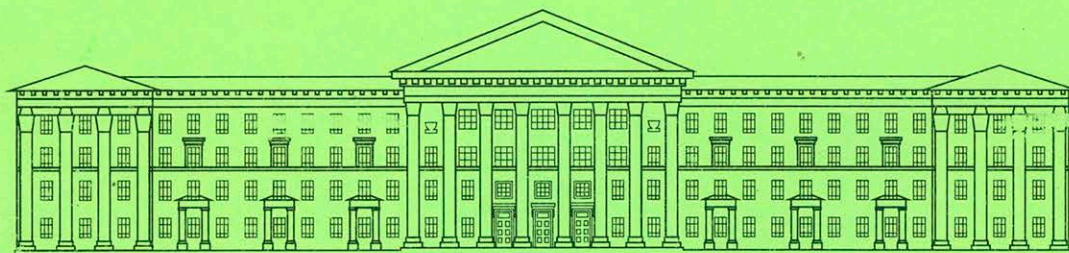




ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

1(61)

.. 2016 ..

*Есть в движенье сладость и тревога.
Станция, внезапный поворот.
Жизнь моя — железная дорога,
Вечное стремление вперед.*

Маргарита Алигер, 1938 г.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Науковий журнал

№ 1 (61) 2016

Виходить 6 разів на рік ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Заснований у серпні 2003 р.

Наука та прогрес транспорту
Автоматизовані системи управління на транспорті
Екологія на транспорті
Економіка та управління
Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Електричний транспорт
Залізнична колія
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання
Матеріалознавство
Моделювання задач транспорту та економіки
Нетрадиційні види транспорту. Машини та механізми
Промисловий транспорт
Рухомий склад залізниць і тяга поїздів
Транспортне будівництво
Розвиток вищої школи

Дніпропетровськ

2016

Засновник:
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ
ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Пішінько О. М., доктор технічних наук
Мямлін С. В., доктор технічних наук
Козаченко Д. М., доктор технічних наук
Колесникова Т. О., кандидат наук
із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (УКРАЇНА):

Афанасов А. М., Банніков Д. О., Бараш Ю. С., Біляєв М. М., Бобирь Д. В., Бобровський В. І., Боднар Б. Є., Босов А. А., Вакуленко І. О., Власова Т. І., Волкова В. Є., Габринєць В. О., Гаврилук В. І., Гетьман Г. К., Главацький К. Ц., Гненний О. М., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобець В. Л., Доценко О. М., Дудкіна В. В., Ейтутіс Г. Д., Жуковицький І. В., Заблудовський В. О., Казакевич М. І., Капіца М. І., Копитко В. І., Костін М. О., Кравець В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган М. Б., Муха А. М., Мухіна Н. А., Настечик М. П., Нетеса М. І., Оковитий С. І., Очкасов О. Б., Петренко В. Д., Пічугов С. О., Пічурін В. В., Полішко Т. В., Радкевич А. В., Радченко М. О., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Сніжко Л. О., Урсуляк Л. В., Штапенко Е. П., Яришкіна Л. О.

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Анісімов П. С. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Бялонь А. (Інститут залізничного транспорту, Варшава, Республіка Польща); Вайчунас Г. (Вільнюський технічний університет ім. Гедімінаса, Литва); Васяк І. (Інститут електроенергетики Лодзинської політехніки, Республіка Польща); Гусєв Б. В. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Долежел І. (Університет Західної Богемії, Чеська Республіка); Зіммер К. (Інститут Електротехніки Варшавської політехніки, Республіка Польща); Куанишев Б. М. (Казахська академія транспорту і комунікацій, Республіка Казахстан); Лінгайтис В. Л. (Вільнюський технічний університет ім. Гедімінаса, Литва); Манашкін Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковські А. (Сілезька політехніка, Республіка Польща); Стржелецькі Р. (Гданська морська академія, Республіка Польща); Тітова Т. С. (Петербурзький державний університет шляхів сполучення Імператора Олександра І, Російська Федерація); Худзікевич А. (Варшавський політехнічний університет, Республіка Польща); Шепонг Адам (Варшавський політехнічний університет, Республіка Польща).

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.
Видання внесено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки).
Журнал зареєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 15.02.2016 р., протокол № 7

Видавець Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (м. Дніпропетровськ)
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

Адреса засновника та редакції вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпропетровськ, Україна, 49010
тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua;
сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Видання публікується з 1936 р.:

- 1936–1993 рр. – «Труди Дніпропетровського інститута інженерів залізничного транспорту»;
- 1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
- 2003–2012 рр. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
- з 2013 р. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

**ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

(НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА

**ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА)**

Научный журнал

№ 1 (61) 2016

Выходит 6 раз в год ♦ ♦ ♦ ♦ Основан в августе 2003 г.

Наука и прогресс транспорта
Автоматизированные системы управления на транспорте
Экология на транспорте
Экономика и управление
Эксплуатация и ремонт средств транспорта
Электрический транспорт
Железнодорожный путь
Информационно-коммуникационные технологии и математическое моделирование
Материаловедение
Моделирование задач транспорта и экономики
Нетрадиционные виды транспорта. Машины и механизмы
Промышленный транспорт
Подвижной состав железных дорог и тяга поездов
Транспортное строительство
Развитие высшей школы

Днепропетровск

2016

Учредитель:
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА

*ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО
СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА*

Пшинько А. Н., доктор технических наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

Мямлин С. В., доктор технических наук

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. Н., доктор технических наук

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Колесникова Т. А., кандидат наук
по социальным коммуникациям

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ (УКРАИНА):

Афанасов А. М., Банников Д. О., Бараш Ю. С., Беляев Н. Н., Бобырь Д. В., Бобровский В. И., Боднар Б. Е., Босов А. А., Вакуленко И. А., Власова Т. И., Волкова В. Е., Габринцев В. А., Гаврилюк В. И., Гетьман Г. К., Главацкий К. Ц., Гненный О. Н., Головова Л. С., Гончаров К. В., Горобец В. Л., Доценко Е. Н., Дудкина В. В., Жуковичский И. В., Заблудовский В. А., Казакевич М. И., Капица М. И., Копытко В. И., Костин Н. А., Кравец В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган Н. Б., Муха А. М., Мухина Н. А., Настечик М. П., Нетеса Н. И., Оковитый С. И., Очкасов А. Б., Петренко В. Д., Пичугов С. А., Пичурин В. В., Полишко Т. В., Радкевич А. В., Радченко Н. А., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Снежко Л. А., Урсуляк Л. В., Штапенко Э. Ф., Эйтулис Г. Д., Яришкина Л. А.

ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Анисимов П. С. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Бялонь А. (Институт железнодорожного транспорта, Варшава, Республика Польша); Вайчунас Г. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Васяк И. (Институт электроэнергетики Лодзинской политехники, Республика Польша); Гусев Б. В. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Долежел И. (Университет Западной Богемии, Чешская Республика); Зиммер К. (Институт Электротехники Варшавской политехники, Республика Польша); Куанышев Б. М. (Казахская академия транспорта и коммуникаций, Республика Казахстан); Лингайтис В. Л. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Манашкин Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковски А. (Силезская политехника, Республика Польша); Стржелецки Р. (Гданьская морская академия, Республика Польша); Титова Т. С. (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация); Худзикевиц А. (Варшавский политехнический университет, Республика Польша); Шепонг Адам (Варшавский политехнический университет, Республика Польша).

Журнал
зарегистрирован

Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г.

Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины
приказом Министерства образования и науки Украины 29.12.2014 г. № 1528
(технические науки).

Журнал зарегистрирован: в международных каталогах периодических изданий
Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометрических системах
Google Scholar, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.
Печатается по решению ученого совета университета от 15.02.2016 г., протокол № 7

Издатель

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна (г. Днепропетровск)
Свидетельство субъекта издательского дела ДК № 1315 от 31.03.2003 г.

Адрес
учредителя

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: +38 (056) 371-51-05;
e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; сайт журнала: <http://stp.diit.edu.ua/>

Издание публикуется с 1936 г.:

1936–1993 гг. – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
1993–2002 гг. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
2003–2012 гг. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
с 2013 г. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport
named after Academician V. Lazaryan

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU
VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACÌONAL'NOGO UNÌVERSITETU
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU

(SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS
BULLETIN OF DNIPROPETROVSK NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY
TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN)

Scientific journal

No. 1 (61) 2016

Bi-Monthly ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Founded in August 2003

Science and Transport Progress
Transport Automated Control Systems
Transport Ecology
Economics and Management
Operation and Repair of Transport Means
Electric Transport
Railway Track
Information and Communication Technologies and Mathematical Modeling
Material Science
Transport and Economic Tasks Modeling
Non-Traditional Transport Modes. Machines and Mechanisms
Industrial Transport
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction
High School Development

Dnipropetrovsk

2016

Founder:
**DNIPROPETROVSK NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT
 NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN**

Chairman of the Editorial Board of the University
 Editor-in-Chief
 Deputy Chief Editor
 Executive Secretary

Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences
 Myamlin S. V., Doctor of Technical Sciences
 Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
 Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

EDITORIAL BOARD MEMBERS (UKRAINE):

Afanasov A. M., Bannikov D. O., Barash Yu. S., Biliaiev M. M., Bobrovskiy V. I., Bobyr D. V., Bodnar B. J., Bosov A. A., Crivchick G. G., Dotsenko O. M., Dudkina V. V., Eitutis H. D., Gabrync V. A., Gavrilyuk V. I., Getman G. K., Glavatskiy K. Ts., Hnennyi O. M., Golovkova L. S., Goncharov K. V., Gorobets V. L., Kapitsa M. I., Kazakevich M. I., Kopytko V. I., Kostin M. O., Krasnyuk A. V., Kravets V. V., Kurgan M. B., Kuznetsov V. G., Mukha A. M., Mukhina N. A., Nastechik N. P., Netesa N. I., Ochkasov O. B., Okovytyy S. I., Petrenko V. D., Pichugov S. O., Pichurin V. V., Polishko T. V., Radchenko N. A., Radkevych A. V., Raksha S. V., Shtapenko E. P., Skalozub V. V., Snizhko L. O., Ursulyak L. V., Vakulenko I. O., Vlasova T. I., Volkova V. Ye., Yarishkina L. O., Zabludovskiy V. O., Zhukovytsky I. V.

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Anisimov P. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Bialon A. (Railway Institute, Warszawa, Republic of Poland); Chudzikiewicz A. (Transport Warsaw University of Technology, Republic of Poland); Dolezel I. (The University of West Bohemia, Czech Republic); Gusev B. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Kuanyshov B. M. (Kazakh Academy of Transport and Communications, Republic of Kazakhstan); Lingaitis V. L. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Manashkin L. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», USA); Sladkowski A. (Silesian University of Technology, Republic of Poland); Strzelecki R. (Gdynia Maritime Academy, Republic of Poland); Szelag Adam (Warsaw University of Technology, Republic of Poland); Titova T. S. (Petersburg State Transport University, Russian Federation); Vaiciunas G. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Wasiak I. (Institute of Electrical Power Engineering, Republic of Poland); Zymmer K. (Electrotechnical Institute, Republic of Poland)

Journal was registered	by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine. Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012 Edition is included in the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 r. no. 1528 (technical sciences). Journal is registered: in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; research and metric systems Google Scholar, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI. Published according to the Academic Council decision of the University from 15.02.2016, Protocol no. 7
Publisher	Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipropetrovsk) Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003
Address of Founder	St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: http://stp.diit.edu.ua/

Edition is being published since 1936:

1936–1993 – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
 1993–2002 – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
 2003–2012 – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
 since 2013 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

ЮВІЛЯРИ.

80 РОКІВ ШАФРАНУ ЛЕОНІДУ МОІСЕЄВИЧУ



18 февраля 2016 года исполняется 80 лет ШАФРАНУ Леониду Моисеевичу, доктору медицинских наук, профессору, Заслуженному деятелю науки и техники Украины, Почетному работнику морского и речного флота Украины, первому заместителю директора ГП «Украинский научно-исследовательский институт медицины транспорта» Минздрава Украины (Одесса).

За 50 лет своей активной и разносторонней научной деятельности он внес существенный вклад в развитие морской медицины, медицины транспорта, промышленной, транспортной и биохимической токсикологии, гигиены и токсикологии полимерных материалов, в том числе в теорию и практику пожаробезопасности и токсикологии горения полимеров, проблему адаптации человека в экстремальных условиях производственной и окружающей среды, психофизиологию операторского труда.

Л. М. Шафран родился в г. Коростень Житомирской области, Украина, в семье служащих. В 1954 г. окончил среднюю школу с медалью в г. Черновцы. Далее вся жизнь связана с Одессой, где в 1954 г. поступил и в 1957 г. окончил с отличием Военно-морское медицинское училище. После увольнения в запас в связи с сокращением Вооруженных сил СССР в 1959 г. поступил и в 1966 г. окончил лечебный факультет Одесского государственного медицинского института им. Н. И. Пирогова с отличием и, одновременно, в 1964 г. – биоло-

гический факультет Одесского государственного университета им. И. И. Мечникова с отличием.

С 1959 г. работал помощником эпидемиолога, врачом Бассейновой санэпидстанции Черноморско-Азовского водздравотдела. В июле 1965 г. организовал и возглавил Бассейновую токсикологическую лабораторию Черноморско-Азовского водздравотдела, которая вскоре стала научно-практическим центром медицины водного транспорта на Южном, а затем и других морских и речных бассейнах страны. Это определялось бурным развитием отечественного морского флота и судостроения. За короткое время штат лаборатории вырос с 4-х до 104-х сотрудников, которые выполняли исследования в интересах Министерств морского флота, судостроительной промышленности, общего и среднего машиностроения на общую сумму более 1 млн руб. в год. Лаборатория была оснащена современным оборудованием и аппаратурой, вычислительной техникой, имела виварий и комплекс затравочных камер. Тесные творческие связи у коллектива лаборатории сложились с Центральными НИИ морского флота и технологии судостроения, НПО «Прометей», «Алмаз», «Рубин». НПО «Энергия», Черноморским и Латвийским морскими пароходствами, судостроительными и судоремонтными предприятиями на всех морских бассейнах страны. Наряду с большим объемом проводимых в лаборатории химико-аналитических и экспериментальных исследований, сотрудники выполняли их непосредственно на судах в длительных морских рейсах, участвовали в производственных испытаниях на береговых объектах и в приемке судов в эксплуатацию. Сам Л. М. Шафран совершил в 1964–1992 гг. десятки морских рейсов в качестве судового врача и врача-исследователя продолжительностью до 9 месяцев, в том числе кругосветное плавание на т/х «Котовский». Результаты исследований легли в основу ряда положений и медицинского приложения к Международному кодексу морской перевозки опасных грузов (IMDG Code), отечественных «Правил морской перевозки опасных грузов» (МОПОГ) трех из-

ЮВІЛЯРИ

даний 1968, 1977 и 1990 гг., Санитарных правил для морских, речных судов и портов СССР, обоснования максимально допустимых сроков непрерывного плавания, внедрения новых режимов труда и отдыха плавсостава, эксплуатации судов сокращенными экипажами, разработки системы профессионального психофизиологического отбора моряков, профилактики нейротоксикозов у членов экипажей 4-х поколений судов-газовозов и химовозов, системы гигиенической регламентации полимеров и лакокрасочных материалов судостроительного, транспортного назначения для надводных, подводных и космических объектов, в том числе принципов создания композиций с заданными гигиеническими свойствами.

Этому способствовали тесные творческие связи и научно-методическая помощь ученых Киевского НИИ гигиены труда и профзаболеваний, ВНИИГИНТОКСа, НИИ им. А. Н. Марзева, НИИГВТ, ВНИИЖГа, ВМА им. С. М. Кирова, Института медико-биологических проблем мединститутами Одессы, Киева, Львова, Москвы, Риги, Ростова-на-Дону и др. Это обеспечило высокий научный уровень и практическую значимость, результативность выполняемых НИР, получивших высокую оценку у нас в стране и за рубежом.

Все это послужило одной из предпосылок открытия в 1978 г. в Одессе филиала НИИ гигиены водного транспорта (Москва), а в 1988 г. – Всесоюзного НИИ гигиены водного транспорта Минздрава СССР (с 1992 г. – Украинский НИИ медицины транспорта Минздрава Украины). С этими учреждениями связана вся последующая научная деятельность Л. М. Шафрана как заведующего отделом, заместителя директора по научной работе и первого заместителя директора института. Установленные в то время международные научные связи с учеными более 20 стран мира частично поддерживаются по настоящее время.

Л. М. Шафран является автором более 600 научных работ, в том числе 18 монографий, руководств и справочников, около 30 авторских свидетельств и патентов. В 1968 г. он защитил кандидатскую, в 1982 г. – докторскую диссертацию, в 1985 г. ему присвоено звание профессора, а в 2005 г. – Заслуженного деятеля науки

и техники Украины. Им подготовлено более 20 кандидатов и 7 докторов наук. Он ведет активную научную общественную деятельность, являясь членом правлений Украинских научных обществ гигиенистов, токсикологов, председателем ассоциации микроэлементологов Украины, членом экспертного совета ДАК МОН Украины, членом специализированного совета при Институте медицины труда НАМН Украины, председателем комиссии по гигиене и токсикологии полимерных материалов Комитета по вопросам гигиенического регламентирования Минздрава Украины, входит в редакции и редакционные советы ряда отечественных и зарубежных научных периодических изданий. В 1967–1976 гг. он являлся экспертом Международной морской организации при ООН (ИМО), в 1975–1980 гг. – членом Консультативного совета ВОЗ по охране здоровья моряков, был приглашенным профессором в Болгарии, Германии, Казахстане, России, является действительным членом (академиком) ряда общественных международных академий, в том числе международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ), международной академии человека в аэрокосмических системах (МАЧАКС), Судостроения. Он является почетным профессором Всероссийского НИИ железнодорожной гигиены, был принят в члены Международной ассоциации морских врачей, Американского химического общества, Российского общества медицинской элементологии.

