде могут создаваться направленными, точечными и прожекторными источниками света [11]. Они позволяют моделировать отражения, блики и их расположение на объекте, создавать подсветку и выгодно подчеркивать форму изделия, а также более точно передавать физические и эстетические свойства материалов (рис. 6).

Создание и настройка параметров навигации. Под этими функциями в VR-среде подразумевается создание и описание свойств системы областей, в пределах которых в VR-проекте можно перемещаться с помощью контроллеров [12]. Кроме того, у пользователя имеется возможность физического перемещения в реальном пространстве, которое дублируется в VR-среде.

К основным задаваемым параметрам навигации относится разрешение либо запрет перемещения через назначенную зону VR-среды с помощью контроллеров. Заложенные в настройках навигации UE4 свойства дают возможность рассматривать объект с разных ракурсов и с различного расстояния, а также создавать ограничения в виртуальном перемещении подобно тому, как это происходит в реальном мире. Также при работе в VR-проекте могут отображаться границы реального окружения, которые не желательно пересекать в целях обеспечения безопасности.

При апробации методики в VR-проекте демонстрации электромобиля в виртуальном павильоне программными средствами UE4 была задана область навигации, ограниченная наружным периметром внутри виртуального павильона, а также заблокирована возможность перемещения «сквозь» конструкции электромобиля с использованием аппаратных средств. На рис. 7 представлен пример настройки области навигации VR-проекта демонстрации электромобиля в виртуальном павильоне.



Рис. 6. VR-среда с различными вариантами освещения: а – с источниками солнечного и атмосферного света; б – без источника солнечного света; с – без источников солнечного и атмосферного света

Fig. 6. VR-environment with different lighting options: a – with sunlight and atmospheric light sources; b – without sunlight source; c – without sunlight or atmospheric light sources

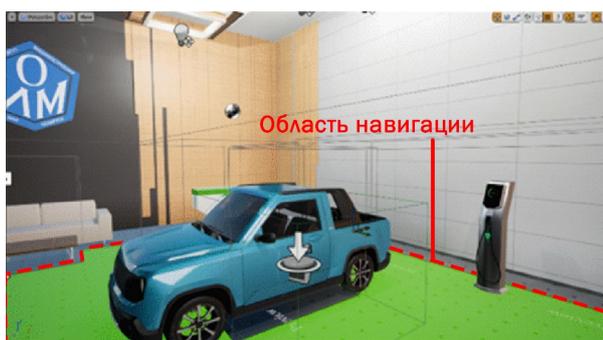


Рис. 7. Настройка области навигации

Fig. 7. Setting up navigation area

Разработка и реализация сценариев анимации. Редактор UE4 позволяет задавать различные варианты анимированных действий с объектами в соответствии с выбранными сценариями. Это дает возможность смоделировать любое необходимое действие (движение, скрывание, смена цвета, фактуры и т. п.) для демонстрации эстетических и стилевых решений, а также функционала и специфических особенностей рассматриваемого объекта [13, 14].

В VR-проекте демонстрации электромобиля в виртуальном павильоне реализована анимация подъема капота с целью ознакомления с размещенными в подкапотном пространстве компонентами (рис. 8). Для задания анимированных действий были написаны специальные скрипты, устанавливающие порядок и условия выполнения необходимых операций, активирующих анимацию открывания капота.

Оптимизация отображения теней. Выполнение данного этапа носит рекомендательный характер и реализуется при разработке VR-проектов с большим количеством моделей, деталей, графики и анимаций, так как каждая смена положения модели относительно пользователя требует нового формирования падающей тени, что увеличивает нагрузку на вычислительные ресурсы, задействованные в проекте. Преобразование динамических теней в статические позволяет улучшить производительность программно-аппаратных средств, исключить или минимизировать возможные задержки и прерывания в отрисовке виртуального проекта во время его просмотра в очках виртуальной реальности [15].



Рис. 8. Настройка анимации открывания капота электромобиля

Fig. 8. Setting up animation of opening electric vehicle hood

Суть этапа заключается в фиксации в пространстве положения теней, возникающих от объектов после задания источников освещения. В результате чего динамические тени преобразуются в статические изображения. Перед этапом финализации VR-проекта все тени были преобразованы в статические изображения путем ограничения подвижности всех источников освещения виртуальной среды в выбранном положении.

Финализация проекта необходима для создания исполнимого файла проекта в целях его запуска и просмотра на компьютерах, в том числе на которых не установлена программа UE4. Исполнимый файл имеет расширение .exe и отличается значительно меньшей размерностью, чем файл в формате программы UE4 [16]. Например, VR-проект UE4 с приведенным на рис. 8 электромобилем занимает 54320 МБ, а исполнимый файл – 3305 МБ.

ВЫВОДЫ

1. По результатам обобщения и систематизации опыта применения программных и аппаратных средств виртуальной реальности, накопленного в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси при выполнении дизайнерских и конструкторских работ в области автомобилестроения, описаны основные возможности и задачи, решаемые в автомобилестроении с помощью VR-технологий, приведен обзор параметров используемого программного и аппаратного обеспечения для работы в VR-среде, разработана и апробирована методика создания VR-проектов – демонст-

рации электромобиля в городской VR-среде и виртуальном павильоне.

2. Описанные в статье современные VR-технологии уже на начальных стадиях проектирования транспортного средства позволяют анализировать в масштабе 1:1 эстетические, стилистические и объемно-пластические решения его экстерьера и интерьера, эргономику, обзорность; оценить качество выполнения сопряжений сложных поверхностей и т. п. В совокупности приведенные возможности вносят существенный вклад в повышение эффективности процесса проектирования путем сокращения времени на анализ множества вариантов и комбинаций решений, в том числе организации дистанционных встреч по их совместной оценке и обсуждению непосредственно в VR-среде, минимизации ошибок и неточностей. Это повышает общую степень проработки изделия и его соответствия требованиям разработчика.

3. Полученные на стадии проектирования виртуальные модели изделия (виртуальные прототипы) в дальнейшем можно использовать в целях его рекламы и продвижения на рынке.

4. Представленные методические основы могут быть применены при проектировании различных технических объектов в области машино- и приборостроения с использованием как упомянутого программного обеспечения, так и других аналогичных средств разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркин, Д. А. Возможности использования систем виртуальной реальности в машиностроении / Д. А. Маркин, Е. А. Новиков // Достижения и перспективы технических наук: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. Уфа: Изд-во НАУЧНЫЙ ЦЕНТР «АЭТЕРНА», 2014. С. 20–22.
2. Netto, A. V. Perspectives of Virtual Reality for the Automotive Industry [Electronic Resource] / A. V. Netto, A. M. Penachio, A. T. Anitelle // Virtual Reality Technology for the Automotive Engineering Area, Conference: SAE Brasil 2002 Congress and Exhibit. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/296643596_Virtual_Reality_Technology_for_the_Automotive_Engineering_Area. Date of access: 12.03.2021.
3. Lawson, G. The Future of Virtual Reality in the Automotive Industry [Electronic Resource] / G. Lawson, D. Sanitri, B. Waterfield // VR Processes in the Automotive Industry, 17th International Conference, HCI International 2015, Los Angeles, CA. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/282076636_VR_Processes_in_the_Automotive_Industry/. Date of access: 12.03.2021.
4. The Use Cases and Benefits of VR in the Automotive Industry [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.improovr.com/blog/the-use-cases-and-benefits-of-vr-in-the-automotive-industry/>. Date of access: 12.03.2021.
5. Колесников, В. А. Использование технологий виртуальной реальности для подготовки специалистов в области автомобильного транспорта / В. А. Колесников, С. В. Сыроваткин, Е. Б. Колесникова // Проблемы та перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали IV Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф., 14–15 квітня 2016 р. Вінниця: Вінницький національний технічний університет, 2016. С. 18–22.
6. Виды очков виртуальной реальности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vr-j.ru/stati-i-obzory/idy-ochkov-virtualnoj-realnosti/>. Дата доступа: 16.03.2021.
7. Unreal Engine VR Mode [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.unrealengine.com/en-US/BuildingWorlds/VRMode/index.html>. Дата доступа: 15.03.2021.
8. Макеффри, М. Unreal Engine VR для разработчиков / М. Макеффри. М.: Эксмо, 2019. 256 с.
9. Материалы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://uengine.ru/site-content/docs/materials-shaders/materials>. Дата доступа: 15.03.2021.
10. Lighting the Environment [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.unrealengine.com/en-US/BuildingWorlds/LightingAndShadows/index.html>. Дата доступа: 15.03.2021.
11. Santello, S. RPG Development in Unreal Engine v4.7. / S. Santello, A. R. Stagner. Birmingham, Publishing House “Packt Publishing”, 2016. 358 p.
12. Тьюриал по Unreal Engine. Ч. 6. Анимация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/344840/>. Дата доступа: 15.03.2021.
13. Shannon, T. Unreal Engine 4 for Design Visualization: Developing Stunning Interactive Visualizations, Animations, and Renderings / T. Shannon. Boston: Addison-Wesley, 2018. 362 p.
14. Sanders, A. An Introduction to Unreal Engine 4 / A. Sanders. Boca Raton: A. K. Peters/CRC Press, 2016. 270 p.
15. Sewell, B. Blueprints Visual Scripting for Unreal Engine: Build Professional 3D-Games with Unreal Engine 4’s Visual Scripting System / B. Sewell. Birmingham: Packt Publishing, 2015. 190 p.
16. Mack, K. Unreal Engine 4 Virtual Reality Projects: Build Immersive, Real-World VR Applications Using UE4, C++, and Unreal Blueprints / K. Mack, R. Ruud. Birmingham: Packt Publishing, 2019. 634 p.

Поступила 14.05.2021

Подписана в печать 11.08.2021

Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. Markin D. A., Novikov E. A. (2014) Possibilities of Using Virtual Reality Systems in Mechanical Engineering. *Dostizheniya i Perspektivy Tekhnicheskikh Nauk: Sb. Statei Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Achievements and Prospects of Technical Sciences / Collection of Papers of the International Scientific and Practical Conference]. Ufa, Publishing House of Scientific Center "AETERNA", 20–22 (in Russian).
2. Netto A. V., Penachio A. M., Anitelle A. T. (2002) Perspectives of Virtual Reality for the Automotive Industry. *Virtual Reality Technology for the Automotive Engineering Area, Conference: SAE Brasil 2002 Congress and Exhibit*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/296643596_Virtual_Reality_Technology_for_the_Automotive_Engineering_Area. (Accessed 12 March 2021).
3. Lawson G., Salanitri D., Waterfield B. (2015) The Future of Virtual Reality in the Automotive Industry. *VR Processes in the Automotive Industry, 17th International Conference, HCI International 2015, Los Angeles, CA*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/282076636_VR_Processes_in_the_Automotive_Industry/. (Accessed 12 March 2021).
4. *The Use Cases and Benefits of VR in the Automotive Industry*. Available at: <https://www.improovr.com/blog/the-use-cases-and-benefits-of-vr-in-the-automotive-industry/>. (Accessed 12 March 2021).
5. Kolesnikov V. A., Syrovatkin S. V., Kolesnikova E. B. (2016) Using Virtual Reality Technologies for Training Specialists in the Field of Automotive Transport. *Problemi ta Perspektivi Rozvitku Avtomobil'nogo Transportu: Materiali IV Mizhnar. Nauk.-Tekhn. Internet-Konf., 14–15 Kvitnya 2016 r.* [Problems and Prospects for Development of Road Transport: Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Internet-Conference, April 14–15, 2016]. Vinnytsia, Vinnytsia National Technical University, 18–22.
6. *Types of Virtual Reality Glasses*. Available at: <https://vr-j.ru/stati-i-obzory/vidy-ochkov-virtualnoj-realnosti/>. (Accessed 16 March 2021) (in Russian).
7. *Unreal Engine VR Mode*. Available at: <https://docs.unrealengine.com/en-US/BuildingWorlds/VRMode/index.html>. (Accessed 15 March 2021).
8. Makeffrey M. (2019) *Unreal Engine VR for Developers*. Moscow, Eksmo Publ. 256 (in Russian).
9. *Materials*. Available at: <https://uengine.ru/site-content/docs/materials-shaders/material>. (Accessed 15 March 2021) (in Russian).
10. *Lighting the Environment*. Available at: <https://docs.unrealengine.com/en-US/BuildingWorlds/LightingAndShadows/index.html>. (Accessed 15 March 2021).
11. Santello S., Stagner A. R. (2016) *RPG Development in Unreal Engine v4.7*. Birmingham, Publishing House "Packt Publishing", 2016. 358 (in Russian).
12. Unreal Engine Tutorial. Part 6: Animation. Available at: <https://habr.com/ru/post/344840/>. (Accessed 15 March 2021) (in Russian).
13. Shannon T. (2018) *Unreal Engine 4 for Design Visualization: Developing Stunning Interactive Visualizations, Animations, and Renderings*. Addison-Wesley. 362.
14. Sanders A. (2016) *An Introduction to Unreal Engine 4*. CRC Press. 270. <https://doi.org/10.1201/9781315382555>.
15. Sewell B. (2015) *Blueprints Visual Scripting for Unreal Engine: Build professional 3D Games with Unreal Engine 4's Visual Scripting System*. Packt Publishing. 190.
16. Mack K., Ruud R. (2019) *Unreal Engine 4 Virtual Reality Projects: Build Immersive, Real-World VR Applications Using UE4, C++, and Unreal Blueprints*. Packt Publishing. 634.

Received: 14.05.2021

Accepted: 11.08.2021

Published online: 30.11.2021

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО
ТВЕРДОГО ТЕЛА
DEFORMATION
IN SOLID MECHANICS

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-476-481>

УДК 534.131:534-8

Моделирование составных кольцевых ультразвуковых волноводов с помощью метода конечных элементов

Докт. техн. наук, доц. Д. А. Степаненко¹⁾, инж. К. А. Бунчук¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье описана методика моделирования и оптимизации составных кольцевых ультразвуковых волноводов, состоящих из двух последовательно соединенных сегментов из различных материалов, с помощью метода конечных элементов. Обоснована возможность применения таких волноводов для усиления колебаний по амплитуде. Преимущество разработанной методики – возможность ее реализации с помощью стандартного программного обеспечения, в частности COMSOL Multiphysics. Корректность и эффективность методики подтверждена путем сравнения численных данных с результатами моделирования с помощью метода передаточных матриц с применением уравнений колебаний типа Эйлера – Бернулли и Тимошенко. Показано, что в составных кольцевых волноводах могут возникать собственные формы колебаний двух типов – знакопеременные и знакопостоянные, причем практический интерес для усиления колебаний по амплитуде представляют только знакопостоянные моды. Даны рекомендации по выбору оптимальных геометрических параметров волноводов, в частности показано, что для обеспечения максимального коэффициента усиления колебаний по амплитуде центральные углы сегментов волновода должны выбираться с учетом расчетной зависимости коэффициента усиления от угла, характеризующейся наличием нескольких локальных максимумов коэффициента усиления. Отмечено, что высокая точность существующих полуаналитических методов расчета и проектирования кольцевых волноводов достигается при использовании методов, основанных на применении уравнений колебаний типа Тимошенко.

Ключевые слова: кольцевой волновод, ультразвуковые колебания, изгибные колебания, собственные формы колебаний, метод конечных элементов, COMSOL Multiphysics

Для цитирования: Степаненко, Д. А. Моделирование составных кольцевых ультразвуковых волноводов с помощью метода конечных элементов / Д. А. Степаненко, К. А. Бунчук // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 476–481. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-476-481>

Modelling of Ring-Shaped Compound Ultrasonic Waveguides by Means of Finite Elements Method

D. A. Stepanenko¹⁾, K. A. Bunchuk¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper describes a technique for modelling and optimization of ring-shaped compound ultrasonic waveguides consisting of two sequentially joined segments of different materials by means of finite elements method. The possibility

Адрес для переписки

Степаненко Дмитрий Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-01
stepd@tut.by

Address for correspondence

Stepanenko Dmitry A.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-01
stepd@tut.by

of using such waveguides for amplifying vibrations in amplitude has been justified in the paper. The advantage of the developed technique consists in possibility of its realization by means of standard engineering software, particularly COMSOL Multiphysics. The correctness and efficiency of the technique is proved by comparing the numerical data with the simulation results by means of transfer matrix method using equations of vibration of Euler – Bernoulli and Timoshenko type. It is shown that in compound ring-shaped waveguides two kinds of vibration modes are possible – variable-sign and constant-sign, moreover only constant-sign modes are of practical interest for amplification of vibration amplitude. Recommendations for selection of optimal geometric parameters of the waveguides are given, particularly it is shown that for ensuring maximum vibration amplification factor it is necessary to choose central angles of the waveguide segments with account for calculated dependence between amplification factor and angle, characterized by presence of several local maxima of the amplification factor. It is noted that the high accuracy of the existing semi-analytical methods for calculating and designing ring-shaped waveguides is achieved using methods based on the application of Timoshenko-type equations of vibration.

Keywords: ring-shaped waveguide, ultrasonic vibrations, flexural vibrations, natural vibration modes, finite element method, COMSOL Multiphysics

For citation: Stepanenko D. A., Bunchuk K. A. (2021) Modelling of Ring-Shaped Compound Ultrasonic Waveguides by Means of Finite Elements Method. *Science and Technique*. 20 (6), 476–481. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-476-481> (in Russian)

Введение

Одним из способов усиления ультразвуковых колебаний по амплитуде является применение кольцевых волноводов с изменяющейся по длине окружности изгибной жесткостью EI (где E – модуль продольной упругости материала волновода; I – осевой момент инерции поперечного сечения волновода). Технически изменение изгибной жесткости может быть реализовано за счет геометрического профилирования волновода [1–4] либо использования составных волноводов, состоящих из нескольких последовательно соединенных сегментов, выполненных из материалов с существенно различающимися значениями модуля упругости E [4, 5]. По своему принципу действия составные кольцевые волноводы аналогичны составным стержневым волноводам, применяемым для усиления продольных ультразвуковых колебаний [6, 7]. В случае кольцевого волновода продольные колебания возбудителя, например стержневого волновода, преобразуются в изгибные колебания, которые усиливаются кольцевым волноводом по амплитуде, а затем изгибные колебания трансформируются в продольные колебания инструмента, присоединенного к кольцевому волноводу в сечении, диаметрально противоположном по отношению к входному сечению.

Для расчета эксплуатационных характеристик составных кольцевых волноводов могут использоваться полуаналитические методы типа метода передаточных матриц [8, 9] и метода гармонического баланса. Также представляют интерес численные – наподобие метода конечных элементов (МКЭ), которые могут быть реализованы посредством стандартного инже-

нерного программного обеспечения. Моделирование с помощью МКЭ также является эффективным средством проверки достоверности результатов, полученных с использованием полуаналитических методов. В статье рассматриваются особенности моделирования составных кольцевых ультразвуковых волноводов с помощью МКЭ с применением программы COMSOL Multiphysics. Достоверность полученных результатов подтверждается путем их сравнения с результатами расчета, выполненного методом передаточных матриц.

Описание методики моделирования

В программе COMSOL Multiphysics, с помощью которой выполняли моделирование, изменения модуля упругости и плотности материала по длине окружности волновода описываются путем задания функций, математически выражающих эти изменения, вместо обычно используемых постоянных свойств материала. Для этого в разделе Options → Constants в виде таблицы задаются значения постоянных, используемых при моделировании: $E1 = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости материала входного сегмента волновода (материал – сталь); $E2 = 1,3 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости материала выходного сегмента (материал – бронза); $\rho1 = 7800$ кг/м³ – плотность материала входного сегмента; $\rho2 = 8300$ кг/м³ – плотность материала выходного сегмента; $\phi10$ – половина центрального угла входного сегмента; d – половина угловой ширины переходного слоя между входным и выходным сегментами (в расчете принято $d = \pi/32$ рад = 5,625°).

При моделировании предполагается, что технология соединения сегментов волновода

обеспечивает формирование между ними тонкого переходного слоя с непрерывным изменением состава и физико-механических свойств (функционально-градиентного слоя). Примером подходящей технологии является диффузионная сварка. Задание постоянных в виде таблицы обеспечивает параметризацию модели, позволяющую исследовать влияние параметров материала на эксплуатационные характеристики волновода путем простого изменения их значений в таблице. Чтобы исключить рассмотрение внеплоскостных мод изгибных колебаний и антисимметричных мод, рассматривалась геометрическая модель волновода в виде четверти кольца с наложением симметричных граничных условий на плоскости разреза. После построения геометрической модели в разделе Physics → Subdomain Settings задавались следующие выражения для модуля упругости и плотности:

$$E1 + (E2 - E1) * \text{flc}2\text{hs}(\text{atan}2(y, x) + \pi/2 - \text{phi}0, d);$$

$$\text{rho}1 + (\text{rho}2 - \text{rho}1) * \text{flc}2\text{hs}(\text{atan}2(y, x) + \pi/2 - \text{phi}0, d).$$

Функция $\text{atan}2(y, x)$ используется для определения угловой координаты точки (x, y) по ее декартовым координатам, а $\text{flc}2\text{hs}(x, d)$ представляет собой сглаженный аналог ступенчатой функции Хевисайда, имеющий непрерывную вторую производную и плавно возрастающий от 0 до 1 на интервале $[-d; +d]$ [10, с. 150]. При описании свойств материала обычной функцией Хевисайда могут возникать проблемы со сходимостью МКЭ, обусловленные наличием у функции разрыва. Применение сглаженной функции Хевисайда хорошо согласуется с принятым выше допущением о непрерывности изменения физико-механических свойств материала в переходном слое между сегментами. Следует обратить внимание, что в конечно-элементной модели отсчет угловой координаты производится таким образом, что входному сечению волновода соответствует координата -90° , а выходному сечению – координата $+90^\circ$.

Для оптимизации волновода по коэффициенту усиления колебаний по амплитуде $K = |w(\pi/2)/w(-\pi/2)|$ (где $w(\varphi)$ – амплитуда радиальной составляющей колебательного смещения) производилась параметрическая прогонка

(Parametric Sweep) с варьированием центрального угла входного сегмента $2\text{phi}0$ в диапазоне от 6° до 174° с шагом 1° . Предельные значения центрального угла были выбраны таким образом, чтобы выполнялось неравенство

$$d < 2\text{phi}0 < \pi - d.$$

Для определения коэффициента усиления рассчитывались значения амплитуды радиальной составляющей колебательного смещения в точках 1 и 7, лежащих на образующей наружной цилиндрической поверхности волновода в его входном и выходном сечениях. Для этого в разделе Options → Integration Coupling Variables → Point Variables задавались две переменные $w1$ и $w7$ (в точках 1 и 7 соответственно), определяемые выражением

$$\text{with}(\text{num}, u) * \cos(\text{atan}2(y, x)) + \text{with}(\text{num}, v) * \sin(\text{atan}2(y, x)),$$

где $\text{with}(\text{num}, v)$ – функция, возвращающая значение переменной var для собственной формы колебаний с порядком num [10, с. 166]; u, v – принятые в COMSOL обозначения координатных составляющих перемещения по координатам x и y в глобальной декартовой системе координат xuz .

Порядку num собственной формы придавалось значение, соответствующее знакопостоянной моде колебаний (классификация собственных форм рассматривается далее в разделе «Результаты моделирования и их обсуждение»).

В разделе Solve → Parametric Sweep задавались параметр прогонки $\text{phi}0$, диапазон и шаг его изменения $\text{range}(6 * \pi/180, \pi/180, 174 * \pi/180)$ и переменные $w1$ и $w7$, подлежащие вычислению. Результаты записывались в текстовый файл с расширением $.log$, содержащий 4 столбца числовых значений, соответствующих переменным $\text{phi}0, \lambda$ (собственная частота колебаний), $w1$ и $w7$. Для каждого значения угла $\text{phi}0$ в файл записывалось 12 собственных частот (значение, заданное в разделе Solve → Solver Parameters в поле Desired number of eigenfrequencies – требуемое количество собственных частот), и поэтому столбцы, соответствующие переменным $\text{phi}0, w1$ и $w7$, содержали блоки из 12 последовательных повторяющихся значений. После удаления из файла текстовых комментариев и изменения расши-

рения на .rpt результаты из файла импортировались в программу Mathcad для дальнейшей обработки и визуализации.

Результаты моделирования и их обсуждение

В качестве численного примера рассмотрено моделирование волновода с центральным углом входного сегмента $2\phi_0 = 187,2^\circ$, радиусом средней линии $R = 29$ мм и толщиной в радиальном направлении $b = 2$ мм. По результатам предшествующих исследований для данных значений R и b и заданных выше свойств материала достигается максимальное значение коэффициента усиления колебаний по амплитуде [9]. В результате моделирования установ-

лено наличие двух типов собственных форм колебаний составных кольцевых волноводов:

1) знакопеременные собственные формы, визуально схожие с собственными формами изгибных колебаний однородных колец и характеризующиеся наличием узлов амплитуды колебательных смещений (в качестве примера на рис. 1а показана знакопеременная собственная форма, соответствующая частоте 29,58 кГц);

2) знакопостоянные собственные формы, не имеющие узлов амплитуды и являющиеся комбинацией изгибной деформации и деформации растяжения средней линии (в качестве примера на рис. 1б показана знакопостоянная собственная форма, соответствующая частоте 24,03 кГц).

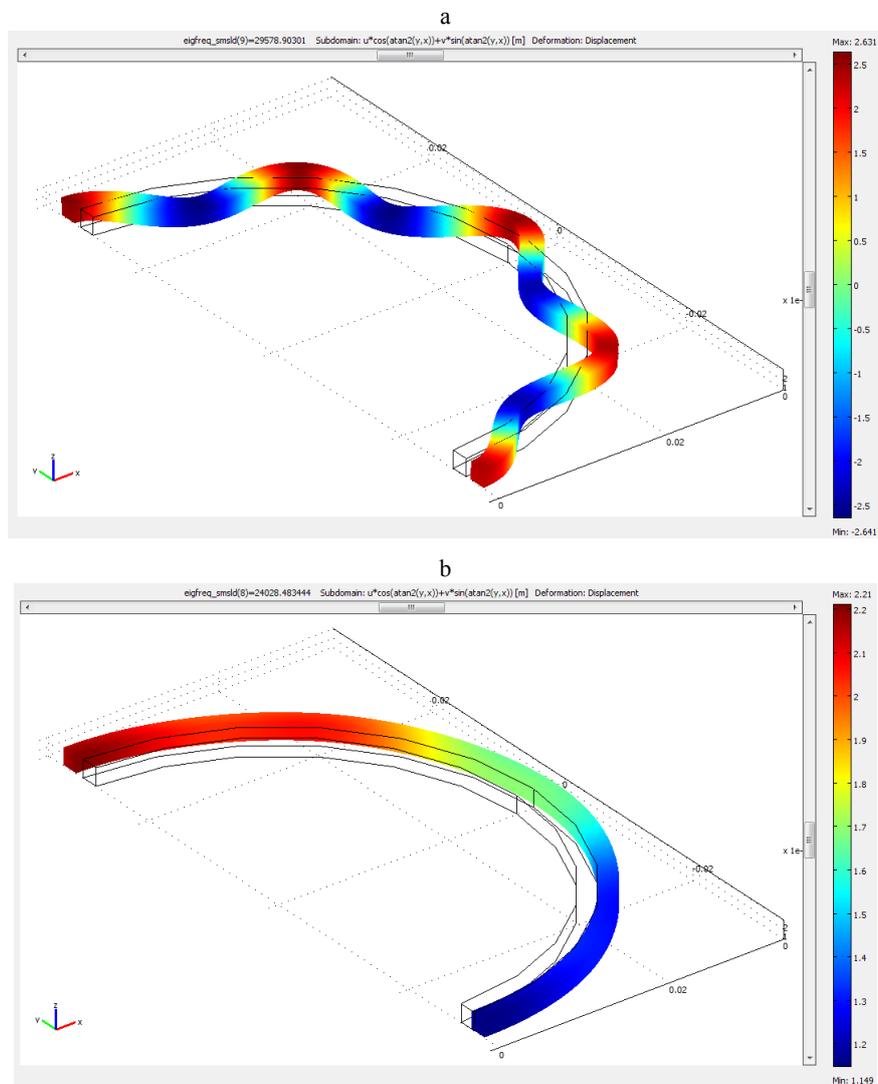


Рис. 1. Результаты расчета знакопеременной (а) и знакопостоянной (б) собственных форм колебаний

Fig. 1. Calculation results of variable-sign (a) and constant-sign (b) of natural vibration shapes

На рис. 1 представлено распределение амплитуды радиальной составляющей колебательного смещения, определяемой выражением

$$u * \cos(\text{atan } 2(y, x)) + v * \sin(\text{atan } 2(y, x)).$$

Знакопеременным собственным формам соответствуют близкие к единице значения коэффициента усиления, и по этой причине они не представляют практического интереса с точки зрения их использования в ультразвуковой технике. Например, для собственной формы, представленной на рис. 1а, коэффициент усиления $K = 1,08$. Знакопостоянным собственным формам соответствуют более высокие значения коэффициента усиления: например, для собственной формы, представленной на рис. 1б, $K = 1,88$. Вывод о наличии двух типов собственных форм колебаний согласуется с результатами, ранее полученными Д. А. Степаненко и соавторами с помощью метода передаточных матриц [8].

Собственная частота знакопостоянной моды $f = 24,03$ кГц, определенная с помощью МКЭ, с высокой точностью совпадает со значением $f = 24,01$ кГц, ранее полученным для волновода с теми же значениями параметров с помощью метода передаточных матриц [9]. Собственные формы колебаний, рассчитанные с использованием МКЭ и метода передаточных матриц, имеют качественно сходную форму (рис. 2, кривые 1, 2), однако метод передаточных матриц дает завышенные значения амплитуды (рис. 2, кривая 1).

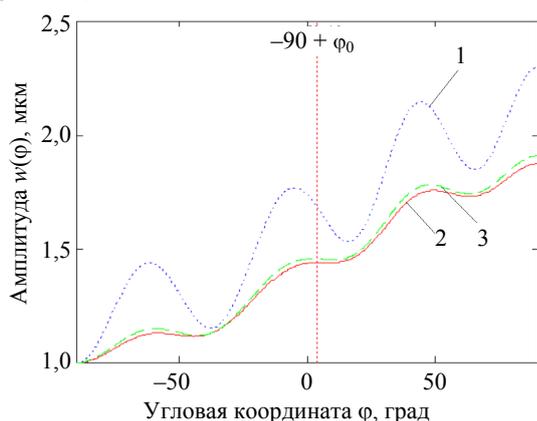


Рис. 2. Результаты расчета знакопостоянной моды $f = 24,03$ кГц

Fig. 2. Calculation results for constant-sign mode $f = 24.03$ kHz

Количественные различия между кривыми 1 и 2 на рис. 2 объясняются тем, что кривая 1 получена на основе уравнений колебаний типа

Эйлера – Бернулли. Более точными являются уравнения типа Тимошенко, дополнительно учитывающие такие факторы, как сдвиговая деформация и инерционный момент, связанный с вращением поперечного сечения. Как видно из рис. 2, при использовании уравнений колебаний типа Тимошенко расчетные значения амплитуды (кривая 3) также оказываются несколько выше значений, определенных с помощью МКЭ, однако количественная ошибка определения амплитуды снижается с 27,8 до 1,9 %.

Путем обработки результатов параметрической прогонки с помощью программы Mathcad получена зависимость коэффициента усиления колебаний по амплитуде $K = w_7/w_1$ от угла $\text{phi}i0$, представленная на рис. 3.

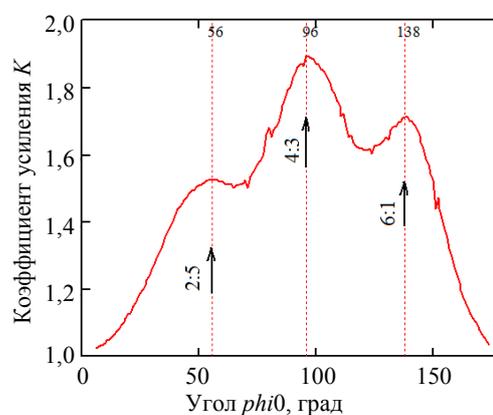


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления колебаний K от половинного значения $\text{phi}i0$ центрального угла входного сегмента волновода

Fig. 3. Dependence of vibration amplification factor K on half value of $\text{phi}i0$ of central angle in input segment of waveguide

Зависимость на рис. 3 качественно согласуется с зависимостью, ранее полученной с помощью метода передаточных матриц [9]. Оба метода дают близкие по величине оптимальные значения угла $\text{phi}i0$, при которых коэффициент усиления достигает максимума. При приближении $\text{phi}i0$ к значениям 0° и 180° коэффициент усиления стремится к единице, что соответствует однородному кольцу. Отношения 2:5, 4:3 и 6:1, указанные на рис. 3, представляют собой отношение $n_1:n_2$, где n_1, n_2 – число максимумов амплитуды для входного и выходного сегментов волновода соответственно: например, для собственной формы, представленной на рис. 2, $n_1:n_2 = 4:3$.

На практике рекомендуется выбирать значение центрального угла входного сегмента

волновода исходя из результатов расчета зависимости коэффициента усиления от угла таким образом, чтобы коэффициент усиления достигал своих максимальных значений. Что касается совершенствования существующих полуаналитических методов расчета и проектирования кольцевых волноводов, рекомендуется модифицировать их на основе уравнений колебаний типа Тимошенко, что позволит повысить точность расчета собственных форм колебаний и точность определения коэффициента усиления.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика моделирования и оптимизации составных кольцевых ультразвуковых волноводов с помощью метода конечных элементов.

2. На конкретном численном примере проведен сравнительный анализ данных, полученных как с использованием метода конечных элементов, так и с помощью метода передаточных матриц, который подтвердил корректность и достоверность результатов.

3. Сформулированы рекомендации по выбору оптимальных геометрических параметров составных кольцевых ультразвуковых волноводов и рекомендации по совершенствованию существующих полуаналитических методов их расчета и проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sonotrode für Ein Ultraschall-Bearbeitungsgerät: Europäische Patentanmeldung EP 0594541 A2, IPC B06B 3/00 / M. Bory, H. Bauer. Veröffentlichungstag der Anmeldung 27.04.94.
2. Machine Component: United States Patent 3015961, Cl. 74-1 / R. N. Roney. Patented 09.01.62.
3. Луговой, И. В. Разработка кольцевых концентраторов с переменной жесткостью для ультразвукового прошивания отверстий в хрупких материалах / И. В. Луговой. Минск, 2017. 27 с.
4. Степаненко, Д. А. Расчет и проектирование ультразвуковых акустических систем для использования в медицине и технике / Д. А. Степаненко. Минск, 2020. 323 с.
5. Усилитель упругих колебаний по амплитуде: Евразийский пат. EA 035595 B1, МПК B06B 3/02 / Д. А. Степаненко, К. А. Бунчук, А. С. Емельянова, М. А. Плескач, Н. В. Солодкая. Оpubл. 14.07.2020.
6. Amplifying Ultrasonic Waveguides: United States Patent US 8033173 B2, IPC G01N 24/00 / T. D. Ehlert, G. Bromfield, P. S. McNichols, N. R. Stegelmann. Patented 11.10.11.
7. Степаненко, Д. А. Методика расчета и возможные применения функционально-градиентных ультразвуковых волноводов / Д. А. Степаненко, В. Т. Минченя // Механика машин, механизмов и материалов. 2013. Т. 22, № 5. С. 19–23.

8. Исследование характеристик составных кольцевых концентраторов ультразвуковых колебаний с помощью метода передаточных матриц [Электронный ресурс] / Д. А. Степаненко [и др.] // Техническая акустика. 2018. № 2. Режим доступа: <http://www.ejta.org/archive/articles2018/stepanenko2.pdf>.
9. Оптимизация кольцевых концентраторов ультразвуковых колебаний / Д. А. Степаненко [и др.] // Приборостроение-2018: материалы Одиннадцатой Международ. науч.-техн. конф., Минск, 14–16 нояб. 2018 г. / Редкол. О. К. Гусев [и др.]. Минск, 2018. С. 328–329.
10. COMSOL Multiphysics User's Guide. Version 3.5. 2008 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://extras.csc.fi/math/comsol/3.5/doc/multiphysics/quick.pdf>.