За плодотворную научную деятельность Л. М. Шафран награжден орденом «Знак Почета» и медалями СССР, 5 медалями ВДНХ СССР, значком «Отличник здравоохранения», медалью им. М.В. Ломоносова (МАНЭБ), медалью им. Бернарда Нохта Института морской медицины и тропических болезней в Гамбурге, Почетным дипломом Института морской медицины в Гданске, грамотами Министерства здравоохранения и Министерства внутренних дел Украины.

Свое 80-летие Л. М. Шафран встречает в активной форме, полон научных планов, творческих идей и начинаний, участвует в подготовке научных кадров высшей квалификации.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

UDC 656.256.3 : 625.162. 4

V. I. HAVRYLIUK^{1*}, O. M. VOZNYAK^{2*}, V. V. MELESHKO^{3*}

^{1*}Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail diitats@mail.ru, ORCID 0000-0001-9954-4478

^{2*}Dep. «Transportation Technology», Lviv branch of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevich St., 12a, Lviv, Ukraine, 79052, tel. 38 (032) 267 99 74, e-mail ovozom@gmail.com, ORCID 0000-0002-7163-9026

^{3*}Head Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Ukrzaliznytsia, Tverska St., 5, Kyiv, Ukraine, 03680, e-mail soyuz_at@mail.ru, ORCID 0000-0001-6833-964X

IMPROVING THE POSITIONING ACCURACY OF TRAIN ON THE APPROACH SECTION TO THE RAILWAY CROSSING

Purpose. In the paper it is necessary to analyze possibility of improving the positioning accuracy of train on the approach section to crossing for traffic safety control at railway crossings. **Methodology.** Researches were performed using developed mathematical model, describing dependence of the input impedance of the coded and audio frequency track circuits on a train coordinate at various values of ballast isolation resistances and for all usable frequencies. **Findings.** The paper presents the developed mathematical model, describing dependence of the input impedance of the coded and audio-frequency track circuits on the train coordinate at various values of ballast isolation resistances and for all frequencies used in track circuits. The relative error determination of train coordinate by input impedance caused by variation of the ballast isolation resistance for the coded track circuits was investigated. The values of relative error determination of train coordinate can achieve up to 40-50 % and these facts do not allow using this method directly for coded track circuits. For short audio frequency track circuits on frequencies of continuous cab signaling (25, 50 Hz) the relative error does not exceed acceptable values, this allow using the examined method for determination of train location on the approach section to railway crossing. **Originality.** The developed mathematical model allowed determination of the error dependence of train coordinate by using input impedance of the track circuit for coded and audio-frequency track circuits at various frequencies of the signal current and at different ballast isolation resistances. **Practical value.** The authors propose the method for train location determination on approach section to the crossing, equipped with audio-frequency track circuits, which is a combination of discrete and continuous monitoring of the train location.

Keywords: railway crossings; automatic crossing signaling; train coordinate control

Introduction

Railway crossings as crossing places in the same level of the railway roadbed and highway are one of the most dangerous areas for the rail and vehicular traffic. Safety control at railway crossings is one of the most acute questions of the general problem for traffic safety on the railways. In

accordance with the conducted analysis, the number of road traffic accidents at railway crossings in recent years has decreased significantly in Ukraine, but is still quite large and is accompanied by significant material and human losses (Fig. 1). Analysis of accidents at railway crossings in different categories (Fig. 2) showed that their considerable

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

quantity (more than 60%) occurred at crossings equipped with automatic crossing signaling (ACS) without a crossing tender.

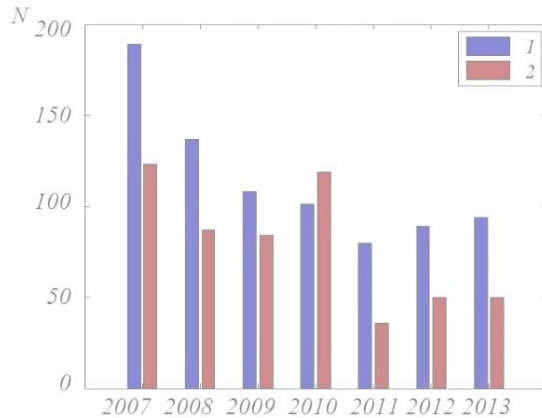


Fig. 1. The total number of road traffic accidents at Ukrainian railway crossings (1) and the number of victims (2) during 2007-2013 years

A similar situation is typical for other countries. For example, in Europe more than 300 deaths occur per year due to accidents at railway crossings [10], and most of them happen at open railway crossings.

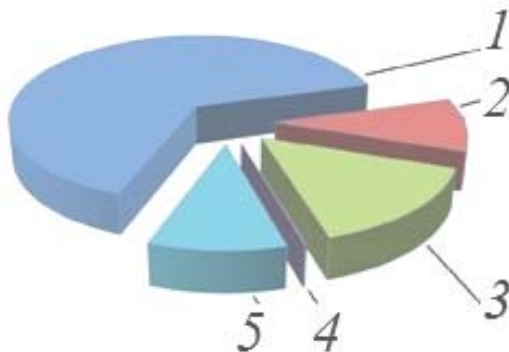


Fig. 2. Distribution of road traffic accidents by types of railway crossings:

- 1 – unmanned, equipped with ACS; 2 – unmanned, without ACS; 3 – with man on duty and signalling; 4 – with man on duty and without signalling; 5 – outside of a railway crossing

The main cause of road traffic accidents at railway crossings is noncompliance with rules by drivers of vehicles, namely, transit through the crossing after the pre-alarm application before the approaching train.

For the timely detection of obstacles before the approaching train at railway crossings many methods were proposed, including ultrasonic detectors usage [11], radars [9], satellite positioning [16] and other sensor devices [8,17], as well as using video

surveillance the rail crossing zone [12,13,15] with information transfer to the train driver.

Vehicles entry at the railway crossing after the pre-alarm application in some cases is provoked with unreasonably high latency time of train's passage, which can be 12 minutes or more. This is due to the fact that the actual motion speed of different trains can vary greatly, while ACS switching occurs at the train entry to the approaching area with the fixed length, which is calculated on the maximum speed of the train.

Thus, in order to improve movement safety at railway crossings it is necessary to use additional means of control, allowing to inspect the zone vacancy of railway crossing, as well as the section of approaching the train to the crossing with automatic determination of train position and speed.

A great number of methods and devices of automatic crossing signaling based on the actual speed of the trains and coordinates at the approaching section, that are determined by the signals from the point sensors of different design, placed on the approaching section to the crossing are described in the literature. However, none of these devices was not widely used due to the lack of functional safety. It is worth mentioning the measuring methods of train coordinates on the approach section to the crossing, based on changes of parameters control of the rail line during the train movement on it. The [2] proposed a method based on test signaling supply in to the rail line, [6, 14] proposed to measure the distance up to cuts on the marshaling yard, based on signal processing of track circuits using the states classifier. The authors [4, 5] proposed to determine the train coordinates by input resistance of the track circuit (TC), on which there is a train. Since the accuracy of these methods is significantly affected by the ballast insulation resistance of rail lines, the authors [4-6, 14] offered to analyze the measured signals and parameters of track circuits using different state classifiers of track circuits. However, complete research for the changes impact of ballast insulation resistance on the on train positioning accuracy has not been studied sufficiently.

Purpose

Purpose of this paper is improving the positioning accuracy of trains on the approach section to the railway crossing that eventually will increase traffic safety at them.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Methodology

Research were conducted with the mathematical model method on the developed model that describes the input impedance dependence of the coded and audio-frequency track circuits on the train coordinate at different values of the ballast insulation resistance for all signal current frequencies that are presently used in track circuits.

Mathematical model. Equivalent circuits of the coded track circuit with signal current frequency of 25 and 50 Hz and jointless audio-frequency track circuit with frequencies of 25, 50, 420, 480, 580, 720, 780 Hz in the presence of a train on it (i.e. in shunt mode operation) are presented in Fig. 3.

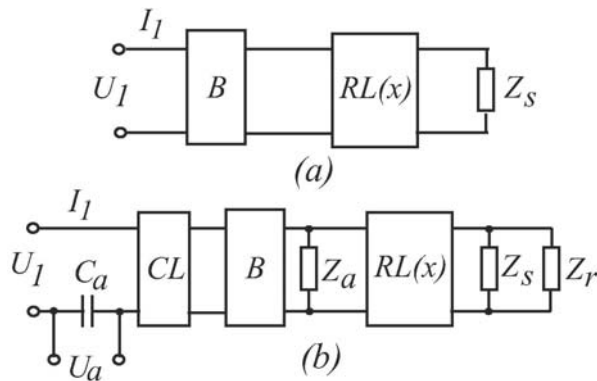


Fig. 3. Equivalent circuits of the coded (a) and audio-frequency (b) track circuits in a shunt mode

In the figure, there are following designations: – U_1, I_1 – input voltage and current at the output, supplying TC (transformer, frequency converter or track filter for AFTC); U_a, I_a – voltage and coded current of automatic signalling for audio frequency track circuits; C_a – capacitor in the current supply circuit of cab signaling; CL – four-pole network, corresponding to the cable line for audio frequency track circuits; B – four-pole network, including all equipment of TC supply end, located in the track box or the relay case near a rail line (transformer, impedance-bond resistors, capacitors in accordance with electric circuit of TC [3]); Z_a – the input impedance of the adjacent track circuit (for jointless track circuits); $RL(x)$ – four-pole network, corresponding to the rail line with the movable unit (train) at a distance x from the supply end; Z_s – impedance of train shunt; Z_r – impedance of the rail line after the movable unit. Parameters of RC elements and coefficients of four-pole network for

matrix in A – form are taken from [3]. The primary parameters of the cable and the rail lines at the frequency of the current signal were converted into the coefficients of four-pole network similarly (as in) [1, 3, 7]. The general matrix accordingly to the equivalent circuits (Fig. 1) was calculated as the matrix product of all four-pole network, included in it

$$\underline{M}_0 = \prod_i \underline{M}_i. \quad (1)$$

The input impedance of the track circuit with the movable shunt on it is found by formula:

$$\underline{Z}_i = \frac{\underline{M}(1,1)R_s + \underline{M}(1,2)}{\underline{M}(2,1)R_s + \underline{M}(2,2)}. \quad (2)$$

The above mentioned mathematical description is implemented in MatLab. The selected variable parameters included the following: signal current frequency f equal to 25, 50, 420, 480, 580, 720 or 780 Hz; length of the rail line L and the current coordinate of the movable unit $x = 0..L$, and the ballast insulation resistance r_i .

Findings

The simulation resulted in obtained dependences of the input impedance of track circuit in shunt mode $Z_{inp}(x, f, r_i)$ on TC parameters. Simulation was performed for the coded track circuits with signal current frequency of 25 Hz, length of 2.5 km and 50 Hz, length of 2.6 km at two values of ballast insulation resistance r_i , equal 1 and 50 Ohm/km. For audio-frequency track circuits simulation was performed for signal current frequency of 25, 50, 420, 480, 580, 720 and 780 Hz at a RC length of 0.3 km and ballast insulation resistance r_i 0.8 and 50 Ohm / km. Cable line length is taken equal to 1 km.

The simulation obtained dependences of the input impedance modulus $abs(Z_{inp})$ from train coordinate $x = 0..L$ are presented in Fig. 4. The figure shows that at distance up to the train $x \leq 1 \text{ km}$ resistance impact r_i on value $abs(Z_{inp})$ is not significant, but when x is increased this impact becomes essential that does not allow determining the train coordinate x by input

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

impedance of track circuits $Z_{inp}(x, f, r_i)$ with sufficient accuracy for practical usage.

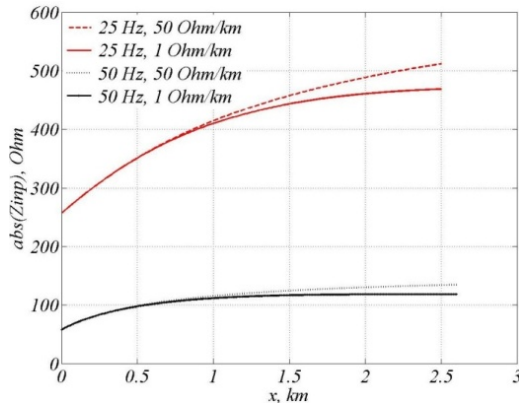


Fig. 4. Dependences of the input impedance modulus of the coded track circuits on the coordinate x

To study the impact of ballast insulation resistance changes r_i on the train coordinate accuracy x accordingly value $Z_{inp}(x, f, r_i)$ for each value $Z_{inp}(x, f, r_i)$ at given frequency f the values of the corresponding train coordinate were calculated at two values of ballast insulation resistance r_i , equal 50 and 1 Ohmm/km. Difference between these values

$$\text{deltax} = x_1(r_i = 50) - x_2(r_i = 1)$$

characterizes the absolute error in determining the coordinate x , due to the change of ballast insulation resistance.

Dependence deltax on x is presented in Fig. 5.

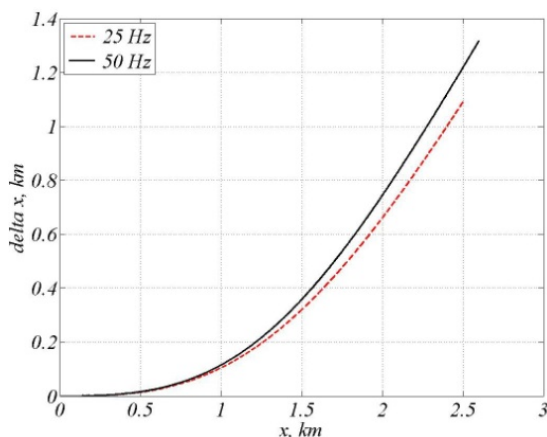


Fig. 5 The dependence of the absolute error deltax on the coordinate x

The figure shows that absolute error in determining the coordinate deltax increases significantly with raise $x > 0,5$ km and at maximum value $x = L$ the relative error is ~40-50 %.

Thus, it can be concluded that the direct use of the method for determining the train coordinate accordingly the input impedance of the coded track circuits does not provide the necessary accuracy for practical use due to the significant impact change of ballast insulation resistance. To reduce error of the coordinate measurement in [4, 5] proposed the use of the additional measurement results processing using the classifier of track circuits states.

For the coordinate $x \leq 0,5$ km error of measurements x accordingly input impedance is not significant one.

Based on research the paper proposed the method of accuracy increase of determining the train coordinate on approach section to the railway crossing, equipped with audio-frequency track circuits. It comprises the simultaneous usage of discrete and continuous monitoring of the train's position. Discrete monitoring is carried out by signals from track relays of audio frequency track circuits in accordance with the control scheme concerning sequence of occupancy and clearing the track circuits. Continuous monitoring is based on the input resistance dependence of audio frequency track circuits on the train coordinate.

This method is implemented due to widespread introduction of automatic block signalling with audio frequency track circuits instead of the numeric coded automatic block signalling, occurring in recent times, supports implementation of this method. According to typical materials for the crossing signaling design for sections, equipped with automatic block signaling with audio frequency track circuits, for crossing signaling operation for each track near crossing, two track circuits, usually with a common feed end and with a frequency of 720 Hz for one track and 780 Hz for a different one, length of at least 150 are provided. The rest of approach section to the railway crossing in the right and the wrong directions includes several audio frequency track circuits. Prior to approaching section audio-frequency track circuit also has a short length and frequency of 720 or 780 Hz, which allow reducing the area of the additional shunting, and, respectively, to record more

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

precisely the entry of the train on the approach section.

Fig. 6 presents the dependences of input impedance modulus $abs(Z_{inp})$ audio frequency track circuits (TC) on coordinate x train for signal current with frequencies of 420, 480, 580, 720, 780 Hz and for ACS current, frequency of 25 и 50 Hz at $r_i = 0,8 \text{ Ohm/km}$ are presented in Fig. 6.

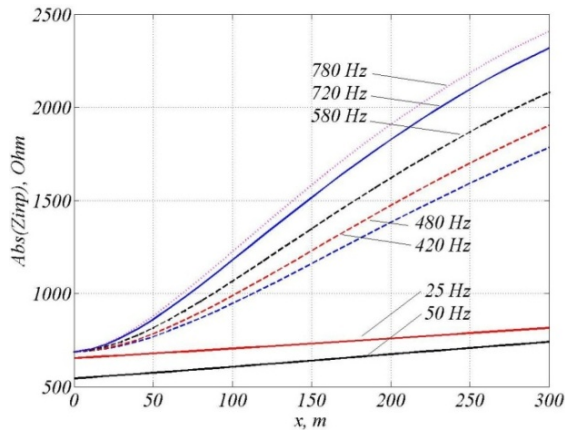


Fig. 6. Dependencies of input impedance modulus $abs(Z_{inp})$ of audio-frequency track circuits on x for different frequencies

As it can be seen from the figure monotone dependence $abs(Z_{inp})$ on x allow using it to determine the train coordinates at all tested frequencies. The resolution capability of the method depends on change rate of the input impedance of track circuit Z_{inp} by variation x . To evaluate rate of change Z_{inp} from x at different frequencies the derivative from Z_{inp} upon x was calculated

$$dif(abs(Z_{inp})) = \frac{\partial[abs(Z_{inp})]}{\partial x}.$$

Fig. 7 presents the dependence of derivative $dif(abs(Z_{inp}))$ on x . One can see that graph $dif(abs(Z_{inp}))$ takes fairly large values, which increase with the frequency increase and decrease of the distance to the train.