Поступила 30.06.2021

Подписана в печать 31.08.2021

Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. Bory M., Bauer H. (1994) *Sonotrode für Ein Ultraschall-Bearbeitungsgerät*. Europäische Patentanmeldung EP 0594541 A2, IPC B06B 3/00 (in German).
2. Roney R. N. (1962) *Machine Component*. United States Patent 3015961, Cl. 74-1.
3. Lugovoy I. V. (2017) Development of Ring Hubs with Variable Stiffness for Ultrasonic Piercing of Holes in Brittle Materials. Minsk. 27 (in Russian).
4. Stepanenko D. A. (2020) *Calculation and Design of Ultrasonic Acoustic Systems for Use in Medicine And Technology*. Minsk, 2020. 323 (in Russian).
5. Stepanenko D. A., Bunchuk K. A., Emelyanova A. S., Pleskach M. A., Solodkaya N. V. (2020) *Amplifier of Elastic Oscillations in Amplitude*. Eurasian Patent EA 035595 B1 (in Russian).
6. Ehlert T. D., Bromfield G., McNichols P. S., Stegelmann N. R. (2011) *Amplifying Ultrasonic Waveguides*: United States Patent US 8033173 B2.
7. Stepanenko D. A., Minchenya V. T. (2013) Methodology for Calculation and Possible Applications of Functional-gradient Ultrasonic Waveguides. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 22 (5), 19–23 (in Russian).
8. Stepanenko D. A., Emel'yanova A. S., Pleskach M. A., Solodkaya N. V. (2018) Investigation of Characteristics of Composite ring Concentrators of Ultrasonic Vibrations Using Method of Transfer Matrices. *Tekhnicheskaya Akustika = Technical Acoustics*, (2). Available at: <http://www.ejta.org/archive/articles2018/stepanenko2.pdf> (in Russian).
9. Stepanenko D. A., Emel'yanova A. S., Pleskach M. A., Solodkaya N. V. (2018) Optimization of Ring Concentrators of Ultrasonic Oscillations. *PriBORostroenie-2018: Materialy Odinnadtsatoi Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 14–16 Noyab. 2018 g.* [Instrument Making – 2018: Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference, Minsk, November 14–16, 2018]. Minsk, 328–329 (in Russian).
10. *COMSOL Multiphysics User's Guide. Version 3.5. 2008*. Available at: <https://extras.csc.fi/math/comsol/3.5/doc/multiphysics/quick.pdf>.

Received: 30.06.2021

Accepted: 31.08.2021

Published online: 30.11.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-482-486>

УДК 621.315

Получение методом «горячей стенки» тонких пленок $Pb_xSn_{1-x}Te$ для создания ИК-фотоприемников

Кандидаты физ.-мат. наук, доценты В. А. Иванов^{1,2)}, В. В. Красовский¹⁾,
докт. физ.-мат. наук, доц. В. Ф. Гременок²⁾, Л. И. Постнова²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Сплавы теллурида свинца и олова ($Pb_xSn_{1-x}Te$) являются материалами с хорошими термоэлектрическими свойствами, а также полупроводниками, которые можно применять в качестве длинноволновых инфракрасных детекторов. Методом прямого плавления синтезирован поликристаллический теллурид сплавов $Pb_xSn_{1-x}Te$ ($0,05 \leq x \leq 0,80$). Тонкие пленки этих материалов были получены методом «горячей стенки» осаждением на стеклянные подложки Corning 7059 при $T_{sub} = (200-350)^\circ C$ и вакууме около 10^{-5} Торр. Микроструктура пленок исследовалась методами XRD, SEM и EDX. Рентгеновские спектры тонких пленок удовлетворительно соответствовали спектрам порошковой мишени и указывали на отсутствие бинарных фаз. Пленки демонстрировали естественную кубическую кристаллическую структуру. С возрастанием содержания свинца увеличивается параметр элементарной ячейки кристаллов. Установленная линейная зависимость между параметром элементарной ячейки и элементарным составом соответствует закону Vegard. SEM-анализ показал, что пленки являются поликристаллическими, имеют столбчатую структуру, плотно упакованы и обладают хорошей механической адгезией. Размеры зерен зависят от химического состава и температуры подложки. Электрические измерения показали, что выращенные пленки – это невырожденные полупроводники p -типа проводимости. Проводимость пленок находилась в диапазоне $\sigma = (3 \cdot 10^1) - (1 \cdot 10^4) \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Увеличение концентрации свинца приводит к снижению электропроводности. Холловская подвижность в выращенных тонких пленках в диапазоне изменения содержания свинца от ~10 до ~23 ат. % возрастает, а при дальнейшем увеличении до ~33 ат. % – падает. При этом наиболее сильная зависимость падения подвижности от роста температуры наблюдается для пленок с большим содержанием свинца и объясняется преобладающим рассеянием носителей заряда на колебаниях кристаллической решетки. Для образца со средней концентрацией свинца в температурной зависимости подвижности наблюдается альтернативное влияние двух механизмов рассеяния: на ионах примеси и на фононах.

Ключевые слова: метод «горячей стенки», полупроводники $Pb_xSn_{1-x}Te$, тонкие пленки, структурные и электрические свойства

Для цитирования: Получение методом «горячей стенки» тонких пленок $Pb_xSn_{1-x}Te$ для создания ИК-фотоприемников / В. А. Иванов [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 482–486. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-482-486>

Production of Thin $Pb_xSn_{1-x}Te$ Films by “Hot Wall” Method for Creating IR-Photodetectors

V. A. Ivanov^{1,2)}, V. V. Krasovskii¹⁾, V. F. Gremenok²⁾, L. I. Postnova²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Alloys of lead and tin telluride ($Pb_xSn_{1-x}Te$) are materials with good thermoelectric properties, as well as semiconductors that can be used as long-wave infrared detectors. Polycrystalline telluride of $Pb_xSn_{1-x}Te$ ($0.05 \leq x \leq 0.80$) alloys

Адрес для переписки

Красовский Василий Васильевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-72-39
vkrasovskii@bntu.by

Address for correspondence

Krasovskii Vasilii V.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-72-39
vkrasovskii@bntu.by

has been synthesized by direct fusion technique. Thin films of these materials have been obtained by the hot wall method depositing Corning 7059 on glass substrates at $T_{sub} = (200-350)$ °C and vacuum of about 10^{-3} Torr. The microstructure of the films has been investigated by XRD, SEM and EDX methods. The X-ray spectra of thin films have been in satisfactory agreement with the spectra of the powder target and indicated the absence of binary phases. The films have shown a natural cubic crystalline structure. While increasing the lead content, the unit cell parameter of the crystal also increases. The established linear relationship between the unit cell parameter and the elemental composition corresponds to Vegard's law. The SEM analysis has shown that the films are polycrystalline, have a columnar structure, are tightly packed and have good mechanical adhesion. The grain size depends on the chemical composition and temperature of the substrate. The electrical measurements have shown that the grown films are non-degenerate semiconductors of p-type conductivity. The conductivity of the films was in the range of $\sigma = (3 \cdot 10^1) - (1 \cdot 10^4) \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. An increase of lead concentration leads to a decrease in electrical conductivity. Hall mobility in the grown thin films increases in the range of changes in the lead content from ~10 to ~23 at. %, and decreases with a further increase to ~33 at. %. At the same time, the strongest dependence of the decrease in mobility on an increase in temperature increase is observed for films with a high lead content and is explained by the predominant scattering of charge carriers by vibrations of the crystal lattice. For a sample with an average lead concentration, an alternative effect of two scattering mechanisms is observed in the temperature dependence of the mobility: by impurity ions and by phonons.

Keywords: “hot wall” method, $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ semiconductors, thin films, structural and electric properties

For citation: Ivanov V. A., Krasovskii V. V., Gremenok V. F., Postnova L. I. (2021) Production of Thin $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ Films by “Hot Wall” Method for Creating IR-Photodetectors. *Science and Technique*. 20 (6), 482–486. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-482-486> (in Russian)

Введение

Полупроводниковые соединения $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}\text{PbTe}$ и SnTe обладают хорошими термоэлектрическими свойствами, а также интересны как потенциальные материалы для длинноволновых инфракрасных детекторов [1–3]. Ширина запрещенной зоны этих материалов изменяется от $E_g = 0,18$ eV для SnTe до $E_g = 0,32$ eV для PbTe [4, 5]. Эти соединения кристаллизуются в кубической решетке типа NaCl и являются во многих отношениях аналогами [6, 7]. По сходству структур соединений SnTe и PbTe и близости величин постоянных кристаллических решеток можно предположить наличие между этими соединениями непрерывного ряда твердых растворов [8]. PbTe кристаллизуется в составе, близком к стехиометрическому, и необходимая концентрация носителей тока получается добавлением соответствующих примесей (например, галогенов для получения n - PbTe и щелочных металлов для получения p - PbTe) [9]. Вакансии в подрешетке свинца являются акцепторами, а в подрешетке теллура – донорами. В специально нелегированных образцах электрические свойства, в первую очередь, определяются концентрацией избыточных атомов теллура и свинца. SnTe всегда кристаллизуется с большой концентрацией вакансий в металлической подрешетке. Вакансии металла в кристаллической решетке образуют в запрещенной зоне этого полупроводникового соединения акцепторные энергетические уровни, и данное полупроводниковое соединение имеет p -тип проводимости. Изменение состава системы PbTe-SnTe приводит к изменению всех свойств. Поэтому исследование характеристик такого полупроводникового соединения, полу-

ченного в виде тонких пленок, представляет большой интерес как для термоэлектрического, так и для фотоэлектрического применения.

Получение и исследование пленок

Для получения пленок PbSnTe выбран метод термического вакуумного нанесения типа «горячей стенки» [10], когда перенос паров испаряемого материала мишени проходит в цилиндрическом канале, температура стенок которого не ниже температуры испарителя. В качестве подложек использовали стекла марки Corning 7059, исходным материалом для напыления были порошки поликристаллических слитков, предварительно синтезированные методом сплавления в вакуумированных кварцевых ампулах. Для определения электрических свойств полученных пленок проведены исследования температурных зависимостей электропроводности и подвижности носителей заряда.

Кристаллическую структуру поликристаллических пленок исследовали рентгеновской дифрактометрией (XRD), используя дифрактометр Siemens D-5000 с CuK_α -источником. Идентификацию фаз проводили сравнением экспериментально установленных межплоскостных расстояний d с данными таблиц JCPDS. Элементный состав пленок исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Steeoscan F-360 со спектрометром EDX 10000 с точностью около 2 %. Температурные зависимости электропроводности и подвижности носителей заряда регистрировались в температурном интервале 100–400 К, при этом подвижность носителей заряда определяли методом Холла в магнитном поле 1,72 Тл.

Анализ результатов

Полученные поликристаллические пленки толщиной 1,0–3,0 мкм были однофазными с кубической структурой. Микроструктура пленок имела вид плотноупакованных столбчатых зерен с направлением роста перпендикулярно подложке. Размеры в поперечнике зерен – в интервале 0,1–1,3 мкм в зависимости от элементного состава и режимов получения пленок. При повышении температуры подложки до 200–350 °С средняя шероховатость поверхности пленок увеличивалась от 10 до 40 нм. Все пленки имели избыток атомов теллура. На рис. 1 приведены микрофотографии поверхности и скола пленки одного из составов.

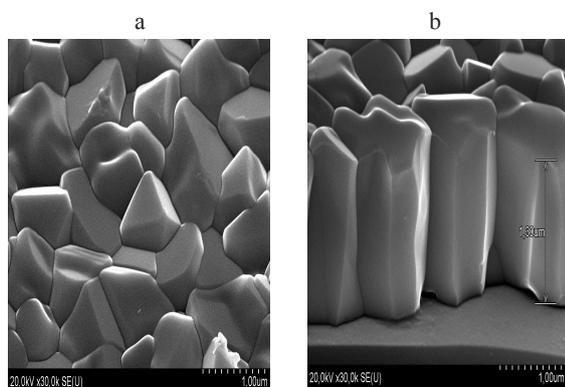


Рис. 1. Микрофотографии поверхности (а) и скола (б) пленки $Pb_{0,79}Sn_{0,21}Te$
 Fig. 1. Micrographs of surface (a) and film cleavage (b) $Pb_{0,79}Sn_{0,21}Te$

Как видно из рис. 1, пленка имеет столбчатую микроструктуру, которая является типичной для пленок и других составов. Только с изменением состава и температур подложек изменяются размеры зерен. Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что все полученные пленки были поликристаллическими, однофазными и содержали только фазу кубической структуры (типа NaCl), а посторонние кристаллические фазы отсутствовали. Параметр элементарной ячейки $Pb_xSn_{1-x}Te$, рассчитанный по рентгенограммам пленок, с увеличением x изменялся от $a = 6,311 \text{ \AA}$ для состава пленки $Pb_{0,05}Sn_{0,95}Te$ до $a = 6,419 \text{ \AA}$ для $Pb_{0,80}Sn_{0,20}Te$. Полученные значения параметров решетки находились в хорошем соответствии с данными, приведенными в базе JCPDS для кристаллов $PbSnTe$, а также с данными, представленными в литературе для пленок $PbSnTe$, полученных различными методами. По результатам анализа методом наименьших квадратов установлена линейная зависимость между параметрами элементарной ячейки и элементным составом

пленок $Pb_xSn_{1-x}Te$, что согласуется с законом Вегарда.

Исследования электрических свойств пленок проводили на трех их образцах с составами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Атомный состав исследуемых пленок
 Atomic composition of the studied films

Номер образца	Pb, ат. %	Sn, ат. %	Te, ат. %
1	9,78	37,75	52,47
2	23,14	22,36	54,50
3	32,91	15,68	51,41

На рис. 2 приведены температурные зависимости электропроводности для исследуемых пленок. В соответствии с табл. 1 и рис. 2 увеличение концентрации атомов свинца приводит к уменьшению электропроводности.

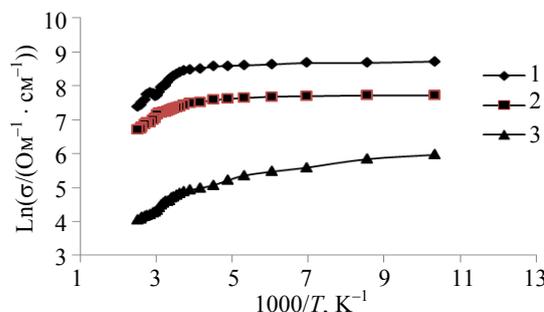


Рис. 2. Температурные зависимости электропроводности пленок 1, 2, 3 с составами согласно табл. 1

Fig. 2. Temperature dependences of electrical conductivity of films 1, 2, 3 with the composition according to Table 1

Как следует из рис. 2, в области низких температур 100–250 К электропроводность слабо зависит от температуры. Дальнейшее повышение температуры ведет к уменьшению электропроводности, т. е. проявляется металлический характер, причем с ростом в пленке концентрации атомов свинца металлический характер электропроводности начинает проявляться при более низких температурах.

Электропроводность полупроводника кроме концентрации носителей определяется также их подвижностью [11]. Наиболее эффективными центрами рассеяния электронов и дырок в полупроводнике являются тепловые колебания атомов решетки и заряженные ионы примесей. Роль примесей могут играть дефекты кристаллической решетки. При рассеянии на акустических колебаниях атомов подвижность $\mu = A(kT)^{-3/2}$, где A – коэффициент, не зависящий от температуры и энергии. При рассеянии носителей заряда на заряженных ионах примеси подвижность $\mu = B(kT)^{3/2}$, где B – коэффициент,

также не зависящий от температуры и энергии. Переход от примесного рассеяния носителей заряда к решеточному происходит при тем более высоких температурах, чем больше концентрация заряженных центров в полупроводнике. Если учитывать только рассеяние на ионах примеси и тепловых колебаниях решетки, можно прийти к выводу, что подвижность с повышением температуры растет пропорционально $T^{3/2}$, проходит через максимум и затем уменьшается пропорционально $T^{-3/2}$. Если в полупроводнике действуют оба механизма рассеяния, тогда

$$1/\mu = AT^{-3/2} + BT^{3/2}, \quad (1)$$

где A, B – величины, не зависящие от температуры [12].

Исследования эффекта Холла для пленок позволили определить величины подвижностей и концентраций носителей заряда. Максимальные значения подвижности получены на пленке 2. На рис. 3а, б показаны температурные зависимости подвижностей и концентраций носителей заряда для пленок трех составов.

Как видно из рис. 3а, температурные зависимости подвижности для пленок с различными составами проявляются не одинаково. Наиболее характерная зависимость у пленки 2. С повышением температуры подвижность увеличивается, достигая максимума при ~ 220 К, а далее начинает уменьшаться. Такой характер зависимости можно объяснить различными механизмами рассеяния носителей заряда при изменении температуры пленки. При невысоких

температурах рассеяние носителей заряда происходит на дефектах, в роли которых выступают вакансии атомов металла, так как пленки имеют p -тип проводимости за счет избытка атомов теллура. При относительно высоких температурах начинает преобладать механизм рассеяния носителей на тепловых колебаниях решетки, и подвижность с ростом температуры уменьшается. При этом, как видно из рис. 3б, концентрация носителей заряда с ростом температуры медленно уменьшается, что свидетельствует о металлическом характере электропроводности. На пленках 1 и 3 температурная зависимость подвижности проявляется иначе. Если для пленок с небольшой концентрацией атомов свинца с повышением температуры подвижность уменьшается слабо, то для относительно больших концентраций свинца подвижность уменьшается более интенсивно во всем температурном интервале. Концентрации носителей заряда в пленках 1 и 3 с ростом температуры изменяются слабо, но для пленки 3 наблюдается небольшое температурное повышение концентрации с ростом температуры. Отличие температурной зависимости подвижности пленки 2 можно объяснить более высокой концентрацией вакансий атомов металла из-за относительно большой концентрации атомов теллура. Для пленок 1 и 3 согласно (1) во всем температурном интервале одновременно действуют два механизма рассеяния носителей заряда с небольшим преобладанием механизма рассеяния на колебаниях решетки.

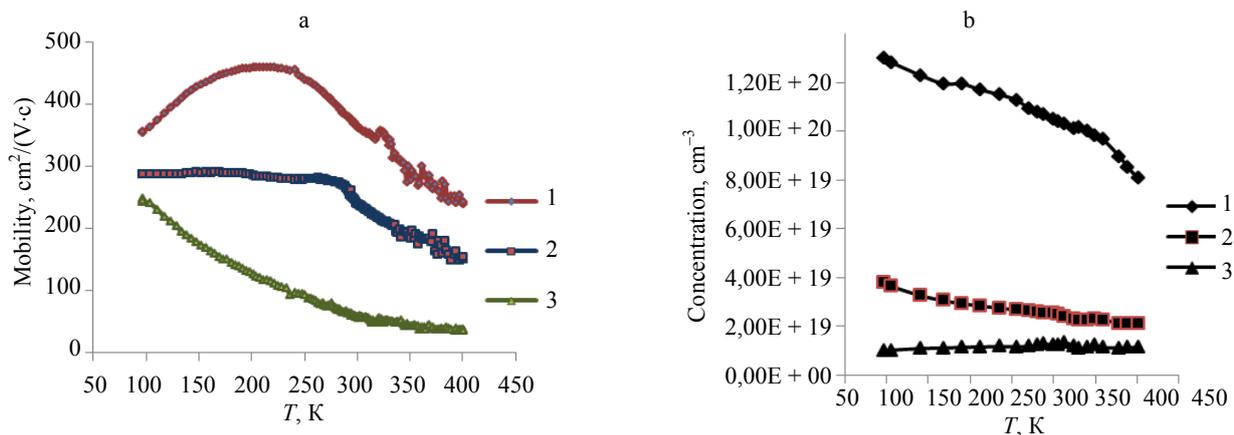


Рис. 3. Температурные зависимости подвижности (а) и концентрации носителей заряда (б) в пленках 1, 2, 3 с составами согласно табл. 1

Fig. 3. Temperature dependences of mobility (a) and charge carrier concentration (b) in films 1, 2, 3 with the composition according to Table 1

ВЫВОД

В результате проведенных исследований установлено, что применение метода термического вакуумного нанесения типа «горячей

стенки» позволяет получить однородную по толщине и свойствам пленку $Pb_xSn_{1-x}Te$ по всей поверхности стеклянной подложки. Исследованные пленки являются невырожденными по-

лупроводниками p -типа проводимости. Увеличение концентрации атомов свинца приводит к уменьшению электропроводности. С ростом концентрации атомов теллура подвижность носителей заряда увеличивается, при этом происходит преобладание механизма рассеяния носителей заряда на тепловых колебаниях решетки с повышением температуры пленок. Полученные результаты указывают на перспективность развития работ по применению тонких пленок $Pb_xSn_{1-x}Te$ для создания различных тонкопленочных преобразователей. Перспективность предложенного метода получения пленок обусловлена возможностью применения на всех стадиях технологического процесса промышленных методов, обеспечивающих получение однородных слоев большой площади.

ЛИТЕРАТУРА

- Epitaxial Lead Chalcogenides on Si for Mid IR Detectors and Emitters Including Cavities / H. Zogg [et al.] // *Journal of Electronic Materials*. 2008. Vol. 37, No 9. P. 1497–1503. <https://doi.org/10.1007/s11664-008-0429-0>.
- Gelbstein, Y. $Pb_{1-x}Sn_xTe$ Alloys Application Considerations / Y. Gelbstein // *Journal of Electronic Materials*. 2011. Vol. 40, No 5. P. 533–536. <https://doi.org/10.1007/s11664-010-1435-6>.
- Dmitriev, A. V. Current Trends in the Physics of Thermoelectric Materials / A. V. Dmitriev, I. P. Zvyagin // *Physics-Uspexhi*. 2010. Vol. 53, No 8. P. 789. <https://doi.org/10.3367/ufne.0180.201008b.0821>
- Experimental Observation of Band Inversion in the $PbSnTe$ System / S. O. Ferreira [et al.] // *Journal of Applied Physics*. 1999. Vol. 86, No 12. P. 7198–7200. <https://doi.org/10.1063/1.371815>.
- Molecular Beam Epitaxial Growth of $PbTe$ and $PbSnTe$ on Si Substrates for Heterojunction Infrared Detectors / C. Boschetti [et al.] // *Infrared Physics & Technology*. 2001. Vol. 42, No 2. P. 91–99. [https://doi.org/10.1016/s1350-4495\(01\)00061-5](https://doi.org/10.1016/s1350-4495(01)00061-5).
- Li, B. Crystal Structure, Morphology, Depth Profile of Elements and Mid-Infrared Optical Constants of Mild Lead Telluride Film / B. Li, S. Zhang, L. Zeng // *Applied Physics A*. 2003. Vol. 76, No 6. P. 965–968. <https://doi.org/10.1007/s00339-002-1948-9>
- Rafea, M. A. Effect of Substrate Type and Optimization of the Preparation Condition for $PbSnTe$ Films Used as IR Photoconductors / M. A. Rafea, S. F. Mounir, R. Labusch // *Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications*. 2009. Vol. 3, No 6. P. 543–552.
- Terra, F. S. Photoconductivity and Electrical Properties of $Pb_xSn_{1-x}Te$ Thin Films / F. S. Terra, M. Abdel-Rafea, M. Monir // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2001. Vol. 12, No 10. P. 561–567.
- Low Temperature Thermal, Thermoelectric, and Thermomagnetic Transport in Indium Rich $Pb_xSn_{1-x}Te$ Alloys / V. Jovovic [et al.] // *Journal of Applied Physics*. 2008. Vol. 103, No 5. P. 053710–053717. <https://doi.org/10.1063/1.2890150>.
- Electrical Properties of Hot Wall Deposited $PbTe-SnTe$ Thin Film / V. A. Ivanov [et al.] // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2013. Vol. 4, No 6. P. 816–822.
- Effect of Substrate Temperature on the Galvanomagnetic, Photoelectrical and Optical Properties of $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ Thin Films / M. A. Rafea [et al.] // *Chalcogenide Letters*. 2009. Vol. 6, No 3. P. 115–123.
- Deen, M. L. Electrical Characterization of Semiconductor Materials and Devices-Review / M. J. Deen, F. Pascal // *Journal of Mater Sci: Mater Electron*. 2006. Vol. 17, No 8. P. 549–575. <https://doi.org/10.1007/s10854-006-0001-8>.

Поступила 11.12.2020

Подписана в печать 21.04.2021

Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

- Zogg H., Arnold M., Felder F., Rahim M., Ebnetter C., Zaslavitskiy I., Quack N., Blunier S., Dual J. (2008) Epitaxial Lead Chalcogenides on Si for Mid IR Detectors and Emitters Including Cavities. *Journal of Electronic Materials*, 37 (9), 1497–1503. <https://doi.org/10.1007/s11664-008-0429-0>
- Gelbstein Y. (2011) $Pb_{1-x}Sn_xTe$ Alloys Application Considerations. *Journal of Electronic Materials*, 40 (5), 533–536. <https://doi.org/10.1007/s11664-010-1435-6>
- Dmitriev A. V., Zvyagin I. P. (2010) Current Trends in the Physics of Thermoelectric Materials. *Physics-Uspexhi*, 53 (8), 789. <https://doi.org/10.3367/ufne.0180.201008b.0821>.
- Ferreira S. O., Abramof E., Motisuke P., Rappl P. H. O., Closs H., Ueta A. Y., Boschetti C., Bandeira I. N. (1999) Experimental Observation of Band Inversion in the $PbSnTe$ System. *Journal of Applied Physics*, 86 (12), 7198–7200. <https://doi.org/10.1063/1.371815>.
- Boschetti C., Bandeira I. N., Closs H., Ueta A. Y., Rappl P. H. O., Motisuke P., Abramof E. (2001) Molecular Beam Epitaxial Growth of $PbTe$ and $PbSnTe$ on Si Substrates for Heterojunction Infrared Detectors. *Infrared Physics & Technology*, 42 (2), 91–99. [https://doi.org/10.1016/s1350-4495\(01\)00061-5](https://doi.org/10.1016/s1350-4495(01)00061-5).
- Li B., Zhang S., Zeng L. (2003) Crystal Structure, Morphology, Depth Profile of Elements and Mid-Infrared Optical Constants of Mild Lead Telluride Film. *Applied Physics A*, 76 (6), 965–968. <https://doi.org/10.1007/s00339-002-1948-9>.
- Rafea M. A., Mounir S. F., Labusch R. (2009) Effect of Substrate Type and Optimization of the Preparation Condition for $PbSnTe$ Films Used as IR Photoconductors. *Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications*, 3 (6), 543–552.
- Terra F. S., Abdel-Rafea M., Monir M. (2001) Photoconductivity and Electrical Properties of $Pb_xSn_{1-x}Te$ Thin Films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 12 (10), 561–567.
- Jovovic V., Thiagarajan S. J., Heremans J. P., Komissarova T., Khokhlov D., Nicorici A. (2008) Low Temperature Thermal, Thermoelectric, and Thermomagnetic Transport in Indium Rich $Pb_xSn_{1-x}Te$ Alloys. *Journal of Applied Physics*, 103 (5), 053710–053717. <https://doi.org/10.1063/1.2890150>.
- Ivanov V. A., Gremenok V. F., Seidi H. G., Zimin S. P., Gorkachev E. S. (2013) Electrical Properties of Hot Wall Deposited $PbTe-SnTe$ Thin Film. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 4 (6), 816–822.
- Rafea M. A., Terra F. S., Mounir M., Labusch R. (2009) Effect of Substrate Temperature on the Galvanomagnetic, Photoelectrical and Optical Properties of $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ Thin Films. *Chalcogenide Letters*, 6 (3), 115–123.
- Deen M. J., Pascal F. (2006) Electrical Characterization of Semiconductor Materials and Devices-Review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 17 (8), 549–575. <https://doi.org/10.1007/s10854-006-0001-8>.

Received: 11.12.2020

Accepted: 21.04.2021

Published online: 30.11.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-487-492>

УДК 642.2:66

Восстановление аппаратной функции спектральных колориметров с помощью методов регуляризации

Кандидаты техн. наук, доценты М. А. Раджабова¹⁾, Б. И. Ешматова¹⁾,
Н. К. Бабаназарова²⁾

¹⁾Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
(Ташкент, Республика Узбекистан),

²⁾Бухарский инженерно-технологический институт (Бухара, Республика Узбекистан)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Рассмотрена задача определения спектральной характеристики контролируемого образца в условиях ограниченной априорной информации с использованием методов регуляризации. Изменение состояния поверхности оптических элементов существенно увеличивает рассеяние света, поэтому нужен регулярный учет величины рассеянного света в световом потоке, отраженном от поверхности как измеряемого, так и сравнительного образцов. Преобразование светового потока в электрический сигнал фотоприемника также может происходить нелинейно. Это требует разработки такого метода измерения, который бы учитывал как рассеянный свет, так и различные нелинейности измерительной схемы. Известно, что математическая модель измерения описывается интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода, его решение в условиях принятых предположений рекомендуется искать в виде матричного уравнения с использованием рекуррентной процедуры. Принимая во внимание, что оценивание погрешностей исходных данных в уравнении связано с определенными трудностями, в рассматриваемом случае параметр регуляризации целесообразно определять на основе способа квазиоптимальности. Характерным недостатком известных аналитических и экспериментальных методов определения аппаратной функции спектрального прибора является то, что они не учитывают ее изменение во время эксплуатации. Поскольку реальная аппаратная функция прибора обычно отличается от кривой Гаусса, использование аппаратных функций в виде аналитических зависимостей не всегда дает желаемый результат, а для экспериментальных методов требуется специальная аппаратура с квазимонохроматическим источником излучения. В статье предложен алгоритм восстановления аппаратной функции спектрального прибора, основанный на регулярных методах решения некорректных задач. Оценку матричного оператора аппаратной функции можно получить на основе явных алгоритмов оценивания метода наименьших квадратов. Указана целесообразность выбора такого значения параметра регуляризации, которое минимизирует принятую характеристику точности решения.

Ключевые слова: колориметры, отражающие образцы, пропускающие образцы, фотометрический шар, рассеяние света, фотометрическая шкала, калибровка, спектральная характеристика, аппаратная функция, уравнение Фредгольма, некорректные задачи, байесовский подход, параметр регуляризации

Для цитирования: Раджабова, М. А. Восстановление аппаратной функции спектральных колориметров с помощью методов регуляризации / М. А. Раджабова, Б. И. Ешматова, Н. К. Бабаназарова // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 487–492. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-487-492>

Restoration of Hardware Function of Spectral Colorimeters Using Regularization Methods

M. A. Radjabova¹⁾, B. I. Eshmatova¹⁾, N. K. Babanazarova²⁾

¹⁾Tashkent State Technical University named after Islam Karimov (Tashkent, Republic of Uzbekistan),

²⁾Bukhara Institute of Engineering and Technology (Bukhara, Republic of Uzbekistan)

Abstract. The problem of determining the spectral characteristic of a controlled sample under conditions of limited a priori information using regularization methods is considered in the paper. A change in the state of the surface of optical elements

Адрес для переписки

Бабаназарова Наргиса Камиловна
Бухарский инженерно-технологический институт
ул. К. Муртазаева, 15,
200117, г. Бухара, Республика Узбекистан
Тел.: +99 891 406-00-09
nargisa2003@list.ru

Address for correspondence

Babanazarova Nargisa K.
Bukhara Institute of Engineering and Technology
15, K. Murtazaev str.,
200117, Bukhara, Republic of Uzbekistan
Tel.: +99 891 406-00-09
nargisa2003@list.ru

significantly increases the light scattering, so it is necessary regularly to take into account the amount of scattered light in the light flux reflected from the surface and the measured and comparative samples. The conversion of the light flux into the electrical signal of the photodetector can also occur non-linearly. This requires the development of such measurement method that considers both the scattered light and various non-linearities of the measuring circuit. It is known that the mathematical model of measurement is described by the Fredholm integral equation of the first kind, its solution under the accepted assumptions is recommended to be sought in the form of a matrix equation using a recurring procedure. With regard to the fact that the estimation of the initial data errors in the equation is associated with certain difficulties, in the case under consideration, it is advisable to determine the regularization parameter based on the method of quasi-optimality. A characteristic disadvantage of the known analytical and experimental methods for determining the hardware function of a spectral device is that they do not take into account its change during operation. Since the actual hardware function of the device usually differs from the Gaussian curve, the use of hardware functions in the form of analytical dependencies does not always give the desired result, and for experimental methods, special equipment with a quasi-monochromatic radiation source is required. An algorithm for restoring the hardware function of a spectral device based on regular methods for solving ill-posed problems is proposed. The estimation of the matrix operator of the hardware function is proposed to be obtained on the basis of explicit least squares estimation algorithms. The expediency of choosing a value of the regularization parameter that minimizes the accepted characteristic of the accuracy of the solution is indicated.

Keywords: colorimeters, reflective samples, transmissive samples, photometric ball, light scattering, photometric scale, calibration, spectral characteristic, hardware function, Fredholm equation, incorrect tasks, Bayesian approach, regularization parameter

For citation: Radjabova M. A., Eshmatova B. I., Babanazarova N. K. (2021) Restoration of Hardware Function of Spectral Colorimeters Using Regularization Methods. *Science and Technique*. 20 (6), 487–492. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-487-492> (in Russian)

Введение

Разработка колориметров с заданными эксплуатационными характеристиками, такими как стабильность и точность, условия освещения и наблюдения, форма контролируемых изделий, высокое быстродействие, требует оптимизации их схемных и конструктивных параметров [1, 2]. Оптические схемы фотоэлектрических колориметров предполагают в своем составе различные оптические элементы, на которых происходит рассеяние света. Изменение состояния поверхности оптических элементов, например оседание пыли, существенно увеличивает рассеяние света. Поэтому возникает задача регулярного учета величины рассеянного света в световом потоке, отраженном от поверхности как измеряемого, так и сравнительного образцов. Преобразование светового потока в электрический сигнал фотоприемника также может происходить нелинейно. Все это требует разработки такого метода калибровки и измерения, который бы учитывал как рассеянный свет, так и различные нелинейности измерительной схемы, предполагая, что она содержит измерительный и сравнительный каналы.

Калибровка фотометрической шкалы спектрального прибора

Световой поток, отраженный измеряемым образцом в телесный угол ω , определяется по формуле

$$\Phi_{\text{и}}(\lambda) = \beta_{\text{и}}(\lambda) E(\lambda) \frac{d^2}{4} \omega \cos \alpha, \quad (1)$$

где d – диаметр измеряемого отверстия шара; $E(\lambda)$ – освещенность внутренней поверхности фотометрического шара; α – угол между нормалью к образцу и направлением наблюдения; $\beta_{\text{и}}(\lambda)$ – спектральный апертурный коэффициент отражения измеряемого образца.

Соотношение (1) учитывает влияние рассеянного света внутри фотометрического шара и изменение освещенности в шаре при образцах с различными значениями $\beta_{\text{и}}(\lambda)$ [3]. Если установлен режим измерения прозрачных образцов, то конечная точка определяется при отсутствии образца в измерительном канале ($\tau(\lambda_i) = 100\%$), а начальная – установкой непрозрачной заслонки ($\tau(\lambda_i) = 0\%$). В режиме измерения отражающих образцов конечная точка фотометрической шкалы определяется по «белому» стеклу с известным спектральным коэффициентом отражения, а начальная – по специальному «черному» образцу с ловушкой.

Значения спектральных коэффициентов отражения «белого» и «черного» образцов хранятся в памяти микропроцессора прибора в течение всего времени, на которое действителен аттестат на образец, а соотношения сигналов фотоприемника при измерении исследуемых «белого» и «черного» образцов, полученные в результате калибровки, – в оперативной па-

мнети устройства в течение гарантированного времени, за которое нестабильность не превысит установленную величину.

Уменьшить погрешность, обусловленную нелинейностью фотометрической шкалы, можно, производя калибровку фотометрической шкалы не в двух точках, а в нескольких, т. е. аппроксимируя нелинейную фотометрическую шкалу рядом прямых с различными наклонами. Этими вопросами занимались разработчики фотометрических колориметров «Спектротон» и «Пульсар» ОКБА НПО «Химвтоматика» (г. Чирчик, Узбекистан) совместно с исследователями Ташкентского государственного технического университета [4, 5]. Такой подход может значительно уменьшить систематическую погрешность, обусловленную нелинейностью фотометрической шкалы, но требует значительно большего объема памяти. Кроме того, увеличивается время процедуры калибровки. Помимо перечисленных выше фактов, полуавтоматическая калибровка учитывает нестабильность электронных схем, изменение чувствительности фотоприемника и т. д.

Алгоритм определения спектральной характеристики методом регуляризации

Совершенствование микропроцессорной техники предполагает замену аппаратного исполнения ряда узлов и схем прибора вычислительными и управляющими процедурами [6]. Известно, что линейная математическая модель оптического измерения описывается интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода

$$u(\lambda) = \int_a^b A(\lambda, \lambda') \tau(\lambda') d\lambda', \quad c \leq \lambda \leq d, \quad (2)$$

где $u(\lambda)$ – измеренная спектральная характеристика; $A(\lambda, \lambda')$ – аппаратная функция, характеризующая реальный измерительно-вычислительный комплекс; $\tau(\lambda')$ – истинная спектральная характеристика образца; a, b – границы истинного спектра; c, d – границы экспериментального спектра.

Пусть значения точного решения $\tau(\lambda')$ в точках λ'_j ($j = \overline{1, n}$) представляют собой n -мер-

ный вектор $\tau = [\tau(\lambda'_1), \tau(\lambda'_2), \dots, \tau(\lambda'_n)]$. Используя известные квадратурные формулы вычисления определенных интегралов [4], основное интегральное уравнение (2) можно представить в матричной форме

$$A\tau = u, \quad (3)$$

где A – прямоугольная матрица размерности $m \times n$; $u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T$ – вектор измерений размерности m .

Будем считать, что вместо точной правой части \bar{u} уравнения (3) задан $u = \bar{u} + \xi$, где шум измерения ξ , не коррелированный с u , имеет нулевое среднее и ковариационную матрицу V_ξ , а также подчиняется нормальному распределению. Кроме того, будем полагать, что априорная информация о векторе τ задана математическим ожиданием τ_0 и ковариационной матрицей Γ_0 . Следуя байесовскому подходу, в условиях принятых предположений искомое решение τ с учетом обратимости матриц Γ_0 и V_ξ можно определить из уравнения [7]

$$(\Gamma_0^{-1} + A^T V_\xi^{-1} A) \tau = A^T V_\xi^{-1} u + \Gamma_0^{-1} \tau_0. \quad (4)$$

Однако в большинстве практических случаев априорное распределение вектора τ неизвестно. В этих условиях целесообразно искомое решение τ определять из системы алгебраических уравнений вида

$$(\alpha G + A^T V_\xi^{-1} A) \tau = A^T V_\xi^{-1} u, \quad (5)$$

где α – параметр регуляризации; G – неотрицательно определенная симметричная матрица.

Принимая во внимание, что оценивание погрешностей исходных данных в (3) связано с некоторыми трудностями, в рассматриваемом случае параметр регуляризации α целесообразно определять на основе способа квазиоптимальности [8]

$$\inf_{\alpha} \|\alpha d \tau_{\alpha} / d \alpha\|^2. \quad (6)$$

В случае, если ковариационная матрица V_ξ неизвестна, выбор параметра регуляризации α можно осуществлять при помощи метода пере-

крестной значимости. В соответствии с этим методом в качестве параметра регуляризации принимается такое значение α , которое доставляет минимум функционалу

$$D_0(\alpha) = \frac{1}{m} \|u - A_t\|^2 / \{1 - S_p[\Phi(\alpha)]/m\}^2, \quad (7)$$

где $\Phi(\alpha) = A(\alpha G + A^T A)^{-1}$; $S_p[\cdot]$ – индекс следа матрицы.

В [9] подчеркивается, что рассматриваемая задача определения спектральной характеристики контролируемого образца в условиях ограниченной априорной информации относительно характеристик ошибок измерений относится к классу некорректных стохастических задач и при ее решении естественно также применять методы и концепции, разработанные для этого класса задач. В частности, можно использовать рекуррентную процедуру вида:

$$\tau_{t+1}^\alpha = \tau_t^\alpha + \frac{P_t^\alpha a_{t+1}^T}{\alpha + a_{t+1}^T P_t^\alpha a_{t+1}} (u_{t+1} - a_{t+1} \tau_t^\alpha), \quad \tau_0^\alpha = 0;$$

$$P_{t+1}^\alpha = P_t^\alpha + \frac{P_t^\alpha a_{t+1}^T a_{t+1} P_t^\alpha}{\alpha + a_{t+1}^T P_t^\alpha a_{t+1}} P_0^\alpha = E, \quad \alpha > 0, \quad (8)$$

где $a_t, t = \overline{1, m}$ – строки матрицы A ; E – единичная матрица $n \times n$.

Параметр регуляризации α в (8) также целесообразно определять на основе способа квазиоптимальности. Можно показать, что

$$\tau_t^\alpha = (\alpha E + A_t^T A_t)^{-1} A_t^T u_t, \quad (9)$$

где $A_t = (a_1, a_2, \dots, a_t)^T$; $u_t = A_t \tau_t$, причем $\tau_t^\alpha \rightarrow \tau_t$ при $\alpha \rightarrow 0$.

Восстановление аппаратной функции спектрального прибора

Исследуемый истинный спектр $\tau(\lambda'_i)$, как правило, искажается при измерении аппаратной функцией $A(\lambda, \lambda')$ спектрального прибора, являющейся сверткой аппаратной функции фотометрической части прибора и аппаратной функции приемно-регистрирующей системы [9]. Множество существующих методов определе-

ния аппаратной функции можно разделить на две группы: экспериментальные и аналитические. Экспериментальный способ должен удовлетворять ряду требований: аппаратная функция должна определяться при условиях, соответствующих нормальному режиму работы прибора (способ освещения щели, ширина щели, область спектра, постоянная времени, шумы), способ должен обеспечивать определение аппаратной функции широкого класса приборов разной разрешающей силы, а также не быть очень трудоемким. Аналитические методы основаны на законах геометрической оптики и полезны при рассмотрении экспериментальных результатов, особенно на этапе проектирования нового прибора и выбора его принципиальной оптической схемы. Как правило, применяется графический метод элементарных площадей.

Аналитические методы достаточно громоздки, а для экспериментальных способов требуется специальная аппаратура с квазимонохроматическим источником излучения. Кроме того, трудно одновременно удовлетворить все требования, предъявляемые к экспериментальным методам. Общий характерный недостаток обоих методов – они не учитывают изменение аппаратной функции во время эксплуатации. В условиях серийного производства приборов эти недостатки будут носить принципиальный характер. Следовательно, актуален вопрос разработки надежного метода определения аппаратной функции. В [9, 10] предлагается алгоритм восстановления аппаратной функции спектрального прибора, основанный на регулярных методах решения некорректных задач.

Будем полагать, что имеются результаты p измерений ($j = 1, 2, \dots, p$) спектральных характеристик исследуемых образцов. Тогда на основе располагаемых данных, используя известные квадратурные формулы вычисления определенных интегралов в (2), можно прийти к матричному уравнению

$$U = AT + E, \quad (10)$$

где U, A, T, E – матрицы вещественных параметров размерностей $[m \times p], [m \times n], [n \times p], [m \times p]$ соответственно.

Оценку матричного оператора A аппаратной функции, согласно (10), можно получить на основе явных МНК-алгоритмов оценивания, задаваемых соотношениями:

$$\hat{A} = \arg \min I = \tilde{U}\tilde{T}^+, \quad \tilde{T}^+ = (\tilde{T}^T\tilde{T} + \alpha I)^{-1} \tilde{T}^T, \quad \alpha > 0;$$

$$\tilde{U} = \Lambda^{-1/2}U, \quad \tilde{T} = \Lambda^{-1/2}T,$$

$$I = M \left\{ \text{tr}(U - AT)^T \Lambda^{-1}(U - AT) \right\}, \quad (11)$$

где Λ – симметричная положительно определенная весовая матрица.

В (11) присутствует неопределенный параметр α . Выбор его представляет основную сложность при использовании рекомендуемых алгоритмов. Во-первых, параметр α должен быть определенным образом согласован с погрешностями исходных данных A и U , для того чтобы решение было регуляризованным. Во-вторых, с точки зрения точности решения, желательно из множества значений α , удовлетворяющих требованию согласования, в качестве параметра регуляризации взять такое, которое минимизирует принятую числовую характеристику точности решения (например, средне-квадратическую ошибку). В условиях отсутствия априорной информации о погрешностях задания исходных данных параметр регуляризации α в (11) рационально определить на основе способов квазиоптимальности или отношений.

Приближенное решение (4) можно также получить в случае $\Lambda^{-1} = \text{diag}[g(1), g(2), \dots, g(n)]$ при помощи следующего рекуррентного алгоритма взвешенного МНК-метода наименьших квадратов [10]:

$$a_i^T(\lambda + 1) = a_i^T(\lambda) + g(v + 1)P(\lambda)t_j(v + 1) \times$$

$$\times [u_{ij}(v + 1) - t_j^T(v + 1)a_i^T(\lambda)] \times$$

$$\times [\alpha + g(v + 1)t_j^T(v + 1)P(\lambda)t_j(v + 1)]^{-1};$$

$$P(\lambda + 1) = P(\lambda)g(v + 1)P(\lambda)t_j(v + 1) \times$$

$$\times [\alpha + g(v + 1)t_j^T(v + 1)P(\lambda)t_j(v + 1)]^{-1} \times$$

$$\times t_j^T(v + 1)P(\lambda),$$

где $a_i, i = \overline{1, m}$ – строки матрицы A ; $T_j, j = \overline{1, p}$ – столбцы матрицы T ; $P(0) = \beta I, \beta \gg 0$; $\lambda = 1, 2, \dots$; $v = \lambda$ при $0 \leq \lambda \leq m$; $v = \lambda - m$ при $0 < \lambda \leq 2m$; $v = \lambda - 2m$ при $2m < \lambda \leq 3m, \dots$

ВЫВОД

Истинный спектр образцов искажается аппаратной функцией спектрального прибора, являющейся сверткой аппаратной функции фотометрической части прибора и аппаратной функции приемно-регистрирующей системы. Поэтому предложены алгоритмы восстановления аппаратной функции прибора, основанные на регулярных методах решения некорректных задач. Выполненный анализ позволяет выявить потенциальные возможности рассматриваемых алгоритмов и оптимизировать их регуляризующие возможности за счет более полного и гибкого использования располагаемой априорной информации относительно помехо-сигнальной обстановки при измерении цветовых характеристик материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулямов, Ш. М. Улучшение метрологических характеристик фотометров для контроля качества жидких продуктов / Ш. М. Гулямов, М. А. Раджабова, У. Т. Мухамедханов, // Известия ВУЗов. Технические науки. 2000. № 3. С. 9–13.
2. Раджабова, М. А. Система колориметрического контроля качества хлопкового масла / М. А. Раджабова, У. Т. Мухамедханов // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. 16-й Междунар. науч. конф. ММТТ-2003. Р/на Д, 2003. Т. 6. С. 75–78.
3. Radjabova, M. A. Optimization of Design Parameters of Spectral Type Colorimeter Proceedings of Ninth / M. A. Radjabova // World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation. WCIS-2016. Tashkent, Oct. 25–27, 2016. P. 168–173.
4. Соловьев, В. А. Оптимальная выборка спектрофотометрической информации при заданной колориметрической погрешности / В. А. Соловьев // Измерительная техника. 1986. № 9. С. 31–32.
5. Раджабова, М. А. Повышение точности колориметров спектрального типа для решения задачи контроля качества жидких продуктов / М. А. Раджабова // Химическая технология. Контроль и управление. 2016. № 3. С. 69–73.

6. Применение методов искусственного интеллекта к синтезу систем управления качеством промышленной продукции и взаимодействие средств интеллектуальной поддержки принятия решений / Б. Т. Каипбергенов [и др.] // Вестник Каракалпакского отделения Академии наук Республики Узбекистан. 2016. № 2. С. 38–42.
7. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. М.: Наука, 1979. 185 с.
8. Верлань, А. Ф. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы / А. Ф. Верлань, В. С. Сизиков. Киев: Наукова думка, 1986. 544 с.
9. Регуляризация некорректно поставленных задач спектроколориметрии / Н. Р. Юсупбеков [и др.] // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. 13-й Междунар. науч. конф. ММТТ-2000. СПб., 2000. Т. 6. С. 225–228.
10. Radjabova, M. A. Application of Ill-Posed Problem Regularization Methods to Improve the Accuracy of Spectrocolorimeter Proceedings of Eighth / M. A. Radjabova // World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation. Tashkent, Nov. 25–27, 2014. P. 216–224.
- Поступила 28.02.2021
Подписана в печать 03.05.2021
Опубликована онлайн 30.11.2021
- REFERENCES
1. Gulyamov Sh. M., Radjabova M. A., Mukhamedkhanov U. T. (2000) Improvement of Metrological Characteristics of Photometers for Quality Control of Liquid Products. / *Izvestiya VUZov. Tekhnicheskie Nauki* [Proceedings of Higher Education Institutions. Technical Science], (3), 9–13 (in Russian).
2. Radjabova M. A., Mukhamedkhanov U. T. (2003) Colorimetric Cottonseed Oil Quality Control System. *Matematicheskie Metody v Tekhnike i Tekhnologiyakh: Sb. Tr. 16 Mezhdunar. Nauch. Konf. MMTT-2003* [Mathematical Methods in Engineering and Technology: Proceedings of the 16th International Scientific Conference MMTT-2003]. Rostov on Don, 6, 75–78 (in Russian).
3. Radjabova M. A. (2016) Optimization of Design Parameters of Spectral Type Colorimeter Proceedings of Ninth. *World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation. WCIS-2016. Tashkent, Oct. 25–27, 2016*, 168–173.
4. Solovyov V. A. (1986) Optimal Sampling of Spectrophotometric Information for a Given Colorimetric Error. *Izmeritel'naya Tekhnika = Measurement Techniques*, (9), 31–32 (in Russian).
5. Radjabova M. A. (2016) Improving Accuracy of Spectral Colorimeters for Solving Problem of Quality Control of Liquid Products. *Khimicheskaya Tekhnologiya. Kontrol' i Upravlenie* [Chemical Technology. Control and Management], (3), 69–73 (in Russian).
6. Kaipbergenov B. T. [et al.] (2016) Application of Artificial Intelligence Methods to the Synthesis of Quality Management Systems for Industrial Products and Interaction of Intelligent Decision Support Tools. *Vestnik Karakalpakskogo Otdeleniya Akademii Nauk Respubliki Uzbekistan* [Bulletin of Karakalpak Branch of Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan], (2), 38–42 (in Russian).
7. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. (1979) *Methods for Solving Ill-Posed Problems*. Moscow, Nauka Publ. 185 (in Russian).
8. Verlan A. F., Sizikov V. S. (1986) *Integral Equations: Methods, Algorithms, Programs*. Kiev, Navukova Dumka Publ. 544 (in Russian).
9. Yusupbekov N. R. [et al.] (2000) Regularization of Ill-Posed Problems in Spectrocolorimetry. *Matematicheskie Metody v Tekhnike i Tekhnologiyakh: Sb. Tr. 13 Mezhdunar. Nauch. Konf. MMTT-2000* [Mathematical Methods in Engineering and Technology: Proceedings of the 13th International Scientific Conference MMTT-2000]. Saint-Petersburg, 6, 225–228 (in Russian).
10. Radjabova M. A. (2014) Application of Ill-Posed Problem Regularization Methods to Improve the Accuracy of Spectrocolorimeter Proceedings of Eighth. *World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation. Tashkent, Nov. 25–27, 2014.*, 216–224.
- Received: 28.02.2021
Accepted: 03.05.2021
Published online: 30.11.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-493-498>

УДК 625.8

Применение фосфогипса в дорожном строительстве

Докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾, докт. хим. наук, проф. В. Н. Яглов¹⁾,
канд. техн. наук, доц. Т. А. Чистова¹⁾, асп. В. В. Гиринский¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В настоящее время в Республике Беларусь решается проблема переработки побочного продукта – фосфогипса, образующегося в процессе производства фосфорной кислоты. Вопрос утилизации фосфогипса становится все более актуальным, и причин здесь несколько: транспортирование фосфогипса в отвалы и его хранение требуют больших капитальных вложений и эксплуатационных затрат; при создании отвалов фосфогипса приходится отчуждать большие площади, иногда даже обрабатываемых земель; хранение этого материала в отвалах, даже при нейтрализации растворимых примесей и соблюдении правил эксплуатации отвала, наносит непоправимый вред окружающей среде. Известны исследования ученых по применению фосфогипса в дорожном строительстве в качестве вяжущего для укрепления грунтов, устройства оснований и при проведении ремонтных работ. В статье представлены результаты экспериментов по получению дорожно-строительных материалов из данного отхода без перевода его в вяжущее вещество. Разработана технология приготовления асфальтобетонной смеси с применением минерального порошка в виде фосфогипса-дигидрата.

Ключевые слова: дорожно-строительные материалы, отходы производства фосфорной кислоты, фосфогипс-дигидрат, минеральный порошок, технология приготовления асфальтобетонной смеси

Для цитирования: Применение фосфогипса в дорожном строительстве / Я. Н. Ковалев [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 493–498. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-493-498>

Application of Phosphogypsum in Road Construction

Ya. N. Kovalev¹⁾, V. N. Yaglov¹⁾, T. A. Chistova¹⁾, V. V. Girinsky¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Currently the Republic of Belarus is solving the problem of processing a by-product – phosphogypsum, formed in the process of phosphoric acid production. The issue of utilization of phosphogypsum is becoming more and more relevant, and there are several reasons for this: transportation of phosphogypsum to dumps and its storage require large capital investments and operating costs; when creating phosphogypsum dumps, it is necessary to alienate large areas, sometimes even cultivated land; storage of this material in dumps, even with the neutralization of soluble impurities and with the observance of dump operational rules causes irreparable harm to the environment. There are known studies of scientists on the use

Адрес для переписки

Ковалев Ярослав Никитич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Kovalev Yaroslav N.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

of phosphogypsum for road construction as a binder for strengthening soils, foundations and repair work. The paper presents the results of experiments on obtaining road-building materials from this waste without converting it into a binder. Based on the research, a technology for the preparation of asphalt concrete mixtures with the use of mineral powder in the form of phosphogypsum dihydrate has been developed.

Keywords: road construction materials, waste from the production of phosphoric acid, phosphogypsum dihydrate, mineral powder, technology of asphalt concrete mixture preparation

For citation: Kovalev Ya. N., Yaglov V. N., Chistova T. A., Girinsky V. V. (2021) Application of Phosphogypsum in Road Construction. *Science and Technique*. 20 (6), 493–498. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-493-498> (in Russian)

Введение

Применение в дорожном строительстве эффективных материалов на основе местного сырья и отходов промышленности – важная народно-хозяйственная задача, решение которой обеспечит сокращение расхода топливно-энергетических и материальных ресурсов, снизит капитальные вложения. Этому может способствовать широкое использование в качестве исходного сырья фосфогипса-дигидрата.

Фосфогипс – отход, образующийся при производстве экстракционной фосфорной кислоты. На Гомельском химическом заводе фосфогипс находится в отвалах, его накоплено более 10 млн т. Отфильтрованный от фосфорной кислоты фосфогипс-полугидрат сульфата кальция (ФПС), охлаждаясь от 90–105 °С до температуры окружающей среды, постепенно переходит в дигидрат, кристаллизуясь и превращаясь в гипсовый камень, который не обладает вяжущими свойствами. Длительность этого перехода зависит от температуры окружающей среды и количества оставшейся в фосфогипсе фосфорной кислоты и может достигать нескольких часов или суток. Ежегодный прирост отхода составляет около 800 тыс. т. В настоящее время утилизируется его не более 10 % из-за загрязнения фосфогипса различными примесями, требующими нейтрализации [1]. А это увеличивает себестоимость фосфогипсового вяжущего по сравнению с природным гипсом.

Известно много вариантов применения ФПС в дорожном строительстве [2–10]. Однако этого явно недостаточно, хотя сферы использования довольно широки. Авторы статьи предлагают применять фосфогипс-дигидрат в качестве компонента дорожного асфальтобетона – минерального порошка.

В БНТУ разработаны научные принципы и проверена экспериментальная возможность

получения дорожно-строительных материалов непосредственно из промышленных отходов фосфогипса без перевода их в вяжущее вещество [10]. В основе технологии получения смесей для укладки в дороги лежат такие процессы, как измельчение, гомогенизация и смешивание. Для этого требуется серийно выпускаемое оборудование, используемое на цементно- и асфальтобетонных заводах (бункеры, питатели, дозаторы, смесители, мельницы, сушильные барабаны). Полученная смесь может быть сразу пригодна для применения (в течение 2–4 ч) или в сухом виде храниться около одного месяца. Укладка производится с помощью дорожных машин с одновременным уплотнением катками.

Физико-механические свойства фосфогипсового материала в зависимости от вида исходного сырья и степени уплотнения в месячном возрасте следующие:

предел прочности при изгибе, МПа,	– 1,5–5,0;
прочность на сжатие, МПа,	– 3,5–20,0;
средняя плотность, кг/м ³ ,	– 1600–2000;
водопоглощение, %,	– 1–6;
морозостойкость, циклов,	– 25–150.

Экспериментальные исследования

В качестве базового состава асфальтобетонной смеси при исследовании принимали мелкозернистый асфальтобетон (тип Б). Базовый состав включал следующие компоненты, % по массе:

гравий	– 47;
отсев	– 35;
щебень фракций 5–20 мм	– 10;
минеральный порошок	– 8;
битум БНД 90/130	– 5–6.

В лабораторных исследованиях в качестве минерального порошка использовали фосфогипс-дигидрат и активатор в виде гудрона с

вязкостью 2 с. Применение активированных минеральных порошков способствует улучшению структуры асфальтобетона. Такие порошки характеризуются однородностью и более равномерным распределением тонких слоев битума на минеральных зернах, что приводит к меньшему содержанию свободного битума.

Для выяснения влияния исходных компонентов асфальтобетона (битума, гудрона, фосфогипса) на свойства асфальтобетонной смеси провели экспериментальные исследования с использованием математического планирования. Изготавливали образцы асфальтобетона (тип Б), в которых варьировали количество гудрона (X_1), битума (X_2) и фосфогипса (X_3). Содержание исходных компонентов в смеси изменялось следующим образом, %:

- гудрона – от 0,5 до 2,5;
- битума – от 3,5 до 4,5;
- фосфогипса – от 3,0 до 4,0.

В качестве основных параметров для оценки свойств асфальтобетона выбирали показатели: пределы прочности на сжатие R_{20} , R_{50} , R_0 при температурах 20; 50; 0 °С соответственно; плотность ρ ; водонасыщение W ; набухание H ; коэффициент водостойкости K_v ; коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении $K_{v,дл}$.

Технология приготовления образцов из горячей асфальтобетонной смеси в лабораторных условиях заключалась в следующем.

1. Нагревали минеральные материалы (щебень фракций 5–15 мм, отсева и ПГС) до температуры 160–180 °С.

2. Нагревали гудрон до 120 °С.
3. Нагревали воду до 90 °С.
4. Приготавливали смесь «фосфогипс + вода + гудрон» и нагревали ее до температуры 90 °С.
5. Нагревали битум до 160 °С.
6. Смешивали нагретые минеральные материалы с раствором «фосфогипс + вода + гудрон» с добавлением битума.

Затем из готовой асфальтобетонной смеси формировали образцы исходя из необходимости получения для каждой из четырех смесей по 12 образцов стандартного вида ($h = d = 5$ см) (табл. 1).

Таблица 1

Составы экспериментальных асфальтобетонных смесей
Compositions of experimental asphalt concrete mixes

Состав смеси	Номер смеси			
	1	2	3	4
Гравий, %	47	47	46	46
Отсев, %	40	40	40	40
Щебень, %	10	10	10	10
Гудрон, %	0,5	1,0	2,0	2,5
Битум, %	4,0	4,0	3,5	3,5
Фосфогипс, %	3	3	4	4
H ₂ O, г	27,0	27,0	54,0	67,5

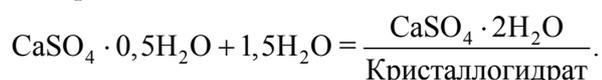
Показатели физико-механических свойств асфальтобетонов, полученные при выполнении опытов, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели физико-механических свойств асфальтобетонов (тип Б, марка II)
Indicators of physical and mechanical properties of asphalt concrete (type B, grade II)

Номер смеси	Уровень фактора			Предел прочности R , МПа			Плотность ρ , г/см ³	Водонасыщение W , %	Набухание H , %	Коэффициент водостойкости		$R_{50,дл}$ после длительного водонасыщения
	X_1	X_2	X_3	на сжатие		при растяжении				K_v	$K_{v,дл}$	
				при температуре, °С								
				20	50	0						
Требование СТБ 1033				–	>1,1	1,5–3,5	–	1–4	<1,00	>0,80	–	–
1	0,5	4,0	3	1,80	0,65	3,65	2,25	8,90	0,43	1,30	1,32	1,15
2	1,0	4,0	3	1,79	0,67	3,85	2,31	9,64	0,40	1,25	1,55	1,28
3	2,0	3,5	4	2,60	0,72	3,34	2,26	9,21	0,11	0,75	1,11	1,24
4	2,5	3,5	4	1,79	0,67	3,54	2,27	9,20	0,90	0,97	1,07	1,06

Анализ табл. 2 показывает, что увеличение содержания в смеси битума вызывает повышение прочностных показателей асфальтобетона и коэффициента водостойкости (смесь № 2). Количество гудрона и фосфогипса имеет оптимальную область, т. е. до некоторого значения показатели улучшаются (смеси № 1, 2), а затем начинают ухудшаться. Показатели прочности вначале растут, но при переходе через оптимальную область начинают падать (смеси № 3, 4). Фосфогипс-дигидрат в процессе взаимодействия с горячим каменным материалом теряет полторы молекулы H_2O и переходит в полу-гидрат. Наилучшие показатели водонасыщения W и коэффициента длительной водостойкости $R_{50\text{дл}}$ у смесей № 1–3. При водонасыщении образцов происходит кристаллизация фосфогипса-полугидрата в кристалл фосфогипс-дигидрат



Кристаллизация фосфогипса полностью завершается при длительном водонасыщении, тем самым увеличивая прочность образцов – $K_{в,дл}$ принимает значения 1,32; 1,55; 1,11 (смеси № 1, 2, 3 соответственно).

Таким образом, показатель водонасыщения, полученный в ходе лабораторных исследований (смеси № 1–4), включает не только истинное водонасыщение образцов, но и полторы молекулы воды, затраченные на кристаллизацию фосфогипса. Поскольку кристаллизация фосфогипса приводит к повышению прочностных характеристик асфальтобетона и существен-

но не влияет на другие показатели (H , ρ), возникает необходимость определения истинного значения водонасыщения, исключая из прежнего водонасыщения полторы молекулы воды, ушедшие на кристаллизацию фосфогипса.

Варьируя факторами X_1 , X_2 , X_3 , т. е. количеством смеси гудрона, битума и фосфогипса в качестве минерального порошка, получили оптимальные показатели физико-механических свойств асфальтобетонной смеси, которые сравнили с требованиями СТБ 1033–2016 (табл. 3).

Анализируя показатели оптимизированной асфальтобетонной смеси, следует отметить, что все характеристики физико-механических свойств, за исключением предела прочности при растяжении при температуре $0^\circ C$ (R_0), отвечают требованиям СТБ 1033–2016. Предел прочности после длительного водонасыщения $R_{50\text{дл}}$ имеет гораздо большее значение, чем до кристаллизации фосфогипса в образце. Исходя из этого за R_{50} принимаем показатель предела прочности на сжатие при $50^\circ C$ после длительного водонасыщения ($R_{50\text{дл}}$).

Технология приготовления горячей асфальтобетонной смеси с применением фосфогипса-дигидрата

На основании проведенных исследований разработана производственная технология приготовления горячих асфальтобетонных смесей с применением минерального порошка в виде фосфогипса-дигидрата. В основу ее заложены теоретические предпосылки, проверенные в ходе экспериментов.

Таблица 3

Сравнение показателей асфальтобетонной смеси
Comparison of indicators of asphalt concrete mix

Наименование показателя	Значение показателя		
	для экспериментальной смеси с минеральным порошком (X_1, X_2, X_3) (1,8; 4,0; 3,0)	по СТБ 1033 (тип В, марка II)	
Предел прочности на сжатие R_{50} , МПа, при температуре $50^\circ C$	0,90	Не менее 1,2	
Предел прочности на сжатие после длительного водонасыщения $R_{50\text{дл}}$, МПа, при температуре $50^\circ C$	1,31	–	
Предел прочности на сжатие R_{20} , МПа, при температуре $20^\circ C$	2,31	–	
Предел прочности при растяжении R_0 , МПа, при нуле градусов	3,80	1,5–3,5	
Средняя плотность ρ , г/см ³	2,26	–	
Водонасыщение по объему W , %	0,71	От 1 до 4	
Набухание H , %	0	Не более 1	
Коэффициент длительной водостойкости:	$K_{в14\text{сут}}$	0,87	Не менее 0,85
	$K_{в28\text{сут}}$	1,35	–

Асфальтобетонную смесь приготавливали на установке Д-177-2К. На отдельной технологической линии готовилась смесь «фосфогипс – вода – гудрон» и в горячем состоянии подавалась в смеситель установки Д-177-2К.

Схема технологического цикла по производству асфальтобетонной смеси приведена на рис. 1. Смесь «фосфогипс – вода – гудрон» готовилась следующим образом: сырье фосфогипс-дигидрат с помощью погрузчика подавалось в приемный бункер глинорыхлителя. Здесь с помощью бил производились рыхление, измельчение и проталкивание фосфогипса через решетку. Размельченный фосфогипс поступал в рабочую зону мешалки.

При заполнении мешалки на 1/2 объема поступление фосфогипса прекращалось и включался вал с лопастями, который перемешивал фосфогипс на сухую. После этого в мешалку одновременно подавалось равное количество воды, нагретой до 90 °С, и гудрона, нагретого до 160 °С. Таким образом, на свежесформированной поверхности фосфогипса адсорбировался гудрон, что в дальнейшем приводило к возникновению прочных физико-химических связей на минеральной поверхности с органическим вяжущим.

Подача воды и гудрона регулировалась оператором установки. Полученная масса битумным насосом прокачивалась через электронагреватель. Циркуляция смеси прекращалась

после получения однородной массы с заданной с помощью термодатчика температурой.

Полученная таким образом смесь «фосфогипс – вода – гудрон» посредством насоса дозированных порциями подавалась в смесительное отделение асфальтобетонной установки. Здесь смесь перемешивалась с каменными материалами. Одновременно в смеситель подавалась порция битума. При перемешивании смеси «фосфогипс – вода – гудрон» с горячими минеральными материалами происходит испарение воды, а частички фосфогипса, окруженные тонкой пленкой гудрона, плотно прилипают («прикипают») к поверхности минеральных частиц, образуя новую модифицированную поверхность, активно вступающую во взаимодействие с битумом, структурируя его и повышая адгезию битума к поверхности минеральных частиц. Кроме того, что частички фосфогипса заполняют межзерновые пустоты в минеральном остове и обеспечивают его плотность, они выполняют еще и роль активатора каменного материала. Одновременно с этим испаряющаяся вода вспенивает битум, переводя его в тонкопеночное состояние. Битум обволакивает частички минеральных материалов тонкой высокоструктурированной оболочкой. При этом частички минеральных материалов связываются между собой в результате контакта таких оболочек, что обеспечивает их наиболее прочное сцепление.

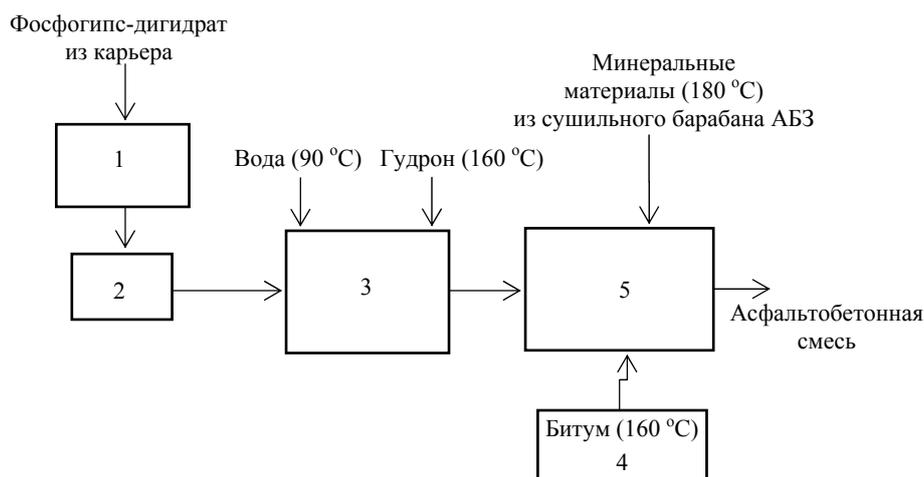


Рис. 1. Блок-схема технологической линии по производству асфальтобетонной смеси «фосфогипс – вода – гудрон – битум»: 1 – источник складирования фосфогипса; 2 – глинорыхлитель; 3 – мешалка; 4 – битумный насос с электроподогревом; 5 – смесительное отделение асфальтобетонной установки; АБЗ – асфальтобетонный завод

Fig. 1. Block diagram of technological line for production of asphalt concrete mixture “phosphogypsum – water – tar – bitumen”: 1 – source of phosphogypsum storage; 2 – clay ripper; 3 – mixer; 4 – electrically heated bitumen pump; 5 – mixing room of asphalt concrete plant; АБЗ [ACP] – asphalt concrete plant

Следует особо подчеркнуть, что при попадании смеси на горячие минеральные материалы температура последних снижается. Поэтому для обеспечения температуры асфальтобетонных смесей при выпуске их из смесителя и укладке в конструктивный слой необходимо минеральные материалы в сушильном барабане нагревать выше нормативного значения на 20–25 °С.

ВЫВОДЫ

1. Разработан состав активированного минерального порошка на основе фосфогипса-дигидрата.

2. Проведены исследования с использованием математического планирования эксперимента. Определено влияние исходных компонентов минерального порошка на свойства асфальтобетонной смеси. В частности, установлено, что с увеличением содержания битума в асфальтобетонной смеси наблюдается повышение прочности на сжатие в среднем на 15 %.

3. При водонасыщении образцов происходит кристаллизация фосфогипса-полугидрата в кристалл фосфогипс-дигидрат, которая полностью завершается при длительном водонасыщении, тем самым увеличивая прочность образцов. Отмечено, что предел прочности после длительного водонасыщения $R_{50дл}$ имеет гораздо большее значение, чем до кристаллизации фосфогипса в образце.

4. В результате анализа различного соотношения гудрона, битума и фосфогипса в качестве минерального порошка выбран оптимальный состав асфальтобетонной смеси и получены наилучшие показатели ее физико-механических свойств, отвечающие требованиям СТБ 1033–2016.