To study the impact of change of the ballast insulation resistance $Z_{inp}(x, r_i)$ we bring into consideration value, equal to the difference between the input impedance of the TC at the two extreme values of ballast insulation resistance $r_i = 0,8 \text{ u } 50 \text{ Ohm/km}$

$$Z_{dif}(x) = Z_{inp}(x, 50) - Z_{inp}(x, 1).$$

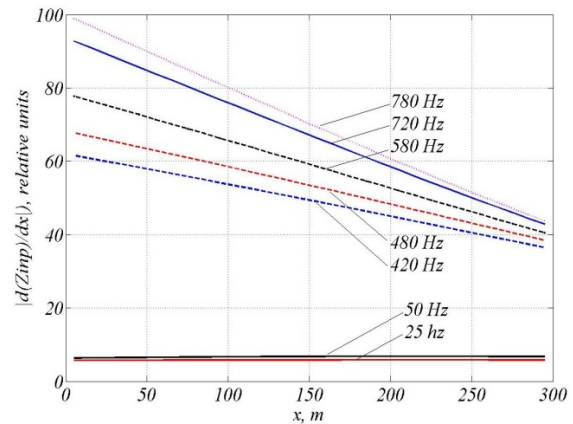


Fig. 7. Dependence of the derivative $dif(abs(Z_{inp}))$ on x for the different frequencies

Fig. 8 presents the dependence Z_{dif} on the coordinate x for frequencies $f = 25, 50, 420, 480, 580, 720, 780 \text{ Hz}$ is presented in Fig. 8. From this Figure one can see, that value $abs(Z_{dif})$ is significantly increased by raising the coordinate x and signal current frequency. It should be noted, that obtained values are large enough $abs(Z_{dif})$ and they do not fully characterize the error of measurement. To characterize the relative measurement error, let us consider the relative change of the TC input impedance $Z_{inp}(x, r_i)$, caused by changes of the ballast insulation resistance

$$Z_r(x) = \frac{(Z_{inp}(x, 50) - Z_{inp}(x, 0,8))}{Z_{inp}(0,8)}.$$

Calculated dependence Z_r on x is presented in Figure 9. From the above dependence one can be seen that relative values of change $Z_{inp}(x, r_i)$ at variation of ballast insulation resistance have acceptable for practical use values, equal $\leq 1 \%$, only for frequencies of 25 and 50 Hz. It may be concluded that on the short track circuits is possible direct determination of train coordinate by their input impedance at operation frequencies of automatic cab signalling, i.e. 25 and 50 Hz, since the relative measurement error caused by the change of ballast insulation resistance at these frequencies, does not exceed the allowable values for practical use.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Measurement error of train coordinate upon the input resistance of track circuits on tonal frequencies is significant and these results application to determine the position of the train is only possible after the appropriate intellectual processing of measurement results.

Since the input impedance of track circuits is a complex quantity, the behavior of each of its components is of interest, depending on the train coordinate, frequency and the ballast insulation resistance to select the most suitable complex impedance component for the practical use. Fig. 10 presents the graphs of complex impedance compo-

nents of the track circuit, namely, $Abs(\underline{Z}_r)$ modulus, $Arg(\underline{Z}_r)$ argument, real $Re(\underline{Z}_r)$ and imaginary part $Im(\underline{Z}_r)$ from frequency and train coordinate. From the analysis of the mentioned graphs one can conclude that the most appropriate value for determining the coordinates x is considered above $Abs(\underline{Z}_r)$ modulus, since the rest components dependences of complex value of the input impedance of track circuits on coordinates x has more complex nature, which may lead to ambiguity of measurement results interpretation.

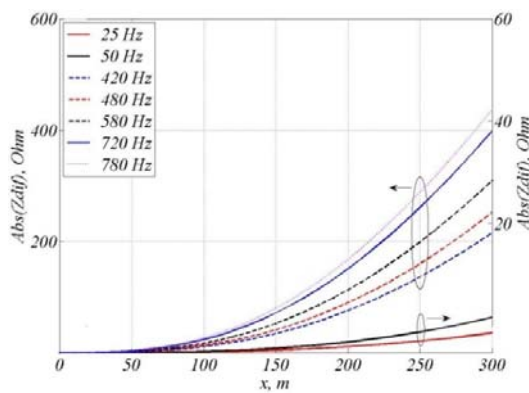


Fig. 8. Dependence of $Abs(\underline{Z}_{dif})$ on x for different frequencies

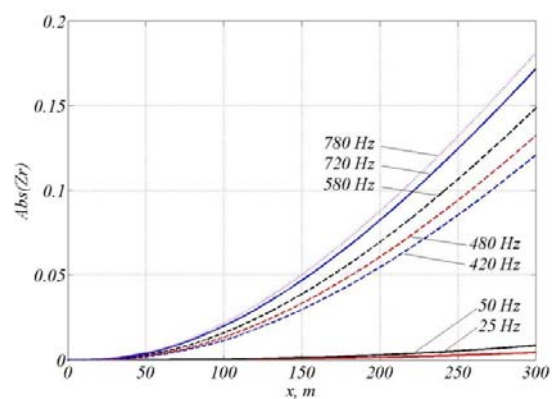


Fig. 9. Dependence of $Abs(\underline{Z}_r)$ on x for different frequencies

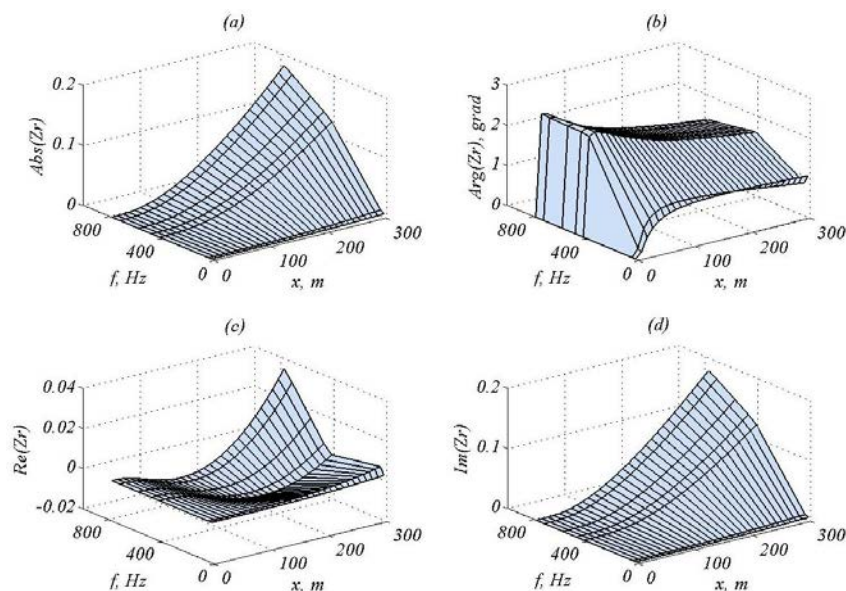


Fig. 10. Dependence of $Abs(\underline{Z}_r)$ module, $Arg(\underline{Z}_r)$ argument, real $Re(\underline{Z}_r)$ and imaginary $Im(\underline{Z}_r)$ part of the impedance \underline{Z}_r on the frequency f and coordinate x

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

The results obtained at simulation for other lengths of track circuits and of cable line have shown that the above considered regularities are performed for them too.

Originality and practical value

The developed mathematical model allowed determination of the error dependence of the train coordinate upon the input impedance of the track circuit for coded and audio-frequency track circuits at various frequencies of the signal current and ballast insulation resistance.

The paper proposed the method for train location determination on approach section to the crossing, equipped with audio-frequency track circuits, which is a combination of discrete and continuous monitoring of the train location. Discrete monitoring is carried out by signals from track relays of audio-frequency track circuits in accordance with the control scheme concerning sequence of occupancy and clearing the track circuits. Continuous monitoring of train position is controlled with the input resistance of audio-frequency track circuits.

Conclusions

1. A mathematical model was developed; it describes the dependence of the input impedance of coded and audio-frequency track circuits on the train coordinate at different values of the ballast insulation resistance for all usable frequencies of current signal in track circuits.

2. Relative error of detecting the coordinates of the train by input impedance of the coded track circuits due to the change of ballast insulation resistance was determined. It can reach 40-50%, which makes impossible a straight-forward adaptation of a method for determining the coordinates of the train by the input impedance of the coded track circuits.

3. For the audio-frequency track circuits at frequencies of automatic cab signaling the relative error in determining the coordinate of the train by the input impedance does not exceed the acceptable values, it allows using this method to determine the train location on approach section to the railway crossing.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Гаврилюк, В. И. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи / В. И. Гаврилюк, В. И. Щека, В. В. Мелешко // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 7–15. doi: 10.15802/stp2015/55352.
2. Грачев, Г. Н. Применение метода импульсного зондирования для организации переездной сигнализации / Г. Н. Грачев, М. Б. Гуменик. // Автоматика, телемеханика и связь. – 1997. – № 11. – С. 28–30.
3. Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / В. С. Аркатов, Ю. В. Аркатов, С. В. Казеев, Ю. В. Ободовский. – Москва : Миссия-М. – 2006. – 496 с.
4. Тарасов, Е. М. Выбор признаков и решающих правил при распознавании состояний рельсовых линий сортировочных горок / Е. М. Тарасов, М. В. Трошина // Вестн. УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 3 (48). – С. 194–197.
5. Тарасов, Е. М. Определение вида решающей функции классификатора координат вагонов // Изв. академии управления: теория, стратегии, инновации. – 2013. – № 1 (14). – С. 54–57.
6. Gavriljuk, V. Investigation of correlation measuring method accuracy for two types of test signals / V. Gavriljuk, R. Rybalka, V. Bezrukov // Transport problems. – 2008. – Vol. 3. – Iss. 4, pt. 1. – P. 33–38.
7. Havryliuk, V. I. Electrical impedance of traction rails at audio frequency range / V. I. Havryliuk, V. V. Meleshko // Інформ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2015. – № 2. – P. 31–36.
8. Ku, B. Y. Grade-Crossing Safety / B. Y. Ku // IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2010. – Vol. 5. – Iss. 3. – P. 75–81. doi: 10.1109/MVT.2010.938274.
9. Lohmeier, S. P. Development of an ultra-wideband radar system for vehicle detection at railway crossings / S. P. Lohmeier, R. Rajaraman, V. C. Ramasami // Proc. of IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium (24.06–28.06.2002). – 2002. – Vol. 6. – P. 3692–3694. doi: 10.1109/IGARSS.2002.1027293.
10. Mekki, A. Validation of a new functional design of automatic protection systems at level crossings with model-checking techniques / A. Mekki, M. Ghazel, A. Toguyeni // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2012. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 714–723. doi: 10.1109/TITS.2011.2178238.
11. Obstruction detector using ultrasonic sensors for upgrading the safety of a level crossing / S. Kautoshi, H. Arai, T. Shimizu, M. Takada // Proc. of

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

- the Intern. Conference on Developments in Mass Transit Systems. – London, 1998. – P. 190–195. doi: 10.1049/cp:19980140.
12. Pu, Y.-R. Study of moving obstacle detection at railway crossing by machine vision / Y.-R. Pu, Li-W. Chen, S.-H. Lee // Information Technology Journal. – 2014. – Vol. 13. – Iss. 16. – P. 2611–2618. doi: 10.3923/itj.2014.2611.2618.
 13. Road sign recognition by single positioning of space-variant sensor window / D. G. Shaposhnikov, L. N. Podladchikova, A. V. Golovan, N. A. Shevtsova // Proc. of the 15th Intern. Conference on Vision Interface. – Calgary, 2002. – P. 213–217.
 14. Rybalka, R. Identification method of linear dynamic systems with spectrum correction procedure used / R. Rybalka, V. Gavriljuk, V. Bezrukov // Advances in Transport Systems Telematics. – Warszawa : Wydawnictwa komunikacji i łączności, 2009. – P. 229–236.
 15. Rybalka, R. Method for pre-processing of level crossing image / R. Rybalka, K. Honcharov // Transport problems. – 2015. – Vol. 10. – Iss. 1. – P. 79–86.
 16. Sobolev, Yu. Principles of railway crossing signaling control using satellite systems of navigation / Yu. Sobolev, A. Bojnik // Eastern-European J. of Enterprise Technologies. – 2003. – № 1. – P. 21–28.
 17. Takeda, T. Improvement of railroad crossing signals / T. Takeda // Proc. of 1999 IEEE/IEEEJ/JSAT Intern. Conference on Intelligent Transportation Systems (05.10–08.10.1999). – Tokyo, 1999. – P. 139–141. doi: 10.1109/ITSC.1999.821042.

В. І. ГАВРИЛЮК^{1*}, О. М. ВОЗНЯК^{2*}, В. В. МЕЛЕШКО^{3*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта diitats@mail.ru, ORCID 0000-0001-9954-44781

^{2*}Каф. «Транспортні технології», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта ovozom@gmail.com, ORCID 0000-0002-7163-9026

^{3*}Головне управління автоматики, телемеханіки та зв'язку ДП «Укрзалізниця», вул. Тверська, 5, Київ, Україна, 03680, ел. пошта soyuz_at@mail.ru, ORCID 0000-0001-6833-964X

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ПОЇЗДА НА ДІЛЯНЦІ НАБЛИЖЕННЯ ДО ПЕРЕЇЗДУ

Мета. У статті необхідно проаналізувати можливість підвищення точності визначення положення поїзда на ділянці наближення до переїзду для забезпечення безпеки руху на залізничних переїздах. **Методика.** Дослідження проведені з використанням розробленої математичної моделі, що описує залежність вхідного імпедансу кодових і тональних рейкових кіл (РК) від координати поїзда при різних значеннях опору ізоляції баласту для всіх використовуваних частот. **Результати.** Розроблено математичну модель, що описує залежність вхідного імпедансу кодових і тональних рейкових кіл від координати поїзда при різних значеннях опору ізоляції баласту та всіх використовуваних в РК частот сигнального струму. Досліджено залежність відносної похибки визначення координати поїзда по вхідному імпедансу кодових рейкових кіл, яка обумовлена зміною опору ізоляції баласту. Значення відносної похибки визначення координати поїзда можуть досягати 40–50 %, що не дозволяє безпосередньо застосовувати цей спосіб для кодових рейкових кіл. Для коротких тональних рейкових кіл на частотах автоматичної локомотивної сигналізації безперервного типу (25, 50 Гц) відносна похибка визначення координати поїзда по вхідному імпедансу не перевищує допустимі значення. Це дозволяє використовувати розглянутий спосіб для визначення місця розташування поїзда на ділянці наближення до переїзду. **Наукова новизна.** На основі розробленої математичної моделі досліджена залежність похибки визначення координати поїзда по вхідному імпедансу рейкового кола для кодових і тональних рейкових кіл при різних частотах сигнального струму та при різних опорах ізоляції баласту. **Практична значимість.** Авторами запропоновано метод визначення положення поїзда на ділянці наближення до переїзду для перегонів, обладнаних тональними рейковими колами, який заснований на використанні дискретного та безперервного контролю координати поїзда.

Ключові слова: залізничні переїзди; автоматична переїзна сигналізація; контроль координати поїзда

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

В. И. ГАВРИЛЮК^{1*}, О. М. ВОЗНЯК^{2*}, В. В. МЕЛЕШКО^{3*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 3731504, эл. почта diitats@mail.ru, ORCID 0000-0001-9954-4478

^{2*}Каф. «Транспортные технологии», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич, 12а, Львов, Украина, 79052, тел. +38 (032) 267 99 74, эл. почта ovozom@gmail.com, ORCID 0000-0002-7163-9026

^{3*}Главное управление автоматики, телемеханики и связи ГП «Укрзализныця», ул. Тверская, 5, Киев, Украина, 03680, эл. почта soyuz_at@mail.ru, ORCID 0000-0001-6833-964X

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОЕЗДА НА УЧАСТКЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ К ПЕРЕЕЗДУ

Цель. В статье необходимо проанализировать возможность повышения точности определения положения поезда на участке приближения к переезду для обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах. **Методика.** Исследования проведены с использованием разработанной математической модели, описывающей зависимость входного импеданса кодовых и тональных рельсовых цепей (РЦ) от координаты поезда при различных значениях сопротивления изоляции балласта для всех используемых частот. **Результаты.** Разработана математическая модель, описывающая зависимость входного импеданса кодовых и тональных рельсовых цепей от координаты поезда при различных значениях сопротивления изоляции балласта и всех используемых в РЦ частот сигнального тока. Исследована зависимость относительной погрешности определения координаты поезда по входному импедансу кодовых рельсовых цепей, обусловленная изменением сопротивления изоляции балласта. Значения относительной погрешности определения координаты поезда могут достигать 40–50 %, что не позволяет непосредственно применять этот способ для кодовых рельсовых цепей. Для коротких тональных рельсовых цепей на частотах автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (25, 50 Гц) относительная погрешность определения координаты поезда по входному импедансу не превышает допустимые значения. Это позволяет использовать рассмотренный способ для определения местоположения поезда на участке приближения к переезду. **Научная новизна.** На основе разработанной математической модели исследована зависимость погрешности определения координаты поезда по входному импедансу рельсовой цепи для кодовых и тональных рельсовых цепей при различных частотах сигнального тока и при различных сопротивлениях изоляции балласта. **Практическая значимость.** Авторами предложен метод определения положения поезда на участке приближения к переезду для перегонов, оборудованных тональными рельсовыми цепями, который основан на использовании дискретного и непрерывного контроля координаты поезда.