5. Разработана технология получения асфальтобетонной смеси с применением фосфогипса-дигидрата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Недосеко, И. В. Технология получения гипсового вяжущего из фосфогипса с адсорбционной очисткой от вредных примесей / И. В. Недосеко. Минск, 1991. 15 с.
2. Способ получения вяжущего: пат. 2200714 Рос. Федерации / В. П. Сучков, Э. В. Киушкин. Опубл. 20.03.2003.
3. Яшин, С. Л. Технология и свойства модифицированных фосфогипсом битумо-минеральных композиций / С. Л. Яшин. Грозный, 2013. 152 с.
4. Рекомендации по применению фосфогипса-полугидрата Гомельского химического завода при проектировании и строительстве дорожных одежд / М-во строи-

5. тельства и эксплуатации дорог БССР. Трест «Оргдорстрой». Минск, 1990. 34 с.
6. Иваницкий, В. В. Фосфогипс и его использование / В. В. Иваницкий, П. В. Классен, А. Д. Новиков. М.: Химки, 1990. 224 с.
7. Новые методы переработки и применения каменных материалов и отходов промышленности в дорожном строительстве: тр. СоюздорНИИ. М.: СоюздорНИИ, 1982. 124 с.
8. Использование фосфогипса в дорожном строительстве / В. С. Исаев [и др.] // Автомобильные дороги. 1987. № 1. С. 9–10.
9. Колев, И. А. Получение строительных материалов и изделий путем механохимической активации фосфогипса / И. А. Колев. Л., 1989. 25 с.
10. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 368 с.
11. Жаврид, С. С. Строительные изделия и конструкции из полимерфосфогипса / С. С. Жаврид, В. И. Малихторович, В. М. Абрамов. Минск: Ураджай, 1982. 168 с.

Поступила 01.06.2021

Подписана в печать 09.08.2021

Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. Nedoseko I. V. (1991) *Technology for Producing Gypsum Binder from Phosphogypsum with Adsorption Purification from Harmful Impurities*. Minsk, 1991. 15 (in Russian).
2. Suchkov V. P., Kiushkin E. V. (2003) *Method for Obtaining a Binder*. Patent 2200714 Russian Federation (in Russian).
3. Yashin S. L. (2013) *Technology and Properties of Bitumen-Mineral Compositions Modified with Phosphogypsum*. Grozny. 152 (in Russian).
4. Ministry of Construction and Operation of Roads of the BSSR. Trust “Orgdorstroy” (1990) *Recommendations for the Use of Phosphogypsum Semi-Hydrate of the Gomel Chemical Plant in the Design and Construction of Road Pavements*. Minsk. 34 (in Russian).
5. Ivanytsky V. V., Klassen P. V., Novikov A. D. (1990) *Phosphogypsum and its Application*. Moscow, Khimki Publ. 224 (in Russian).
6. *New Methods of Processing and Application of Stone Materials and Industrial Waste in Road Construction*. Proceedings of Soyuzdor Research Institute. Moscow, Soyuzdormii Publ., 1982. 124 (in Russian).
7. Isaev V. S., Yumashev V. M., Grebenevich N. P., Kochetkova R. G. (1987) The Use of Phosphogypsum in Road Construction. *Avtomobilnye Dorogi* [Highways], (1), 9–10 (in Russian).
8. Kolev I. A. (1989) *Obtaining Construction Materials and Products by Mechanochemical Activation of Phosphogypsum*. Leningrad. 25 (in Russian).
9. Dvorkin L. I., Dvorkin O. L. (2007) *Construction Materials from Industrial Waste*. Rostov on Don, Feniks Publ. 368 (in Russian).
10. Zhavrid S. S., Malikhatorovich V. I., Abramov V. M. (1982) *Building Products and Structures Made of Polymer Phosphogypsum*. Minsk, Uradzhayi Publ. 168 (in Russian).

Received: 01.06.2021

Accepted: 09.08.2021

Published online: 30.11.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-499-505>

UDC 624.01

Development of Technological Solutions for Sewer Rehabilitation Using Clinker Brick

D. F. Goncharenko¹⁾, A. I. Aleinikova¹⁾, S. V. Yesakova¹⁾, R. I. Hudilin¹⁾

¹⁾Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture (Kharkiv, Ukraine)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. The aim of the work is to develop a technology for the restoration of damaged sections of sewer collectors using clinker bricks. A significant part of such collectors in the Ukraine has completely exhausted their depreciation resource. For their construction, concrete and reinforced concrete were used, which are subject to destruction as a result of the influence of many factors and, above all, microbiological corrosion. Therefore, the selection of the optimal repair technology using corrosion-resistant clinker brick is relevant. The paper considers the problems of repair and reconstruction of worn-out collectors. Technical and technological solutions of an open method for their recovery using pneumatic formwork and corrosion-resistant clinker brick are presented. The design of the collector lining structure has been carried out using the finite element method. To justify the feasibility of using the proposed technology, two options for restoring a worn-out collector have been considered: the “pipe-in-pipe” method and method developed by the authors using clinker bricks. The second option in terms of the cost of materials is almost four times more economical and more expedient than the first one (where polymer materials are used). The advantage of restoring circular sewer collectors by means of laying clinker bricks lies in the durability and resistance of this material (taking into account the anticorrosive composition of concrete) to the aggressive effects of the sewer environment. It should be noted that the application of the developed restoration technology is the most appropriate in conditions of sparse building or outside the city due to the significant volume of earthworks.

Keywords: sewer, wear, biogenic corrosion, emergency damage, restoration technology, brick, pneumatic formwork, finite elements method

For citation: Goncharenko D. F., Aleinikova A. I., Yesakova S. V., Hudilin R. I. (2021) Development of Technological Solutions for Sewer Rehabilitation Using Clinker Brick. *Science and Technique*. 20 (6), 499–505. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-499-505>

Разработка технологических решений восстановления канализационного коллектора с использованием клинкерного кирпича

Докт. техн. наук, проф. Д. Ф. Гончаренко¹⁾,
кандидаты техн. наук А. И. Алейникова¹⁾, С. В. Есакова¹⁾,
асп. Р. И. Гудилин¹⁾

¹⁾Харьковский национальный университет строительства и архитектуры (Харьков, Украина)

Реферат. Разработана технология восстановления с применением клинкерного кирпича поврежденных участков канализационных коллекторов. Значительная часть таких коллекторов в Украине полностью исчерпала свой амортизационный ресурс. Для их строительства использовались бетон и железобетон, которые подвержены разрушению при воздействии многих факторов и прежде всего микробиологической коррозии. Поэтому выбор оптимальной технологии ремонта с применением коррозионно-стойкого клинкерного кирпича является актуальным. Рассмотрены проблемы ремонта и реконструкции изношенных коллекторов. Приведены технические и технологические решения

Адрес для переписки

Алейникова Алевтина Игоревна
Харьковский национальный университет
строительства и архитектуры
ул. Сумская, 40,
61002, г. Харьков, Украина
Тел.: +380 66 291-31-87
alevtynaal222@gmail.com

Address for correspondence

Aleinikova Alevtyna I.
Kharkiv National University
of Civil Engineering and Architecture
40, Sumska str.,
61002, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +380 66 291-31-87
alevtynaal222@gmail.com

открытого способа их восстановления с использованием пневматической опалубки и коррозионно-стойкого клинкерного кирпича. Расчет конструкции обделки коллектора выполнен с помощью метода конечных элементов. Показаны преимущества и недостатки предложенных решений, приведены примеры их практического применения. Для обоснования целесообразности использования данной технологии рассмотрены два варианта восстановления изношенного коллектора: методом «труба в трубе» и разработанным авторами методом с применением клинкерного кирпича. Второй вариант по стоимости материалов практически в четыре раза экономичнее и целесообразнее первого (где используются полимерные материалы). Преимущество восстановления канализационных коллекторов круглого сечения путем устройства кладки из клинкерного кирпича заключается в долговечности и устойчивости этого материала (с учетом антикоррозионного состава бетона) к агрессивному воздействию канализационной среды. Следует отметить, что применение разработанной технологии восстановления наиболее целесообразно в условиях неплотной застройки или за пределами города ввиду значительного объема земляных работ.

Ключевые слова: канализационный коллектор, износ, биогенная коррозия, аварийное повреждение, технология восстановления, кирпич, пневматическая опалубка, метод конечных элементов

Для цитирования: Разработка технологических решений восстановления канализационного коллектора с использованием клинкерного кирпича / Д. Ф. Гончаренко [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 499–505. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-499-505>

Introduction

The distribution system of sewerage utility systems is a sophisticated complex of facilities for sustainable sewage disposal. Its key elements include drainage pipelines and sewage tunnel collectors of various diameters characterizing the degree of development and redevelopment of a city. Under current conditions Ukrainian operating enterprises carry out their activities on the brink of their technological and organizational capabilities, as evidenced by high depreciation of fixed assets and emergency condition of many networks due to insufficient financing of the industry [1]. As of 2015, the total length of drainage networks in Ukraine was 37.404 thousand km, including drainage networks in an emergency condition: 12.749 thousand km or 34 %. Compared with 2014, the total length of emergency drainage networks increased by 459 km or 3.6 % for the whole country. Share of emergency drainage networks in Kharkiv in their whole length is 42 %. The trend of recent years indicates that the length of emergency networks increases annually by 0.67 % [2].

It is known that most of the sewers with a diameter of 700 to 1800 mm were built of concrete and reinforced concrete 40–50 years ago. As evidenced by the analysis of the occurrence of emergency situations in the water disposal networks in Ukrainian cities, frequently, concrete and reinforced concrete structures of sewers fail long before their rated service life [1, 2]. The study of the operation life of sewers shows that up to 80–90 % of accidents in reinforced concrete pipelines are due

to corrosion processes. Chemical reactions occurring in the free space of the pipeline form an aggressive environment for concrete structures. The arch structures of the sewer are most susceptible to biogenic corrosion [3]. Accidents and failures in the operation of sewer networks lead to obvious economic, environmental and societal effects.

Research of Ukrainian and foreign scientists in the field of operational resources suggests [4–13] the sewer fall into decay due to the following reasons: penetration of surface water inside the structures; static and dynamic loads generated by truck transport; deviations from the codes and errors in construction; poor quality of the shaft wall surface; aggressive biological environment; ground subsidence. The questions of studying the physicochemical properties of concrete are devoted to work, as well as to the processes of hardening of concrete in an environment, articles by scientists are devoted [14–16]. Currently, the relative share of emergency water disposal networks in Kharkiv is 42 % of their total length. The trend of recent years shows that the length of emergency networks increases annually by an average of 0.67 % per year [17], and emergency situations are increasingly common. At the beginning of 2018, a collapse occurred at seven sites of the Southern gravity sewer in the town of Lozovaya in Kharkiv region. The analysis of the accident pointed out a number of reasons for the sewer to be taken out of serviceable condition, as follows:

– a decrease in the amount of drains by a factor of 2 to 3 over the past 20 years;

- an increase in aggressivity of waste water (exceeding the maximum permissible concentration of ammonium nitrogen by 1.5 times, of phosphates by more than 4 times);

- a reduction in the flow velocity;
- an increase in the amount of precipitation.

Over the course of its operation (over 30 years), the reinforced concrete arch has been almost completely deteriorated as a result of the action of biogenic corrosion [18, 19]. Moreover, significant collapses occurred on the sewer that conveys waste water from the area where the Kharkiv Tractor Plant is located to the treatment facilities (Fig. 1).

Given the sewers are laid at a shallow depth and there are no buildings or related structures, no motorways or pedestrian walkways or other utility facilities being located in the area of sewer deterioration, repair and rehabilitation work by open cut is proven to be expedient. The open-cut method of repair and rehabilitation allows for:

- increasing or decreasing the cross-section of the conduit, depending on the design needs;
- additionally making connections from various facilities, and connecting manholes built on the site under repair;
- carrying out repair and rehabilitation work irrespectively of the cross-section of the conduit section to be rehabilitated, the length of the run, the base of the conduit, the materials used;
- carrying out work irrespectively of the geological and hydrogeological conditions and the depth of the sewer conduit.

Sewer rehabilitation using the conventional open-cut method involves excavating a trench [20], dismantling a worn-out sewer, and installing a new sewer made of materials that can resist biogenic corrosion, such as pipes made of polyethylene, fiberglass and others (Fig. 2).



Fig. 1. Sewer deterioration in the area of the Kharkiv Tractor Plant due to biogenic corrosion



Fig. 2. Repair of pipelines using a traditional pipe method

The use of polymeric materials for sewer repair is common. The polymers have high resistance to biogenic corrosion. At the same time, polyethylene and fiberglass are expensive materials. In conditions of limited funding for the sewerage industry, the issue of cost savings is a priority.

An analysis of the first sewers in European cities shows that most of the sewers were built of clinker brick. Brick sewers of circular cross-section with a diameter of 700 to 1800 mm, with a standard or enlarged saddle, and of semi-elliptic (hipped) cross-section for large sizes, are more consistent with the static working conditions, and where high-grade brick is used, durable and resistant to aggressive ground and waste water [21]. In Ukrainian cities, clinker brick also found its use in the construction of sewage systems in Kyiv in 1893 (Fig. 3) and in Kharkiv in 1914 (Fig. 4) [22]. However, the need to erect structures that are complex in terms of capacity and geometry for the arch of the sewer to be built has resulted in replacing brick sewers with precast reinforced concrete conduits.



Fig. 3. Sewers built of clinker brick in Kyiv



Fig. 4. Sewers built of clinker brick in Kharkiv

The introduction in recent years of mobile pneumatic formworks, which are capable to replace complex structures for the arched section of the sewer to be built, enables repair and rehabilitation of sewers using clinker brick. The purpose of this work is to develop a technology for rehabilitating damaged sections of sewers using clinker brick:

- to achieve the study's objectives, the following tasks were set;
- to perform an analysis of the occurrence of emergency situations in sewers with a diameter of 700 to 1800 mm;

- to review the existing technologies of rehabilitation of water disposal networks;
- to develop a sewer rehabilitation technology using clinker brick to extend their operation life.

Sample site and instruments

In order to determine the properties of the main elements (ceramic brick and mortar) of the arch section of the sewer, which was built in 1931 in Kharkiv, the samples that had been used in aggressive environments over 85 years were submitted to the laboratory of construction materials and products of Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture [22]. After they were tested, it was found that the brick of which the sewer was built was in normal condition and was slightly deteriorated by corrosion; biogenic corrosion of the seams caused mechanical damage to the brickwork [22]. Hence, clinker brick are capable to resist biogenic corrosion, which makes it a suitable material for rehabilitating and repairing water disposal conduits, provided that a properly designed concrete mixture is used for mortar, which is able to resist corrosion.

Given the fact that, generally, the arches of the reinforced concrete sewers in operation are destroyed due to the effect of corrosion, while the invert is in satisfactory condition, the authors have developed a sewer rehabilitation technology using clinker brick by open cut (Fig. 5).

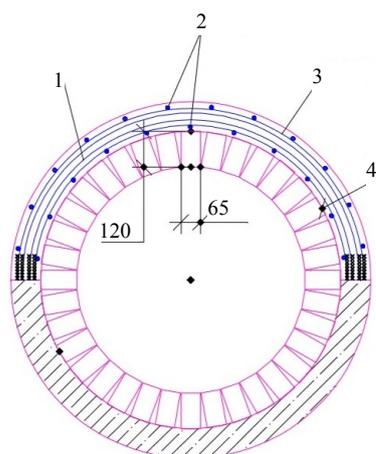


Fig. 5. Schematic diagram for arrangement and reinforcement of the sewer of clinker brick with a protective arch of cast-in-situ concrete: 1 – invert section of the sewer to be rehabilitated; 2 – brickwork; 3 – arch reinforcement 4 – protective arch of cast-in-situ concrete

The arch is built by brick laying using clinker brick in several stages:

- 1) arranging waste water disposal;
- 2) excavating a trench;
- 3) dismantling the damaged sections of the sewer (arch, walls);
- 4) clearing the invert section of the sewer;
- 5) brick laying of the invert section of the sewer (in case of deterioration of the invert);
- 6) cleaning the existing reinforcement to ensure the combined behavior of the invert and the erected protective lining of the arch;
- 7) arranging the pneumatic formwork for the brick laying of the arch using clinker brick;
- 8) brick laying of the arch of the sewer;
- 9) arranging the required reinforcement for the protective lining of the arch of cast in-situ reinforced concrete;
- 10) laying of concrete mix of the cast-in-place section of the arch;
- 11) removing the pneumatic formwork after concrete strength is achieved;
- 12) backfilling the trench.

To assess the bearing capacity and the combined behavior of the proposed structure of the arch, its stress state has been calculated under the following conditions: the diameter of the existing sewer is $D = 1500$ mm, the height of backfill soil over the arch of the sewer is $H = 3$ m, the specific gravity of soil is $\gamma = 20$ kN/m³, the design resistance is $R = 20$ t/m². The calculation has been performed by the finite element method using SCAD software; the model is shown in Fig. 6. The data on the reinforcement power for the cast-in-situ reinforced concrete arch are given in Fig. 7, 8.

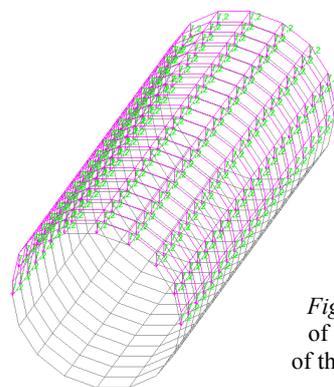


Fig. 6. The design model of the proposed structure of the cast-in-situ reinforced concrete arch

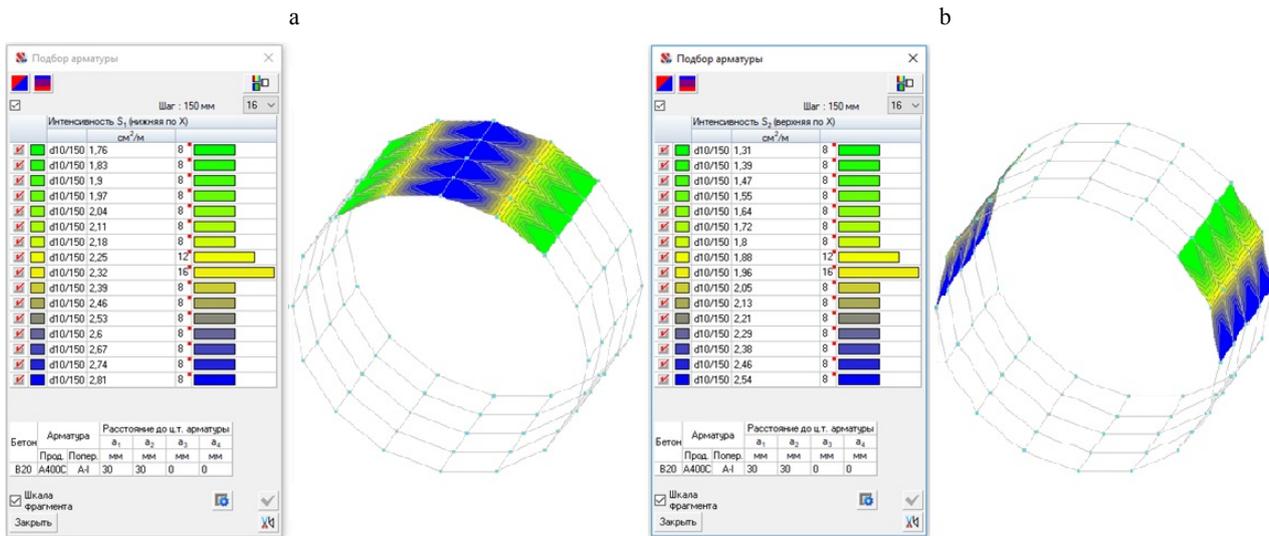


Fig. 7. The reinforcement power of the reinforcement at a pitch of 150 mm in x direction: a – lower; b – upper

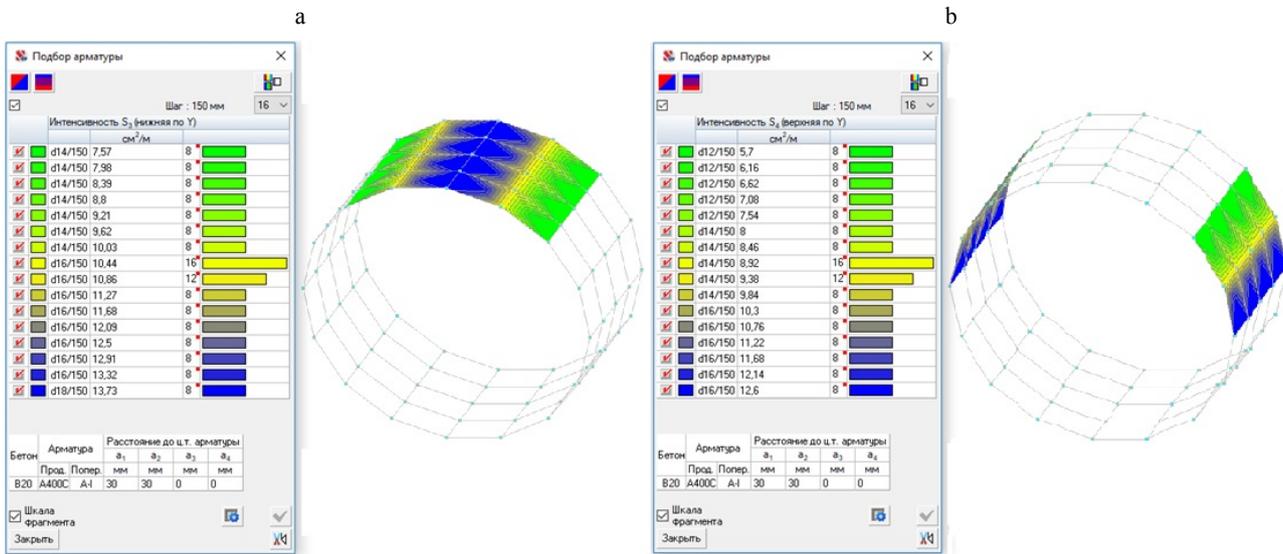


Fig. 8. The reinforcement power of the reinforcement at a pitch of 150 mm in y direction: a – lower; b – upper

Results

The cladding process cycle included a series of four main operations such as installation of anchors and holding channels; installation of reinforced slag cast panels; filling the space behind the sections with concrete mixture; coating the plate joints with modified epoxy resin or polyurethane. The specifications of the cast-in-situ structure elements for the rehabilitation of 1 (one) running meter of the sewer are listed in Tab. 1. Clinker brick and mortar are not taken into consideration in this case due to the need for clarification regarding

the type of brickwork for each individual case and the repair section of the sewer.

Table 1
Specifications of the cast-in-situ structure elements for the rehabilitation of 1 (one) running meter of the sewer

Item No	Description	Number, pcs.	Mass of a unit, kg
1	Reinforcement Ø18A400C, L = 1690, DSTU 3760:2006	6	3.380
2	Reinforcement Ø10A400C, L = 1000, DSTU 3760:2006	23	0.617
3	Reinforcement Ø16A400C, L = 1820, DSTU 3760:2006	6	2.870
4	Concrete, class C16/20, W4, F100	0.18	

To substantiate the expediency of using the proposed technology, two options for rehabilitating a worn-out sewer have been considered: the “pipe-in-pipe” method and the method developed by the authors involving clinker brick. The comparison of the performance indicators is shown in Tab. 2.

Table 2

Cost of technological solutions for rehabilitating a Ø1000 mm conduit, section length: 100 running meters

Item No	Description	Labor intensity, man-hours	Total cost of material, c.u.
1	Sewer rehabilitation by open cut using the proposed method involving clinker brick	740	5000
2	Sewer rehabilitation by open cut by laying SPIRO SN 6–8 corrugated polyethylene pipe	834	21000

From Tab. 2 it follows that sewer rehabilitation involving clinker brick is almost four times more cost effective and expedient in terms of the cost of materials than that involving SPIRO PE pipes. The advantage of the rehabilitation of sewers of circular cross-section by laying clinker brick resides in the durability and resistance of this material to aggressive effects, with due consideration of corrosion-resistant concrete composition. It should be noted that the use of the developed rehabilitation technology is most appropriate in the conditions of small built-up areas or outside the city limits due to a significant amount of earth works.

CONCLUSIONS

1. The experience gained over recent years in repair and refurbishment of sewers clearly shows high efficiency of the technologies applied in this case using structures made of various protective materials.

2. Sewerage networks are among the most critical elements of the centralized water disposal system, so the selection of the optimum repair and refurbishment technology is an urgent task. The technologies of rehabilitation collector using traditional materials, polymers, clinker bricks and protective coatings proved to be highly effective. The above reconstruction and refurbishment technologies have a number of benefits as follows. The use of polyethylene and fiberglass pipes in-

creases the service life of sewage systems by up to 50 years or more, since polyethylene and fiberglass have a high chemical resistance when used in aggressive environments.

3. The cost of polymer pipes is quite high. As studies show, sewer networks made of clinker bricks have been in operation for more than 100 years. Moreover, the reliability of these networks is not compromised. The developed technology of sewer repair using clinker bricks allows to save financial resources. The calculations of the carrying capacity of the construction with clinker bricks show the possibility of using this technology for the repair of sewers.

4. The technology of rehabilitation sewage collector with the clinker brick will find its application in unpopulated areas, since it is inappropriate to use it in cramped buildings.

5. In conditions of limited financial resources and high cost of imported polymer pipes for Ukraine, the technology proposed by the authors deserves special attention. The final version of the sewage repair technology can be selected according to the specific conditions of the construction operations and technical and economic indicators of the considered cladding choice.

REFERENCES

- Bondarenko D., Bulhakov V., Harmash O., Goncharenko D., Pilihran S. (2018) *Kanalizatsiyni Tuneli Kharkiv: QUO VADIS?*. Kharkiv, Raritety Ukrainy Publ. 232 (in Ukrainian).
- Aleinikova A., Volkov V., Goncharenko D., Zubko H., Starkova O. (2017) *Metodolohichni Osnovy Podovzhennia Ekspluatatsiynoho Resursu Pidzemnykh Inzhenernykh Meresh.* Kharkiv, Raritety Ukrainy Publ. 320 (in Ukrainian).
- Garmash A., Bondarenko D., Zubko G., Goncharenko D. (2016) On Renovation of the Destroyed Tunnel Sewer Collector in Kharkiv. *World Journal of Engineering*, 13 (1), 72–76. <https://doi.org/10.1108/wje-02-2016-009>.
- Sterling R., Alam S., Allouche E., Condit W., Matthews J., Downey D. (2016) Studying the Life-Cycle Performance of Gravity Sewer Rehabilitation Liners in North America. *Procedia Engineering*, 165, 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.797>.
- Kaushal, V., Young, V. (2017) Microbiologically Induced Concrete Corrosion in Sanitary Sewer Systems. *Trenchless Technology and Pipe Conference TX. The University of Texas, Arlington, TX*.
- Kravchenko O., Yamko O. (2015) Current State of Water Supply and Drainage Systems in Ukraine: Problems and

- Prospects of their Development. *Book of Reports of the International Congress and Engineering Exhibition "ETEWS-2017"*, 86.
7. Vasilyev V., Klementyev Yu. V., Stolbikhin Yu. (2015) Methods of Anticorrosive Protection of Tunnel Collectors and their Facilities. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika = Water Supply and Sanitary Engineering*, (1), 58–66 (in Russian).
 8. Mahmoodian M., Alani A. (2017) Effect of Temperature and Acidity of Sulfuric Acid on Concrete. *Properties Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (10), 1001–1009. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002002](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002002).
 9. Liebscher, M., Gillar, M., Bosseler B. (2011) Sanierung und Abwässersehächten. *Korrespondenz Abwasser und Abfall*, 58 (8), 734–742 (in German).
 10. Liebscher M., Gillar M., Bosseler B. (2011) Sanierung und Abwässersehächten. *Korrespondenz Abwasser und Abfall*, 58 (9), 814–824 (in German).
 11. Anbari M., Massoud T., Abbas R. (2017) Risk Assessment Model to Prioritize Sewer Pipes Inspection in Wastewater Collection Network. *Journal of Environmental Management*, 190, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.052>.
 12. Aleinikova A. (2016) Method for Evaluating the Economic Efficiency of Water Supply Lines Restoration Based on Teleinspection Results. *Aktual'ni Problemi Ekonomiki = Actual Problems of Economics*, 8, 224–228.
 13. Goncharenko D. (2008) *Ekspluatatsiya, Remont i Vostanovlenie Setej Vodootvedeniya*. Kiev, Konsum Publ. 400 (in Russian).
 14. Yukhnevskiy P. I., Dimitriadi N. P. (2019) About Synergistic Effect of Lubricant and Chemical Additives on Obtaining Quality Surface of Concrete Products. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 18 (4), 303–310. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-303-310> (in Russian).
 15. Palevoda I. I., Zhamoidzik S. M., Nekhan D. S., Batan D. S. (2019) Study of Physical and Mechanical Properties of Centrifuged Concrete. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 18 (4), 319–329. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-319-329> (in Russian).
 16. Gurinenko N. S., Batyanovskiy E. I. (2019) Influence of Polyfunctional Additive on Hardening Process and Properties of Cement Concrete. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 18 (4), 330–338. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-330-338> (in Russian).
 17. Goncharenko D., Olejnik D., Bondarenko D. (2014) The Selection of Design and Technology Solutions for Inspection Shafts Construction at Existing Deep-Laid Water Disposal Networks. *Voda i Ekologiya: Problemy i Resheniya = Water and Ecology*, (4), 59–68 (in Russian).
 18. Goncharenko D., Olejnik D. (2014) Razrabotka Tekhnologii Vozvedeniya Zashchishhennykh ot Korrozii Shakhtnykh Stvolov na Dejstvuyushhikh Kanalizatsionnykh Kollektorakh Glubokogo Zalozheniya. *Naukovii Visnik Budivnitstva = Scientific Bulletin of Civil Engineering*, (2), 52–55 (in Russian).
 19. Goncharenko D., Olejnik D., Kajdalov V. (2014) Osobnosti Vozvedeniya Korroziionnostojkikh Shakhtnykh Stvolov Glubokogo Zalozheniya na Dejstvuyushhikh Setyakh Vodootvedeniya. *MOTROL – Motoryzatsiya i Energetyka Rolnictwa*, (6), 3–10 (in Russian).
 20. Rohem N., Pacheco L. J., Budhe S., Banea M. D., Sampaio E. M., De Barros S. (2016) Development and Qualification of a New Polymeric Matrix Laminated Composite for Pipe Repair. *Composite Structures*, 152, 737–745. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.091>.
 21. Orlov A. (1991) *Zashchita Stroitel'nykh Konstruktsij i Tekhnologicheskogo Oborudovaniya ot Korrozii*. Moscow, Stroizdat Publ. 304 (in Russian).
 22. Goncharenko D., Bondarenko D., Zabelin S. (2017) Otsenka Sostoyaniya Kanalizatsionnogo Kollektora Harkovskogo Traktornogo Zavoda, Postroennogo v 1931 godu. *Naukovii Visnik Budivnitstva = Scientific Bulletin of Civil Engineering*, 89 (3), 63–66 (in Russian).

Received: 29.01.2020

Accepted: 14.12.2020

Published online: 30.11.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-506-513>

УДК 623.3

Оценка влияния объектов капитального строительства на прилегающую улично-дорожную сеть при организации дорожного движения посредством регулируемых пересечений

Канд. техн. наук, доц. А. В. Зедгенизов¹⁾, докт. техн. наук Д. В. Капский²⁾,
канд. техн. наук, доц. Р. Ю. Лагерев¹⁾

¹⁾Иркутский государственный технический университет (Иркутск, Российская Федерация),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021

Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Рассмотрены проблемы оценки влияния центров массового тяготения на прилегающую улично-дорожную сеть в процессе их функционирования, расширения или перепрофилирования. Обоснован выбор критериев оценки организации дорожного движения, приведенных в отечественной и зарубежной литературе, в частности предлагается использовать коэффициент загрузки запрашиваемых пересечений и соответствующий ему уровень обслуживания движения (LOS). Представлены основные модели оценки пропускной способности регулируемых пересечений. Показан механизм формирования математической модели оценки коэффициента загрузки регулируемых пересечений. Разъяснены понятия пропускной способности группы полос, продолжительности потерянного времени в цикле, фазовых коэффициентов, потока насыщения и коэффициентов, учитывающих снижение идеального потока насыщения. Приведена математическая модель оценки транспортного спроса, позволяющая рассчитывать интенсивность транспортного потока как к рассматриваемому центру массового тяготения, так и от него на основе общего объема корреспонденций, доли посетителей на индивидуальном транспорте, среднего наполнения индивидуального транспорта, а также коэффициента суточной неравномерности по прибытию и отправлению посетителей на индивидуальном транспорте. Предложена интегрированная математическая модель коэффициента загрузки, включающая параметры оценки транспортного спроса к центрам массового тяготения и параметры, определяющие пропускную способность регулируемых пересечений. Уникальность интегрированной модели состоит в том, что в ней одновременно задействованы параметры, отражающие транспортный спрос и пропускную способность запрашиваемого пересечения. Приведены рекомендации по оценке уровня транспортного обслуживания потоков и коэффициента загрузки на основе данных значений транспортного спроса и пропускной способности прилегающей к центру массового тяготения улично-дорожной сети. Представленная методика оценки уровня обслуживания движения на основе пропускной способности регулируемых пересечений позволяет оценить степень влияния центров массового тяготения на прилегающую улично-дорожную сеть.

Ключевые слова: организация дорожного движения, улично-дорожная сеть, пропускная способность, регулируемые пересечения, уровень обслуживания движения, коэффициент загрузки

Для цитирования: Зедгенизов, А. В. Оценка влияния объектов капитального строительства на прилегающую улично-дорожную сеть при организации дорожного движения посредством регулируемых пересечений / А. В. Зедгенизов, Д. В. Капский, Р. Ю. Лагерев // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 506–513. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-506-513>

Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-70
oapdd_atf@bntu.by

Address for correspondence

Kapskiy Denis V.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-70
oapdd_atf@bntu.by

Estimation Impact of Capital Development Projects on Adjacent Street and Road Network in Organization of Traffic by Means of Signal Controlled Intersections

A. V. Zedgenizov¹, D. V. Kapskiy², R. Yu. Lagerev¹

¹Irkutsk State Technical University (Irkutsk, Russian Federation),

²Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper discusses problems of assessing the impact of mass attraction centers on the adjacent street and road network in the process of their functioning, expansion or conversion. The choice of criteria for assessing the organization of traffic flow, given in the Russian and foreign literature, has been substantiated, in particular, it is proposed to use v/c ratio for adjacent junction and corresponding level of traffic service (LOS). The main models for estimating capacity of signalized intersections are presented. The procedures of forming a mathematical model for estimating the load factor of signalized intersections is shown. The concepts of lane group capacity, total lost time per cycle, phase coefficients, saturation flow rate, and coefficients taking into account the decrease in the ideal saturation flow rate are explained. A mathematical model for estimating transport demand is presented, which allows to calculate the intensity of traffic flow to and from the center of mass attraction on the basis of the total traffic flow of correspondence, share of visitors in individual transport, average filling of individual transport, and coefficient of daily irregularity upon arrival and departure of visitors on an individual transport. An integrated mathematical model of load factor is proposed which includes parameters for estimating transport demand for centers of mass attraction and parameters that determine the signalized intersections capacity. The uniqueness of the integrated model is that it simultaneously involves parameters reflecting the demand and capacity of loading intersection. Recommendations are made on assessing the level of traffic service flows and the v/s ratio, based on the data of transport demand and capacity, adjacent to the centers of mass attraction of the road network. The presented method of estimating the LOS based on the capacity of the signalized intersections allows us to estimate the influence degree of mass attraction centers on the adjacent urban road network.

Keywords: organization of road traffic, street and road network, capacity, signalized intersections, level of service (LOS), load factor = volume to capacity ratio (v/c ratio)

For citation: Zedgenizov A. V., Kapskiy D. V., Lagerev R. Yu. (2021) Estimation Impact of Capital Development Projects on Adjacent Street and Road Network in Organization of Traffic by Means of Signal Controlled Intersections. *Science and Technique*. 20 (6), 506–513. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-506-513> (in Russian)

Введение

Вступивший в силу Федеральный закон от 29.12.2017 № 433-ФЗ «Об организации дорожного движения в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» подтверждает необходимость введения новых подходов, связанных с оценкой степени влияния объектов капитального строительства (ОКС) на прилегающую улично-дорожную сеть (УДС). Прежде всего, речь идет о необходимости разработки проектов организации движения (ПОД) при строительстве или реконструкции ОКС в отношении сети дорог и (или) их участков, обслуживающих ОКС; о необходимости расчета вместительности парковок общего пользования и разработки ПОД при организации въезда транспортного средства на парковки общего пользования и выезда с них. Учитывая положения ФЗ № 433, следует предусмотреть случаи, при которых условия обслуживания ОКС требуют наличия регулирования транспортных потоков, соответственно интегрированных математических моделей, позволяющих качественно оценивать уровень обслуживания движения с применением исходных данных, характеризующих транспортный спрос.

Уровень обслуживания движения – понятие, плотно закрепившееся в отечественных нормативных документах относительно недавно. И связано это в первую очередь с развитием автомобилизации, увеличением числа типов подвижного состава и с необходимостью организации дорожного движения при широком спектре факторов и дорожных условий. Рассматриваемое понятие является производной основных характеристик функционирования элементов УДС и прежде всего пересечений. К сожалению, в Республике Беларусь требования по разработке ПОД отсутствуют, хотя имеются требования по оценке качества дорожного движения и по уменьшению потерь [1, 2].

Оценка уровня обслуживания

Как известно, к общепринятым характеристикам уровня обслуживания относят: коэффициент (уровень) загрузки $z = N/P$ (N – интенсивность движения, авт./ч; P – фактическая (практическая) пропускная способность, авт./ч); коэффициент скорости движения $c = v_z/v_0$ (v_z – средняя скорость движения при рассматриваемом уровне обслуживания, км/ч; v_0 – скорость движения в свободных условиях при уровне обслуживания

ния A , км/ч); коэффициент загрузки $p = q_z/q_{\max}$ (q_z , q_{\max} – интенсивность движения и фактическая (практическая) пропускная способность соответственно, авт./ч) [3].

Для оценки уровня обслуживания движения на элементах УДС специалистам в области организации дорожного движения, организации безопасности движения, а также транспортным инженерам вполне достаточно упомянутых выше характеристик. Однако в случаях принятия решений на политическом, административном и уровнях бизнес-сообществ необходима более понятная интерпретация уровня обслуживания, сводящаяся к некоторой шкале с кратким описанием процесса движения (уровня обслуживания движения, LOS) [4, 5]. Этот подход позволит достаточно точно оценить от «отлично» до «неудовлетворительно» качественные характеристики уровня удобства при проезде через рассматриваемое пересечение.

Таким образом, задача оценки уровня обслуживания движения может сводиться к определению основных параметров дорожного движения, а для пересечений наиболее приемлемой характеристикой является коэффициент загрузки, определяющий долю использования пропускной способности группы движения. Если интенсивность движения индивидуально-го транспорта (ИТ) в зоне центра массового тяготения (ЦМТ) при въезде на его территорию, а также при выезде с территории определяется транспортным спросом, то пропускная способность запрашиваемого ЦМТ пересечения должна оцениваться существующими методиками для конкретных видов пересечений – регулируемых и нерегулируемых.

Для оценки целесообразности применения светофорного регулирования на пересечении, запрашиваемом ЦМТ, следует пользоваться нормативной литературой [6], которая критерием принятия решения определяет критическое соотношение интенсивностей транспортных средств и пешеходов в конфликтующих направлениях. Методика оценки пропускной способности подробно изложена в [7]. Иные особенности применения светофорного регулирования, включая такой важный аспект, как безопасность дорожного движения, приведены в [8, 9].

Принимая во внимание все сопутствующие факторы, приведенные в методических рекомендациях по оценке пропускной способности автомобильных дорог, математический аппарат по

оценке пропускной способности регулируемых пересечений авторы предлагают представить в рассмотренной ниже последовательности.

• Пропускная способность группы полос, ед./ч:

$$P_{ij} = \frac{S_{ij}}{G_i C}, \quad (1)$$

где S_{ij} – поток насыщения группы полос j в течение фазы регулирования i , ед./ч; G_i – эффективная длительность фазы регулирования i , с; C – длительность цикла регулирования, с.

• Поток насыщения

$$S = S_o n f_w f_g f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT} f_{Lpb} f_{Rpb}, \quad (2)$$

где S_o – идеальный поток насыщения, прив. авт./ч; n – количество полос движения в составе группы; f_w, f_g, f_p – коэффициенты, учитывающие ширину полосы движения, продольные уклоны и помехи, создаваемые паркующимися транспортными средствами соответственно; f_{bb}, f_a – то же, учитывающие помехи, создаваемые автобусами, и тип территории; f_{LU}, f_{LT} – то же, учитывающие помехи, создаваемые поворачивающими налево транспортными средствами в составе группы; f_{RT} – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые поворачивающими направо транспортными средствами в составе группы; f_{Lpb}, f_{Rpb} – коэффициенты, учитывающие помехи, создаваемые пешеходами при повороте налево и направо соответственно.

• Длительность цикла регулирования

$$C = \frac{1,5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y}, \quad (3)$$

где L – продолжительность потерянного времени (цикл), характеризующая период времени, в который транспортные средства не осуществляют движение: это переходные интервалы между фазами, а при наличии выделенной пешеходной фазы – пешеходная фаза; y – фазовый коэффициент рассматриваемой группы полос.

• Фазовый коэффициент

$$y_i = \max \left(\frac{N_{ij}}{S_{ij}} \right). \quad (4)$$

• Эффективная длительность фазы регулирования

$$G = \frac{y \sum_{i=1}^n G}{\sum_{i=1}^n y}, \quad (5)$$

где $\sum_{i=1}^n G$ – сумма всех зеленых сигналов, характеризует эффективное время цикла регулирования, т. е. время, в течение которого осуществлялось движение транспортных средств:

$$\sum_{i=1}^n G = C - \sum y. \quad (6)$$

• Интенсивность транспортных потоков на въезд и выезд к (от) ЦМТ определяется транспортным спросом

$$N_{ИТ} = E_{ЦМТ} \frac{d_{ИТ}}{P_{ИТ}} k_{сн}, \quad (7)$$

где $E_{ЦМТ}$ – транспортный спрос к центру массового тяготения, кор./сут.; $d_{ИТ}$ – доля посетителей на ИТ в рассматриваемый час; $P_{ИТ}$ – среднее наполнение ИТ, чел.; $k_{сн}$ – коэффициент суточной неравномерности для рассматриваемого часа.

Транспортный спрос $E_{ЦМТ}$ предлагается оценить на основании его генерирующей способности, выраженной числом посетителей на единицу площади (чел./м²) [10–12], либо на основании имеющегося в наличии регрессионного уравнения, учитывающего дополнительные параметры, характеризующие формирование транспортного спроса к рассматриваемому объекту. Следует особо подчеркнуть, что такое уравнение должно изучаться только в рамках одного типа ЦМТ. Например, для жилых зон средней и высокой этажности, расположенных в административных

границах населенного пункта с численностью 250–1000 тыс. жителей, получено уравнение вида

$$E = 0,018S_{12,13} + 0,18l_c - 590, \quad (8)$$

где E – общее число корреспонденций, совершенных к объекту за рассматриваемый период (сутки), чел./сут.; $S_{12,13}$ – площадь ЦМТ соответствующего типа (жилье средней и высокой этажности), м²; l_c – удаленность объекта тяготения от центра города, м.

Диапазон оценки транспортного спроса по предлагаемому эмпирическому выражению применяется при удаленности от центра города от 3200 до 12000 м. Получены другие примеры оценки транспортного спроса (для офисов):

$$E = 152 + 0,1S_4, \quad (9)$$

где S_4 – площадь ЦМТ соответствующего типа (офисных зданий), м².

Следует отметить, что в данном случае фактор удаленности от центра города не влияет на формирование транспортного спроса к рассматриваемому типу ЦМТ. В случае необходимости оценки транспортного спроса к торгово-развлекательным центрам получена зависимость

$$E = 0,73S_{21}, \quad (10)$$

где S_{21} – площадь ЦМТ соответствующего типа (торгово-развлекательных центров), м².

Кроме того, необходимы данные о доле посетителей рассматриваемого ЦМТ, приходящейся на ИТ. В зависимости от типа ЦМТ, времени суток и дней недели значение доли посетителей на ИТ будет различным. Так, на рис. 1 представлены значения распределения долей посетителей на ИТ в зависимости от часов суток для объектов жилья.

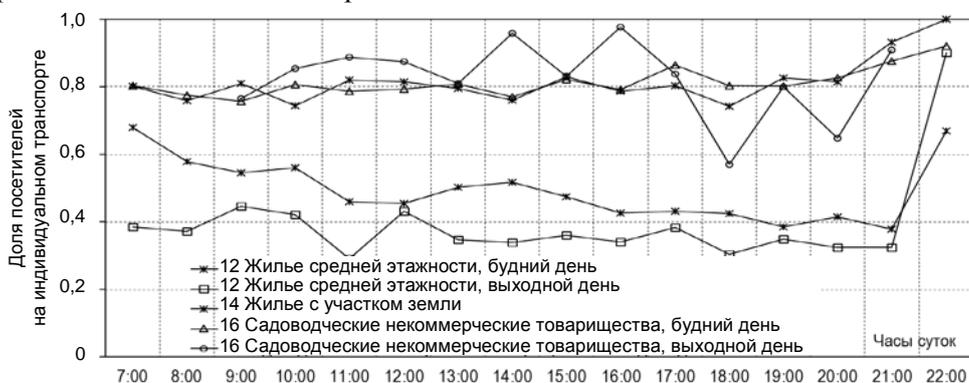


Рис. 1. Доля посетителей центра массового тяготения на индивидуальном транспорте

Fig 1. Share of mass attraction center visitors on individual transport

Как видно из рис. 1, среднее наполнение индивидуальных транспортных средств в течение дня практически не изменяется, однако для жилья с участком земли их значение существенно больше, чем для жилья, расположенного в границах селитебной территории.

Полученные средние значения наполнения ИТ позволяют перейти от количества посетителей (от корреспонденций) к интенсивности ИТ, формирующейся из посетителей рассматриваемого ЦМТ. В зависимости от часов суток, дней недели, а главное – от типа ЦМТ среднее наполнение существенно варьируется (рис. 2).

В ходе проведенных исследований установлено, что наибольшим наполнением обладают садоводческие некоммерческие товарищества (СНТ) (рис. 2) преимущественно в утренние и вечерние часы пик. Среднее значение для данной группы ЦМТ составило 1,53 чел./авт.

Следующим ключевым параметром при оценке интенсивности транспортного потока являются коэффициенты суточной неравномерности, позволяющие определить долю посетителей и соответственно долю ИТ, приходящуюся на рассматриваемый час суток, как правило, пиковый. Значения коэффициентов суточной неравномерности – безразмерная унифицированная величина, характеризующая долю загрузки ЦМТ по часам суток (рис. 3).

Как правило, большая часть ЦМТ имеет общепринятые коэффициенты суточной неравномерности, распределенные в соответствии с пиковыми нагрузками. Вместе с этим установлено, что детские сады и ясли имеют резкое смещение числа корреспонденций в утренний час до 40 % – так же, как проходные заводы, столовых и т. п.

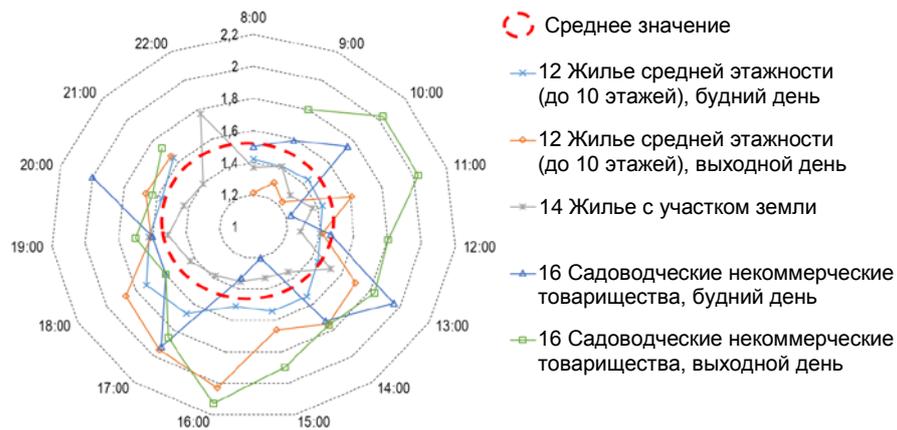


Рис. 2. Среднее наполнение индивидуальным транспортом центров массового тяготения
 Fig. 2. Average filling of the centers of gravitation by individual transport

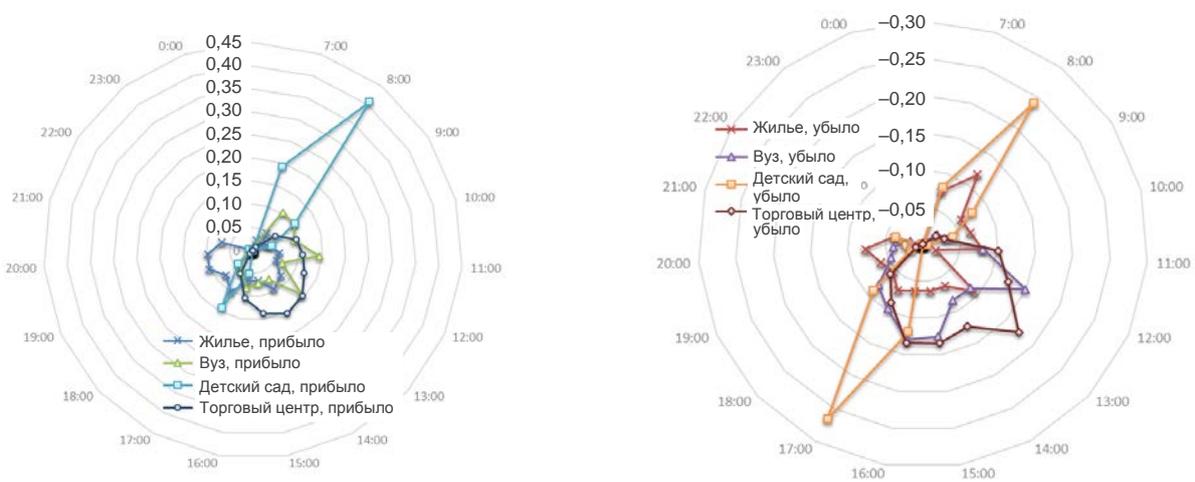


Рис. 3. Коэффициенты суточной неравномерности по центрам массового тяготения
 Fig. 3. Daily irregularity coefficients for mass attraction centers

Стандартный коэффициент суточного максимума лежит в пределах 0,12–0,15: к таким ЦМТ относят жилье, офисы, почтовые отделения, СНТ/ДТН и другие территории. Применение коэффициентов суточной неравномерности позволяет установить количественную связь между суточным значением загрузки ЦМТ и конкретным часом. Данная взаимосвязь крайне важна при проведении практических расчетов (прогнозирование интенсивности движения ИТ к ЦМТ и торгово-развлекательному району). В целом получено усредненное значение коэффициента суточного максимума по всем рассматриваемым ЦМТ, которое составило 0,168.

Таким образом, принимая во внимание упомянутые выше подходы к оценке пропускной способности группы движения на регулируемом пересечении, с учетом зависимостей (1)–(6) модель оценки уровня загрузки может иметь следующий вид:

$$z = \frac{E_{\text{ЦМТ}} \frac{d_{\text{ИТ}}}{P_{\text{ИТ}}} k_{\text{сн}}}{\left(S_o n f_w f_g f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT} f_{Lpb} f_{Rpb} \right) \left(\frac{N_{ij}}{S_{ij}} \sum_{i=1}^n G_i \right)} \cdot \frac{1,5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_{ij}}{S_{ij}} \right)}$$

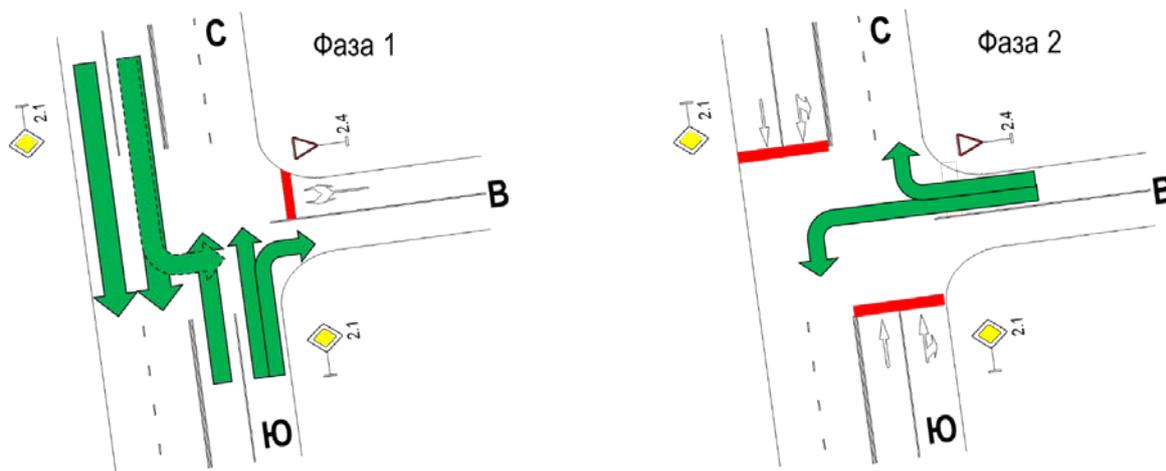


Рис. 4. План фаз запитывающего пересечения
Fig. 4. Phase plan of feeding intersection

В результате преобразований можем получить основной оценочный параметр

$$z = \frac{(1,5L + 5) \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_{ij}}{S_{ij}} \right)}{\left(\frac{1,5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_{ij}}{S_{ij}} \right)} - L \right) \left(1 - \sum_{i=1}^n \left(\max \frac{N_{ij}}{S_{ij}} \right) \right)}. \quad (11)$$

В качестве апробации предлагаемой модели рассмотрим случай ввода светофорного регулирования на одном из типовых пересечений, запитывающих ЦМТ. Матрица значений интенсивностей транспортных потоков представлена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица интенсивностей транспортных потоков на пересечении, ед./ч
Traffic intensity matrix at intersection, units/h

Отправление	Прибытие				Сумма
	С	Ю	З	В	
С	–	600	–	231	600
Ю	800	–	–	175	1206
З	–	–	–	–	–
В	117	60	–	–	177
Сумма	917	660	–	406	

За основу принята методика расчета режима работы светофорной сигнализации, представленная в [7]. Следовательно, предварительно составим план фаз (рис. 4), на котором левоповоротный поток, поворачивая налево, конфликтует с основным направлением.

Тогда по формуле (8) имеем

$$z = \frac{(1,5 \cdot 6 + 5) \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{177}{1282} + \frac{1206}{2640} \right) \right)}{\left(\frac{1,5 \cdot 6 + 5}{1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{177}{1282} + \frac{1206}{2640} \right)} - 6 \right) \times} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{(1,5 \cdot 6 + 5) \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{177}{1282} + \frac{1206}{2640} \right) \right)}{\times \left(1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{177}{1282} + \frac{1206}{2640} \right) \right)} = \frac{1484}{2053} = 0,72.$$

Расчеты подтверждают, что коэффициент загрузки запрашивающего пересечения соответствует уровню обслуживания движения «D», что сопоставимо с высокой эмоциональной загрузкой водителей и низкой экономической эффективностью работы пересечения в целом.

Следует отметить, что предлагаемая модель (11) в зависимости от группы полос требует от проектировщика наличия общедоступной исходной информации, такой как геометрические параметры запрашивающего пересечения, число полос, продольные уклоны, ширина полос движения и т. п., схема организации дорожного движения (наличие разрешенных поворотов, остановочных пунктов, мест для уличного паркования и др.). При рассмотрении групп полос, запрашивающих ЦМТ, требуются значения площади рассматриваемого ЦМТ и его удаленности от центра города и (или) от магистральной улицы.

С учетом большого количества свободно расширяемых ГИС-программ такая информация вполне доступна и имеет достаточно высокую надежность. Данные, характеризующие доли посетителей, прибывающих на ИТ, среднее наполнение ИТ, и коэффициенты суточной неравномерности по прибытию и отправлению оцениваются путем натурных исследований с учетом рекомендаций, изложенных выше, а также с помощью научных публикаций [13–17].

ВЫВОДЫ

1. Представлена математическая модель оценки транспортного спроса, позволяющая оценивать интенсивность транспортного потока как к рассматриваемому центру массового тяготения, так и от него на основе общего объема

корреспонденций, доли посетителей на индивидуальном транспорте, среднего наполнения индивидуального транспорта, а также коэффициента суточной неравномерности по прибытию и отправлению посетителей на индивидуальном транспорте.

2. Предложена математическая модель коэффициента загрузки, включающая параметры оценки транспортного спроса к центру массового тяготения и параметры, определяющие пропускную способность регулируемых пересечений.

3. Представленная методика оценки уровня обслуживания движения на основе пропускной способности регулируемых пересечений позволяет оценить степень влияния центра массового тяготения на прилегающую улично-дорожную сеть с применением следующих ГИС-данных: площадь центра массового тяготения, его удаленность от центра города и (или) от магистральной улицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.03-227–2010 (02250). Введ. 01.07.2011. Минск: Минстройархитектуры, 2011. 46 с.
2. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. Минск: БНТУ, 2006. 240 с.
3. Лагерев, Р. Ю. Методика оценки распределения транспортных потоков на пересечениях с использованием детекторов транспорта / Р. Ю. Лагерев, А. В. Зедгенизов // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов: сб. науч. тр., посвященный ежегодной Междунар. науч.-практ. конф., 24–28 окт. 2011 г. Минск: БНТУ, 2012. С. 215–224.
4. Лагерев, Р. Ю. Управление насыщенными регулируемые пересечениями. Городские транспортные системы: вектор развития науки проектирования / Р. Ю. Лагерев, А. В. Зедгенизов, А. Г. Левашев // Организация и безопасность движения в крупных городах. Инновации: ресурс и возможности: сб. докл. 10-й Междунар. конф. СПб.: СПбГАСУ, 2012. С. 148.
5. Ваксман, С. А. Принципы разработки и содержание КСОД столичного города (на примере Минска) / С. А. Ваксман, Ф. Г. Глик, Д. В. Капский // Наука – образованию, производству, экономике: матер. 7-й Междунар. науч.-техн. конф., в 3 т. Минск: БНТУ, 2009. Т. 2. С. 267–268.
6. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств: ГОСТ Р 52289–2004. Введ. 15.12.2004. М.: Стандартинформ, 2004. 112 с.
7. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог: ОДМ 218.2.020–2012. М., 2012. 148 с.

8. Zedgenizov, A. V. The Estimation of Correspondence Generation to the Residential District of City Center / A. V. Zedgenizov // *Nauka i Studia*. 2014. Vol. 126, No 16. P. 76–83.
9. Zedgenizov, A. V. Methods for the Traffic Demand Assessment Based on the Quantitative Characteristics of Urban Areas Functioning / A. V. Zedgenizov, D. G. Burkov // *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 20. P. 724–730. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.117>.
10. Hooper, K. G. *Trip Generation Handbook*, 2nd ed. Washington: ITE, 2004.
11. *Trip Generation*, 8th ed. Washington ITE, 2008.
12. Zedgenizov, A. Location-Based Transport Demand Forecasting Methods for Suburbanized Areas / A. Zedgenizov // *Proceedings of the International Conference: Aviamechanical Engineering and Transport (Avent 2018)*. 2018. Vol. 158. P. 458–461. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.88>.
13. Плотников, А. М. Разработка схем организации движения транспортных и пешеходных потоков на регулируемых перекрестках / А. М. Плотников. СПб.: Нестор-История, 2010. 109 с.
14. *Highway Capacity Manual 2010* / Transportation Research Board, National Research Council. Washington, 2010. 1134 p.
15. Об утверждении Концепции обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Беларусь: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 14 июня 2006 г. № 757 // Национальный реестр правовых актов Респ. Беларусь. 2006. № 5/22459.
16. Капский, Д. В. Проведение исследований интенсивности движения транспортных потоков: теория и эксперимент / Д. В. Капский, Д. В. Рожанский, Д. В. Мозалевский // *Безпека дорожнього руху України*. 2006. Т. 23, № 3–4. С. 35–40.
17. Капский, Д. В. *Методология повышения качества дорожного движения* / Д. В. Капский. Минск: БНТУ, 2018. 372 с.
- Поступила 17.05.2019
Подписана в печать 20.08.2019
Опубликована онлайн 30.11.2021
- REFERENCES
1. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-3.03-227–2010 (02250). *Streets of Settlements. Building Design Codes*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2011. 46 (in Russian).
2. Vrubel Yu. A., Kapsky D. V., Kot E. N. (2006) *Determination of Traffic Losses*. Minsk, Belarusian National Technical University. 240 (in Russian).
3. Lagerev R. Yu., Zedgenizov A. V. (2012) Methodology for Assessing Distribution of Traffic Flows at Intersections Using Traffic Detectors. *Sovershenstvovanie Organizatsii Dorozhnogo Dvizheniya i Perevozok Passazhirov i Gruzov: Sb. Nauch. Tr., Posvyashchennyi Ezhegodnoi Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., 24–28 Okt. 2011 g.* [Improvement of Organization of Road Traffic and Transportation of Passengers and Goods: Collection of Scientific Papers Dedicated to the Annual International Scientific and Practical Conference, Oct. 24–28, 2011]. Minsk, Belarusian National Technical University, 215–224 (in Russian).
4. Lagerev R. Yu., Zedgenizov A. V., Levashev A. G. (2012) Saturated Adjustable Intersections Control. Urban Transport Systems: Vector of Design Science Development. *Organizatsiya i Bezopasnost' Dvizheniya v Krupnykh Gorodakh. Innovatsii: Resurs i Vozmozhnosti: Sb. Dokl. 10-i Mezhdunar. Konf.* [Organization and Traffic Safety in Large Cities. Innovations: Resource and Capabilities: Collection of Papers of the 10th International Conference]. Saint-Petersburg, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering [SPbGASU], 148 (in Russian).
5. Vaksman S. A., Glik F. G., Kapsky D. V. (2009) Design Principles and Content of KSOD [Complex Scheme of Traffic Organization] for Capital City (on the Example of Minsk). *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Mater. 7-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 2* [Science for Education, Production, Economy: Proceedings of the 7th International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 267–268 (in Russian).
6. State Standard P 52289–2004. *Technical Means of Organizing Road Traffic. Rules for the Use of Road Signs, Markings, Traffic Lights, Road Barriers and Guiding Devices*. Moscow, Standartinform Publ., 2004. 112 (in Russian).
7. ODM [Road Industrial Methodical Document] 218.2.020–2012. Road Industrial Methodical Document. Methodological Recommendations for Assessing the Throughput of Highways. Moscow, 2012. 148 (in Russian).
8. Zedgenizov A. V. (2014) The Estimation of Correspondence Generation to the Residential District of City Center. *Nauka i Studia*, 126 (16), 76–83.
9. Zedgenizov A. V., Burkov D. G. (2017) Methods for the Traffic Demand Assessment Based on the Quantitative Characteristics of Urban Areas Functioning. *Transportation Research Procedia*, 20, 724–730. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.117>.
10. Hooper K. G. (2004) *Trip Generation Handbook*. 2nd ed. Washington, DC Institute of Transportation Engineers.
11. DC Institute of Transportation Engineers (2008) *Trip Generation*, 8th ed. Washington.
12. Zedgenizov A. (2018) Location-Based Transport Demand Forecasting Methods for Suburbanized Areas. *Proceedings of the International Conference: Aviamechanical Engineering and Transport (Avent 2018)*, 158, 458–461. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.88>.
13. Plotnikov A. M. (2010) *Development of Schemes for Organizing the Movement of Transport and Pedestrian Flows on the Regulated Intersections*. Saint-Petersburg, Nestor-Istoriya Publ. 109 (in Russian).
14. Transportation Research Board, National Research Council (2010) *Highway Capacity Manual 2010*. Washington, D. C. 1134.
15. On the Approval of the Concept for Ensuring Safety Road Traffic in the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus Dated June 14, 2006 No 757. *Natsional'nyi Reestr Pravovykh Aktov Resp. Belarus'* [National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus]. 2006, 5/22459 (in Russian).
16. Kapsky D. V., Rozhansky D. V., Mozalovsky D. V. (2006) Carrying Out Research on Intensity of Traffic Flows: Theory and Experiment. *Bezpeka Dorozhniogo Rukhu Ukraini* [Road Safety of Ukraine], 23 (3–4), 35–40 (in Russian).
17. Kapsky D. V. (2018) *Methodology for Improving the Quality of Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 372 (in Russian).

Received: 17.05.2019

Accepted: 20.08.2019

Published online: 30.11.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-514-521>

УДК 656.13

Определение параметров функционирования маршрутов пассажирского транспорта средствами компьютерного моделирования процессов

Докт. техн. наук, проф. В. К. Доля¹⁾, докт. техн. наук, доц. К. В. Доля¹⁾, канд. техн. наук Е. Е. Доля²⁾

¹⁾Одесский национальный морской университет (Одесса, Украина),

²⁾Харьковский национальный университет радиозлектроники (Харьков, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Исследована эффективность функционирования маршрутов городского пассажирского транспорта. Установлено, что данное функционирование происходит в неизолированной среде, которая влияет на систему с момента ее образования и может привести к расхождению между расчетной и фактической эффективностью работы системы. В результате анализа показателей функционирования маршрута перевозок пассажиров выявлено, что среда функционирования маршрутов влияет на их эффективность комплексно. Вследствие этого должно учитываться взаимное влияние одного фактора на другие. Оценка эффективности функционирования следует проводить для всей системы маршрутов, а не для отдельно рассматриваемой подсистемы. В результате анализа таких основных показателей, как доход, затраты на топливо, смазочные материалы, техническое обслуживание и ремонт, выявлены расхождения между запланированными значениями показателей и реальными данными. Определено, что функция распределения случайных величин указанных показателей описывается нормальным законом. На заключительном этапе исследования получены закономерности влияния параметров автотранспортного предприятия на вероятность окупаемости мероприятий. Предлагаемый комплексный подход к определению эффективности маршрутов городского пассажирского транспорта базируется не только на устоявшихся, но и на стохастических параметрах, используемых при функционировании этих маршрутов. Разработан алгоритм определения эффективности городских маршрутных пассажирских перевозок, который учитывает взаимосвязь доходов и расходов, современные представления о закономерностях изменения вероятности развития оптимистического, пессимистического и промежуточного вариантов развития событий эффективности маршрутов. В основу алгоритма положены формализованные зависимости изменения во времени вероятностей доходов и расходов, учитываемые в процессе функционирования маршрутов городского пассажирского транспорта при различных их параметрах.

Ключевые слова: транспортная система, маршрут, городской пассажирский транспорт, эффективность перевозок, стохастичность перевозочного процесса, объем перевозок, период окупаемости

Для цитирования: Доля, В. К. Определение параметров функционирования маршрутов пассажирского транспорта средствами компьютерного моделирования процессов / В. К. Доля, К. В. Доля, Е. Е. Доля // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 514–521. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-514-521>

Determining Parameters of Functioning of Passenger Transport Routes by Means of Computer Simulation of Processes

V. K. Dolia¹⁾, K. V. Dolia¹⁾, O. E. Dolia²⁾

¹⁾Odessa National Maritime University (Odessa, Ukraine),

²⁾Kharkiv National University of Radio Electronics (Kharkiv, Ukraine)

Abstract. The efficiency of the functioning of urban passenger transport routes has been studied in the paper. It has been established that the functioning of urban passenger transport routes takes place in a non-isolated environment, which affects the system from the moment of its formation and can lead to discrepancy between the calculated and actual efficiency

Адрес для переписки
Доля Виктор Константинович
Одесский национальный морской университет
ул. Мечникова, 34,
65029, г. Одесса, Украина
Тел.: +380 66 298-94-87
c.dolya@ukr.net

Address for correspondence
Dolia Victor K.
Odessa National Maritime University
34, Mechnikova str.,
65029, Odessa, Ukraine
Tel.: +380 66 298-94-87
c.dolya@ukr.net

of the system. As a result of the functioning indicator analysis of the passenger transportation route, it has been revealed that the environment of the route functioning affects the efficiency in a complex manner. Consequently, the mutual influence of one factor on others should be taken into account. Performance evaluation should be carried out for the entire route system, and not within the separately considered subsystem. As a result of the analysis of such key indicators as income, fuel costs, lubricants, maintenance and repair, discrepancies have been found between the planned values of indicators and actual data. It is determined that the distribution function of the random variables of these indicators is described by a normal law. At the final stage of the study, regularities in the influence of the road transport enterprise parameters on the probability of investment return have been obtained. The proposed integrated approach to determining the efficiency of urban passenger transport routes is based not only on the established, but also on the stochastic parameters that occur during the functioning of these routes. An algorithm has been developed for determining the efficiency of urban route passenger traffic, which takes into account the interrelation of income and expenses, modern ideas about the patterns of change in the probability of development of optimistic, pessimistic and intermediate scenarios for improvement of route efficiency events. The algorithm is based on formalized dependences of the change in time of the probabilities of income and expenses which are taken into account in the operation process of urban passenger transport routes with their various parameters.

Keywords: transport system, route, urban passenger transport, traffic efficiency, stochasticity of the transportation process, traffic volume, payback period

For citation: Dolia V. K., Dolia K. V., Dolia O. E. (2021) Determining Parameters of Functioning of Passenger Transport Routes by Means of Computer Simulation of Processes. *Science and Technique*. 20 (6), 514–521. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-514-521> (in Russian)

Введение

Современные требования к развитию транспортных систем городов требуют гармоничного соотношения технологических, экономических и социальных показателей функционирования маршрутов городского пассажирского транспорта общего пользования [1, 2]. Эффективные для перевозчика и удобные для жителей маршруты могут обеспечить привлекательность и пользу в общей системе городского пассажирского транспорта [3]. Не требует дополнительных объяснений тот факт, что эффективные маршруты, которые обеспечивают доступную цену за проезд и одновременно являются прибыльными, могут быть инвестиционно привлекательными и составлять основу всей транспортной системы городского пассажирского транспорта [4].

Опыт общественно-экономических отношений в области транспорта свидетельствует о том, что эффективны такие системы, а в рассматриваемом случае – пассажирские маршруты, в которых наблюдается рациональное соотношение следующих параметров: доходы перевозчиков, затраты на производственную деятельность, налоги и сборы, кредитные платежи. В то же время в современной науке и практике еще недостаточно разработаны методы и подходы, позволяющие исследовать эффективность функционирования маршрутов с учетом стохастичности большинства наблюдаемых параметров в общем комплексном подходе к аналогичным исследованиям [1, 5–8].

Цель исследования – оценка эффективности маршрутов городского пассажирского транс-

порта с учетом стохастичности составляющих параметров их функционирования. Объект исследования – процесс функционирования маршрутов городского пассажирского транспорта, а предмет – закономерности влияния параметров маршрутов городского пассажирского транспорта на их эффективность. В исследовании использовали методы анализа вариантов решения задачи с помощью программного обеспечения, теории систем и системного анализа для формализации транспортных процессов, а также математическое моделирование для формирования закономерностей изменения основных показателей маршрутов.