Ключевые слова: железнодорожные переезды; автоматическая переездная сигнализация; контроль координаты поезда

REFERENCES

1. Havryliuk V.I., Shcheka V.I., Meleshko V.V. Ispytaniya novykh tipov podvizhnogo sostava na elektromagnitnyu sovместimost s ustroystvami signalizatsii i svyazi [Testing new types of rolling stock for electromagnetic compatibility with signaling and communication devices]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 5 (59), pp. 7-15. doi: 10.15802/stp2015/55352.
2. Grachev G.N., Gumenik M.B. Primeneniye metoda impulsnogo zondirovaniya dlya organizatsii pereyezdnoy signalizatsii [Pulse sounding method application for the organization of crossing signaling]. *Avtomatika telemechanika i svyaz – Automation, Telecontrol and Communication*, 1997, no. 11, pp. 28-30.
3. Arkatov V.S., Arkatov Yu.V., Kazeyev S.V., Obodovskiy Yu.V. *Relsovyye tsepi magistralnykh zheleznnykh dorog* [Track circuits of main railways]. Moscow, LLC «Missiya-M» Publ., 2006. 496 p.
4. Tarasov Ye.M., Troshina M.V. Vybory pri znakov i reshayushchikh pravil pri raspoznavanii sostoyaniy relsovykh liniy sortirovochnykh gorok [Features selection and decision rules for recognition of rail lines on marshalling yards]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ufa State Aviation Technical University], 2012, vol. 16, no. 3 (48), pp. 194-197.
5. Tarasov Ye.M. Opredeleniye vida reshayushchey funktsii klassifikatora koordinat vagonov [Defining the type of decision function of coordinate cars classifier]. *Izvestiya akademii upravleniya: teoriya, strategiya, innovatsii – News of Management Academy: Theory, Strategy and Innovation*, 2013, no. 1 (14), pp. 54-57.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

6. Gavrilyuk V., R. Rybalka, V. Bezrukov. Investigation of correlation measuring method accuracy for two types of test signals. *Transport problems*, 2008, vol. 3, issue 4, Part 1, pp. 33-38.
7. Havryliuk V.I., Meleshko V.V. Electrical impedance of traction rails at audio frequency range. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transp – Information and Control Systems on the Railway Transport*, 2015, no. 2, pp. 31-36.
8. Ku B.Y. Grade-Crossing Safety. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2010, vol. 5, issue 3, pp. 75-81. doi: 10.1109 /MVT.2010. 938274
9. Lohmeier S.P., Rajaraman R., Ramasami V.C. Development of an ultra-wideband radar system for vehicle detection at railway crossings. Proc. of IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium (24.06-28.06.2002). 2002, vol. 6. pp. 3692-3694. doi: 10.1109/IGARSS.2002.1027293.
10. Mekki A., Ghazel M., Toguyeni A. Validation of a new functional design of automatic protection systems at level crossings with model-checking techniques. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, vol. 13, issue 2, pp. 714-723. doi: 10.1109/TITS. 2011. 2178238.
11. Kazutoshi S., Arai H., Shimizu T., Takada M. Obstruction detector using ultrasonic sensors for upgrading the safety of a level crossing. Proc. of the Intern. Conference on Developments in Mass Transit Systems. London, 1998, pp. 190-195. doi: 10.1049/cp:19980140.
12. Pu Y.-R., Chen Li-W., Lee S-H. Study of moving obstacle detection at railway crossing by machine vision // Y.-R. Pu. *Informational Technology Journal*, 2014, vol. 13, issue 16, pp. 2611-2618. doi: 10.3923/itj.2014.2611.2618.
13. Shaposhnikov D.G., Podladchikova L.N., Golovan A. V., Shevtsova N.A. Road sign recognition by single positioning of space-variant sensor window. Proc. of the 15th Intern. Conference on Vision Interface. Calgary, 2002, pp. 213-217.
14. Rybalka R., Gavrilyuk V., Bezrukov V. Identification method of linear dynamic systems with spectrum correction procedure used. *Advances in transport systems telematics*. Warszawa, Wydawnictwa komunikacji i lacznosci Publ., 2009, pp. 229-236.
15. Rybalka R., Honcharov K. Method for pre-processing of level crossing image. *Transport problems*, 2015, vol. 10, issue1, pp. 79-86.
16. Sobolev Yu., Bojnik A. Principles of railway crossing signaling control using satellite systems of navigation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2003, no. 1, pp. 21-28.
17. Takeda T. Improvement of railroad crossing signals. Proc. of 1999 IEEE/IEEJ/JSAI Intern. Conference on Intelligent Transportation Systems (05.10-08.10.1999). Tokyo, 1999, pp. 139-141. doi: 10.1109/ITSC.1999.821042.

Prof. A. B. Boinik, Sc. Tech. (Ukraine); Prof. V. V. Skalozub, Sc. Tech. (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: Dec. 12, 2015

Received: Feb. 21, 2016

UDC 656.259.12

A. YU. ZHURAVLEV^{1*}

^{1*}Dep. «Automation, Remote Control and Communication», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel +38 (067) 990 76 51, e-mail anton.zhuravlev@gmail.com, ORCID 0000-0001-6885-5177

ABOUT TRACK CIRCUIT CALCULATION METHOD DEPENDENT ON FERROMAGNET PROPERTIES IN CONDITIONS OF TRACTION CURRENT NOISE INFLUENCE

Purpose. The work is intended to investigate the electromagnetic processes in impedance bond in order to improve noise immunity of track circuits (TC) for safe railway operation. **Methodology.** To achieve this purpose the methods of scientific analysis, mathematical modelling, experimental study, a large-scale simulation were used. **Findings.** The work examined the interference affecting the normal performance of track circuits. To a large extent, part of track circuit damages account for failures in track circuit equipment. Track circuit equipment is connected directly to the track line susceptible to traction current interference, which causes changes in its electrical characteristics and electromagnetic properties. Normal operability, performance of the main operating modes of the track circuit is determined by previous calculation of its performance and compilation of regulatory tables. The classical method for determination of track circuit parameters was analysed. The classical calculation method assumes representation of individual sections of the electrical track circuit using the quadripole network with known coefficients, usually in the A-form. Determining the coefficients of linear element circuit creates no metrological or mathematical difficulties. However, in circuits containing nonlinear ferromagnets (FM), obtaining the coefficients on the entire induction change range in the cores is quite a difficult task because the classical methods of idling (I) and short circuit (SC) are not acceptable. This leads to complicated methods for determining both the module and the arguments of quadripole network coefficients. Instead of the classical method, the work proposed the method for calculating the track circuit dependent on nonlinear properties of ferromagnets. **Originality.** The article examines a new approach to the calculation of TC taking into account the losses in ferromagnets (FM), without determination of equivalent circuit quadripole network coefficients. When building the FM reversal model in parallel magnetic fields, the most accurate methods are the approximation ones that take into account not only the changes in values and over time, but also their derivatives. The development of computer hardware and software makes real the mathematical methods for calculating TC with significant change in ferromagnetic inductance, including the saturation areas. Herewith, it is important to search for approximating analytical expression that describes the dynamic limit hysteresis loop (HL). **Practical value.** The changes in the electrical parameters of the same TC were analysed using the classical and the new calculation methods, the difference made less than 10%. The work introduced some measures to increase operational noise immunity of TC.

Keywords: track circuit; impedance bond; quadripole network; ferromagnet; hysteresis; spectrum; vortical currents; magnetic viscosity; magnetizing curve; simulation

Introduction

Experience has shown that certain conditions and operating modes of the power network create a powerful influence of the traction current noise on the work of electric track circuits (TC). Such exposure results in magnetization of nonlinear ferromagnets (transformers, impedance bonds and components containing ferromagnetic core) in track circuits and, consequently, in failure of TC and signalling systems. Adverse conditions [11, 12, 13] for TC operation are created in the following cases:

1) At a certain switching circuit of DC traction network of splicing stations the level of permanent traction current potentials «rail-to-earth» in the rail network increases. It results in increased **leakage currents** into the open-line track of AC electric traction lines, causing magnetization of impedance bonds and track transformers, and disruption of short (less than 500 m) track circuits;

2) In the areas of AC electrified railroads the ice on the contact network collectors creates an electric arc, accompanied by electrical transients in the power circuit of an electric locomotive. Con-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

stant component of this current at the rail line asymmetry also causes saturation of ferromagnets;

3) Switching on the locomotive main switch in a certain voltage phase of the circuit power line also leads to transition process with the consequences given above;

4) When a laden electric locomotive enters the neutral section on the current collectors there are several electric arcs repeated aperiodically; this leads, as mentioned above, to the occurrence of transients and failures of TC. From the above it follows that improvement of track circuit noise immunity in the signalling systems in conditions of permanent reverse traction current influence is an actual scientific and technical problem.

Purpose

The purpose of this work is to examine the causes of traction current harmful influence on TC operation, to create the calculation method for TC

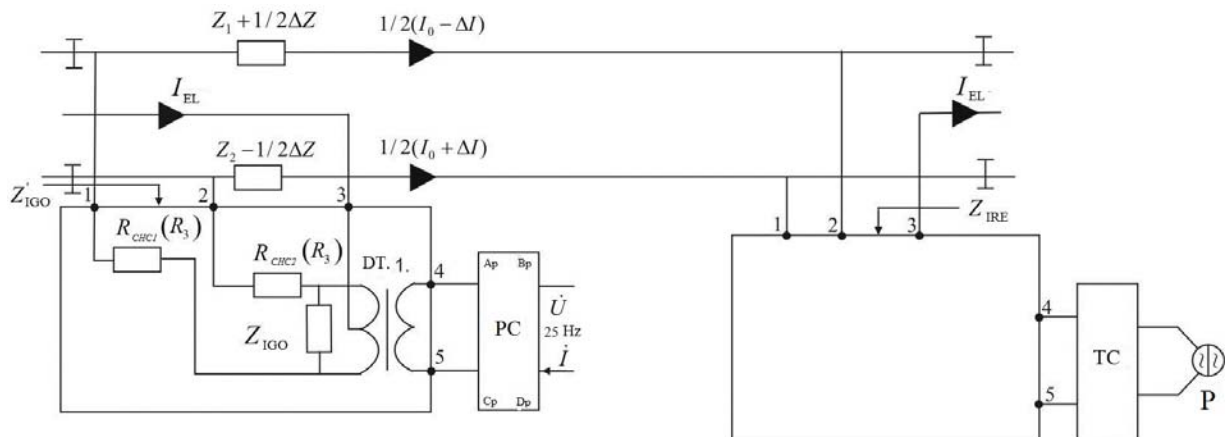


Fig. 1. Equivalent circuit of track lines

The EMF equation for equivalent circuit contour of the track (Figure 1) consisting of two rails, equipment impedance Z_{igo} , Z_{ire} and choke cables, for the difference in currents can result in the following expression:

$$\Delta I = \frac{\Delta Z' + 2(R_{CHC1} - R_{CHC2})}{Z + Z_{igo}' + Z_{ire} + 2(R_{CHC1} + R_{CHC2}) + Z_{MWR}} I_{EL}, \quad (1)$$

where I_{EL} – electric locomotive current; $\Delta Z = Z_1 - Z_2$ – difference in rail resistance, Ohm; Z – rail loop resistance, Ohm/km; Z_{MWR} – main

with nonlinear ferromagnets (FM) and to propose technical solutions to improve the reliability of TC and railway automation systems.

Methodology

Disruption of TC operation. Let's consider one of the causes of TC operation disruption – longitudinal asymmetry of track lines. Measurements show that the asymmetry coefficient is higher in winter than in summer due to increased insulation resistance. It is established that the best way to approximate the conductive joint resistance distribution is asymmetric Weibull law, resistance variation reaches 1.8 ... 15 m.e.r. (meters of entire rail); longitudinal asymmetry coefficient ranges from 10% to 12% – in summer, up to 18% – in winter [1, 6].

winding resistance DT.1, Ohm; $R_{CHC1(2)}$ – choke cable resistance, Ohm.

It follows from (1) that Z_{igo}' , Z_{ire} perform the symmetric action, but their impedance for the signal current under the track integrity monitoring conditions is small and can be neglected.

For DC the equation (1) can be written as:

$$\Delta I = \frac{\Delta R_{CC} + 2(R_{ДП1} - R_{ДП2})}{R_P + 2(R_{ДП1} + R_{ДП2}) + R_{ДП}} I_{ЭЛ},$$

or

$$\Delta I = K_a \cdot I_{ЭЛ}, \quad (2)$$

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Thus, the longitudinal asymmetry coefficient of track line is:

$$K_a = \frac{\Delta R_{RC} + 2(R_{CHC1} - R_{CHC2})}{R_p + 2(R_{CHC1} + R_{CHC2}) + \Delta R_{MWR}}, \quad (3)$$

where ΔR_{RC} – difference in track resistance due to resistance of connectors.

In short TC (less than 500 m) longitudinal asymmetry is one of the main causes of traction current asymmetry $K_a = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$, where $I_{1,2}$ – traction currents in the rails 1 and 2.

Measurements show that the resistance of the steel DC rail connector is distributed among its components, so [4, 3]:

$$R_{RC} = R_{SC} + (R_N + R_{WS}) = \frac{2}{5} R_{RC} + \frac{3}{5} R_{RC},$$

where R_M – resistance of nipple – rope junction; R_{SC} – resistance of steel cable; R_{WS} – resistance of weld seam.

For steel connector with 100 mm² cross-section, which is widely used in practice, it appears that averages $R_{SC} = 295$ mcOhm; $R_N + R_{WS} = 437$ mcOhm; $R_{RC} = 232$ mcOhm; for the connector with 90 mm² cross-section – $R_{RC} = 770$ mcOhm [8].

Rules for protection of metallic structures from stray-current corrosion allow increasing rail resistance through the joints by max 20%, while the DC asymmetry coefficient is $K_a = \frac{\Delta R}{R_p} = 0,12 \dots 0,13$.

Approximate calculation of asymmetry for alternate traction current is performed with the following assumptions [3, 8]:

- Resistance of rails differ among themselves by the amount of resistance of connectors;
- Connector losses do not depend on the frequency;
- Resistance in points of welding and junctions cable – nipple – plug – rail depends on the frequency as much as the internal resistance of the rails.
- Herewith, the minimum coefficient of longitudinal asymmetry:

$$|K_z| = K_a \left| \frac{R_{SC}}{R_C \cdot Z} + \frac{(R_N + R_{WS}) Z_i}{R_C \cdot Z} \right| \leq \leq 0,008\%, \text{ or } 8.0\%, \quad (4)$$

where Z_i – internal resistance of rails, $0.35e^{j35}$ Ohm/km; rail loop resistance $R_p = 0.1$ Ohm; $Z = 0.8e^{j65}$ Ohm/km – rail resistance to 50 Hz current. For higher frequency the coefficient $|K_z|$ is reduced to 1.608% for 420 Hz frequency and 1.376% for 780 Hz.

Let's assess the numerator of the fraction (3) for TC that most often fail with length of 0.25 ... 0.5 km. We assume that $R_{RC} = 770 \cdot 10^{-6}$ Ohm, $R_{CHC1} = 8000 \cdot 10^{-6}$ Ohm ($\ell_{CHC} = 3.25$ m), $R_{CHC2} = 3076 \cdot 10^{-6}$ Ohm ($\ell_{CHC} = 1.25$ m), rail link 25m, rail resistance 0.1 Ohm/km, $n_c = \frac{\ell_{TC}}{0,025} - 2$.

It turned out that $\Delta R = 0.026 \dots 0.056$ Ω , and the value K_a is in the range of 30.2% ... 38.6%. We should note here that the resistance of 300 m long line to 50 Hz current does not exceed 0.1 Ohm/km and is compared to the total impedance of contact connectors «cable – plug – nipple -wing IB» (normative 60 ... 80).

Let us consider the proposed TC calculation method for nonlinear FM modes of TC circuits, based on the mathematical model of ferromagnet reversal magnetization [2, 4].

Originality and practical value

Mathematical description of model. We assume that ferromagnetic saturation leads to changes in induction (intensity) of the magnetic field of DT.1.150 core according to the complex law

$$b = b_0 + \sum_{k=1}^m \left[b_{k \sin} \sin(k\omega t) + b_{k \cos} \cos(k\omega t) \right], \quad (5)$$

where $k = 1, 2, \dots, m$, nd measuring of quadri-pole network using the known methods of idling and short circuit is too complicated [2].

It is known that when there is cyclical change in the external magnetic field the ferromagnetic induction retards in phase from the tension and enables the cycle of dynamic hysteresis loop (HL)

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

(Fig. 2 (a)). HL area defined the power losses caused by reversal magnetization, vortical currents and magnetic viscosity [3].

The mathematical model that accurately describes the research HL is as follows:

$$h = \left(A e^{-\gamma^2 b m^2} \right) \alpha_1 \sinh(\beta_1 b) + \alpha_2 \frac{db}{dt} \cosh(\beta_2 b),$$

$$b = b_0 + b_m \sin(\omega t) \quad (b = b_m \sin(\omega t)), \quad (6)$$

($A e^{-\gamma^2 b m^2}$ – makes sense when building the specific loop exits and depends on constructive features of the subject) and allows taking into account the influence of harmonic spectrum for ferromagnet reversal input current. The values A , γ , α_1 , β_1 , α_2 , β_2 – approximation coefficients of the function (6), are determined using numerical methods by HL experimental end value and magnetization curve, taken at the maximum values of induction and signal frequency. The first term (6) describes the basic magnetization curve (BMC), the second one describes dissipative processes both for hysteresis and vortical currents, and depends on the magnetic viscosity.

Coefficients α_1 and β_1 of anhysteretic component (6) are determined by the selected points on the BMC curve, the values A and γ are determined by expressions [1]

$$\ln(A) = \gamma^2 b_m^2 \max;$$

$$\gamma^2 = \frac{\ln(h_0 / \alpha_1 \cdot \sinh(\beta_1 b_0))}{b_m^2 \max - b_0^2},$$

Herewith, we take the points b_0 , h_0 close to the maximum induction b_m , and induction $b_m \max$ corresponds to the maximum operating value. The coefficients α_2 и β_2 are calculated by the formulas:

$$\alpha_2 = \frac{h_c}{\Omega \cdot b_m}, \quad \beta_2 = \frac{1}{b_m},$$

where h_c – coercive force, A/m.