Проведение исследований

Исследованиями установлено, что процессы, которые происходят во время выполнения пассажирских перевозок, являются стохастическими [9–11]. Для их оценки выборочно проанализированы результаты работы автотранспортных предприятий, предоставляющих услуги по перевозкам пассажиров на городских маршрутах. Результаты анализа деятельности субъектов хозяйствования при выполнении пассажирских перевозок в г. Харькове позволили установить различия между запланированными значениями показателей и реальными данными. Для выявления особенностей распределения этих разногласий установили отклонение между плановыми и фактическими данными, поскольку показатели в натуральном выражении значительно отличались. По результатам исследований построены графики распределения отклонений имеющихся затрат на топливо и смазочные материалы в зависимости от рас-

четных значений (рис. 1, 2). Кроме того, определены отклонения затрат на техническое обслуживание и ремонт, шины.

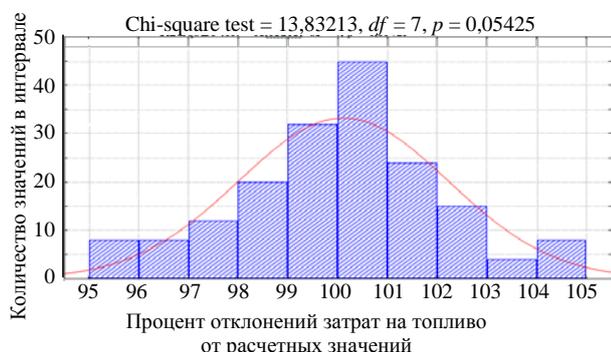


Рис. 1. Гистограмма распределения отклонений имеющихся затрат на топливо от расчетных значений

Fig. 1. Deviation distribution histogram of available fuel costs from calculated values

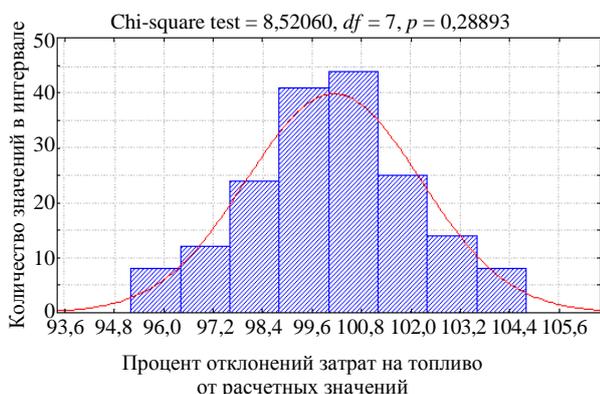


Рис. 2. Гистограмма распределения отклонений имеющихся затрат на смазочные материалы от расчетных значений

Fig. 2. Deviation distribution histogram of available costs for lubricants from calculated values

Для определения колебаний количества перевезенных пассажиров на городских пассажирских автобусных маршрутах проведен сбор соответствующей информации на автотранспортных предприятиях Харькова. По результатам составлена табл. 1.

Характер распределения установленных разногласий описывается нормальным законом распределения случайных величин с соответствующим математическим ожиданием и средним квадратичным отклонением σ . Для проверки гипотезы о соответствии статистического распределения теоретическому использовали критерий Пирсона (χ^2), рассчитанный в программе Statistica.

Так, для распределения расходов на топливо критерий Пирсона $\chi^2 = 13,83$ при количестве степеней свободы $df = 7$; вероятность согласия $p = 0,054$, что больше принятой $0,050$ [10, 12]. Следовательно, можно утверждать, что отклонение фактических затрат на топливо от рассчитанных описывается нормальным законом. Критерий Пирсона составил для:

- смазочных материалов $\chi^2 = 8,52$ при количестве степеней свободы $df = 7$ и вероятности согласия $p = 0,288$;
- технического обслуживания и ремонта $\chi^2 = 13,72$ при количестве степеней свободы $df = 7$ и вероятности согласия $p = 0,056$;
- шин $\chi^2 = 13,72$ при количестве степеней свободы $df = 7$ и вероятности согласия $p = 0,058$.

Таблица 1

Суммарные характеристики параметров функционирования автотранспортных предприятий
Total characteristics of parameters for functioning of road transport enterprises

№ наблюдения	Общее количество перевезенных пассажиров Q , пас./сут.	Общий доход D , у. е.	Общий пробег автобусов L , км	Общие затраты на топливо Z_{\max} , грн.
1	512550	640687,5	256121,2	204517,5
2	523120	653900,0	261403,1	204721,0
...
153	493920	617400,0	246811,8	205128,0
154	516648	645810,0	258169,2	205331,5
155	527301	659126,3	263492,2	205535,0
156	416580	520725,0	208164,9	205942,0
157	498847	623558,8	249274,1	206349,0

Для всех расчетов $p > 0,05$. При учете стохастичности перевозочного процесса целесообразно принять во внимание отклонения φ путем рассмотрения распределения i -го объема перевозок за период t

$$\varphi_i = \frac{Q_{ti}}{Q_{cct}}, \quad (1)$$

где Q_{ti} – i -й объем перевозок за период t , пас.; Q_{cct} – средний объем перевозок, рассчитанный по детерминированным моделям, пас.

По нормальному закону распределения i -й объем перевозок не должен выходить за пределы $\pm 3\sigma$

$$Q_{ti} = Q_{cct} \pm 3\sigma. \quad (2)$$

Известно, что расходы на обеспечение функционирования маршрута зависят от пробега на маршруте L_{ti} , который прямо пропорционален объему перевозок пассажиров:

$$L_{ti} = \frac{2l_m N_{pt} Q_{ti}}{Q_{cct}}, \quad (3)$$

где l_m – длина маршрута, км; N_{pt} – количество рейсов, выполненных за период t , ед.

Приведенные уравнения доказывают влияние стохастичности колебаний объемов перевозимых пассажиров не только на доходную составляющую функционирования маршрута, но и на расходы от функционирования. С учетом стохастичности колебаний объемов перевозимых пассажиров в новых подходах к расчету эффективности городских пассажирских перевозок сформулируем основные этапы выполнения задачи:

I – определение параметров закона распределения объемов перевозок;

II – определение эксплуатационных характеристик работы на маршруте;

III – определение затрат, связанных с работой транспортных средств на маршруте;

IV – определение основных налогов и сборов, связанных с перевозочным процессом;

V – определение показателей функционирования маршрута (периода окупаемости).

Сформулированные этапы позволяют построить алгоритм расчета параметров эффективности городских пассажирских перевозок.

Эту задачу, а также установление закономерностей влияния исходных характеристик на вероятность окупаемости инвестиционных мероприятий выполняли с помощью программного обеспечения. При разработке программы расчета параметров эффективности городских пассажирских перевозок выходные данные распределяли по трем группам:

- характеристика маршрута;
- параметр автотранспортного предприятия;
- характеристика транспортного средства.

Используя алгоритм расчета параметров эффективности городских пассажирских перевозок, разработали соответствующий программный продукт в среде Borland C++ (рис. 3).

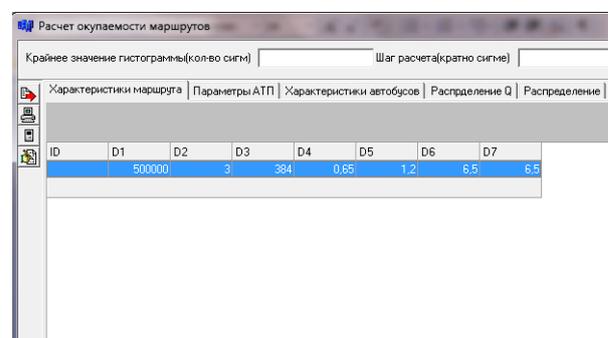


Рис. 3. Интерфейс программного обеспечения расчета параметров эффективности городских пассажирских перевозок

Fig. 3. Software Interface for calculating efficiency parameters of urban passenger traffic

При расчете эффективности функционирования городских пассажирских перевозок вся совокупность параметров делится на постоянные (условно постоянные) и переменные. Поэтому на данном этапе целесообразно сформировать массив данных этих показателей.

В результате изучения закономерностей влияния характеристик маршрута на вероятность окупаемости установлено, что главной характеристикой маршрута является объем перевозок. Кроме того, важно его колебание в течение времени функционирования маршрута. Для учета колебаний объема перевозок в программном продукте обеспечен отдельный модуль, что позволяет без изменения значения среднего объема перевозок (в пределах $\pm 3\sigma$) проводить исследования изменения параметров эффективности функционирования маршрутов городского пассажирского транспорта.

Экспериментальные исследования показали, что среднее квадратичное отклонение объемов перевозок колеблется в пределах 1–10 %. Изменения вероятности окупаемости инвестиционных мероприятий при среднем квадратичном отклонении объема перевозок $\sigma = 1$ приведены на рис. 4, а ожидаемый финансовый результат – на рис. 5.

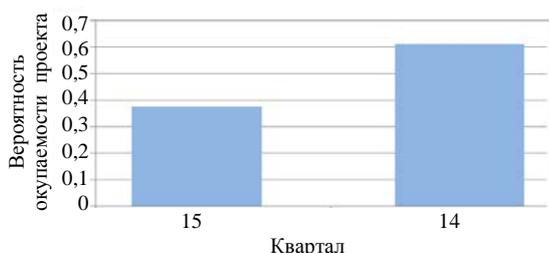


Рис. 4. Изменение вероятности окупаемости при среднем квадратичном отклонении объема перевозок $\sigma = 1$ (5000 пассажиров)

Fig. 4. Change in probability of payback with average square deviation of traffic volume $\sigma = 1$ (5000 passengers)

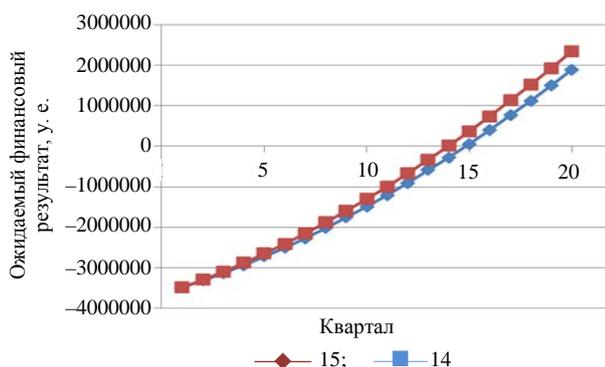


Рис. 5. Изменение ожидаемого финансового результата при среднем квадратичном отклонении объема перевозок $\sigma = 1$

Fig. 5. Change in expected financial result with average square deviation of traffic volume $\sigma = 1$

Согласно рис. 4, вероятность окупаемости в 14-м квартале составила 0,61, а в 15-м – 0,39, при этом ожидаемый финансовый результат зависит от квартала окупаемости (рис. 5). По результатам расчетов можно сделать вывод, что возможным периодом окупаемости является 14-й квартал с вероятностью 0,61. К тому же при $\sigma > 5$ вероятность окупаемости выходит за пределы продолжительности функционирования системы.

Изменение среднего квадратичного отклонения объема перевозок с $\sigma = 1$ на $\sigma = 3$ приводит к расширению диапазона вероятности окупаемости на шесть кварталов (рис. 6).

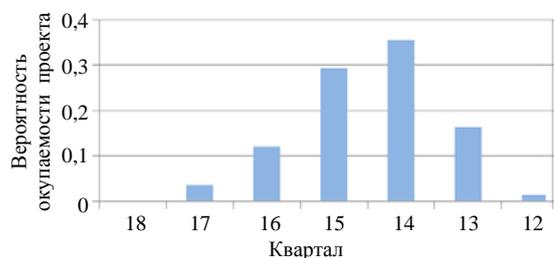


Рис. 6. Изменение вероятности окупаемости при среднем квадратичном отклонении объема перевозок $\sigma = 3$ (15000 пассажиров)

Fig. 6. Change in probability of payback with average square deviation of traffic volume $\sigma = 3$ (15.000 passengers)

Согласно рис. 6, максимальное значение вероятности в 14-м квартале составило 0,35, а ожидаемый финансовый результат зависит от квартала окупаемости (рис. 7).

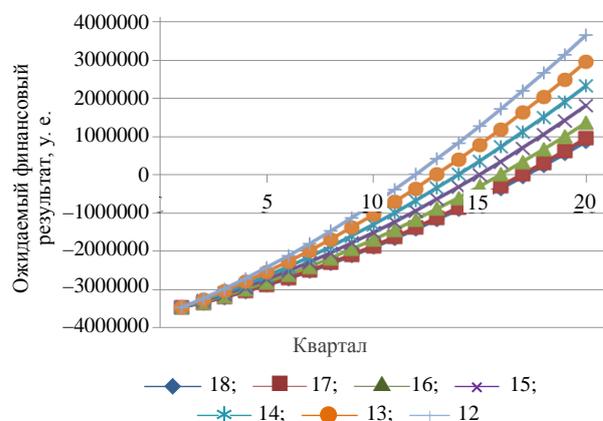


Рис. 7. Изменение ожидаемого финансового результата при среднем квадратичном отклонении объема перевозок $\sigma = 3$

Fig. 7. Change in expected financial result with average square deviation of traffic $\sigma = 3$

Увеличение среднего квадратичного отклонения еще на единицу ($\sigma = 4$) приводит к расширению диапазона вероятности окупаемости на восемь кварталов (рис. 8). Изменение ожидаемого финансового результата при среднем квадратичном отклонении объема перевозок $\sigma = 4$ приведено на рис. 9.

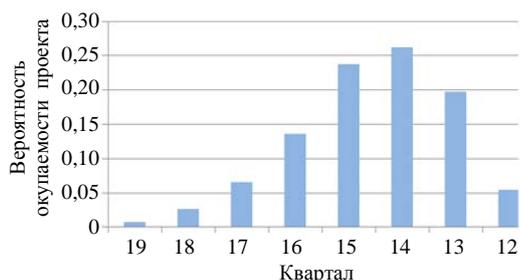


Рис. 8. Изменение вероятности окупаемости при среднем квадратичном отклонении объема перевозок $\sigma = 4$ (20000 пассажиров)

Fig. 8. Change in probability of payback with average square deviation of traffic volume $\sigma = 4$ (20.000 passengers)

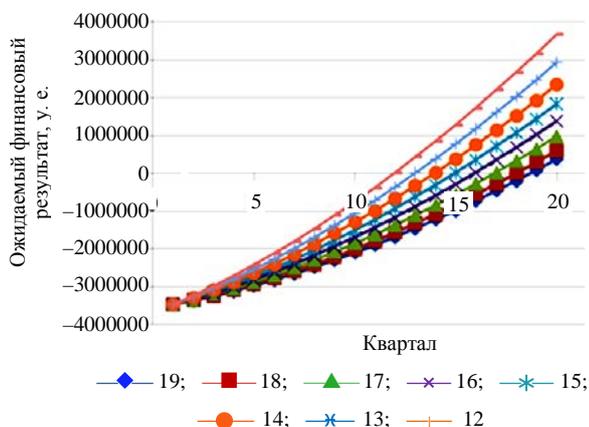


Рис. 9. Изменение ожидаемого финансового результата при среднем квадратичном отклонении объема перевозок $\sigma = 4$

Fig. 9. Change in expected financial result with average square deviation of traffic volume $\sigma = 4$

Увеличение среднего квадратичного отклонения еще на единицу ($\sigma = 5$) приводит к расширению диапазона вероятности окупаемости на восемь кварталов (рис. 10). При величине ставки дисконта 9 % и неизменном значении среднего квадратичного отклонения наблюдается расширение диапазона периодов вероятной окупаемости. Изменение ожидаемого финансового результата при среднем квадратичном отклонении объема перевозок $\sigma = 5$ приведено на рис. 11. По результатам расчетов можно сделать вывод, что наиболее вероятным периодом окупаемости будет 14-й квартал с вероятностями от 0,20 до 0,61. При этом после отклонения $\sigma = 5$ вероятность окупаемости

выходит за пределы продолжительности функционирования системы.

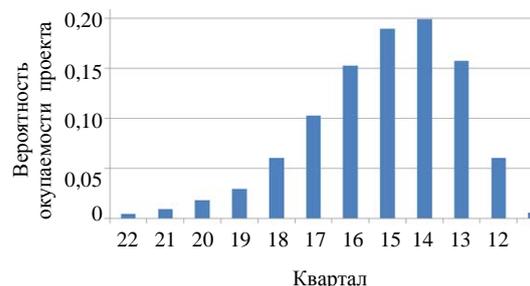


Рис. 10. Изменение вероятности окупаемости при величине ставки дисконта 9 % и стандартном отклонении объема перевозок $\sigma = 5$

Fig. 10. Change in probability of payback at discount rate of 9 % and standard deviation of traffic volume $\sigma = 5$

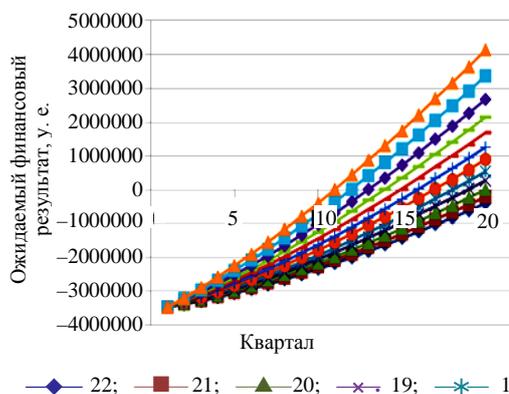


Рис. 11. Изменение ожидаемого финансового результата при величине ставки дисконта 9 % и стандартном отклонении объема перевозок $\sigma = 5$

Fig. 11. Change in expected financial result at discount rate of 9 % and standard deviation of traffic volume $\sigma = 5$

Установленные закономерности влияния параметров автотранспортного предприятия на вероятность окупаемости свидетельствуют о том, что среди всей совокупности параметров автотранспортного предприятия главным является коэффициент выпуска транспортных средств на линию α_v . Так, увеличение этого коэффициента на 0,05 единицы ($\alpha_v = 0,95$) приведет к смещению вероятности окупаемости с 3-го до 12-го квартала, а также к уменьшению диапазона кварталов окупаемости. Подобная тенденция сохраняется и в обратном направлении, т. е. уменьшение α_v на 0,1 единицы ($\alpha_v = 0,85$) приведет к смещению вероятности окупае-

мости с 7-го до 19-го квартала, а также к увеличению диапазона кварталов окупаемости.

Другая характеристика маршрута, которая влияет на вероятность окупаемости, – величина тарифа. Для исследований выбирали интервал изменения тарифа от 3,25 до 4 гривен при среднем квадратичном отклонении $\sigma = 5$. В результате установлено, что увеличение тарифа значительно сокращает период окупаемости. То есть при определении обоснованного тарифа нужно иметь достоверные данные как об объемах перевозок, так и об их колебаниях в течение длительного периода времени.

Такие характеристики, как максимальный пассажиропоток, длина маршрута и время оборота, являются условно постоянными, т. е. не изменяются в течение длительного периода времени. Иначе любое изменение значений этих характеристик требует пересмотра всего мероприятия по прогнозированию эффективности функционирования маршрута.

Рассмотрено также влияние изменения амортизационных расходов, размеров ставки дисконта и заработной платы на основные показатели эффективности функционирования маршрутов городского пассажирского транспорта. Согласно исследованиям, изменение ставки дисконта влияет на диапазон кварталов окупаемости, расширяя его до 12 кварталов. Кроме того, наблюдается изменение вероятности окупаемости от 0,235 до 0,198 при неизменном наиболее вероятном 14-м квартале окупаемости. Изучено также влияние основных характеристик транспортных средств (автобусов), таких как номинальная пассажироместимость, норма расхода топлива и годовые процентные выплаты по заемному капиталу.

Среди характеристик маршрута, влияющих на период окупаемости, – величины объема перевозок и будущего тарифа. Основные параметры автотранспортного предприятия, которые влияют на изменение вероятности окупаемости, – это коэффициент выпуска, заработная плата водителей, стоимость одного литра топлива и ставка амортизационных отчислений. Они приводят к расширению и смещению диапазона вероятности окупаемости. Главные характеристики функционирования городского транспортного средства, из-за которых изменяется окупае-

мость инвестиционного мероприятия, – номинальная пассажироместимость, цена транспортного средства и годовые процентные выплаты.

ВЫВОДЫ

1. Результаты анализа деятельности субъектов хозяйствования при выполнении пассажирских перевозок позволили установить различия между запланированными значениями показателей и реальными данными. Среди них – расходы на топливо, смазочные материалы, техническое обслуживание и ремонт, шины. При этом функция распределения случайных величин описывается нормальным законом.

2. При проверке гипотезы о соответствии статистического распределения использовали критерий Пирсона. По результатам расчетов установлено для расходов:

– на топливо при $\chi^2 = 13,83$ и количестве степеней свободы $df = 7$ вероятность согласия $p = 0,054$;

– на смазочные материалы при $\chi^2 = 8,52$ и числе степеней свободы $df = 7$ вероятность согласия $p = 0,288$;

– на техническое обслуживание и ремонт при $\chi^2 = 13,72$ и количестве степеней свободы $df = 7$ вероятность согласия $p = 0,056$;

– на шины при $\chi^2 = 13,65$ и количестве степеней свободы $df = 7$ вероятность согласия $p = 0,058$.

Для всех рассмотренных видов расходов вероятность согласия превышает принятую величину 0,05.

3. Для учета стохастичности параметров городских пассажирских перевозок рассмотрено распределение объема перевозок как такового, что согласовывается с нормальным законом распределения, который принимается во внимание при расчете соответствующих разновидностей расходов.

ЛІТЕРАТУРА

1. Influence of Features of the Transport Network Pattern on the Haul Cycle Length between its Nodes on the Example of the Transport Network of Ukraine / C. Dolya [et al.] // Technology Audit and Production Reserves. 2017. Vol. 5, No 2. P. 54–58. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112078>.

2. Долья, К. В. Формализация гравитационной модели для расчета параметров междугородних пассажирских корреспонденций / К. В. Долья // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 5. P. 437–443. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-437-443>.
 3. Modeling of Polygons of Maximum Passenger Route Transport Accessibility by the Example of the Transport System of Ukraine / K. Dolya [et al.] // *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. Vol. 6, No 2. P. 28–33. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.115219>.
 4. Dolia, K. Variativity of the Transport System at Intercity Passenger Transport from the Demand / D. Kostiantyn // *International Journal of Data Science and Analysis*. 2017. Vol. 3, No 6. P. 77. <https://doi.org/10.11648/j.ijdsa.20170306.13>.
 5. Dolya, C. Investigation of Approaches to Modeling of Intercity Passenger Transportation System / C. Dolya, A. Botsman, V. Kozhyna // *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. Vol. 4, No 2. P. 24–28. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.108889>.
 6. Grigorova, T. Assessment of Elasticity of Demand for Services of Suburban Road Passenger Transport / T. Grigorova, Ya. Davidich, V. Dolya // *Technology Audit and Production Reserves*. 2015. Vol. 3, No 2. P. 13–16. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.44768>.
 7. Galkin, A. The Role of Consumers in Logistics Systems / A. Galkin, C. Dolia, N. Davidich // *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 27. P. 1187–1194. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.010>.
 8. Капский, Д. В. Форма графика работ водителей маршрутного пассажирского транспорта / Д. В. Капский, С. С. Семченков // *Автомобильное строительство и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. в 2 т. Минск: БНТУ, 2020. Т. 2. С. 92–96*.
 9. Dolia, V. Several Logistics Chains Transportation Services Approach by Single Transport Company / V. Dolia, Y. Kush, A. Galkin // *Journal L'Association 1901 "SEPIKE"*. 2014. Vol. 4. P. 86–90.
 10. Management of Freight Transport Projects in Cities in Assessing their Effectiveness / D. Kostiantyn [et al.] // *Software Engineering*. 2018. Vol. 6, No 2. P. 63.
 11. Кот, Е. М. Вибір оптимальної моделі збору та обробки інформації з метою реалізації диспетчерського управління рухом маршрутного пасажирського транспорту / Е. М. Кот, С. А. Ринкевич, С. С. Семченко // *Перспективні напрями розвитку регіональних транспортних та логістичних систем: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Харків: ХНАДУ, 2018. С. 125–129*.
 12. Galkin, A. Influencing Financial Flows on Logistics Technology Solutions (Case Study on Transportation Mode Selection) / A. Galkin, C. Dolya // *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*. 2017. Vol. 117. P. 61–73.
- Поступила 02.03.2021
Подписана в печать 18.05.2021
Опубликована онлайн 30.11.2021
- REFERENCES
1. Dolya C., Lyfenko S., Nesterenko S., Vyatkin K. (2017) Influence of Features of the Transport Network Pattern on the Haul Cycle Length between its Nodes on the Example of the Transport Network of Ukraine. *Technology Audit and Production Reserves*, 5 (2), 54–58. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112078>.
 2. Dolya C. V. (2017) Gravity Model Formalization for Parameter Calculation of Intercity Passenger Transport Correspondence. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 16 (5), 437–443. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-437-443> (in Russian).
 3. Dolia K., Davidich Yu., Dolia O., Lyfenko S., Uhodnikova O. (2017) Modeling of Polygons of Maximum Passenger Route Transport Accessibility by the Example of the Transport System of Ukraine. *Technology Audit and Production Reserves*, 6 (2), 28–33. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.115219>.
 4. Dolia K. (2017) Variativity of the Transport System at Intercity Passenger Transport from the Demand. *International Journal of Data Science and Analysis*, 3 (6), 77. <https://doi.org/10.11648/j.ijdsa.20170306.13>.
 5. Dolya C., Botsman A., Kozhyna V. (2017) Investigation of Approaches to Modeling of Intercity Passenger Transportation System. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (2), 24–28. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.108889>.
 6. Grigorova T., Davidich Ya., Dolya V. (2015) Assessment of Elasticity of Demand for Services of Suburban Road Passenger Transport. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (2), 13–16. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.44768>.
 7. Galkin A., Dolia C., Davidich N. (2017) The Role of Consumers in Logistics Systems. *Transportation Research Procedia*, 27, 1187–1194. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.010>.
 8. Kapsky D. V., Semchenkov S. S. (2020) Form of Work Schedule for Drivers of Route Passenger Transport. *Avto-traktorostroenie i Avtomobil'nyi Transport: Sb. Nauch. Tr. T. 2* [Automotive and Tractor Construction and Road Transport: Collection of Scientific. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 92–96 (in Russian).
 9. Dolia V., Kush Y., Galkin A. (2014) Several Logistics Chains Transportation Services Approach by Single Transport Company. *Journal L'Association 1901 "SEPIKE"*, 4, 86–90.
 10. Kostiantyn D., Olena D., Sergey L., Anastasiia B. (2018) Management of Freight Transport Projects in Cities in Assessing their Effectiveness. *Software Engineering*, 6 (2), 63.
 11. Kot E. M., Rinkevich S. A., Semchenkov S. S. (2018) Selection of Optimal Model of Information Collection and Processing with the Purpose to Realize Dispatch Control of Route Passenger Transport Movement. *Perspektivni Napryami Rozvitku Regional'nikh Transportnikh ta Logistichnikh Sistem: Materiali Mizhnar. Nauk.-Prakt. Konf.* [Perspective Directions for Development of Regional Transport and Logistics Systems: Proceedings of International Scientific and Practical Conference]. Kharkiv, Kharkiv National Automobile and Highway University, 125–129 (in Ukrainian).
 12. Galkin A., Dolya C. (2017) Influencing Financial Flows on Logistics Technology Solutions (Case Study on Transportation Mode Selection). *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport = WUT Journal of Transportation Engineering*, 117, 61–73.
- Received: 02.03.2021
Accepted: 18.05.2021
Published online: 30.11.2021

Fuel Consumption of Wheeled Vehicle and Transportation Costs during Highway Construction/Reconstruction

D. N. Leontiev¹, A. V. Ihnatenko¹, O. V. Synkovska¹, L. A. Ryzhikh¹,
N. V. Smirnova¹, Yu. V. Aleksandrov², N. V. Rudenko¹

¹Kharkiv National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine),

²Kharkiv National University of Internal Affairs (Kharkiv, Ukraine)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. A method is proposed for determining the fuel consumption of a wheeled vehicle depending on its speed, road surface flatness and road slope in the longitudinal direction. The purpose of the research is to derive mathematical relationships for calculating the fuel consumption of vehicles, which is one of the transport cost factors during the construction/reconstruction or overhaul of a highway. The proposed polynomial dependencies for calculating fuel in addition to vehicle speed, road surface flatness and its longitudinal slope take into account the mass-dimensional parameters of vehicles involved in road traffic. New mathematical relationships between the speed of wheeled vehicles, road surface flatness and longitudinal road slope allow to simulate the change in the value of fuel consumption of a wheeled vehicle when the speed of traffic flow or the slope of the road surface changes in the forward or reverse direction of the vehicle. In a graphic way, the influence of the pavement slope on the value of fuel consumption, both loaded and unloaded wheeled vehicle is presented. When determining transport costs associated with the highway construction, reconstruction or overhaul it is proposed to use empirical mathematical relationships, which make it possible to obtain fuel consumption with an accuracy of 5 % and save up to 15 % of budget (private) investments. The analysis of scientific publications of the existing approach determine the transport costs associated with highway construction, reconstruction or overhaul. The presented method for determining the fuel consumption of wheeled vehicles with small and large loading capacity increases the accuracy of determining transportation costs and reduces the level of financial costs for highway construction, reconstruction or overhaul.

Keywords: fuel consumption, road conditions, transportation costs, highway, construction, road reconstruction, traffic flow, longitudinal road profile, travel speed

For citation: Leontiev D. N., Ihnatenko A. V., Synkovska O. V., Ryzhikh L. A., Smirnova N. V., Aleksandrov Yu. V., Rudenko N. V. (2021) Fuel Consumption of Wheeled Vehicle and Transportation Costs during Highway Construction/Reconstruction. *Science and Technique*. 20 (6), 522–527. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-522-527>

Расход топлива колесного транспортного средства и транспортные издержки при строительстве/реконструкции автомобильной дороги

Кандидаты техн. наук, доценты Д. Н. Леонтьев¹, А. В. Игнатенко¹, Е. В. Синьковская¹, Л. А. Рыжих¹,
докт. техн. наук, проф. Н. В. Смирнова¹, канд. психол. наук, доц. Ю. В. Александров²,
канд. пед. наук, доц. Н. В. Руденко¹

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (Харьков, Украина),

²Харьковский национальный университет внутренних дел (Харьков, Украина)

Реферат. Предлагается способ определения расхода топлива колесного транспортного средства в зависимости от скорости его движения, ровности дорожного покрытия и уклона дороги в продольном направлении. Цель исследований – вывести математические зависимости для расчета расхода топлива транспортных средств, являющегося одним из факторов

Адрес для переписки

Леонтьев Дмитрий Николаевич
Харьковский национальный
автомобильно-дорожный университет
ул. Ярослава Мудрого, 25,
61002, г. Харьков, Украина
Тел.: +38 057 700-38-77
dima.a3alij@gmail.com

Address for correspondence

Leontiev Dmitry N.
Kharkiv National
Automobile and Highway University
25, Yaroslava Mudrogo str.,
61002, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +38 057 700-38-77
dima.a3alij@gmail.com

транспортных издержек при строительстве/реконструкции или капитальном ремонте автомобильной дороги. Предложенные полиномиальные зависимости для расчета расхода топлива, кроме скорости движения автомобиля, ровности дорожного покрытия и продольного уклона дороги, учитывают массогабаритные параметры транспортных средств, участвующих в дорожном движении. Новые математические взаимосвязи между скоростью движения колесного транспорта, ровностью дорожного покрытия и продольным уклоном дороги позволяют моделировать изменение величины расхода топлива колесного транспортного средства при изменении скорости движения транспортного потока или уклона дорожного покрытия в прямом или обратном направлении движения автомобиля. В графическом виде представлено влияние уклона дорожного покрытия на величину расхода топлива как груженого, так и снаряженного колесного транспортного средства. При определении транспортных издержек, связанных со строительством, реконструкцией или капитальным ремонтом автомобильной дороги, предлагается использовать эмпирические математические зависимости, позволяющие получить расход топлива с точностью до 5 % и сэкономить до 15 % бюджетных (частных) инвестиций. Выполнен анализ научных публикаций существующего подхода по определению транспортных издержек, связанных со строительством, реконструкцией или капитальным ремонтом автомобильной дороги. Приведенный способ определения расхода топлива колесных транспортных средств малой и большой грузоподъемности повышает точность установления транспортных издержек и снижает уровень финансовых затрат на строительство, реконструкцию, капитальный ремонт автомобильных дорог.

Ключевые слова: расход топлива, дорожные условия, пикеты, транспортные издержки, автомобильная дорога, строительство, реконструкция автомобильной дороги, транспортный поток, продольный профиль дороги, скорость движения

Для цитирования: Расход топлива колесного транспортного средства и транспортные издержки при строительстве/реконструкции автомобильной дороги / Д. Н. Леонтьев [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 522–527. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-522-527>

Introduction

Currently one of the key tasks in highway designing and its further operation activities is to increase the efficiency of capital investments in its construction, reconstruction and overhaul by optimizing the design solutions. Economic methods for calculating the effectiveness of project design options provide for the indicator comparison of outcomes and costs for the compared options. This comes down, as a rule, to the calculation of efficiency keeping in mind the economic, social, environmental and other consequences of a particular engineering decision.

When choosing a rational design decision as to the highway construction, reconstruction or overhaul, road construction engineers estimate transportation costs only by averages, which, of course, reduce the accuracy and reliability of any conclusions drawn by them over the benefits of a particular decision. It is known that in transportation costs the largest share is the fuel consumption of a car, which mostly depends on the road conditions of its travelling, therefore, when searching for a rational option for a design decision as to the highway construction, reconstruction or overhaul, it is necessary to increase the accuracy of calculation methods especially for this indicator.

Aim and task setting – the aim of the research is to improve the accuracy of determining the transportation costs associated with the vehicle fuel consumption during the highway operation, as well as during its overhaul period.

Determination of the fuel consumption with changing road conditions

One of the understudied factors while comparing design options is the analysis of changing road conditions during the road operation. In particular, this includes the consistent patterns of changes in the fuel consumption of all vehicles that make up the estimated traffic flow taking into account the change of the rolling resistance coefficient and the carriageway flatness indicators [1–4]. The fuel consumption required for moving on a given road section depends on the road and vehicle parameters [5, 6]. The road characteristics, such as the vehicle speed, longitudinal slope, rolling resistance coefficient and carriageway flatness characteristics, which determine the driving resistance forces and the power losses to move along this particular road segment, participate in the dependencies of fuel consumption in relation to road conditions [7, 8].

The influence of vehicle parameters on fuel consumption [9, 10] is studied in detail and presented in the form of analytical solutions depending on the vehicle speed [11, 12].

In accordance with the road conditions, a driver sets the speed of a car and the road conditions, as it is known, are determined by the plan, road cross section and indicators of the operational road condition [13], so choosing a model for changing the speed of a vehicle is one of the important tasks in determining transportation costs associated with fuel consumption [14, 15].

The relation of the movement speed of different types of vehicles with the plan and the road cross section, based on the generalization of the road conditions outlined in [6], can be represented as shown in Fig. 1 [4]. And you should pay attention to the fact that when moving on the same section of road in different directions, the speed of the same vehicle has not the same character, and, consequently, the transportation costs associated with fuel consumption on direct and the opposite direction of movement will be different.

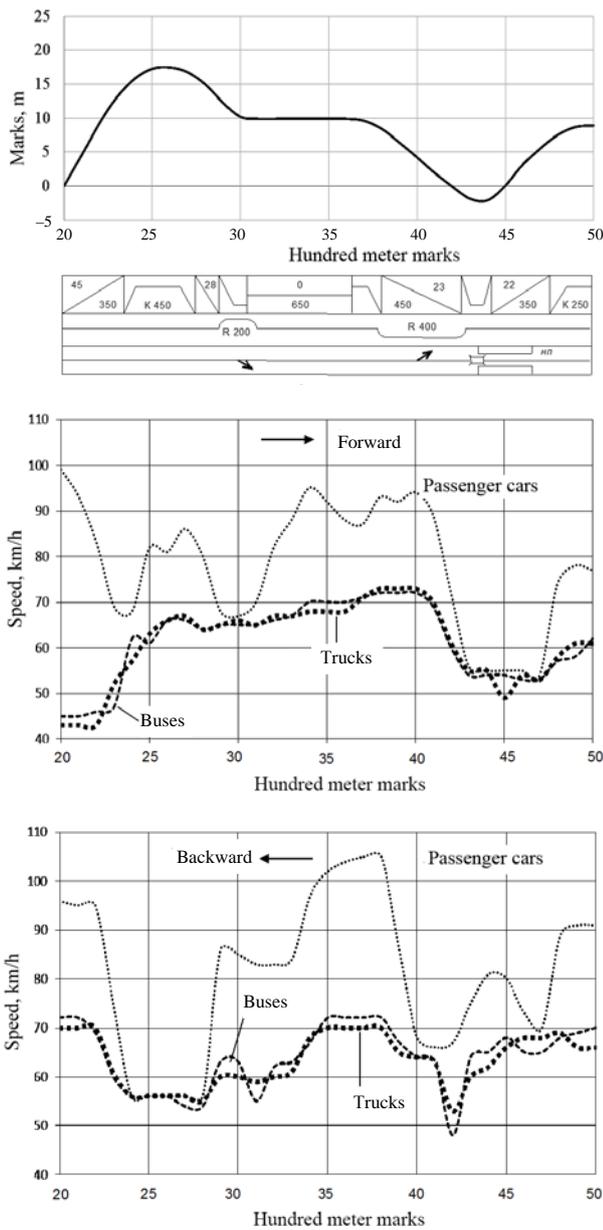


Fig. 1. Relation of vehicle speed with the plan and the longitudinal cross section of a road at an average traffic intensity of 300 cars/h [4]

Solving the problem of determining the fuel consumption of the main types of vehicles with not just changing road conditions on certain road sections but changes in their speed, one must also take into account the influence of the resistance forces and the power losses of the movement in accordance with the studies of the authors' publication [9]. Thus, the offered model for determining transportation costs with fuel consumption during the highway operation, as well as during the overhaul maintenance period, is based on the equation of the fuel consumption [9], obtained by the synthesis of the equations of vehicle motion and partial modes characteristics of internal combustion engine operation

$$G_s = \frac{A}{\eta_i}, \quad (1)$$

where A – parameter combining the fuel consumption with the vehicle speed, road resistance and power capacity per movement [4, 9]; η_i – engine efficiency indicator [9].

Calculating the value of fuel consumption of typical vehicles shows (Fig. 2, 3) [4] that with increasing the slope and increasing vehicle mass, the value of fuel consumption by their internal combustion engines increases. Increasing the speed of a vehicle has a different effect on fuel consumption.

So the calculations showed that increasing the speed to 40 km/h on vehicles of medium and large capacity leads to decreasing the fuel consumption, and their further movement at speeds above 40 km/h leads to increasing the fuel consumption (Fig. 2).

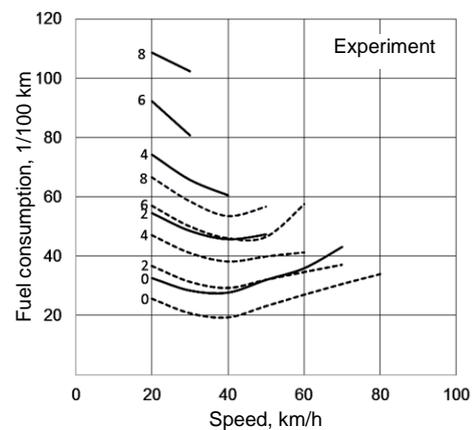


Fig. 2. Fuel consumption of trucks and buses: solid line – loaded car; dotted line – unloaded car (flatness indicator – 50 cm/km; road surface – asphalt concrete; the figures near the curves – road slope, %) [8]

Unlike vehicles with medium and high carrying capacities, vehicles with low carrying capacities have minimal fuel consumption at the speeds of around 60 km/h. Increasing the speed of more than 60 km/h as well as for vehicles with a larger mass, leads to increasing the fuel consumption (Fig. 3).

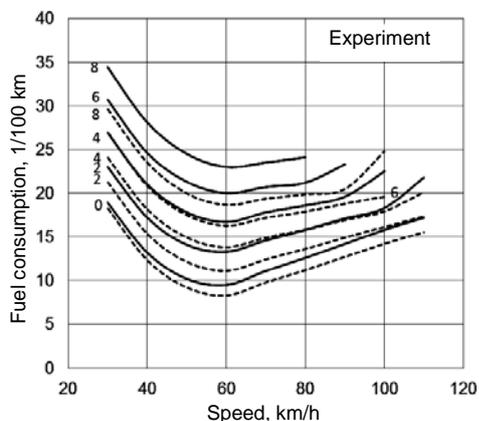


Fig. 3. Fuel consumption of passenger cars: solid line – loaded car; dotted line – unloaded car (flatness indicator – 50 cm/km; road surface – asphalt concrete; figures near the curves – road slope, %) [8]

It should be noted that the equation (1) forming the basis of the offered model for determining transportation costs gives a high accuracy of calculations only for a road that has an excellent carriageway flatness, that is, not more than 50 cm/km. For the roads with a large value of carriageway flatness, the offered method for determining transportation costs combining with the fuel consumption requires the clarification. This is especially relevant in determining transportation costs during the between overhauls period of the road maintenance.

Result and discussion

In order to clarify the effect of the deterioration of the carriageway flatness on the value of fuel consumption, some road experimental studies of the various types of vehicles movement were carried out, the obtained results are shown in Fig. 4, 5.

The carried out studies were performed both for the unloaded condition of a vehicle, and in the conditions of its full loading on the asphalt road. In experimental studies, the average fuel consumption, the vehicle speed and the road flatness were recorded. It should be noted that the speed of passenger cars, trucks with a full carrying capacity up to 3.5 t and buses – up to 5.0 t did not exceed 100 km/h, and the speed of movement of trucks over 3.5 t and buses over 5.0 t did not exceed 70 km/h.

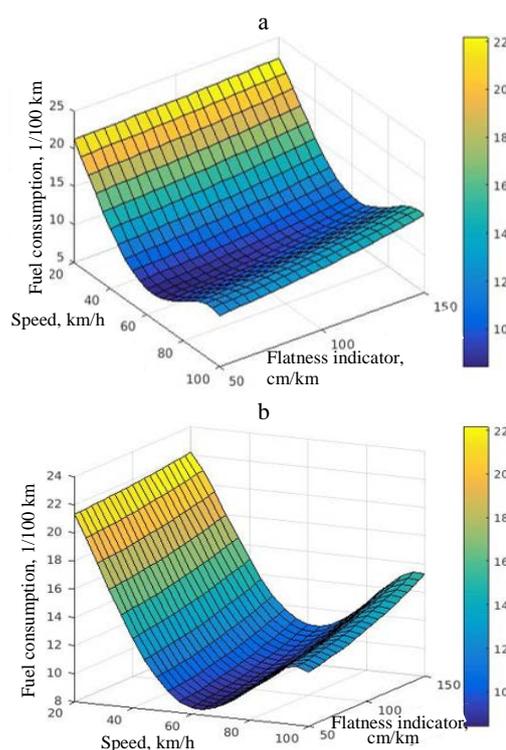


Fig. 4. The dependence of the fuel consumption of passenger cars of the flatness of the road and the speed of the vehicle at its loading state: a – loaded; b – unloaded (road slope – 0 %)

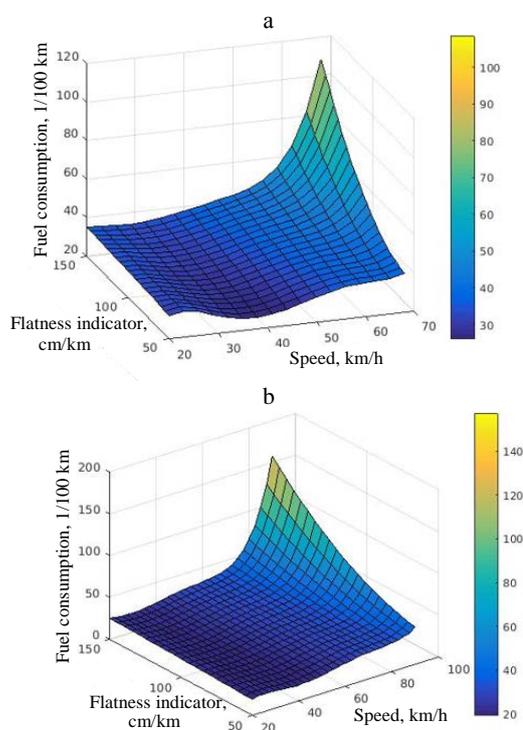


Fig. 5. The dependence of fuel consumption trucks and buses on the flatness of the road and the speed of the vehicle at its loading state: a – loaded; b – unloaded (road slope – 0 %)

The data obtained in the process of experimental studies made it possible to clarify the dependence (1) forming the basis of the model for determining transportation costs by obtaining on its basis new polynomial dependencies:

$$Q = 1,8i + 23,08 - 1,32 \cdot 10^{-2} S + 0,3652v - 3,2 \cdot 10^{-5} S^2 + 1,057 \cdot 10^{-3} Sv - 0,03201v^2 + 4,539 \cdot 10^{-6} S^2v - 2,564 \cdot 10^{-5} Sv^2 + 5,027 \cdot 10^{-4} v^3 - 2,449 \cdot 10^{-8} S^2v^2 + 1,625 \cdot 10^{-7} Sv^3 - 2,307 \cdot 10^{-6} v^4; \quad (2)$$

$$Q = 6i - 228,2 + 27,58v + 2,533S - 1,115v^2 - 0,2427vS - 0,005529S^2 + 0,02066v^3 + 0,007796v^2S + 0,0004778vS^2 - 1,773 \cdot 10^{-4} v^4 - 1,003 \cdot 10^{-4} Sv^3 - 1,203 \cdot 10^{-5} v^2S^2 + 5,75 \cdot 10^{-7} v^5 + 4,398 \cdot 10^{-7} Sv^4 + 9,293 \cdot 10^{-8} v^3S^2; \quad (3)$$

$$Q = 10i - 507,1 + 68,61v + 4,431S - 3,237v^2 - 0,474vS - 1,111 \cdot 10^{-2} S^2 + 7,089 \cdot 10^{-2} v^3 + 0,0174v^2S + 1,042 \cdot 10^{-3} vS^2 - 7,313 \cdot 10^{-4} v^4 - 2,577 \cdot 10^{-4} v^3S - 3,008 \cdot 10^{-5} v^2S^2 + 2,892 \cdot 10^{-6} v^5 + 1,305 \cdot 10^{-6} v^4S + 2,707 \cdot 10^{-7} v^3S^2. \quad (4)$$

Using the equation (2) it is easy to determine the fuel consumption (l/100 km) of a unloaded or loaded vehicle with low weight (cars, trucks with gross weight up to 3.5 t and buses – up to 5.0 t) given the road flatness (S), its slope (i) and vehicle speed (v).

On the basis of the equation (3), it is possible to calculate the fuel consumption of a unloaded vehicle (a truck over 3.5 t and buses over 5.0 t) using all the same initial parameters (road flatness (S), its slope (i) and vehicle speed (v)).

As the fuel consumption of a loaded vehicle with high carrying capacity (trucks over 3.5 t and buses over 5.0 t) differs significantly from its fuel consumption in the unloaded condition, it is necessary to determine it according to the dependency (4) for more accurate results.

Analyzing the results obtained in the calculation of transportation costs as to the fuel consumption showed that taking into account the change in the fuel consumption of a vehicle at the end of the between-repairs time of the road operation compared to a new road or road after an overhaul has a much higher transportation cost.

For further comparison of design options, it is necessary to take into account the fact that along the road, the traffic flow is uneven in time and space, consisting of different types of vehicles, with different values of fuel consumption, so its share is more than 60 % of the motor transport component of transportation costs.

On any road this component on different road segments may differ significantly from the average value, which makes it possible to find problem road sections by the criterion of transportation costs when searching for the best option.

For such a directional search, it is necessary to solve the problem of differentiating the components of the transportation costs for different road sections, depending on the changing road conditions and the types of vehicles that make up the estimated traffic flow, which significantly increases the reliability of the substantiation of capital investments by the criterion of transportation costs.

If the calculation based on the offered methodology is carried out with reference to the plan and the longitudinal road cross-section (Fig. 1), for example, in the opposite direction, then you can summarize the results and present them in the form of a graph of travel expenditures of fuel by vehicles on different road sections (Fig. 6). On Fig. 6 the following abbreviations are accepted: Fv – freight vehicle up to 3.5 t; Fb – freight vehicle over 3.5 t; Rt – road trains; Bs – buses over 5.0 t; Cs – cars; A – average fuel consumption for the considered flow of vehicles.

It should be noted that since, in accordance with the road map, a vehicle travels over the distances smaller than one kilometre; it is advisable that the fuel consumption dimension l/100 km should be reduced to the fuel consumption dimension l/100 m for the ease analysis of the calculated results. In addition, this dimension with the unit of length measurement (hundred meter mark – 100 m) in a road project is familiar to road engineers.

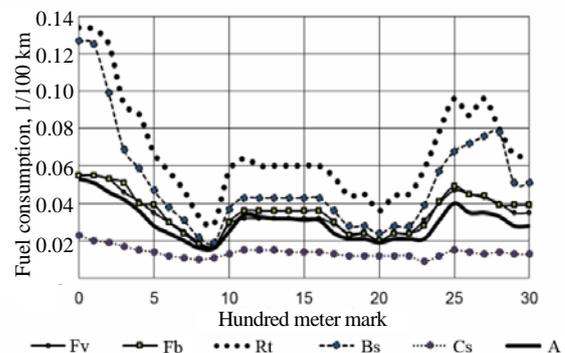


Fig. 6. Fuel consumption depending on the type of a vehicle in the relevant road section

Analyzing the results of calculations in Fig. 6, it is possible to conduct a comparative assessment of the variants of design decisions and choose a rational decision as to the road construction, reconstruction or overhaul.

Analysis of the results of similar calculations performed for other values of slopes and indicators of the rough meter, shows a directly proportional dependence of fuel consumption on the value of the longitudinal slope in the entire speed range of a vehicle. The analysis of the given above modelling results convinces us of the need to take into account an increase of up to 30 % in fuel consumption when driving on an uneven roadway.

CONCLUSIONS

1. Studies conducted on fuel consumption patterns showed that the accuracy of fuel consumption calculations can have an effect of up to 30 % on transport costs compared with averaged calculations.

2. During the overhaul period of the road operation, an accurate calculation of transportation costs saves up to 15 % of the budget funds allocated for the road reconstruction by reducing the amount of consumables in the forward and reverse wheeled vehicle movement.

3. The generalization of traffic flow conditions made it possible to determine with an accuracy of up to 5 % the impact of the speed, the flatness of road surface and the road slope on the value of fuel consumption of typical vehicles to calculate transportation costs determining the level of costs for highway construction, reconstruction and overhaul.

4. Modelling the nature of the change in fuel consumption for different traffic flows shows that when comparing design options, a more accurate calculation of the fuel consumption for all hundred meter marks of the design solution is just as important as the adhesion coefficient and the road evenness indicator.

REFERENCES

- Li D., Li C., Miwa T., Morikawa T. (2019) An Exploration of Factors Affecting Drivers' Daily Fuel Consumption Efficiencies Considering Multi-Level Random Effects. *Sustainability*, 11 (2), 393. <https://doi.org/10.3390/su11020393>.
- Litvinov A. S., Farobin Ya. A. (1989) *Automobile. Theory of Operational Properties*. Moscow, Mashinostroenie Publ. (in Russian).
- Ageykin Ya. S., Volskaya N. S. (2008) *Theory Vehicle*. Moscow, Moscow State Industrial University. 318 (in Russian).
- Filippov V. V., Smirnova N. V., Leontiev D. N. (2014) On the Dependence of Fuel Consumption and the Effect on it of Vehicle Speed and Road Conditions. *Vestnik Kharkovskogo Natsionalnogo Avtomobilno-Dorozhnogo Universiteta = Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 67, 7–12 (in Russian).
- Vasilev A. P. (ed.) [et al.] (2004) *Road Builder Reference Encyclopedia. Vol. II. Repair and Maintenance of Automobile Roads*. Moscow, Informavtodor Publ. 507 (in Russian).
- Filippov V. V., Smirnova N. V. (2014) *Modeling Traffic Flows on Roads of II–IV Categories*. Kharkiv, Kharkiv National Automobile and Highway University. 200 (in Russian).
- Huertas J. I., Giraldo M., Quirama L. F., Díaz J. (2018) Driving Cycles Based on Fuel Consumption. *Energies*, 11, 3064. <https://doi.org/10.3390/en11113064>.
- Ho S., Wong Y., Chang V. W. (2014) Developing Singapore Driving Cycle for Passenger Cars to Estimate Fuel Consumption and Vehicular Emissions. *Atmospheric Environment*, 97, 353–362. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.042>.
- Govorushchenko N. Ya., Turenko A. N. (2004) *Systems Engineering on the Design of Transport Machines*. Kharkiv, Kharkiv National Automobile and Highway University. 208 (in Russian).
- Lim J., Lee Y., Kim K., Lee J. (2018) Experimental Analysis of Calculation of Fuel Consumption Rate by On-Road Mileage in a 2.0 L Gasoline-Fueled Passenger Vehicle. *Applied Sciences*, 8 (12), 2390. <https://doi.org/10.3390/app8122390>.
- Doumbia M., Toure N. E., Silue S., Yoboue V., Diedhiou A., Hauhouot C. (2018) Emissions from the Road Traffic of West African Cities: Assessment of Vehicle Fleet and Fuel Consumption. *Energies*, 11, 2300. <https://doi.org/10.3390/en11092300>.
- Plotz P., Funke S. A., Jochem P. (2018) Empirical Fuel Consumption and CO₂ Emissions of Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 22 (4), 773–784. <https://doi.org/10.1111/jiec.12623>.
- Leontiev D. N., Nikitchenko I. N., Ryzhyh L. A., Lomaka S. I., Voronkov O. I., Hritsuk I. V., Pylshchik S. V., Kuripka O. V. (2019) About Application the Tyre-Road Adhesion Determination of a Vehicle Equipped with an Automated System of Brake Proportioning. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 18 (5), 401–408. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-401-408>.
- Kan Z. H., Tang L. L., Kwan M. P., Zhang X. (2018) Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions Using GPS Big Data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 (4), 566. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040566>.
- Al-Arkawazi SAF (2018) Measuring the Influences and Impacts of Signalized Intersection Delay Reduction on the Fuel Consumption, Operation Cost and Exhaust Emissions. *Civil Engineering Journal-Tehran*, 4 (3), 552–571. <https://doi.org/10.28991/cej-0309115>.

Received: 24.06.2019

Accepted: 10.09.2019

Published online: 30.11.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-528-538>

УДК 656.13

Разработка моделей экспресс-анализа безопасности дорожного движения

Канд. техн. наук, доц. Л. С. Абрамова¹⁾,
кандидаты техн. наук Г. Г. Птица¹⁾, С. В. Капинус¹⁾, Т. В. Харченко¹⁾

¹⁾Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (Харьков, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Приведены результаты исследования актуальной научно-технической проблемы определения уровня безопасности дорожного движения на участках автомобильных дорог. Целью исследования являлась разработка экспресс-метода оценки безопасности дорожного движения на основе усовершенствования метода итогового коэффициента аварийности путем редукции частных коэффициентов аварийности при необходимой точности определения уровня безопасности на автомобильных дорогах общего пользования. Проведена формализация взаимосвязи параметров условий дорожного движения для изучения уровня безопасности на автомобильных дорогах. Латентные факторы параметров условий движения получены на основе редукции их совокупности методом главных компонент с учетом взаимосвязи частных коэффициентов аварийности, что позволило разработать аналитические модели определения безопасности дорожного движения для внедрения в практику проведения аудита безопасности дорожного движения. Разработана методика выявления опасных участков на автомобильных дорогах, в которую вошли 11 параметров дорожных условий из 18 частных коэффициентов аварийности, предложенных в прототипе и нормативных документах Украины. Адекватность модели определена значениями отклонений полученных данных по авторской модели и модели-прототипу от значений относительного коэффициента аварийности, которые соответственно составили 3,22 и 18,61, т. е. предложенная модель в шесть раз уменьшает значение отклонений и влияет на точность определения уровня безопасности. Экспериментальные исследования проведены на 79 км автомобильных дорог (на 385 секторах с неизменными значениями параметров условий движения). Результаты сравнительного анализа уровня безопасности по модели-прототипу и разработанной модели были идентичными и показали уменьшение временных и трудовых затрат в 1,6 раза без потери точности. Таким образом, разработанную методику рекомендуется применять для определения потенциальной опасности участков автомобильных дорог во время экспресс-анализа безопасности автомобильной дороги или при проведении аудита безопасности дорожного движения на различных стадиях жизненного цикла автомобильной дороги.

Ключевые слова: уровень безопасности дорожного движения, параметры условий движения, коэффициенты аварийности, латентные факторы, аудит безопасности дорожного движения

Для цитирования: Разработка моделей экспресс-анализа безопасности дорожного движения / Л. С. Абрамова [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 528–538. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-528-538>

Development of Models for Express Analysis of Road Safety

L. S. Abramova¹⁾, H. H. Ptitsia¹⁾, S. V. Kapinus¹⁾, T. V. Kharchenko¹⁾

¹⁾Kharkiv National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine)

Abstract. Results of a study of an actual scientific and technical problem of determining the road safety level on road sections are presented in the paper. The aim of the study is to develop an express method for assessing road safety based on improving the method of the final accident rate by reducing the partial accident rate with the required accuracy of determining the safety

Адрес для переписки

Птица Геннадий Григорьевич
Харьковский национальный
автомобильно-дорожный университет
ул. Ярослава Мудрого, 25,
61002, г. Харьков, Украина
Тел.: +38 057 707-37-06
gennadij.ptitsa@gmail.com

Address for correspondence

Ptitsia Hennadij H.
Kharkiv National
Automobile and Highway University
25, Yaroslava Mudrogo str.,
61002, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +38 057 707-37-06
gennadij.ptitsa@gmail.com

level on public roads. The formalization of the relationship between the parameters of road traffic conditions has been carried out to study the level of safety on highways. Latent factors of the parameters of traffic conditions have been obtained on the basis of reduction of their aggregate by the method of principal components, taking into account the relationship of partial accident rates. This condition has allowed to develop analytical models for determining road safety for implementation in the practice of conducting a road safety audit. A method for identifying hazardous areas on highways has been proposed in the paper. It includes 11 parameters of road conditions out of 18 partial accident rates proposed in the prototype and regulatory documents of Ukraine. The adequacy of the model is determined by deviation values of the obtained data according to the prototype model from the values of the relative accident rate, which were 3.22 and 18.61, respectively. The proposed model reduces the deviation value by six times and affects the accuracy of determining the safety level. Experimental studies have been conducted on 79 km of highways (on 385 sectors with constant values of traffic conditions parameters). The results of a comparative analysis of the safety level for the prototype model and the developed model have been identical and shown a decrease in time and labor costs by 1.6 times without loss of accuracy. Thus, the developed methodology is recommended to be applied for determining the potential danger of road sections during an express analysis of the road safety or when conducting a safety audit at various stages of the road life cycle.

Keywords: road safety level, traffic conditions parameters, accident rates, latent factors, road safety audit

For citation: Abramova L. S., Ptitsia N. H., Kapinus S. V., Kharchenko T. V. (2021) Development of Models for Express Analysis of Road Safety. *Science and Technique*. 20 (6), 528–528. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-528-538> (in Russian)

Введение

Уровень развития транспортной системы государства – один из важнейших признаков ее технологического прогресса. Потребность в высокоразвитой транспортной системе еще более усиливается при интеграции Украины в европейскую и мировую экономику. Геостратегическое расположение страны способствует развитию транспортной системы как составляющей транзитных перевозок между государствами Европы, Азии, Ближнего Востока. К транспортной системе в рыночных условиях предъявляются высокие требования по качеству, регулярности и надежности транспортных связей, сроков и стоимости доставки. Поэтому состояние транспортной системы Украины должно соответствовать условиям европейской интеграции по обеспечению необходимого уровня комфорта и безопасности дорожного движения.

Последние десятилетия вопросы безопасности движения в мире являются одними из первоочередных, о чем свидетельствует принятие в апреле 2016 г. Генеральной Ассамблеей Организации Объединенных Наций задачи сокращения к 2020-му вдвое количества случаев смерти и травм в результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП) [1]. Кроме этого, ДТП наносят экономике Украины значительные убытки. По данным Всемирной организации здравоохранения и Всемирного банка, ежегодные потери экономики страны от ДТП достигают 5 млрд дол. США, что составляет 3–6 %

ВВП [2]. Поэтому решение проблемы обеспечения безопасности дорожного движения относится к приоритетным задачам развития страны.

В условиях ограниченности материальных ресурсов для Украины актуально решать проблему повышения надежности системы управления безопасностью дорожного движения средствами выбора необходимых мероприятий по ликвидации опасных участков, в первую очередь путем усовершенствования существующих методов определения уровня безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах. При оценке безопасности дорожного движения заслуживают внимания методы, учитывающие защищенность участников дорожного движения. На основании анализа имеющихся методов [3] предложена их классификация по типу входных параметров: статистические данные ДТП; вероятность рисков возникновения ДТП; параметры условий движения, влияющие на психоэмоциональное состояние водителя; потери общества от ДТП; технические показатели эффективности дорожного движения. В результате выделен метод итогового коэффициента аварийности $K_{ит}$ на основании определения частных коэффициентов аварийности K_i , которые соответствуют влиянию различных параметров дорожных условий [4]:

$$K_{ит} = \prod_{i=1}^n K_i, \quad (1)$$

где n – количество частных коэффициентов аварийности.

Этот метод имеет приоритет среди известных способов оценки безопасности дорожного движения, поскольку получил практическое применение в нормативной документации Украины и является наиболее полным по количеству исследуемых факторов [5]. Установлено, что практическое применение указанного метода сопровождается трудоемкостью и неоднозначностью определения параметров условий движения, которые влияют на значения частных коэффициентов аварийности и эффективность его применения при проведении аудита безопасности на автомобильной дороге [6] и экспресс-анализе уровня безопасности дорожного движения.

В результате анализа научных исследований отечественных и зарубежных ученых изучены тенденции развития вариантов формализации метода итогового коэффициента аварийности, заключающиеся в построении уточненных или упрощенных моделей за счет выделения значимых параметров условий движения. В частности, известны работы [7–10], направленные на повышение качественной оценки уровня безопасности дорожного движения за счет применения методов статистического анализа. Учитывая, что условия движения как основа оценки уровня безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах являются многопараметрической подсистемой комплекса «дорожное движение», необходимо применение именно методов многомерного статистического анализа для разработки модели состояния безопасности дорожного движения. Данная модель должна учитывать взаимосвязь отдельных параметров условий движения в виде аналитической зависимости, что, безусловно, эффективно отразится на ее практическом применении для определения потенциально опасных участков на дорогах.

Цель исследования – совершенствование метода итогового коэффициента аварийности путем редукции частных коэффициентов аварийности при необходимой точности определения уровня безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах общего пользования. Для достижения цели авторами решены следующие задачи:

– формализована взаимосвязь параметров условий дорожного движения для определения

уровня безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах;

– определены латентные факторы параметров условий движения на основании взаимосвязи частных коэффициентов аварийности;

– разработаны аналитические модели определения безопасности дорожного движения для внедрения в практику проведения аудита безопасности дорожного движения.

Разработка аналитических моделей определения уровня безопасности дорожного движения

Организация безопасного дорожного движения с позиции защищенности участников движения от ДТП зависит от множества факторов, входящих в систему «человек – автомобиль – дорога – среда», и от оптимального взаимодействия звеньев и элементов всей системы, сбой в функционировании которой провоцирует возникновение сложных дорожно-транспортных ситуаций, увеличивающих риск ДТП.

На основе применения коэффициентов аварийности для определения уровня безопасности дорожного движения опишем дорожно-транспортную ситуацию D_j совокупностью частных коэффициентов аварийности K_{ji}

$$D_j = K_{j1}, K_{j2}, \dots, K_{ji}, \dots, K_{jn}, \quad (2)$$

где K_{ji} – значение i -го ($i = \overline{1; n}$) частного коэффициента аварийности для D_j ($j = \overline{1; m}$).

Параметры, определяющие K_{ji} , относятся к условиям движения (интенсивность, ширина обочин и проезжей части, радиус кривых в плане и т. д.). Тогда описание процесса дорожного движения с позиции безопасности имеет вид

$$D = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1i} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2i} & \dots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{j1} & K_{j2} & \dots & K_{ji} & \dots & K_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{m1} & K_{m2} & \dots & K_{mi} & \dots & K_{mn} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где m – количество дорожно-транспортных ситуаций.

Количество возможных комбинаций в матрице (3) составляет 450 вариантов, что затрудняет применение метода итогового коэффициента для экспресс-анализа. Следовательно, необходимо определение взаимосвязи показателей безопасности и скрытых причин, объясняющих данную взаимосвязь. Для решения этой задачи авторы применили методы факторного анализа, которые позволили выявить латентные факторы, описывающие дорожную ситуацию с одновременной редукцией количества этих факторов [11]. Наиболее целесообразный инструмент редукции совокупности частных коэффициентов аварийности – метод главных компонент, который позволяет: формировать оптимальное пространство новых ортогональных факторов без потери содержательной информации K_{ji} ; создавать модель из основных факторов без выделения «специфических»; определять пространство факторов меньшей размерности, описывающее совокупность K_{ji} и позволяющее не уточнять полученные приближенные оценки. С учетом этого получена формализация описания дорожно-транспортной ситуации (4) на основании латентных факторов ($F_{jf} = f(K_{ji})$) при условии, что факторов гораздо меньше, чем частных коэффициентов аварийности ($p \ll n$). Тогда

$$D_j = F_{j1}, F_{j2}, \dots, F_{jf}, \dots, F_{jp}, \quad (4)$$

где F_{jf} – значение f -го ($f = \overline{1; p}$) латентного фактора аварийности для отдельной дорожно-транспортной ситуации.

Переход от K_{ji} к F_{jf} выполнен с помощью выявления между ними линейной зависимости методом главных компонент, который требует выполнения определенных этапов исследования (рис. 1). Входной информацией для редукции является матрица исходных данных значений K_{ji} , выходной – матрица факторных нагрузок.



Рис. 1. Этапы проведения редукции коэффициентов аварийности

Fig. 1. Stages of accident rate reduction

В ходе исследования выявлены большие различия в диапазонах варьирования параметров условий движения на автомобильных дорогах различных технических категорий, что обусловлено составом и количеством участников дорожного движения, требованиями к скоростным режимам движения и параметрам проезжей части дороги. В технической классификации дорог Украины выделяют пять категорий автомобильных дорог (АД). Дальнейшие исследования проведены для АД II технической категории, которые по протяженности в Украине занимают третье место (первое и второе – дороги III и IV категорий). Данный выбор основан на том, что статистика ДТП, особенно тяжесть их последствий, на АД II технической категории выше, чем на других категориях дорог общего пользования.

Согласно требованиям метода главных компонент определено оптимальное количество латентных факторов, которые формируются по критериям Кайзера и Кеттелла и являются достаточными для описания совокупности K_{ji} . При выборе количества факторов учитывались такие, как: объем описанной дисперсии исходных показателей (пять факторов описывают 66 % дисперсии частных коэффициентов аварийности, четыре – 57 %); количество частных коэффициентов аварийности, описанных выделенными факторами (пять факторов включают 11 частных коэффициентов аварийности, четыре фактора – девять); статистическая обоснованность критериев (именно критерий Кайзера имеет статистическую обоснованность). Следовательно, количество выделенных факторов равно пяти.

Результатом факторного анализа является простое описание для каждой переменной, характеризующейся преимущественным влиянием одного фактора, и наоборот, определен один фактор, который связан только с одной группой переменных.

В результате факторного анализа определены собственные значения факторов и соответствующие им факторные нагрузки, что дало возможность сформировать конечные модели латентных факторов (табл. 1) на основе средневзвешенных значений частных коэффициентов аварийности на километровой участке дороги (K_i^{B3B}). Это позволило учесть взаимное влияние секторов с неизменными величинами параметров условий движения в зоне одного километра автомобильной дороги и осуществить сравнительный анализ значений итогового коэффициента аварийности и количества ДТП, так как статистические данные о ДТП в отчетах представлены по километрам.

Таблица 1

Модели латентных факторов параметров условий движения
Models of latent factors parameters of motion conditions

Фактор	Модель
F_1	$(0,77839K_2^{B3B} + 0,70217K_3^{B3B} + 0,79791K_{12}^{B3B})/1,9371$
F_2	$(-0,80791K_9^{B3B} - 0,87163K_{14}^{B3B})/1,8029$
F_3	$(0,87524K_5^{B3B} + 0,8174K_6^{B3B})/1,7512$
F_4	$(0,81989K_4^{B3B} + 0,68222K_{18}^{B3B})/1,2122$
F_5	$(-0,48343K_8^{B3B} - 0,75671K_{15}^{B3B})/1,1532$

На основании установления линейной связи между частными коэффициентами аварийности и латентными факторами осуществлен переход от известных частных коэффициентов аварийности к выявленным пяти латентным факторам определения итогового коэффициента аварийности. В связи с этим влияние выявленных факторов на уровень безопасности дорожного движения описывается следующей регрессионной моделью:

$$K_{ит}^* = -36,517 + 8,818F_1 - 11,749F_2 - 1,209F_3 + 10,573F_4 - 4,784F_5, \quad (5)$$

где $K_{ит}^*$ – итоговый коэффициент аварийности для экспресс-анализа безопасности.

Анализ латентных факторов, выраженных частными коэффициентами аварийности, позволил выявить физический смысл факторов и их влияние на уровень безопасности дорож-

ного движения: F_1 учитывает влияние ширины дороги; F_2 – влияние населенных пунктов и пересечений с другими автомобильными дорогами; F_3 – влияние условий видимости; F_4 – влияние угла продольного уклона и глубокого кювета, обрыва; F_5 учитывает влияние длины участков (вне населенных пунктов и на подходе к населенному пункту).

Таким образом, определение уровня безопасности дорожного движения по полученной модели позволяет сократить количество частных коэффициентов аварийности при определении итогового коэффициента для АД II технической категории с 18 единиц до 11, а количество переменных в модели итогового коэффициента – с 18 до 5. Это даст возможность в короткий срок определить уровень безопасности дорожного движения на участках автомобильной дороги. Поэтому считаем, что такой подход будет способствовать практическому применению в ходе проведения экспресс-анализа безопасности дорожного движения на автомобильной дороге с точки зрения минимизации временных и трудовых затрат.

Методика экспресс-анализа безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах

Разработка необходимых мероприятий, направленных на повышение безопасности дорожного движения, должна базироваться на научно-практическом исследовании участков дорог с целью выявления потенциальной опасности и конкретных причин и приоритетности их устранения. Для успешного предупреждения любых ДТП нужен интенсивный обмен информацией между участниками дорожного движения и организациями, деятельность которых направлена на предупреждение ДТП. Важную роль играет экспресс-информация, т. е. специализированная информация, необходимая для оперативного решения проблем предупреждения ДТП.

На основании разработанной модели (5) предложена методика экспресс-анализа уровня безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах общего пользования. Эта методика составлена в соответствии с требованиями нормативных документов Украины и состоит из этапов, перечисленных на рис. 2.