Let us consider the ferromagnetic reversal process affected by induction core created $b = b_0 + b_m \sin(\Omega t)$ by direct current field and signal current field of 25 Hz (Fig. 2 (b)). We substitute

this expression as an argument in the formula (6) and turn it omitting the exponential factor $A e^{-\gamma^2 b m^2}$, which does not affect the quantitative result of the first term. As the argument b changes according to the periodic law, then the functions $\sinh(\beta_1 b)$ and $\cosh(\beta_2 b)$ are also periodic and can be represented by Fourier series [10], in which the coefficients in the trigonometric functions are Bessel functions of different orders of imaginary argument $j x_m$. The result is:

$$h = \alpha_1 \sinh(\beta_1 b_0) \cdot \cosh(\beta_1 b_m \sin(\omega t)) +$$

$$+ \alpha_1 \cosh(\beta_1 b_0) \cdot \sinh(\beta_1 b_m \sin(\omega t)) +$$

$$+ \alpha_2 \cdot \omega b_m \cos(\omega t) \times$$

$$\times \left[\cosh(\beta_2 b_0) \cdot \cosh(\beta_2 b_m \sin(\omega t)) + \right.$$

$$\left. + \sinh(\beta_2 b_0) \cdot \sinh(\beta_2 b_m \sin(\omega t)) \right]. \quad (7)$$

We present the hyperbolic functions in (7) by rows:

$$sh(x_m \sin(\omega t)) = 2 \left[-j J_1(j x_m) \right] \cdot \sin(\omega t) -$$

$$- 2 \left[j J_3(j x_m) \right] \cdot \sin(3\omega t) - \dots,$$

$$ch(x_m \sin(\omega t)) = \left[J_0(j x_m) \right] +$$

$$+ 2 \left[J_2(j x_m) \right] \cdot \cos(2\omega t) + \dots$$

and keeping harmonics no higher than the second one, after transformations we obtain:

$$h = h_0 + m_1 \sin(\omega t) + n_2 \sin(2\omega t) +$$

$$+ m_2 \cos(\omega t) + n_1 \cos(2\omega t), \quad (8)$$

where

$$h_0 = \alpha_1 \cdot \sinh(\beta_1 b_0) \cdot \left[J_0(j \beta_1 b_m) \right];$$

$$m_1 = \alpha_1 \cdot \cosh(\beta_1 b_0) \cdot 2 \left[-J_1(j \beta_1 b_m) \right];$$

$$n_1 = \alpha_1 \cdot \sinh(\beta_1 b_0) \cdot 2 \left[J_2(j \beta_1 b_m) \right];$$

$$m_2 = \alpha_2 \omega b_m \cdot \cosh(\beta_2 b_0) \cdot J_0(j \beta_2 b_m) +$$

$$+ \alpha_2 \omega b_m \cdot \sinh(\beta_2 b_0) \cdot \left[-J_0(j \beta_2 b_m) \right];$$

$$n_2 = \alpha_2 \omega b_m \cdot \sinh(\beta_2 b_0) \cdot \left[-J_1(j \beta_2 b_m) \right];$$

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

We examine the term h_0 in the formula (8), since this is the component of the magnetic field strength that leads to the choke core saturation and, ultimately, to failure of TC receiver.

When applying the numerical estimate for field intensity dependence on induction in the formulas (6) and (8), the following parameters are used:

$$\alpha_1 = 2.1 \frac{A}{m}, \beta_1 = 4.5 \frac{1}{T}, \alpha_2 = 0.26 \frac{A}{m}, \beta_2 = 0.77 \frac{1}{T},$$

$$\gamma = 0.92 \frac{1}{T}, A = 5.92 \text{ (steel grade 2412), cross-}$$

sectional area of the DT.1.150 choke core is $29.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, average length of the magnetic power line $\ell = 0.58 \text{ m}$, number of operating winding turns $W_0 = 16$. Maximum values of induction b_m for different lengths of TC are calculated by the formula $b_m = \frac{U_{\text{Ch max}}}{4.44 f W S}$, where $U_{\text{Ch max}}$ – voltage on

the choke primary winding, taken according to the reference data and the regulatory tables of phase-

sensitive TC as 25 Hz [10]. For TC of 250 ... 500 m long $U_{\text{Ch max}} = 1.45 \dots 2.5 \text{ V}$ $b_m = 0.28 \dots 0.42 \text{ T}$; marginal field voltage h_{fv} is in the range of 240 ... 280 A/m, bias current $I_0 = h_{fv} \cdot 0.036 = 8.5 \dots 9.5 \text{ A}$, and asymmetry current 17 ... 19 A.

TC bench tests showed that the limiting current for choke magnetizing, in which the receiver transits to zero state, reaches 8.4 ... 9.25 A.

Figure 2 (b) shows the BMC curve, approximated by the expression (6), and the hysteresis loop at constant field induction (displacement) $b_0 = 1.1 \text{ T}$; it also represents reversible permeability curve, $\mu_r(h_0)$, calculated by the formula

$$\mu_r \leq \tan(\alpha) = \frac{\Delta b_0}{\Delta h_0} \cdot \frac{m_h}{m_b}, \text{ where } \Delta b_0, \Delta h_0 - \text{ incremental induction and field intensity in } i\text{-th point}$$

of the curve $b_0(h_0)$; m_b, m_h – axis scales.

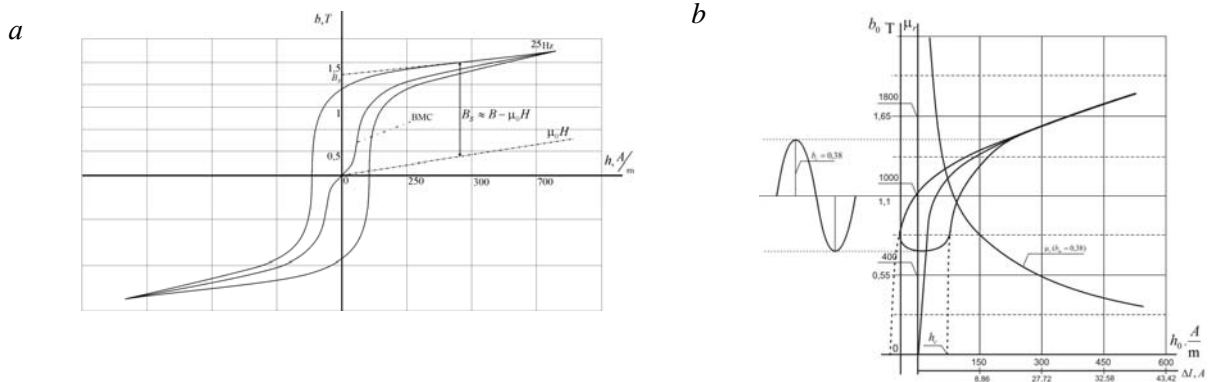


Fig. 2. Dependence of field intensity on induction at 25 Hz frequency:
a – harmonic signal; b – harmonic signal with bias

Coercive force h_c of HL is determined taking into account the fact that anhysteretic component (6) is zero, then 62.2 A/m, and maximum loop induction corresponds to $b_m = b_0 + b_c = 1.4 \text{ T}$. The given value μ_r allows easy determination of inductance L_0 and impedance Z_0 of the main winding, and BMC – magnetization current.

The impedance argument Z_0 can be determined by the value of power losses for vortical currents and hysteresis [5]:

$$P_{B.T.} = V f_c \int_0^{2\pi} H dB, \quad (9)$$

where V – core volume. Phase shift between first EMF harmonics and winding current is determined at the intensity $u = U_m \sin \Omega t$, if induction and intensity are the given functions:

$$B(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_{m_n} \sin(n\Omega t - \gamma_n),$$

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{m_n} \sin(n\Omega t + \psi_n). \quad (10)$$

From (10) and the equation of magnetized winding circuit of the choke DT.1 with the resistance r :

$$ri + W_0 S \frac{dB}{dt} = u \quad (11)$$

we obtain EMF and phase for the first harmonic:

$$E_1 = \Omega W_0 \Phi; \quad \psi_1 = \gamma_1 + \frac{\pi}{2}. \text{ Substituting intensity}$$

$H_0 = \frac{iW}{l}$ and core volume $V = S \cdot l$ into (9) we determine that

$$P_{B.T.} = \Omega W_0 S [I_1 B_1 \sin(\gamma_1 - \psi_1)]. \quad (12)$$

If induction

$$b_1 = b_0 + b_{1m} \sin(\Omega t - \gamma_1) = 1.1 + 0.38 \cdot \sqrt{2} \sin(157t - \gamma_1),$$

current $i_\Omega = 2.6$ A adopted by BMC for $b_0 = 1.1$ T, $b_{1m} = 0.521$ T, $r = 0.003$ Ohm, then from (11) we find that $E_{1m} = 2.174$ V; voltage losses for circuit resistance $7.8 \cdot 10^{-3}$ V, voltage $u = 2.7178$ B, V, and full power $S = 2.7178 \cdot 2.6 = 7.066$ VA, where we get that $P_{B.T.} = 7.0563$ W.

The impedance argument Z_0 is $\varphi = \arcsin \frac{P_{B.T.}}{S} = 86^\circ 57'$. The argument Z_0 can be found in another way. Magnetic flow (11), passing through the core sheet bands,

$$\dot{\Phi} = \frac{2\mu b h_0}{(1+j)\beta d} \tanh\left(\beta(1+j)\frac{d}{2}\right), \quad (13)$$

where $h_0 = \frac{iW}{l}$, $\beta = \sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \gamma}$, γ – steel conductivity ($7 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{Ohm} \cdot \text{mm}}$), μ_r – magnetic permeability of steel is taken 500, $d = 0.055$ m, $b = 0.18$ m – thickness and width of the package of core plates [6].

Calculation of complex impedance growth of DT.1.150 core winding due to vertical current effect is possible thanks to (13):

$$0.2 \leftarrow \Delta Z = \frac{2j \cdot \mu_r S_{II} \Omega W^2}{(1+j)\beta \cdot l \cdot d} \times \tanh\left(\beta(1+j)\frac{d}{2}\right), \quad (14)$$

where $S_{II} = a \cdot b$ – flowed cross-section area of the package; $a = 0.175$ m – steel package height.

For low frequencies (below 900 Hz)

$L_0 = \frac{\mu_0 \mu_r S W^2}{l}$, where L_0 – winding DC inductance; $S = 29.2 \cdot 10^{-4}$ m² – cross-sectional area of the magnetic core covered with windings; $l = 0.58$ m – average length of the magnetic line for flows. Then (14) can be written as

$$\Delta Z = L_0 \frac{2j \cdot \Omega}{(1+j)\beta \cdot d} \times \tanh\left((1+j)\frac{d}{2}\right)$$

and decomposed into real and imaginary parts. As a result we will get the formula for inductance evaluation

$$\Delta L = L_0 \frac{1}{x} \cdot \frac{\text{sh}(x) + \sin(x)}{\text{sh}(x) + \cos(x)} \text{ and active resistance of winding } \Delta R = \omega L_0 \frac{1}{x} \cdot \frac{\text{sh}(x) - \sin(x)}{\text{sh}(x) + \cos(x)}.$$

Complete winding inductance $L = L_0 + \Delta L$, and impedance $R = R_0 + \Delta R$, where $R_0 = \rho \frac{\ell_n}{S_n}$, ℓ_n , S_n

– wire length and cross section.

Let us consider the peculiarities of calculation of the track circuit with nonlinear ferromagnets.

Findings

Calculation of TC operation modes are conducted using the structural equivalent circuit (Fig. 3) of impedance bond, presented by the circuit of L-shaped quadripole network and ideal transformer.

Determination of quadripole network coefficients (usually in A-form) on the entire change range in the induction cores, which exceeds the saturation limit, is quite a difficult task because the classical methods of idling and short circuit are not acceptable. The proposed method of TC calculation facilitates the solution of the above problem.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

The calculations require the FM hysteresis loop (Fig. 2 (a)), taken at maximum induction, and the magnet permeability dependence $\mu_r(h_0)$ on the current (intensity) of magnetization. Then taking into account (8) we determine the intensity h_0 , impedance Z_0 of magnetization needles at a given induction and A-matrix coefficients of the

quadripole networks of DT.1.150 estimated equivalent circuit (Fig. 3):

$$A_T = n \left(1 + \frac{r_1}{z_0} \right), \quad B_T = nr_1, \\ C_T = \frac{1}{nz_0}, \quad D_T = \frac{1}{n} \quad (15)$$

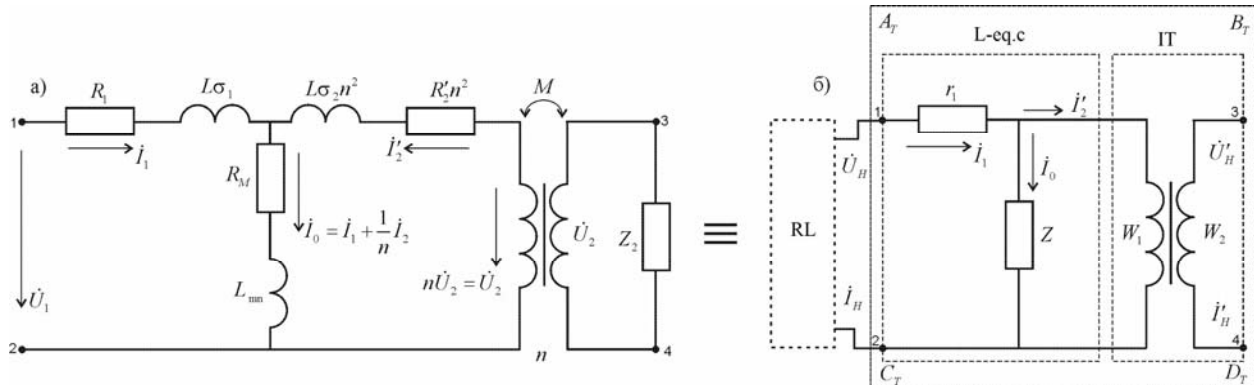


Fig. 3. Impedance bond equivalent circuit:
a – real; b – design

The design equivalent circuit of choke excludes the leak inductance of windings and the given additional winding resistance that affects the calculation accuracy to a small extent.

The calculation results for phase-sensitive twin TC at 25 Hz using the coefficients (15) with choke bias at the ends of TC showed coincidence with those obtained by conventional methods.

Table 1 shows comparative design parameters for the same TC, obtained by two calculation methods – classic and new, using a mathematical

model of ferromagnet reversal magnetization.

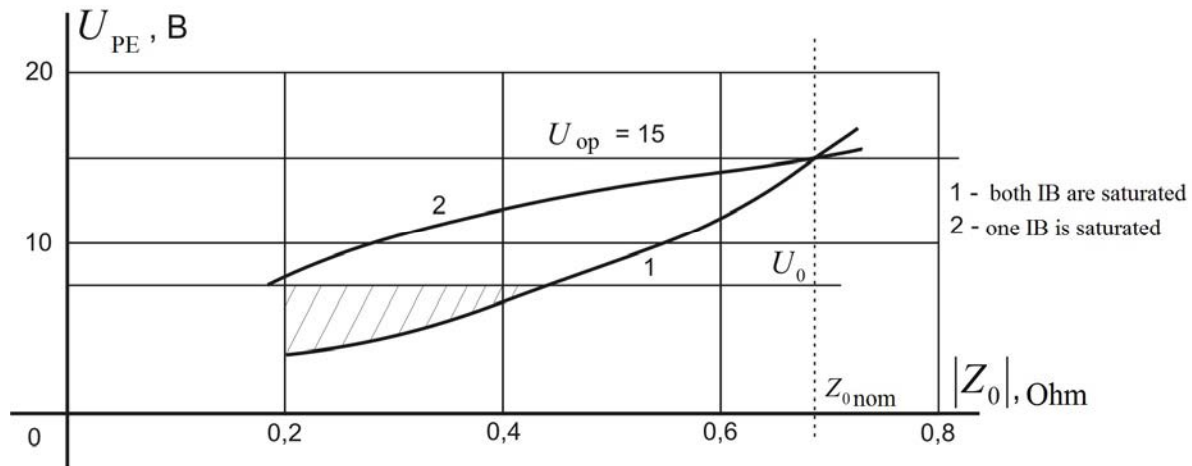
Figure 4 shows the dependence of voltage at the receiver input resistance on the impedance module Z_0 . It can be seen that the end value of resistance at saturation of both chokes reaches 0.44 Ohms, which is 1.6 times less than the nominal value. Switch of the receiver to zero state is possible at saturation of one choke up to resistance $Z_0 = 0.2$ Ohm (Fig. 4).

Table 1

TC calculations results

Calculation methods	\dot{U}_{IB}	\dot{I}_{IB}	\dot{U}_{SC}	S	β_p	Notes
	B	A	B	BA	grad	
Classic	$3.75e^{j95.5^\circ}$	$0.82e^{j60^\circ}$	$5.1e^{j78.6^\circ}$	4.58	$6^\circ 32'$	The difference in results is caused mainly by accounting resistances of steel ChC. Values are given without correction for angle β_p
New	$4.1e^{j89^\circ}$	$0.77e^{j54^\circ}$	$5.5e^{j78^\circ}$	4.23	6°	
Difference in calculations, %	9.3	9.3	7.8	7.64	-	

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Fig. 4. Dependencies of receiver voltage on impedance module Z_0

Conclusions

To solve the problem of providing TC noise immunity under the influence of powerful noise of traction current, several solutions were proposed.

The first solution is to use DT.06.500S type, used for splicing stations, at the stations of impedance bonds with air gap [2, 3].

The second solution is to use switching units [9], which excludes spreading of traction DC out of the splicing station rail network towards the range of electric traction AC that, beside IB saturation, eliminates electric corrosion of supports and metal elements at a distance of 30 km from the source of noise. The device is tested in the laboratory of DNUZT and in the field of Pyatikhatky splicing station of Prydniprov's'ka railway.

The third solution is to install symmetric resistive (R_{CHC1} or R_{CHC2}) units [2, 8] in short TC at AC electric traction. The impedance values of unit resistors are designed to exceed substantially the sum of all resistances in the rail line bridge circuit (Fig. 1). The unit resistors (Fig. 1) are switched on in series with choke cables at one end of the rail line, which is much cheaper than in the case of choke replacement.

The conclusion should emphasize the following: it is found that the cause of TC failures is ferromagnetic core saturation under conditions of rail line asymmetry, herewith the asymmetry of direct current magnetizing FM is 4 ... 5 times higher than the asymmetry of alternating current.

The new method of TC calculation using the mathematical model of ferromagnet reversal magnetization allowed obtaining the numerical evaluation of maximum allowable asymmetry currents and input impedances at the circuit ends, which cause failure of signalling system devices.

The work formulated the technical measures for improvement of noise immunity and TC protection under conditions of powerful traction current noise.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Болдов, Б. А. Аппроксимация симметричных петель гистерезиса ферромагнитных материалов / Б. А. Болдов // Тр. МЭИ. – Москва, 1975. – № 232. – С. 55–60.
2. Брылеев, А. М. Устройства и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, А. В. Шишляков, Ю. А. Кравцов. – Москва : Транспорт, 1966. – 264 с.
3. Вахнин, М. И. Устройства СЦБ при электрической тяге переменного тока / М. И. Вахнин, Н. Ф. Пенкин, М. А. Покровский // Тр. ВНИИЖТа. – Москва, 1956. – Вып. 126. – 217 с.
4. Купфмюллер, К. Основы теоретической электротехники / К. Купфмюллер. – Москва : ГЭИ, 1960. – 217 с.
5. Патент 33376 України. МПК G 01 R 31/02. Пристрій захисту рейкових кіл ділянок тяги змінного струму від впливу зворотного постійного тягового струму / Разгонов А. П., Дьяков В. О., Гілевич О. І., Журавльов А. Ю. (Україна) ; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № u

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

- 2008 00018 ; заявл. 02.01.08 ; опубл. 25.06.08. Бюл. № 12. – 5 с.
6. Патент 84968 України. МПК В 61 L 1/00. Пристрій захисту рейкових кіл ділянки тяги змінного струму від впливу зворотного постійного струму / Разгонов А. П., Журавльов А. Ю., Лебедев А. Ю. (Україна) ; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № у 2013 04391 ; заявл. 08.04.13 ; опубл. 11.11.13. Бюл. № 21. – 6 с.
 7. Разгонов, А. П. Математическая модель перематгничивания ферромагнетиков в рельсовых цепях / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавлев, С. А. Разгонов // Транспорт Урала. – 2008. – № 1. – С. 35–39.
 8. Разгонов, А. П. О влиянии электрической дуги на токосъемники электровоза при гололеде на рельсовые цепи / А. П. Разгонов // Информ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 1998. – № 6. – С. 36–39.
 9. Разгонов, А. П. О надежности работы токопроводящих стыков с тарельчатыми пружинами и с соединителями / А. П. Разгонов, М. А. Кавригин // Автоматика, телемеханика и связь. – 1994. – № 8. – С. 32–34.
 10. Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / под ред. В. С. Аркатова. – Москва : Миссия-М, 2006. – 496 с.
 11. Щека, В. І. Дослідження впливу зворотного тягового струму на режими роботи тональних рейкових кіл / В. І. Щека, І. О. Романцев, К. І. Ящук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 24–28.
 12. Ogunsola, A. Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management / A. Ogunsola, A. Mariscotti // Berlin : Springer-Verlag, 2013. – 528 p.
 13. Rhee, E. Electromagnetic Compatibility Analysis for the Railway Telecommunication Intra-subsystem / E. Rhee, C. Kim // Intern. J. of Software Engineering & Its Applications. – 2014. – Vol. 8, № 5. – P. 115–126. doi: 10.14257/ijseia.2014.8.5.10.

А. Ю. ЖУРАВЛЬОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (067) 990 76 51, ел. пошта anton.zhuravlev@gmail.com, ORCID 0000-0001-6885-5177

ПРО МЕТОД РОЗРАХУНКУ РЕЙКОВИХ КІЛ ІЗ УРАХУВАННЯМ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЕРОМАГНЕТИКІВ В УМОВАХ ВПЛИВУ ЗАВАД ТЯГОВОГО СТРУМУ

Мета. У роботі необхідно дослідити електромагнітні процеси в дросель-трансформаторі з метою підвищення завадостійкості рейкових кіл (РК) та, як наслідок, підвищення безпеки руху на залізниці. **Методика.** Для досягнення поставленої мети застосовано методи наукового аналізу, математичного моделювання, експериментального дослідження, масштабного моделювання. **Результати.** Розглянуто перешкоди, що впливають на нормальну працездатність рейкових кіл. Значною мірою частина пошкоджень у рейковому колі доводиться на відмову в його апаратурі. Апаратура рейкового кола підключена безпосередньо до рейкової лінії, схильної до впливу перешкод тягового струму, які викликають у них зміну електричних характеристик та електромагнітних властивостей. Нормальна працездатність при виконанні основних режимів роботи рейкового кола визначається попереднім розрахунком її характеристик та складанням регульованих нормативних таблиць. Проаналізовано класичний метод визначення параметрів рейкового ланцюга. Класичний метод розрахунку передбачає подання окремих ділянок електричної схеми рейкових кіл чотириполосниками з відомими коефіцієнтами, зазвичай в А-формі. Відшукування коефіцієнтів схем із лінійними елементами не представляє метрологічних та математичних труднощів. Разом із тим, у ланцюгах, що містять нелінійні феромагнетики (ФМ), отримання коефіцієнтів на всьому діапазоні зміни індукцій у сердечниках – досить важке завдання, оскільки класичні методи холостого ходу (ХХ) та короткого замикання (КЗ) стають неприйнятними. Це призводить до ускладнення методів визначення, як модуля, так і аргументів коефіцієнтів чотириполосників. Замість класичного методу запропонований метод розрахунку рейкового кола з урахуванням нелінійної характеристики феромагнетиків. **Наукова новизна.** У статті розглянуто новий підхід до розрахунку рейкового кола з урахуванням втрат у феромагнетиках без пошуку коефіцієнтів чотириполосників схеми заміщення. При побудові моделі перематгнічування ФМ у паралельних магнітних полях найбільш точними є апроксимаційні

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

методи, що враховують не тільки зміни величин і у часі, а ще й їх похідні. З розвитком обчислювальної техніки та програмного забезпечення математичні методи розрахунку РК при значній зміні індуктивності ферромагнетиків, включаючи ділянки насичення, стають реальними. При цьому важливим є пошук апроксимуючого аналітичного виразу, що описує динамічну граничну петлю гістерезису (ПГ). **Практична значимість.** Проведено аналіз зміни електричних параметрів одного й того ж РК при розрахунку класичним і новим методом: різниця склала не більше 10 %. Наведено деякі заходи з підвищення експлуатаційної завадостійкості РК.

Ключові слова: рейкове коло; дросель-трансформатор; чотириполюсник; ферромагнетик; гістерезис; спектр; вихрові струми; магнітна в'язкість; крива намагнічення; моделювання

А. Ю. ЖУРАВЛЕВ^{1*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханіка і зв'язь», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (067) 990 76 51, ел. пошта anton.zhuravlev@gmail.com, ORCID 0000-0001-6885-5177

О МЕТОДАХ РАСЧЕТА РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ ТЯГОВОГО ТОКА

Цель. В работе необходимо исследовать электромагнитные процессы в дросель-трансформаторе с целью повышения помехоустойчивости рельсовых цепей (РЦ) и, как следствие, повышения безопасности движения на железной дороге. **Методика.** Для достижения поставленной цели применены методы научного анализа, математического моделирования, экспериментального исследования, масштабного моделирования. **Результаты.** Рассмотрены помехи, влияющие на нормальную работоспособность рельсовых цепей. В значительной мере часть повреждений в рельсовой цепи приходится на отказ в его аппаратуре. Аппаратура рельсовой цепи подключена непосредственно к рельсовой линии, подверженной влиянию помех тягового тока, что вызывает в них изменение электрических характеристик и электромагнитных свойств. Нормальная работоспособность при выполнении основных режимов работы рельсовой цепи определяется предварительным расчетом ее характеристик и составлением регулировочных нормативных таблиц. Проанализирован классический метод определения параметров рельсовой цепи. Классический метод расчета предполагает представление отдельных участков электрической схемы рельсовых цепей четырехполюсниками с известными коэффициентами, обычно в А-форме. Поиск коэффициентов схем с линейными элементами не представляет метрологических и математических затруднений. Вместе с тем, в цепях, содержащих нелинейные ферромагнетики (ФМ), получение коэффициентов на всем диапазоне изменения индукций в сердечниках – довольно трудная задача, поскольку классические методы холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) становятся неприемлемыми. Это приводит к усложнению методов определения, как модуля, так и аргументов коэффициентов четырехполюсников. Вместо классического метода предложен метод расчета рельсовой цепи с учетом нелинейной характеристики ферромагнетиков. **Научная новизна.** В статье рассмотрен новый подход к расчету РЦ с учетом потерь в ферромагнетиках, без поиска коэффициентов четырехполюсников схемы замещения. При построении модели перемагничивания ФМ в параллельных магнитных полях наиболее точными являются аппроксимационные методы, учитывающие не только изменения величин и во времени, но и их производные. С развитием вычислительной техники и программного обеспечения математические методы расчета РЦ при значительном изменении индуктивности ферромагнетиков, включая участки насыщения, становятся реальными. При этом важным является поиск аппроксимирующего аналитического выражения, описывающего динамическую предельную петлю гистерезиса (ПГ). **Практическая значимость.** Проведен анализ изменения электрических параметров одной и той же РЦ при расчете классическим и новым методом: разница составила не более 10 %. Приведены некоторые мероприятия по повышению эксплуатационной помехоустойчивости РЦ.

Ключевые слова: рельсовая цепь; дросель-трансформатор; четырехполюсник; ферромагнетик; гистерезис; спектр; вихревые токи; магнитная вязкость; кривая намагничивания; моделирование

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

REFERENCES

1. Boldov B.A. Approximatsiya simmetrichnykh petel gisterezisa ferrimagnitnykh materialov [Approximation of the symmetric hysteresis loops of ferromagnetic materials]. *Trudy Moskovskogo energeticheskogo instituta* [Proc. of Moscow Power Engineering Institute]. Moscow, 1975, no. 232, pp.55-60.
2. Bryleyev A.M., Shishlyakov A.V., Kravtsov Yu.A. *Ustroystva i rabota relsovykh tsepey* [Devices and operation of rail circuits]. Moscow, Transport Publ., 1966. 264 p.
3. Vakhnin M.I., Penkin N.F., Pokrovskiy M.A. Ustroystva STsB pri elektricheskoy tyage peremennogo toka [Installation of signaling equipment in electric traction AC]. *Trudy Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Proc. of All-Russian Research Institute of Railway Transport]. Moscow, 1956, issue 126, 217 p.
4. Kupfmyuller K. *Osnovy teoreticheskoy elektrotehniki* [Fundamentals of theoretical electrical engineering]. Moscow, GEI Publ., 1960. 217 p.
5. Razghonov A.P., Diakov V.O., Hilievich O.I., Zhuravlov A.Yu. *Prystroi zakhystu reikovykh kil dilyanok tiahly zminnoho strumu vid vplyvu zvorotnoho postiinoho tiahovoho strumu* [Devices protecting the track circuit sections of AC traction from the permanent influence of return traction current]. Patent UA, no. u 2008 00018. 2008.
6. Razghonov A.P., Zhuravlov A.Yu., Lebediev A.Yu. *Prystroi zakhystu reikovykh kil dilyanky tiahly zminnoho strumu vid vplyvu zvorotnoho postiinoho strumu* [Devices protecting the track circuit section of AC traction from the influence of reverse DC]. Patent UA, no. u 2013 04391. 2013.
7. Razgonov A.P., Zhuravlev A.Yu., Razgonov S.A. Matematicheskaya model peremagnichivaniya ferromagnetikov v relsovykh tsepyakh [A mathematical model of the remagnetization of ferromagnetics in the track circuits]. *Transport Urala – Transport of Urals*, 2008, no. 1, pp. 35-39.
8. Razgonov A.P. O vliyani elektricheskoy dugi na tokosemniky elektrovoza pri gololede na relsovykh tsepi [About the influence of the electric arc on the current collectors of an electric locomotive at the ice on the track circuit]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information Management Systems in Railway Transport*, 1998, no. 6, pp. 36-39.
9. Razgonov A.P., Kavrigin M.A. O nadezhnosti raboty tokoprovodyashchikh stykov s tarelchatymi pruzhinami i s soyedinitelyami [About the reliability of conductive joints with disc springs and connectors]. *Avtomatika, telemekhanika i svyaz – Automation, Telemechanics and Communications*, 1994, no. 8, pp. 32-34.
10. Arkatov V.S. *Relsovykh tsepi magistralnykh zheleznnykh dorog* [Track circuit of main railways]. Moscow, Misisiya-M Publ., 2006. 496 p.
11. Shcheka V.I., Romantsev I.O., Yashchuk K.I. Doslidzhennia vplyvu zvorotnoho tiahovoho strumu na rezhymy roboty tonalnykh reikovykh kil [The investigation of reverse traction current influence on tone track circuit modes]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 24-28.
12. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management*. Berlin, Springer-Verlag Publ., 2013. 528 p.
13. Rhee E., Kim C. Electromagnetic Compatibility Analysis for the Railway Telecommunication Intra-subsystem. *Intern. Journal of Software Engineering & Its Applications*, 2014, vol. 8, no. 5, pp. 115-126. doi: 10.14257/ijseia.2014.8.5.10.

Prof. V. I. Havryliuk, Dr. Sc. (Phys.-Math.) (Ukraine); Prof. M. M. Babaiev, Dr. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Received: Dec. 05, 2015

Accepted: Feb. 04, 2016

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 502.361.504.3.054:656.2

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, Л. Я. МУНТЯН^{2*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1659-7740

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РИСКА ПРИ АВАРИЯХ НА ТРАНСПОРТЕ

Цель. Данное исследование направлено на разработку метода оценки потенциального территориального риска при авариях на железнодорожном транспорте, учитывающего специфику эмиссии химически опасных веществ при чрезвычайных ситуациях во время их транспортировки. **Методика.** Основу предложенного метода составляет численное моделирование процесса переноса химически опасного вещества в атмосфере. Основой численной модели является уравнение массопереноса химически опасных веществ. Данное уравнение учитывает рассеивание в атмосфере опасного вещества за счет ветра и атмосферной диффузии. Для численного интегрирования уравнения переноса химически опасного вещества в атмосфере применяется неявная разностная схема расщепления. На основе построенной численной модели разработан метод оценки потенциального территориального риска и создан код на алгоритмическом языке Фортран. Разработанный метод пространственно-временной оценки территориального риска учитывает: вероятные метеоситуации; режим эмиссии химически опасного вещества; мощность эмиссии; движение источника эмиссии. Проведен вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения атмосферы над поселком Синельниково при аварийной утечке аммиака. **Результаты.** Предложенный метод позволяет оперативно рассчитать возможный потенциальный риск утечки химически опасных веществ на основе расчета уровня загрязнения атмосферы при различных метеоситуациях. Метод позволяет определить размеры зоны токсичного поражения людей и оценить уровень опасности аварий на железнодорожном транспорте. С помощью разработанной численной модели выполнена оценка риска поражения людей в селитебной зоне поселка Синельниково. **Научная новизна.** Учеными создан метод оценки потенциального территориального риска, основанный на численном моделировании процесса загрязнения атмосферы. Выполнен расчет потенциального риска для селитебной зоны поселка Синельниково. **Практическая значимость.** Разработанный метод оценки потенциального риска может быть использован не только для решения задач данного класса для объектов железнодорожного транспорта, но и для других химически опасных объектов. С помощью разработанного метода выполнена оценка потенциального риска для поселка Синельниково в случае аварийной эмиссии аммиака.

Ключевые слова: аварийное загрязнение атмосферы; выброс химически опасных веществ; численное моделирование; оценка риска

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Введение

Оценка уровня загрязнения окружающей среды в случае аварий при транспортировке химически опасных грузов является специфической и особо важной задачей, возникающей в области научных исследований, связанных с эксплуатацией железнодорожного транспорта [1, 2]. В рамках этой проблемы следует выделить одну, крайне важную задачу – оценку территориального риска при аварийных ситуациях на железнодорожном транспорте [9, 14, 17]. Используемые в настоящее время на практике методики решения таких задач не отвечают современным требованиям и не дают возможности получить научно обоснованные данные относительно уровня загрязнения окружающей среды и оценки риска при чрезвычайных ситуациях (рис. 1) [5, 6, 9–12].



Рис.1. Эмиссия загрязняющих веществ при аварии на железной дороге

Fig. 1. Emission of pollutants in the accident on the railroad

Важность решения задач данного класса, особенно сейчас, привлекает к себе внимание в связи с повышенной угрозой террористических атак и диверсий на железной дороге, когда эмиссия опасных веществ может быть значительно больше, чем при авариях. Таким образом, создание методов оценки уровня загрязнения окружающей среды и риска, при чрезвычайных ситуациях на железной дороге, является актуальной научной задачей.

Цель

Целью данной работы является разработка метода для оперативной оценки потенциально-го территориального риска при аварийной эми-

ссии химически опасных веществ на объектах железнодорожного транспорта.