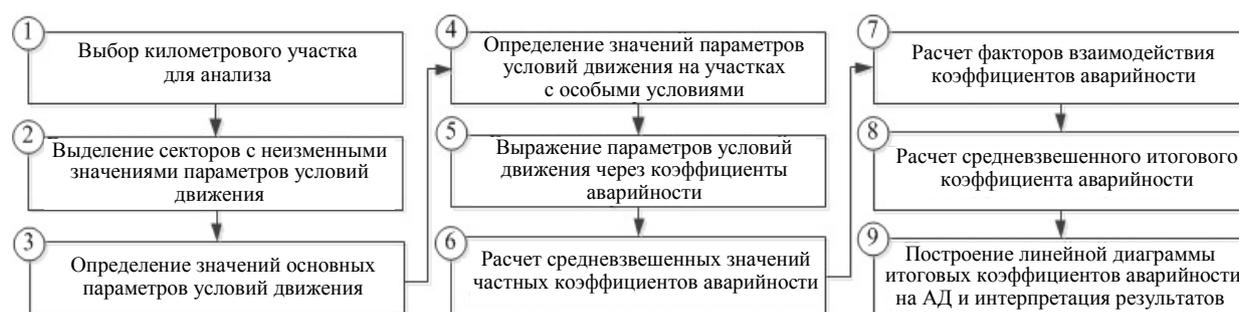


Рис. 2. Этапы экспресс-определения уровня безопасности дорожного движения

Fig. 2. Stages of express determination of road safety level

При выполнении перечисленных на рис. 2 этапов для оценки безопасности дорожного движения на АД II технической категории нужно соблюсти следующие условия.

1. Для анализа необходимо принять участок автомобильной дороги общего пользования протяженностью 1 км (границы исследуемого участка определяются километровыми столбами или другими метками).

2. Выбранный участок следует разделить на сектора с неизменными значениями параметров условий движения. Данная процедура проводится на основе натуральных или документальных наблюдений. При выделении секторов нужно учитывать, что влияние каждого из мест, где возникают те или иные препятствия движению, распространяется на некоторое расстояние. Зоны влияния различных дорожных элементов принимают по нормативам согласно М218-03450778-652:2008.

3. Обязательным для каждого сектора исследуемого участка АД II технической категории является определение следующих параметров: ширина проезжей части, м; ширина обочины, м; количество основных полос движения на проезжей части, шт.; длина прямых участков, км; длина участков на подходах к населенным пунктам, м.

4. Параметры условий движения устанавливаются с соблюдением следующих правил. При наличии:

- перекрестка или населенного пункта на исследуемом участке определяются тип перекрестка и длина населенного пункта (км);

- кривой малого радиуса или других элементов дороги, снижающих видимость на ней, определяются в плане радиус кривых (м) и видимость (м);

- продольного уклона дороги или обрыва глубиной более 5 м вдоль проезжей части определяются продольный уклон (‰) и расстояние от кромки проезжей части до обрыва (с ограждением) (м).

5. Для выражения параметров условий движения через частные коэффициенты аварийности необходимо учитывать их диапазон значений (табл. 2). Величина коэффициента не интерполируется, а принимается ближайшая в таблице.

6. На основании полученных данных по табл. 2 проводится расчет средневзвешенных значений частных коэффициентов аварийности для километрового участка автомобильных дорог.

7. Расчет латентных факторов условий движения выполняется по разработанным моделям (табл. 1) с учетом рассчитанных средневзвешенных значений коэффициентов аварийности. В моделях латентных факторов частным коэффициентам аварийности, которые не были определены из-за отсутствия влияния соответствующего параметра условий движения на дорожную ситуацию, присваивается значение 1.

8. Уровень аварийности определяется итоговым коэффициентом аварийности (5) с учетом латентных факторов.

9. Для выявления потенциально опасных участков необходимо руководствоваться следующими значениями средневзвешенного итогового коэффициента аварийности: при $K_{ит}^* < 3$ – участок безопасный; при $3 \leq K_{ит}^* < 5$ – малоопасный; при $5 \leq K_{ит}^* < 10$ – опасный; при $K_{ит}^* > 10$ – участок повышенной опасности.

Значения частных коэффициентов аварийности на автомобильной дороге II технической категории
 Values of partial accident rates for highway of II technical category

Показатель	Значение					
	7,5	9,0	10,5	14,0 (без разделительной полосы)	14,0 (с разделительной полосой)	
K_2 (при укрепленных обочинах)	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	
Ширина обочины, м	3,0			4,0		
K_3 (двухполосные дороги)	1,0			0,8		
K_3 (трехполосные дороги)	0,49			0,35		
Продольный уклон, ‰	20		30		50	
K_4	1,0		1,25		2,5	
Радиус кривых в плане, м	600–1000		1000–2000		2000	
K_5	1,4		1,25		1,0	
Видимость в плане, м	250		350		500	
K_6 (в плане)	2,0		1,45		1,0	
Длина прямых участков, км	3	5	10	15	20	25
K_8	1,0	1,1	1,4	1,6	1,9	2,0
Тип пересечений	В разных уровнях	Кольцевые	В одном уровне при интенсивности на пересекаемой дороге, процент от суммарной на двух дорогах			
			До 10		10–20	
K_9	0,35	0,7	1,5		3,0	4,0
Количество полос движения на проезжей части	2		3, без разметки		3, с разметкой	
K_{12}	1,0		1,5		0,9	
Длина населенного пункта, км	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0	6,0
K_{14}	1,0	1,2	1,7	2,2	2,7	3,0
Длина участков на подходах к населенному пункту, м	0–100		100–200		200–400	
K_{15}	2,5		1,9		1,5	
Расстояние от кромки проезжей части до обрыва, м	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0
K_{18} (с ограждением)	2,2	2,0	1,85	1,75	1,4	1,0

Для анализа безопасности дорожного движения на АД с учетом средневзвешенных значений итогового коэффициента аварийности целесообразно построить диаграмму его изменения по километрам, что способствует выявлению потенциально опасных участков дороги, а также определить приоритеты реализации мероприятий по повышению безопасности дорожного движения.

Исследование уровня безопасности дорожного движения по разработанной методике

С тем чтобы подтвердить полученные теоретические результаты и дать оценку эффективности разработанной экспресс-методики, провели экспериментальные исследования и сравнительный анализ безопасности движения по методике прототипа. Для выполнения эксперимента были выбраны участки АД II техниче-

ской категории, которые по количеству ДТП и их тяжести относятся к участкам с повышенной аварийностью. Из исследований исключали участки дорог, проходящих через населенные пункты протяженностью более 6 км, поскольку условия движения на АД и в населенных пунктах различны. Выбраны автомобильные дороги Р-23, Р-25, М-17, Н-15 общей протяженностью 365 км. Согласно данным статистики ДТП определили 79 участков дорог с повышенным риском аварийности.

Порядок формирования исходных данных по предложенной методике состоял в следующем:

- 1) исследуемый участок автомобильной дороги делили на сектора с неизменными значениями параметров условий движения (рис. 3);
- 2) для каждого сектора определяли значения параметров условий движения (табл. 2);



Рис. 3. Километровый участок исследуемой автомобильной дороги

Fig. 3. Kilometer stretch of investigated highway

3) значения параметров условий движения выражали через частные коэффициенты аварийности (табл. 2);

4) определяли величины латентных факторов безопасности движения по выявленным зависимостям (табл. 1).

Обследовали 385 секторов с неизменными значениями параметров условий движения, расположенных на участках с повышенной аварийностью исследуемых автомобильных дорог. На основании сформированной базы исходных данных определили значения уровня безопасности дорожного движения по предложенным моделям (табл. 3). Сравнительный анализ результатов расчетов уровня безопасности дорожного движения по экспресс-модели $K_{ит}^*$ и прототипу $K_{ит}^{взв}$ представлен на рис. 4.

На рис. 4 приведены данные для средневзвешенных величин итогового коэффициента аварийности модели-прототипа, поскольку пиковые значения не учитывают взаимодействие

смежных участков с неизменными параметрами условий движения. Сравнительный анализ величин итогового коэффициента аварийности экспресс-модели и модели-прототипа подтверждает адекватность предложенной модели итогового коэффициента аварийности.

Для удостоверения точности рассмотренных моделей проведена оценка связи между количеством происшествий на 1 млн авт.-км (относительный коэффициент аварийности) и значением итогового коэффициента аварийности. Выбор параметра для сравнения основывался на устойчивых связях между относительным и итоговым коэффициентами аварийности [4, 12]. Значение относительного коэффициента аварийности определяется зависимостью статистического количества ДТП (z) от интенсивности движения на участке (N) [3].

Кроме того, точность разработанной модели определяли степенью отклонения величин относительного коэффициента аварийности от значений итогового коэффициента аварийности по прототипу и предложенной модели. Так, экспресс-модель итогового коэффициента аварийности имеет преимущество над моделью-прототипом, поскольку определение $K_{ит}^*$ существенно (в шесть раз) уменьшает отклонение значений относительного коэффициента аварийности от итогового коэффициента аварийности (по модели-прототипу отклонение составило 18,61, по экспресс-модели – 3,22), что влияет на точность определения уровня безопасности дорожного движения.

Таблица 3

Результаты расчетов итогового коэффициента аварийности по экспресс-модели
Results of calculating final accident rate while using express-model

№ км	F_f	K_i	Сектор					$K_i^{взв}$	F_f
			1	2	3	4	5		
8_9	F_1	K_2	1,0	0,6	0,6	0,6	1,0	0,8600	1,022681313
		K_3	0,80	0,49	0,49	0,49	1,00	0,7715	
		K_{12}	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9650	
	F_2	K_9	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0500	-0,953986127
		K_{14}	1	1	1	1	1	1,0000	
	F_3	K_5	-	-	-	-	-	-	0,966529496
		K_6	-	-	-	-	-	-	
	F_4	K_4	-	-	-	-	-	-	1,239138768
		K_{18}	-	-	-	-	-	-	
	F_5	K_8	1	1	1	1	1	1	-1,07536579
		K_{15}	1	1	1	1	1	1	
	Длина сектора			0,25	0,15	0,10	0,10	0,40	1
Средневзвешенный итоговый коэффициент								0,785893306	

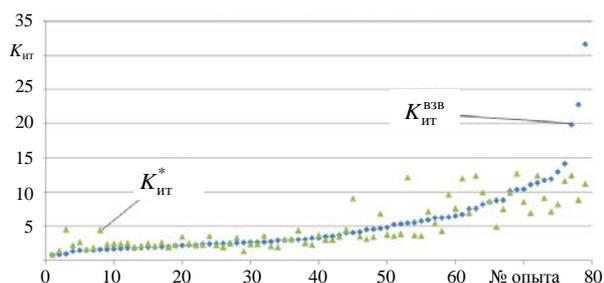


Рис. 4. Сравнение значений итогового коэффициента аварийности по прототипу и экспресс-модели: ◆ – модель-прототип; ▲ – экспресс-модель

Fig. 4. Comparison of final accident rate value of prototype and express-model: ◆ – prototype model; ▲ – express model

В ходе экспериментов вычислен итоговый коэффициент аварийности на всей протяженности АД II технической категории Р-23. Зна-

чения $K_{ит}$ по предложенной экспресс-модели (рис. 5b) сравнили с величинами итогового коэффициента аварийности, которые были определены по модели-прототипу (рис. 5a). На диаграммах цветом выделены участки, где зафиксированы ДТП. По модели-прототипу выявлено 43 опасных участка автомобильной дороги, из них восемь – очень опасные. При этом ДТП происходили на 21 % всех опасных участков. Из выявленных очень опасных участков ДТП случались на 62 % участков автомобильной дороги. При сравнении по предложенной модели выявлено 44 опасных участка, из них 10 относились к очень опасным. При этом на 23 % опасных участков происходили ДТП. Из выявленных очень опасных участков зафиксированы ДТП на 60 % из них.

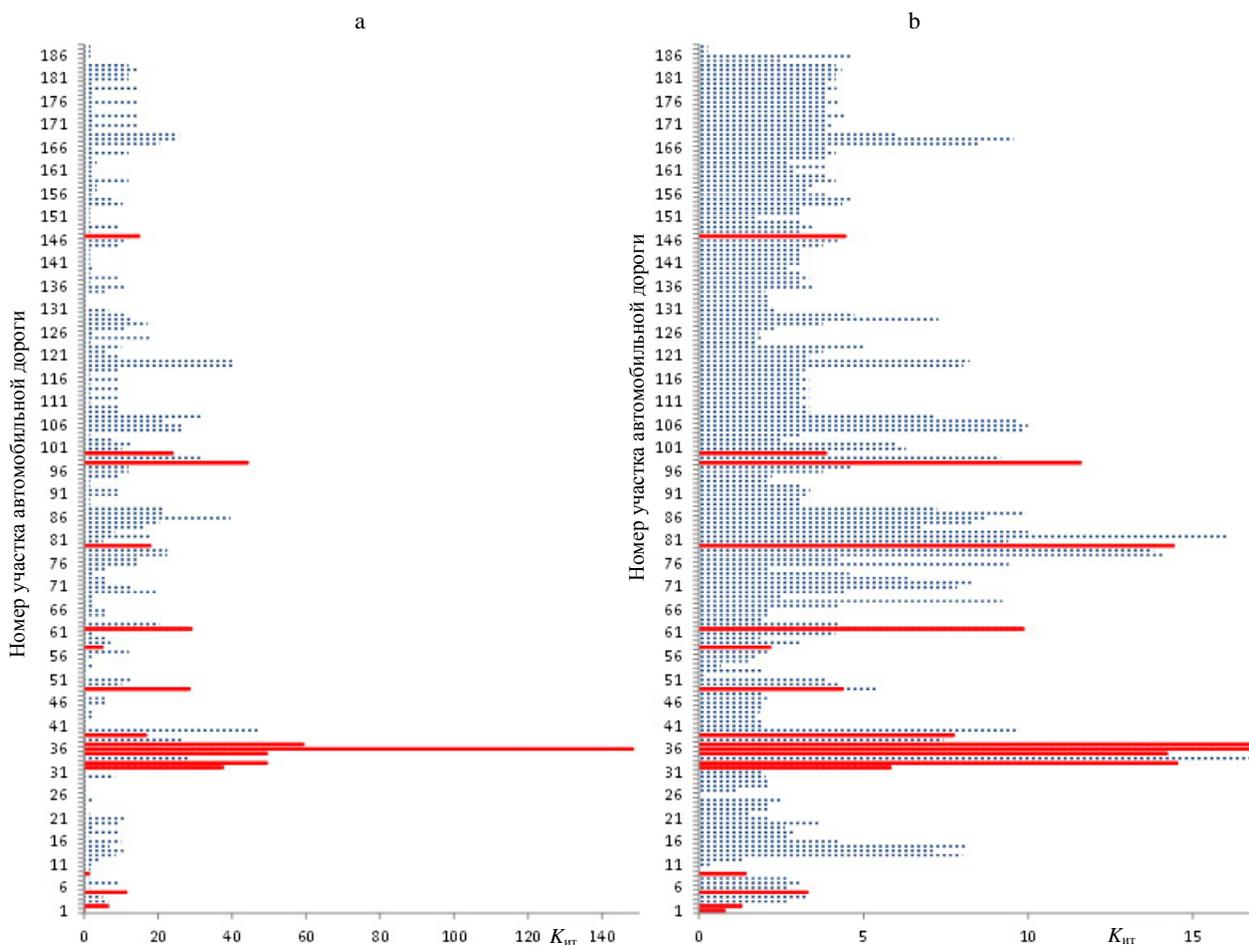


Рис. 5. Сравнение результатов определения итогового коэффициента аварийности по модели-прототипу (a) и экспресс-модели (b)

Fig. 5. Comparison of results for determination of final accident rate according to prototype model (a) and express model (b)

Анализ результатов показал, что для оценки безопасности дорожного движения на исследуемой автомобильной дороге предложенный и базовый методы определения итогового коэффициента аварийности дают схожие результаты. Можно утверждать, что точность результатов (количество выявленных опасных участков по различным моделям $\pm 2\%$; количество выявленных очень опасных участков по различным моделям $\pm 2\%$) при определении итогового коэффициента аварийности не теряется. Следовательно, для экспресс-анализа уровня безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах общего пользования целесообразно применять предложенный метод определения итогового коэффициента аварийности, поскольку он позволяет снизить временные и трудовые затраты (в 1,6 раза) без потери точности.

ВЫВОДЫ

1. В результате исследований получены математические модели итогового коэффициента аварийности, которые позволяют усовершенствовать метод определения уровня безопасности дорожного движения с минимальной потерей информативности и точности.

2. Анализ и проверка разработанной экспресс-модели определения итогового коэффициента аварийности показали эффективность ее применения, поскольку в нее входит меньшее количество переменных (пять), учитывающих 11 параметров условий движения при анализе автомобильных дорог II технической категории, вместо 18 переменных в модели-прототипе.

3. Экспериментальным путем установлено, что определение средневзвешенного значения уровня безопасности на километровой участке автомобильных дорог существенно (в шесть раз) сокращает отклонение значений относительного коэффициента аварийности от величин итогового коэффициента аварийности (по модели-прототипу $\bar{E}_{K_{ит}} = 18,61$, по экспресс-модели $K_{ит}^* - \bar{E}_{K_{ит}^*} = 3,22$), что влияет на точность определения безопасности дорожного движения.

4. Разработанную методику рекомендуется применять для определения потенциальной опасности участков автомобильных дорог во время экспресс-анализа безопасности автомобильной дороги или при проведении аудита безопасности дорожного движения на различных стадиях жизненного цикла автомобильной дороги.

5. Результаты эксперимента подтверждают адекватность модели и уменьшение временных затрат (в 1,6 раза) при проведении аудита безопасности дорожного движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение безопасности дорожного движения во всем мире [Электронный ресурс]: Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН (Семидесятая сессия). Принята 15 апр. 2016 г., № A/RES/70/260. 11 с. Режим доступа: <https://undocs.org/ru/A/RES/70/260>.
2. Доклад о состоянии безопасности дорожного движения в мире 2015 [Электронный ресурс] / Всемирная организация здравоохранения. Режим доступа: https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/GSRRS2015_Summary_RU.pdf?ua=1
3. Абрамова, Л. С. Анализ методов определения показателей безопасности дорожного движения / Л. С. Абрамова, Г. Г. Птица, В. В. Ширин // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2015. Вып. 69. С. 118–123.
4. Методика оцінки рівнів безпеки руху на автомобільних дорогах України: Державні будівельні норми України М 218-03450778-652:2008. Київ: ДерждорНДІ, 2008. 31 с.
5. FHWA Road Safety Audit Guidelines. No FHWA-SA-06-06 / Federal Highway Administration. Washington, 2006. Available at: https://safety.fhwa.dot.gov/rsa/guidelines/documents/FHWA_SA_06_06.pdf.
6. Забышный, А. С. Теоретическая основа частных коэффициентов аварийности / А. С. Забышный // Автомобильные дороги. 1994. № 5. С. 16–18.
7. Haneen, Farah. Multivariate Analyses for Infrastructure-Based Crash-Prediction Models for Rural Highways / Farah Haneen, Polus Abishai, Moshe A. Cohen // Road & Transport Research. 2007. Vol. 16, No 4. P. 26–41.
8. Чванов, В. В. Об уточнении метода «итогового коэффициента аварийности» для оценки безопасности применительно к современным условиям движения / В. В. Чванов // Дороги и мосты: сб. ст. М.: ФГУП РосдорНИИ, 2006. Вып. 16/2. С. 219–230.
9. Абрамова, Л. С. Дослідження показників безпеки руху на дорогах / Л. С. Абрамова, Г. Г. Птица // Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту. 2009. № 1. С. 20–26.

10. Калинина, В. Н. Введение в многомерный статистический анализ / В. Н. Калинина, В. И. Соловьев. М.: ГУУ, 2003. 66 с.
11. Бабков, В. Ф. Дорожные условия и безопасность движения / В. Ф. Бабков. М.: Транспорт, 1993. 271 с.
12. Чванов, В. В. Нормирование итогового коэффициента аварийности / В. В. Чванов, И. Ф. Живописцев // Наука и техника в дорожной отрасли. 2009. Вып. 3. С. 12–16.

Поступила 03.05.2019

Подписана в печать 20.08.2020

Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. *Improving Global Road Safety*. UN General Assembly Resolution (Seventieth Session). Adopted on April 15, 2016, No A/RES/70/260. Available at: <https://undocs.org/ru/A/RES/70/260> (in Russian).
2. World Health Organization, Department of Noncommunicable Diseases. *Report on Global Road Safety 2015*. Available at: https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/GSRRS2015_Summary_RU.pdf?ua=1 (in Russian).
3. Abramova L. S., Ptytsia H. G., Shyrin V. V. (2015) Analysis of Methods for Determining Road Safety Indicators. *Vestnik Kharkovskogo Natsionalnogo Avtomobilno-Dorozhnogo Universiteta = Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 69, 118–123 (in Russian).
4. State Building Norms of Ukraine M 218-03450778-652:2008. *Methods for Assessing Traffic Safety Levels on the Roads of Ukraine*. Kiev, Publishing House of “DerzhdorNDI”, 2008. 31 (in Ukrainian).
5. Federal Highway Administration (2006). *FHWA Road Safety Audit Guidelines*, No FHWA-SA-06-06. Washington. Available at: https://safety.fhwa.dot.gov/rsa/guidelines/documents/FHWA_SA_06_06.pdf.
6. Zabyshny A. S. (1994) Theoretical Basis of Partial Accident Rates. *Avtomobilnye Dorogi [Car Roads]*, (5), 16–18 (in Russian).
7. Haneen Farah, Abishai Polus, Moshe A. Cohen (2007). Multivariate Analyses for Infrastructure-Based Crash-Prediction Models for Rural Highways. *Road & Transport Research*, 16 (4), 26–41.
8. Chvanov V. V. (2006) On the Refinement of the “Final Accident Rate” Method for Assessing Safety Applied to Current Traffic Conditions. *Dorogi i Mosty: Sb. St. [Roads and Bridges: Collection of Papers]*. Moscow, Federal State Unitary Enterprise “Russian Road Reserach Institute”, Iss. 16/2, 219–230 (in Russian).
9. Abramova L. S., Ptytsia H. G. (2009) Research of Road Safety Indicators. *Visnyk Donetskoho Instytutu Avtomobilnoho Transportu [Bulletin of Donetsk Institute of Road Transport]*, (1), 20–26 (in Ukrainian).
10. Kalinina V. N., Soloviov V. I. (2003) *Introduction to Multidimensional Statistical Analysis*. Moscow, State University of Management. 66 (in Russian).
11. Babkov V. F. (1993) *Road Conditions and Traffic Safety*. Moscow, Transport Publ. 271 (in Russian).
12. Chvanov V. V. (2009) Standardization of Final Accident Rate. *Nauka i Tekhnika v Dorozhnoi Otrasi = Advanced Science and Technology for Highways*, (3), 12–16 (in Russian).

Received: 03.05.2019

Accepted: 20.08.2020

Published online: 30.11.2021

Перечень статей, опубликованных
в журнале «Наука и техника» в 2021 г.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Быков К. Ю., Качанов И. В., Шаталов И. М. Силовой режим скоростного комбинированного выдавливания плоских биметаллических дорожных резцов	4
Germashev A. I., Logominov V. A., Dyadya S. I., Kozlova Y. B., Krishtal V. A. Influence of the Cut Axial Depth on Surface Roughness at High-Speed Milling of Thin-Walled Workpieces (Гермашев А. И., Логоминов В. А., Дядя С. И., Козлова Е. Б., Кришталь В. А. Влияние осевой глубины резания на шероховатость поверхности при высокоскоростном фрезеровании тонкостенных деталей)	2
Gorbunov A. V., Devoino O. G., Gorbunova V. A., Yatskevitch O. K., Koval V. A. Thermodynamic Estimation of the Parameters for the C–H–O–N–Me-Systems as Operating Fluid Simulants for New Processes of Powder Thermal Spraying and Spheroidizing (Горбунов А. В., Девойно О. Г., Горбунова В. А., Яцкевич О. К., Коваль В. А. Термодинамическая оценка параметров систем C–H–O–N–Me как имитаторов рабочей среды в новых процессах газотермического напыления и сфероидизации порошков)	5
Дай Вэньци, Алексеев Ю. Г., Королёв А. Ю., Будницкий А. С. Пластическое формообразование наконечника концентратора-волновода для ультразвуковой эндоваскулярной абляции	2
Иванов А. С., Пузырев М. С., Чикишев Е. М. Разработка и обоснование двухдискового рабочего органа сельскохозяйственной машины для обработки почвы	5
Константинова А. А., Ивченко В. И., Бохонко В. В., Соловьев Н. В., Мойсей О. Н. Методические основы применения технологий виртуальной реальности в промышленном дизайне	6
Королёв А. Ю., Алексеев Ю. Г., Нисс В. С., Паршутто А. Э. Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах	4
Луговой В. П., Луговой В. В. Сравнительный анализ колебаний ультразвуковых концентраторов кольцевой формы	2
Луговой В. П. Теоретический анализ перемещений тонких стержней изогнутой формы	5
Маслиев В. Г., Фомин А. В., Ловская А. А., Маслиев А. О., Горбунов Н. И., Дущенко В. В. Прочность гибкой оболочки пневматической рессоры	4
Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М. Оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики методом плазменного напыления на воздухе	5
Пантелеенко Ф. И., Карпец М. Н., Белоцерковский М. А., Сосновский А. В. Определение адгезионной и когезионной прочности металлических покрытий, нанесенных гиперзвуковой металлизацией	6
Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Оковитый В. В., Володько А. С., Асташинский В. М. Формирование покрытий из самофлюсующегося порошка на основе сталей аустенитного класса с добавлением молибдена	2
Селивончик Н. М., Нестеренко Н. Л. Основы расчета противоугонного кранового устройства из эксцентрикового и клещевого механизмов	4
Федосюк В. М. Эволюция микроструктуры и механических свойств наноструктурированных пленок NiFe под действием температурной обработки	2
Шелег В. К., Минь Ма, Белоцерковский М. А. Технология получения и демпфирующие свойства азрированных полимерных покрытий	5
Юркевич А. В., Терешин А. В., Солдаткин В. А. Экспериментальные характеристики механической бесступенчатой передачи с внутренними силовыми функциями	4

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

Сивцев Н. С., Тарасов В. В. Численное исследование напряженно-деформированного состояния заготовки в контактной задаче поверхностного дорнования отверстий	3
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

Степаненко Д. А., Бунчук К. А. Моделирование составных кольцевых ультразвуковых волноводов с помощью метода конечных элементов	6
Сукач М. К. Методика инженерного расчета скобовидных пластинчатых рессор	3

П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е

Иванов В. А., Красовский В. В., Гременок В. Ф., Постнова Л. И. Получение методом «горячей стенки» тонких пленок $Pb_xSn_{1-x}Te$ для создания ИК-фотоприемников	6
Раджабова М. А., Ешматова Б. И., Бабаназарова Н. К. Восстановление аппаратной функции спектральных колориметров с помощью методов регуляризации	6

С Т Р О И Т Е Л Ь С Т В О

Батяновский Э. И., Бондарович А. И., Калиновская Н. Н., Рябчиков П. В. Самоуплотняющийся бетон и технология бетонирования фундаментного массива с использованием 9000 кубических метров бетона	4
Босаков С. В. К решению контактной задачи для упругой полуполосы	5
Буртыль Ю. В., Солодкая М. Г., Ковалев Я. Н. Прогнозирование ровности дорожных покрытий	3
Goncharenko D. F., Aleinikova A. I., Yesakova S. V., Hudilin R. I. Development of Technological Solutions for Sewer Rehabilitation Using Clinker Brick (Гончаренко Д. Ф., Алейникова А. И., Есакова С. В., Гудилин Р. И. Разработка технологических решений восстановления канализационного коллектора с использованием клинкерного кирпича)	6
Ивашечкин В. В., Медведева Ю. А., Кондратович А. Н., Сацута Е. С. Основы расчета и проектирования двухколонных двухфилтровых водозаборных скважин	5
Ковалев Я. Н., Яглов В. Н., Чистова Т. А., Гиринский В. В. Применение фосфогипса в дорожном строительстве	6
Ковшар С. Н., Рябчиков П. В., Гушин С. В. Оценка термонапряженного состояния бетонного массива	3
Leonovich S. N., Riachi J. 3D-Modeling for Life Cycle of the Structure (Леонович С. Н., Риачи Ж. 3D-моделирование для жизненного цикла сооружения)	1
Лукашевич А. А., Лукашевич Н. К., Островская Н. В. Моделирование и численное решение задачи с односторонними связями и трением при динамическом действии нагрузки	1
Молодин В. В., Ануфриева А. Е., Леонович С. Н. Влияние карбонизации бетонных поверхностей на их сцепление со свежееуложенным бетоном	4
Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev V. M., Sadovskaya E. A., Budrevich N. A. Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives (Полонина Е. Н., Леонович С. Н., Хрусталев В. М., Садовская Е. А., Будревич Н. А. Материалы на основе цемента, модифицированные наноразмерными добавками)	3
Романюк В. Н., Нияковский А. М., Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В. Разработка энергоэффективных режимов установок для тепловой обработки бетонных изделий с использованием численных методов расчета	3
Ходяков В. А., Кулан А. В., Савина Е. Н., Бойко И. Л., Гречухин В. А. Диагностика участков мостового полотна и подходов в зонах устройства деформационных швов на автодорожных мостах	1
Юхневский П. И. К вопросу о допустимом содержании ионов аммония в химических добавках для бетонов	5

Т Р А Н С П О Р Т

Абрамова Л. С., Птица Г. Г., Капинус С. В., Харченко Т. В. Разработка моделей экспресс-анализа безопасности дорожного движения	6
Boikov V. P., Guskov V. V., Pavarekha A. S. Automated Tire Pressure Control System for Multi-Purpose Wheeled Vehicles (Бойков В. П., Гуськов В. В., Поварехо А. С. Автоматизированная система регулирования давления воздуха в шинах многоцелевых колесных машин)	1

Herasyumenko V., Shpika N., Smyrnyi M., Khuruzha D. Improving the Energy Performance of Traction Electric Drive Vehicles in Solving Electric Braking (Герасименко В., Шпика Н., Смирный М., Хуружа Д. Повышение энергетических характеристик тяговых электромобилей в решении проблемы электрического торможения)	1
Груданов В. Я., Белохвостов Г. И., Ткачева Л. Т. Научно-практические подходы к совершенствованию конструкций глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания на основе теории чисел	5
Domijanic M., Hirz M. Simulation Model for Drivability Assessment and Optimization of Hybrid Drive Trains (Домијанич М., Хирц М. Имитационная модель для оценки управляемости автомобилем и оптимизация гибридной силовой установки)	1
Доля В. К., Доля К. В., Доля Е. Е. Определение параметров функционирования маршрутов пассажирского транспорта средствами компьютерного моделирования процессов	6
Зедгенизов А. В., Капский Д. В., Лагерев Р. Ю. Оценка влияния объектов капитального строительства на прилегающую улично-дорожную сеть при организации дорожного движения посредством регулируемых пересечений	6
Ibrayev K., Kapskiy D., Bogdanovich S. Ways to Improve Road Safety Audit in the Republic of Kazakhstan (Ибраев К., Капский Д., Богданович С. Пути повышения качества аудита безопасности дорожного движения в Республике Казахстан)	1
Puyn A. P., Terentiev A. N., Arslanov F. R. Automobile Absorption Conditioner (Ильин А. П., Терентьев А. Н., Арсланов Ф. Р. Автомобильный абсорбционный кондиционер)	5
Капский Д. В., Кот Е. Н., Богданович С. В., Рыбинский А. Г., Ибраев К. Анализ условий размещения на дорогах и характеристик железнодорожных переездов Республики Казахстан	3
Kuharonak G. M., Klesso M., Predko A., Telyuk D. Organization of Six-Cylinder Tractor Diesel Working Process (Кухаренок Г. М., Клессо М., Предко А., Телюк Д. Организация рабочего процесса шестицилиндрового тракторного дизеля)	5
Leontiev D. N., Ihnatenko A. V., Synkovska O. V., Ryzhikh L. A., Smirnova N. V., Aleksandrov Yu. V., Rudenko N. V. Fuel Consumption of Wheeled Vehicle and Transportation Costs during Highway Construction/Reconstruction (Леонтьев Д. Н., Игнатенко А. В., Синьковская Е. В., Рыжих Л. А., Смирнова Н. В., Александров Ю. В., Руденко Н. В. Расход топлива колесного транспортного средства и транспортные издержки при строительстве/реконструкции автомобильной дороги)	6
Safonau A. I. Blending Control of Trolleybus Traction and Brake Drives to Enhance Braking Efficiency of Vehicle (Сафонов А. И. Совместное управление тяговым и тормозным приводами троллейбуса для повышения эффективности торможения транспортного средства)	2
Суходоев В. Н. Рельсовый путь с обжатием рельса	3
Kharytonchyk S. V., Kusyak V. A., Nghia Le Van. Control of Pneumatic Actuator for Automated Mechanical Transmission Dry Friction Clutch Base on the Pulse Width Modulation Signal (Харитончик С. В., Кусяк В. А., Нгиа Ле Ван. Управление пневматическим исполнительным механизмом сухого фрикционного сцепления автоматизированной механической трансмиссии на основе модулированного широтно-импульсного сигнала)	1
Choromański W., Grabarek I., Kozłowski M., Czerepicki A. Innovative Urban Transport System – Autonomous and Locally Low-Emission (Хороманьский В., Грабарек И., Козловский М., Черепицкий А. Инновационная автономная система городского транспорта с низким уровнем локального загрязнения окружающей среды)	3

Э Н Е Р Г Е Т И К А

Пехота А. Н., Хрусталева Б. М., Акельев В. Д., Михальченко А. А. Вакуумный пневмотранспорт для производственных и коммунально-бытовых компонентов	2
Седин В. А., Бубырь Т. В. Исследование теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс. Часть 1	2

Седнин В. А., Бубырь Т. В. Исследование теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс. Часть 2	3
Хрусталева Б. М., Пехота А. Н., Нгуен Тху Нга, Ву Минь Фап. Твердое топливо на основе отходов малоиспользуемых горючих энергоресурсов	1

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Лешок А. В., Попова Ю. Б. Использование искусственных нейронных сетей для определения износа композиционного фрикционного материала	4
Лобатый А. А., Бумай А. Ю., Прохорович С. С. Аналитический синтез управляющего ускорения беспилотного летательного аппарата	4

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Гундина М. А. Спектральный анализ сигнала в системе Wolfram Mathematica	2
Матвеева Л. Д. Прямой метод решения задачи билинейного программирования	2
Мелешко И. Н., Ласый П. Г. Приближенное представление дилוגарифмами решения одной вариационной краевой задачи для круга при граничном условии Неймана	2
Невдах В. В. О выполнении закона сохранения энергии в теории упругих волн	2

ЭКОНОМИКА ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Грахов В. П., Кузнецов А. Л., Кислякова Ю. Г., Симакова У. Ф., Князева Я. О. Внедрение цифрового управления проектами строительства и эксплуатации энергоэффективных жилых домов	1
Ивуть Р. Б., Попов П. В., Лапковская П. И., Шевелева Н. Е. Алгоритм решения задачи проектирования региональной логистической инфраструктуры	4
Ковалев Я. Н., Савуха А. В., Гиринский В. В. Техно-экономическое сравнение конструкций дорожных одежд с использованием местных материалов	5
Мелешко Ю. В. Новая индустриализация и тенденции модернизации белорусской промышленности	4
Тымкуль Е. И. Выбор метода качественного и количественного анализа рисков для предприятий энергетики	1
Чазов Е. Л., Грахов В. П., Симченко О. Л. Методический инструмент оценки эффективности проектов капитального строительства нефтедобывающих предприятий	1