Анализ публикаций. В Украине в настоящее время для оценки риска при чрезвычайных ситуациях используется нормативная методика [9], которая носит декларативный характер и не содержит конкретных расчетных зависимостей, позволяющих прогнозировать величину риска для конкретных аварийных ситуаций. Как известно, величина риска зависит от величины поражающих факторов, которые возникают при той или иной чрезвычайной ситуации. При аварийной эмиссии химически опасных веществ возникает поражающий фактор – концентрация. В случае ситуаций, связанных эмиссией химически опасных веществ, для оценки последствий аварий на химически опасных объектах и транспорте используется нормативная методика [10], которая основана на ряде эмпирических зависимостей. Данная методика не учитывает скорость ветра, атмосферную диффузию, режим эмиссии химически опасного вещества на процесс формирования зоны загрязнения, а значит, на величину риска. Эта методика не позволяет оценить величину концентрации, то есть оценить риск. Кроме этой методики, применяются также аналитические модели, в частности модель Гаусса для оценки аварийного загрязнения атмосферы и оценки риска поражения людей [6, 14]. Как известно, модели данной группы позволяют быстро рассчитать зону загрязнения, но только для модельных ситуаций типа точечный постоянно действующий источник или точечный мгновенный выброс. В ряде случаев используются CFD модели [2, 3, 15, 16], но они «сложны» для рядового пользователя. В настоящее время очевиден дефицит моделей и методов прогноза территориального риска, позволяющих оперативно получать необходимые прогнозные данные.

Постановка задачи. Рассматривается рассеивание в атмосфере токсичного вещества, попавшего в нее при чрезвычайной ситуации. Известна интенсивность выброса загрязняющего вещества и продолжительность эмиссии опасного вещества по времени, а также возможные метеоситуации. Необходимо оценить риск токсичного поражения людей на открытом пространстве возле места аварии.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Методика

Платформой решения задачи по оценке потенциального территориального риска в случае аварий при транспортировке химически опасных грузов является осредненное по высоте переноса H уравнение массопереноса примеси Г. И. Марчука [4, 7]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + Q(t) \cdot \delta(x - x_0(t)) \cdot \delta(y - y_0(t)), \quad (1)$$

где C – концентрация опасного вещества; u, v – компоненты вектора скорости ветрового потока; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии; t – время; Q – интенсивность эмиссии опасного вещества; $x_0(t), y_0(t)$ – координаты источника эмиссии, зависящие от времени; $\delta(x - x_0(t)), \delta(y - y_0(t))$ – дельта функция Дирака.

Задавая зависимость от времени координат источника эмиссии $x_0(t), y_0(t)$, мы можем моделировать движение источника эмиссии (разгерметизированная цистерна). Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [2, 7, 13].

В данном разделе рассмотрена новая методология оценки территориального риска в случае аварийной эмиссии опасного вещества на железной дороге. Полагается, что вероятность инициирующего события (аварийный выброс) $P=1$.

Алгоритм определения величины территориального риска разбивается на ряд этапов. На *первом* этапе решения задачи формируется блок данных относительно инициирующего события (место эмиссии, интенсивность эмиссии, режим эмиссии). На *втором* этапе формируется блок данных относительно вероятных метеоситуаций PW_i , характерных для рассматриваемого региона. На *третьем* этапе рассчитывается уровень загрязнения в регионе для вероятных метеоситуаций (численное решение уравнения (1)). На *четвертом* этапе определяются подзоны, где концентрация превышает пороговое значение (ПДК, смертельную концентрацию и т.п.) при той или иной метеоси-

туации. На заключительном, *пятом* этапе, осуществляется построение поля риска для рассматриваемого региона.

При построении поля территориального риска следует учесть, что каждому погодному состоянию $P(W_i)$ отвечает конкретная зона загрязнения, характеризующаяся размерами и концентрацией опасного вещества. Вероятность реализации конкретного погодного состояния определяется по зависимости

$$P(W_i) = N_{\Pi} / T, \quad (2)$$

где N_{Π} – число дней (часов), соответствующих определенной метеоситуации; T – период наблюдений (прогноз метеоситуации).

В данном случае под определенной метеоситуацией будем понимать конкретное значение скорости и направления ветра. Данная информация может быть получена исходя из имеющейся базы наблюдений за погодными условиями в конкретном регионе или на основе прогнозов метеостанций.

Для оценки потенциального территориального риска необходимо оценить вероятность для каждой точки рассматриваемого региона, прилегающего к железной дороге, оказаться под действием шлейфа (облака) опасного вещества.

Исходя из данных рассуждений, можем утверждать, что вероятность попадания какого-либо рецептора под действие шлейфа опасного вещества определится, таким образом, по зависимости:

$$P(W)_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n P(W_i), \quad (3),$$

где $P(W)_{\Sigma}$ – суммарная вероятность всех погодных состояний, отвечающих данному направлению ветра, при котором рецептор попал в зону влияния источника эмиссии.

Таким образом, для расчета вероятности оказаться в зоне поражения (то есть для оценки величины территориального риска) необходимо выполнить расчеты для конкретного рецептора по формуле (3). Необходимо подчеркнуть, что для решения поставленной задачи надо знать концентрацию опасного вещества в точке расположения конкретного рецептора и на сколько эта величина превосходит некоторый поро-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

вый уровень (например, ПДК или какую – либо другую величину). Следовательно, мы приходим к первоочередной задаче – определение поля концентрации опасного вещества для конкретного региона (территории) и конкретной метеоситуации.

Отметим, что для прогноза потенциального территориального риска необходимо знать:

1. мощность эмиссии опасного вещества, режим эмиссии, скорость и направление движения разгерметизированной цистерны;
2. место начала эмиссии;
3. метеоситуацию;
4. концентрационное поле опасного вещества, которое формируется для конкретной метеоситуации.

На базе предложенной модели разработан код **«RISK – QUICK»**, который осуществляет расчет возможного потенциального риска на базе предложенного подхода. Программная реализация кода осуществлена на языке FORTRAN. Разработанный код состоит из нескольких подпрограмм типа SUBROUTINE, каждая из которых осуществляет решение определенной задачи: расчет динамики формирования зоны загрязнения, расчет концентрации химически опасного вещества в заданной точке и т.п. Для решения различных задач по оценке территориального риска нет необходимости вносить какие-либо изменения в разработанный код, изменения вносятся только в файл исходных данных.

Результаты

Для иллюстрации возможностей разработанного метода оценки территориального риска ниже представлено решение конкретной прикладной задачи. Рассматривается регион возле станции «Синельниково» (рис. 2). Размеры региона 10×10 км. Полагается, что в случае чрезвычайной ситуации может произойти утечка аммиака – краткосрочный выброс химически опасного вещества (аммиак), в течении 1 мин. Место эмиссии условно изображено на рис. 4. в виде «кружка». Масса выброшенного вещества 1т. Полагается, что состав сначала движется со скоростью 4 км/час в течение 4 мин, а затем останавливается.



Рис. 2. Расчетная область (ст. «Синельниково»): «кружок» – место аварийной эмиссии

Fig. 2. Estimated area (St. «Sinelnikovo») «circle» – a place of emergency issue

При оценке потенциального территориального риска принималось, что при концентрации равной или большей величины 0,2 мг/м³ рецептор попадает в зону риска.

Предположим, что на станции в период с ночи 24.00 (12 декабря) по 18.00 (13 декабря) по данным метеопрогноза, в течение 42 часов возможны такие метеоситуации: северо–восточный ветер со скоростью:

1. в период с 24.00 по 6.00, (ночь–утро) ожидается скорость ветра 1 м/с;
2. в период с 6.00 по 12.00, (утро–день) скорость ветра 2 м/с;
3. в период с 12.00 (12 декабря) по 18.00 (день 13 декабря) скорость ветра 3 м/с.

Таким образом, на протяжении 42 часов вероятность реализации каждой метеоситуации составляет:

$$P(W_1) = \frac{6}{42} \times 100 = 14.3 \% ;$$

$$P(W_1) = \frac{6}{42} \times 100 = 14.3 \% ;$$

$$P(W_2) = \frac{30}{42} \times 100 = 71.4 \% .$$

Требуется оценить потенциальный территориальный риск для рассматриваемой ситуации

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

аварийной утечки опасного вещества на железнодорожной станции «Синельниково».

На последующих рисунках показаны карты возможного потенциального риска для рассматриваемой ситуации. Необходимо отметить, что представлены данные о величине территориального риска для различных моментов времени, так как исходная задача – нестационарная по своей постановке: эмиссия идет только 1 мин, а далее в атмосфере мигрирует сформировавшаяся зона загрязнения.

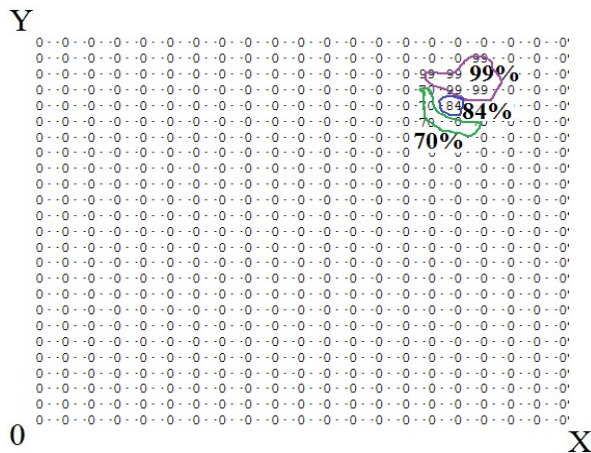


Рис. 3. Матрица территориального риска ($t = 1$ мин)

Fig. 3. Matrix of territorial risk ($t = 1$ min)

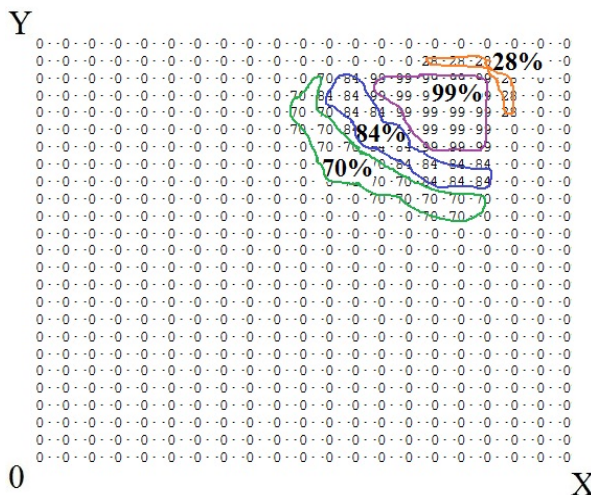


Рис. 4. Матрица территориального риска ($t = 8$ мин)

Fig. 4. Matrix of territorial risk ($t = 8$ min)

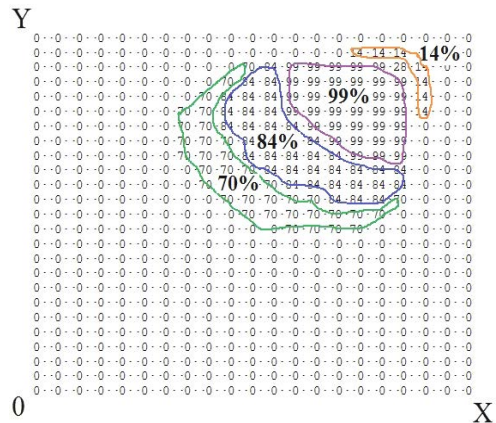


Рис. 5. Матрица территориального риска ($t = 15$ мин)

Fig. 5. Matrix of territorial risk ($t = 15$ min)

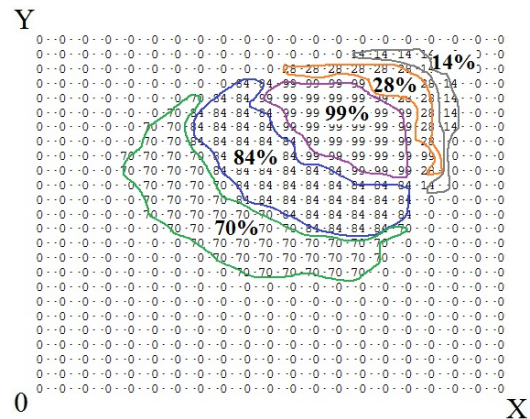


Рис. 6. Матрица территориального риска (время $t = 22$ мин)

Fig. 6. Matrix of territorial risk ($t = 22$ min)

Как видно из рис. 3–6, зона возможного территориального риска постоянно изменяется с течением времени – она увеличивается в размерах. Так для момента времени $t = 1$ мин площадь потенциального территориального риска составляет порядка 5 % рассматриваемого региона, то к моменту времени $t = 22$ мин, площадь потенциального территориального риска практически равна половине площади рассматриваемого региона и полностью покрывает поселок «Синельниково». Это указывает на огромную опасность аварий на объектах железнодорожного транспорта. Кроме этого видно, что величина потенциального риска изменяется для различных точек региона со временем. Так для точек региона, где первоначально величина

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

риска составляла порядка 70 % (момент времени 8 мин после аварии), то для момента времени $t = 22$ мин в этих точках значение потенциального риска уже составляет порядка 84 %, т.е. риск вырос. Это значит, что в случае аварий такого типа размещение жилой застройки на определенном расстоянии, даже достаточно большом от железнодорожной магистрали, еще не гарантирует безопасность для людей.

Анализируя матрицы территориального риска, представленные на приведенных выше рисунках, можно сделать вывод о том, что разработанный метод позволяет оценивать территориальный риск для ситуации, которая характерна при аварийных эмиссиях на объектах железнодорожного транспорта – полунепрерывный выброс химически опасных веществ. Необходимо подчеркнуть, что в Украине нет аналогичного метода решения задач такого класса.

В заключение отметим, для решения задачи потребовалось около 10 с компьютерного времени.

Научная новизна и практическая значимость

Создана численная модель, позволяющая оперативно оценить величину потенциального территориального риска в случае аварийной эмиссии химически опасных веществ на объектах железнодорожного транспорта.

Особенностью построенной модели является использование стандартной исходной информации, быстрота в получении расчетных данных и удобство для анализа получаемых результатов.

Выводы

В работе представлена новая численная модель для расчета возможного потенциального риска при авариях на объектах железнодорожного транспорта. Научной платформой решения задачи является численное интегрирование 2-D модели переноса примеси в атмосфере для различных метеоситуаций. Дальнейшее развитие данной тематики следует проводить в направлении создания 3-D модели аварийного загрязнения атмосферы при чрезвычайных ситуациях при транспортировке опасных грузов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авария и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий : учебн. пособие в 5-ти книгах / Под ред. В. А. Котляревского, А. В. Забегаява. – Москва : АСВ, 2001. – Кн. 5. – 416 с.
2. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2013. – 159 с.
3. Беляев, Н. Н. Прогнозирование загрязнения приземного слоя атмосферы при горении твердого ракетного топлива в хранилище / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // Зб. наук. пр. НГУ. – Дніпропетровськ, 2013. – № 42. – С. 160–167.
4. Берлов, А. В. Расчет загрязнения приземного слоя атмосферы при горении твердого ракетного топлива / А. В. Берлов // Наук. вісн. буд-ва : зб. наук. пр. / Харк. нац. ун-т буд-ва та архіт. – Харків, 2014. – № 1 (75). – С. 185–189.
5. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
6. Гусев, Н. Г. Радиоактивные выбросы в биосфере / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 257 с.
7. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
8. Машихина, П. Б. Моделирование распространения примеси в атмосфере с учетом рельефа местности / П. Б. Машихина // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 27. – С. 138–142.
9. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки : затв. наказом № 637 від 04.12.2002. – Київ, 2002. – 25 с.
10. Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті : затв. наказом № 73/82/64/122 від 27.03.2001. – Київ, 2001. – 33 с.
11. Рудаков, Д. В. Модель рассеивания примеси в приземном слое атмосферы над поверхностью со сложным рельефом / Д. В. Рудаков // Вісник ДНУ. Серія : Механіка. – Дніпропетровськ, 2004. – № 6. – Вип. 8, т. 1. – С. 89–97.
12. Светличная, С. Д. Оценка полученной токсодозы при распространении первичного облака токсического вещества / С. Д. Светличная // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

- пр. / Нац. ун-т цив. захисту України. – Харків, 2011. – Вип. 13. – С. 127–132.
13. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Київ : Наук. думка, 1997. – 368 с.
 14. Швыряев, А. А. Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе / А. А. Швыряев, В. В. Меньшиков. – Москва : Изд-во МГУ, 2004. – 124 с.
 15. Biliaiev, N. N. Expert system to predict the atmosphere pollution in the case of the accident at the solid rocket propellant storage / N. N. Biliaiev, A. V. Berlov // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепров. гос. акад. стр-ва и архит. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 76. – С. 57–61.
 16. Biliaiev, M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. Biliaiev // Air Pollution Modeling and its Application XXI. – Netherlands : Springer, 2012. – P. 87–91.
 17. Maximum Possible Risk Modelling / M. Schutz, M. Cohen, T. Whalen, T. Taylor // Proc. of the 11th Joint Conf. on Information Sciences. – Netherlands : Atlantis Press, 2008. – P. 1–6. doi: org/10.2991/jcis.2008.15.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, Л. Я. МУНТЯН^{2*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1659-7740

ЕКСПРЕС-МЕТОД ОЦІНКИ ПОТЕНЦІЙНОГО ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РИЗИКУ ПРИ АВАРІЯХ НА ТРАНСПОРТІ

Мета. Дане дослідження спрямоване на розробку методу оцінки потенційного територіального ризику при аваріях на залізничному транспорті, що враховував би специфіку емісії хімічно небезпечних речовин при надзвичайних ситуаціях під час їх транспортування. **Методика.** Основу запропонованого методу становить чисельне моделювання процесу переносу хімічно небезпечної речовини в атмосфері. Основою чисельної моделі є рівняння масопереносу хімічно небезпечних речовин. Дане рівняння враховує розсіювання в атмосфері небезпечної речовини за рахунок вітру та атмосферної дифузії. Для чисельного інтегрування рівняння переносу хімічно небезпечної речовини в атмосфері застосовується неявна різницева схема розщеплення. На основі побудованої чисельної моделі розроблено метод оцінки потенційного територіального ризику та створений код алгоритмічною мовою Фортран. Розроблений метод просторово-часової оцінки територіального ризику враховує: ймовірні метеорологічні ситуації; режим емісії хімічно небезпечної речовини; потужність емісії; рух джерела емісії. Проведено обчислювальний експеримент по оцінці рівня забруднення атмосфери над селищем Синельникове при аварійному витокі аміаку. **Результати.** Запропонований метод дозволяє оперативно розрахувати можливий потенційний ризик витоків хімічно небезпечних речовин на основі розрахунку рівня забруднення атмосфери при різних метеоситуаціях. Метод дозволяє визначити розміри зони токсичного ураження людей та оцінити рівень небезпеки аварій на залізничному транспорті. За допомогою розробленої чисельної моделі виконана оцінка ризику ураження людей у селітебній зоні селища Синельникове. **Наукова новизна.** Вченими створено метод оцінки потенційного територіального ризику, заснований на чисельному моделюванні процесу забруднення атмосфери. Виконано розрахунок потенційного ризику для селітебної зони селища Синельникове. **Практична значимість.** Розроблений метод оцінки потенційного ризику може бути використаний не тільки для розв'язання задач даного класу для об'єктів залізничного транспорту, але й для інших хімічно небезпечних об'єктів. За допомогою розробленого методу виконана оцінка потенційного ризику для селища Синельникове у разі аварійної емісії аміаку.

Ключові слова: аварійне забруднення атмосфери; викиди хімічно небезпечних речовин; чисельне моделювання; оцінка ризику

M. M. BILIAIEV^{1*}, L. Y. MUNTKAN^{2*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1659-7740

EXPRESS METHOD OF ESTIMATION OF THE POTENTIAL TERRITORIAL RISK IN CASE OF ACCIDENTS ON TRANSPORT

Purpose. The present research is aimed to the development of a method to assess the potential territorial risk in accidents on the railways, which takes into account the specificity of the chemically hazardous substances emission in emergency situations during their transportation. **Methodology.** The basis of the proposed method is numerical modeling of the transfer process of chemically dangerous substances in the atmosphere. The basis of the numerical model is the equation of convective-diffusion transfer of chemically hazardous substances. This equation takes into account the dispersion in atmosphere of dangerous substances due to wind and atmospheric diffusion. For the numerical integration of the equations of transfer of chemically hazardous substances in the atmosphere is applied an implicit finite-difference scheme of splitting. Based on the constructed numerical model was developed method for the assessment of potential territorial risk and generated code in algorithmic language Fortran. The developed method of spatio-temporal risk assessment takes into account: the territorial probable weather situations; emission mode of chemically hazardous substances; emission power; the movement of the source of emission. A computational experiment to assess the level of air pollution above the village Sinelnikovo during the emergency leak of ammonia was conducted. **Findings.** The proposed method allows calculating quickly the potential risk of the leakage of chemically hazardous substances on the basis of the calculation of the level of pollution in different meteorological situation. The method allows determining the size of the zone of toxic casualties and assessing the level of risk of accidents in railway transport. Using the developed numerical model evaluated the assessment of risk of casualties in the residential area of the village Sinelnikovo. **Originality.** The scientists established the method for the assessment of potential territorial risk, based on the numerical modeling of air pollution. The calculation of potential risk to residential areas of the village Sinelnikovo was executed. **Practical value.** The developed method of assessing risk potential can be used not only for solving problems of this class to objects of railway transport but also for other chemically dangerous objects. By using the developed method was evaluated potential risk to the village Sinelnikovo in the event of accidental emission of ammonia.

Keywords: accidental pollution of the atmosphere; the emission of chemically hazardous substances; numerical simulation; risk assessment

REFERENCES

1. Kotlyarevskiy V.A., Zabegayev A.V. *Avariya i katastrofy. Preduprezhdeniye i likvidatsiya posledstviy. Uchebnoye posobiye v 5-ti knigakh* [Accident and disasters. Warning and liquidation of consequences. Manual in 5 books]. Moscow, ACB Publ., 2001, book 5. 416 p
2. Belyayev N.N., Gunko Ye.Yu., Mashikhina P.B. *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh ekologicheskoy bezopasnosti i monitoringa chrezvychaynykh situatsiy* [Mathematical modeling in problems of environmental safety and monitoring emergencies]. Dnepropetrovsk, Aktsent PP Publ., 2013, 159 p.
3. Belyayev N.N., Berlov A.V. *Prognozirovaniye zagryazneniya prizemnogo sloya atmosfery pri gorenii tverdogo raketnogo topliva v khranilishche* [Prediction of pollution in the atmospheric surface layer during combustion of solid rocket fuel in storage]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho Hirnychoho universytetu* [Proc of National Mining University]. Dnipropetrovsk, Natsionalnyi Hirnychiy Universytet Publ., 2013, no. 42, pp. 160-167.
4. Berlov A.V. *Raschet zagryazneniya prizemnogo sloya atmosfery pri gorenii tverdogo raketnogo topliva* [Calculation of the pollution of the ground atmospheric layer during combustion of solid rocket fuel]. *Naukovyi visnyk budivnytstva: zbirnyk naukovykh prats* [Scientific Bulletin of Construction: Proc.], 2014, no. 1 (75), pp.185-189.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

5. Berlyand M.Ye. *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery* [Prediction and regulation of air pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 273 p.
6. Gusev N.G., Belyayev V.A. *Radioaktivnyye vybrosy v biosfere* [Radioactive emissions in the biosphere]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 257 p.
7. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.
8. Mashikhina P.B. Modelirovaniye rasprostraneniya primesi v atmosfere s uchetom relefa mestnosti [The distribution modeling of impurities in the atmosphere taking into account of terrain]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 27, pp. 138-142.
9. *Metodyka vyznachennia ryzykiv ta yikh pryiniatnykh rivniv dlia deklaruvannia bezpeky ob'ektiv pid-vyshchenoi nebezpeky* [Risks definition technique and their acceptable levels for the declaration of security high-risk facilities]. Kyiv, 2002. 25 p.
10. *Metodyka prohnozuvannia naslidkiv vylyvu (vykydu) nebezpechnykh khimichnykh rehovyn pry avariiakh na promyslovykh ob'ektakh i transporti* [Methods of prediction the consequences of the spout (emission) of hazardous chemicals in accidents at industrial objects and transport]. Kyiv, 2001. 33 p.
11. Rudakov D.V. Model rasseivaniya primesi v prizemnom sloye atmosfery nad poverkhnostyu so slozhnym relefom [Model of impurity dispersion in the atmospheric surface layer over a surface with complex relief]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Mekhanika. Vypusk 8* [Bulletin of Oles Honchar Dnipropetrovsk National University. Series: Mechanics. Volume 8], 2004, no. 6, vol. 1, pp. 89-97.
12. Svetlichnaya S.D. Otsenka poluchennoy toksodozy pri rasprostraneniі pervichnogo oblaka toksicheskogo veshchestva [Evaluation of the toxic dose received at the distribution of the primary cloud of toxic substances]. *Problemy nadzvychaynykh situatsii: zbirnyk naukovykh prats* [Problems of emergency situations: Proc.], 2011, issue 13, pp. 127-132.
13. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Belyayev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modelling of pollution spreading in the environment]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1997. 368 p.
14. Shvyryayev A.A., Menshikov V.V. *Otsenka riska vozdeystviya zagryazneniya atmosfery v issleduyemom regione* [Risk assessment of pollution in the research area]. Moscow, Izdatelstvo MGU Publ., 2004. 124 p.
15. Biliaiev N.N., Berlov A.V. Expert system to predict the atmosphere pollution in the case of the accident at the solid rocket propellant storage. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye: sbornik nauchnykh trudov* [Construction, Material science, Mechanical Engineering: Proc.]. Dnepropetrovsk, 2014, issue 76, pp. 57-61.
16. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI*. Netherlands, Springer Publ., 2012. pp. 87-91.
17. Schutz M., Cohen M., Whalen T., Taylor T. Maximum Possible Risk Modelling. Proc. of the 11th Joint Conf. on Information Sciences. Netherlands, Atlantis Press Publ., 2008, pp. 1-6. doi: org/10.2991/jcis.2008.15.

Статья рекомендована к публикации д.физ.-мат.н., проф. С. А. Пичуговым (Украина); д.т.н., проф. С. З. Полищуком (Украина)

Поступила в редколлегию: 11.12.2015

Принята к печати: 08.02.2016

УДК 331.453:613.155:697.953:[519.6:004.94]

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, С. Г. ЦЫГАНКОВА^{2*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Каф. «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 47 02 79, эл. почта s-tsygankova@mail.ru, ORCID 0000-0002-9837-3109

CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В РАБОЧИХ ЗОНАХ В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА

Цель. Работа предполагает создание CFD модели расчета аэроионного режима в помещениях и в рабочих зонах при искусственной ионизации воздуха путем установки ионизатора внутри помещения с учетом наиболее существенных физических факторов, оказывающих влияние на формирование концентрационного поля аэроионов. **Методика.** Предложенная CFD модель расчета аэроионного режима в рабочих зонах при искусственной ионизации воздуха путем установки ионизатора внутри помещения основана на применении уравнений аэродинамики, электростатики и массопереноса. Уравнение массопереноса учитывает взаимодействие ионов различной полярности друг с другом и с частицами пыли. Расчет скорости движения воздушных потоков в помещении осуществлялся на основе модели потенциального течения, для чего было использовано уравнение Лапласа для функции тока. Для расчета дрейфа заряженных частиц под действием электрического поля использовалось уравнение Пуассона для электрического потенциала. При моделировании учитывались: 1) влияние геометрических характеристик рабочей зоны; 2) местоположение отверстий приточно-вытяжной вентиляции; 3) расстановка мебели и оборудования; 4) режим воздухообмена в помещении; 5) наличие препятствий в процессе рассеивания аэроионов; 6) конкретное место эмиссии частиц пыли и ионов различной полярности и их взаимодействие в помещении и в рабочих зонах. **Результаты.** Разработанная CFD модель позволяет определить концентрацию отрицательных ионов в помещении и в зоне расположения органов дыхания человека. Распределение концентрации отрицательных аэроионов представлено в виде изолиний концентрационного поля. **Научная новизна.** Авторами создана 2D CFD модель для расчета аэроионного режима в рабочих зонах, предоставляющая возможность определять концентрационное поле аэроионов в заданном месте в помещении. Предложенная модель разработана с учетом: размещения мебели и оборудования в помещении; геометрических характеристик помещения; местоположения источников эмиссии пыли и ионов различной полярности; физических процессов, влияющих на формирование концентрационного поля аэроионов. **Практическая значимость.** Полученная 2D CFD модель для расчета аэроионного режима в рабочих зонах позволит рассчитывать концентрацию аэроионов в месте расположения дыхательных органов человека с учетом основных физических факторов, определяющих формирование концентрационных полей аэроионов. Это даст возможность рационально расположить ионизаторы в рабочих помещениях для создания комфортных условий работы персонала.

Ключевые слова: CFD модель; аэроионный режим; концентрационное поле аэроионов; искусственная ионизация

Введение

Для создания комфортных условий работы персонала как в производственных, так и в офисных помещениях, необходимо обеспечить в них определенные микроклиматические параметры, одним из которых является аэроионный состав воздушной среды [4–7, 13, 16].

Наиболее часто применяемым для создания и поддержания требуемого аэроионного режима способом на данный момент является искусственная ионизация воздуха в помещениях. В данной работе рассматривается искусственная ионизация помещения путем установки внутри него ионизатора воздуха. Однако, воз-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

никает необходимость заранее определять уровень отрицательных ионов в помещении. При этом применяемые методы расчета полей концентраций ионов должны учитывать все факторы, которые оказывают существенное влияние на рассеивание ионов в помещении, – наличие различных препятствий, мебели, оборудования и т.д.

В настоящий момент в Украине для расчета аэроионного режима в помещениях применяются в основном аналитические модели [4–12], позволяющие рассчитывать концентрацию аэроионов. Однако, существующие модели разработаны без учета влияния на аэроионный режим таких физических факторов, как источники выброса пыли в помещениях, наличие установленного оборудования и мебели и т.д. Для составления более точного прогноза уровня ионизации в помещении необходимо применение CFD моделей [2, 3, 13, 16]. Эти модели позволяют учесть аэродинамику воздушных потоков в помещении, что по мнению профессора Murakami S. [15], является главным фактором при исследовании процессов рассеивания примесей в помещениях.

Цель

Целью данной работы является создание CFD модели для расчета аэроионного режима в рабочих зонах помещений различного назначения, учитывающей при моделировании размещение мебели и оборудования в помещении, местоположение источников эмиссии пыли, а также физические процессы, влияющие на формирование концентрационного поля аэроионов.

Методика

Как известно, на формирование концентрационного поля аэроионов в помещении оказывает влияние комплекс физических факторов: поток воздуха, вызванный работой вентиляции, диффузия, воздействие электрического поля. Кроме этого происходит взаимодействие ионов различной полярности и взаимодействие их с частицами пыли. Для учета этих процессов, при моделировании рассеивания аэроионов, будем использовать уравнение переноса в виде [16]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(u + bE)C}{\partial x} + \frac{\partial(v + bE)C}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \alpha CB - \\ - \beta CD + \sum Q_c(t) \delta(x - x_c) \delta(y - y_c), \quad (1) \end{aligned}$$

где C , B , D – концентрация отрицательных, положительных аэроионов и частиц пыли соответственно; u , v , – компоненты вектора скорости движения воздушного потока в помещении; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты диффузии; t – время; α – скорость рекомбинации ионов, имеющих различную полярность; β – скорость рекомбинации ионов с частицами пыли; Q_{ci} , – интенсивность эмиссии отрицательных ионов в соответствующих точках с координатами x_{ci}, y_{ci} ; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – дельта-функция Дирака; b – коэффициент мобильности ионов; E – напряженность электрического поля.

Отметим, что ось Y направлена вертикально вверх.

Поскольку аэроионы имеют заряд, то они генерируют электрическое поле E , которое описывается следующим уравнением [16]:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} = \frac{q_e}{\epsilon_0}, \quad (2)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость; q_e – плотность объемного заряда.

От уравнения (2) можно перейти к скалярному потенциалу, если учесть такую зависимость

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{\partial \phi}{\partial x}, \\ E_y &= -\frac{\partial \phi}{\partial y}. \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда получим уравнение Пуассона следующего вида [16]

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = -\frac{q_e}{\epsilon_0}, \quad (4)$$

где $q_e = -eC(x, y)$, $C(x, y)$ – концентрация отрицательных аэроионов; ϕ – скалярный по-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

тенциал; e – элементарний заряд. На базі даного рівняння здійснюється моделювання електричного поля.

Для описання процесів розсіювання положительних іонів і пилі будемо використовувати рівняння переносу виду [16]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial uB}{\partial x} + \frac{\partial vB}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial B}{\partial y} \right) - \alpha CB - \beta BD + \\ + \sum Q_B(t) \delta(x - x_B) \delta(y - y_B), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial D}{\partial y} \right) + \\ + \sum Q_{Di}(t) \delta(x - x_D) \delta(y - y_D). \end{aligned} \quad (6)$$

Обозначение физических параметров в этих уравнениях совпадает с аналогичными обозначениями, приведенными для уравнения (1).

Для расчета аэродинамики воздушных потоков в помещении будем применять модель потенциального течения. Моделирующим уравнением, в этом случае, будет уравнение Лапласа для потенциала скорости

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (7)$$

где P – потенциал скорости.

Компоненты вектора скорости воздушной среды связаны с потенциалом скорости следующими зависимостями

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial P}{\partial x}, \\ v &= \frac{\partial P}{\partial y}. \end{aligned} \quad (8)$$

Постановка краевых условий для моделирующих уравнений рассмотрена в [1, 13, 16].

Для численного интегрирования уравнений переноса [1, 12, 13, 16] используется неявная попеременно-треугольная разностная схема,

реализуемая по методу бегущего счета [1]. Для численного решения уравнения Лапласа и уравнения Пуассона применяется метод Либмана. Расчет выполняется на прямоугольной разностной сетке.

На основе данных разностных схем разработан пакет программ (код) «ION-2». Данный пакет построен на модульном принципе, каждая подпрограмма реализует численное интегрирование конкретного моделирующего уравнения и реализацию соответствующих граничных условий.

Особенностью моделируемого процесса является наличие в помещении мебели, т.е. объектов, влияющих на формирование концентрационного поля ионов. Для «воспроизведения» этих и других объектов в численной модели используется технология «*porosity technique*», называемая также методом маркирования [1]. Суть данной технологии заключается в кодировке разностных ячеек, которые относятся к таким объектам и реализацией в них соответствующих граничных условий.

Результаты

Разработанная численная модель была применена для решения задачи о прогнозе концентрационного поля отрицательных аэроионов в офисном помещении и в его рабочих зонах.

На рис. 1 представлена схема расчетной области – помещения, в которое поступает воздух через два отверстия системы вентиляции. Выход воздуха из помещения происходит через отверстие на противоположной стенке. Рабочая зона представлена рабочим местом (стул и стол), слева и справа расположены стеллажи. Ионизатор располагается на левом стеллаже (рис. 1, а) и на полке, которая размещается на левой стенке помещения (рис. 1, б).

Источником эмиссии положительных ионов в помещении является человек, поэтому в зоне расположения его органов дыхания (рис. 1, позиция 4) задается точечный источник эмиссии положительных ионов с интенсивностью $Q_B = 8 \times 10^4$ частиц/с. Остальные параметры задачи таковы: размеры расчетной области 8,25м×4,2м; положение входных и выходного отверстий вентиляции показано стрелками на рис. 1; $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-12}$ м³/с, $\beta = 1 \cdot 10^{-12}$ м³/с [13, 17];

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными $\mu_x = \mu_y = kV$ (здесь $k = 0,1$ – параметр, V – местная скорость в конкретной расчетной точке, эта скорость определяется из решения аэродинамической задачи). В помещении происходит эмиссия пыли, $Q_{Di} = 4 \cdot 10^4$ частиц/с (положение выброса пыли показано на рис. 1 волнистой линией).

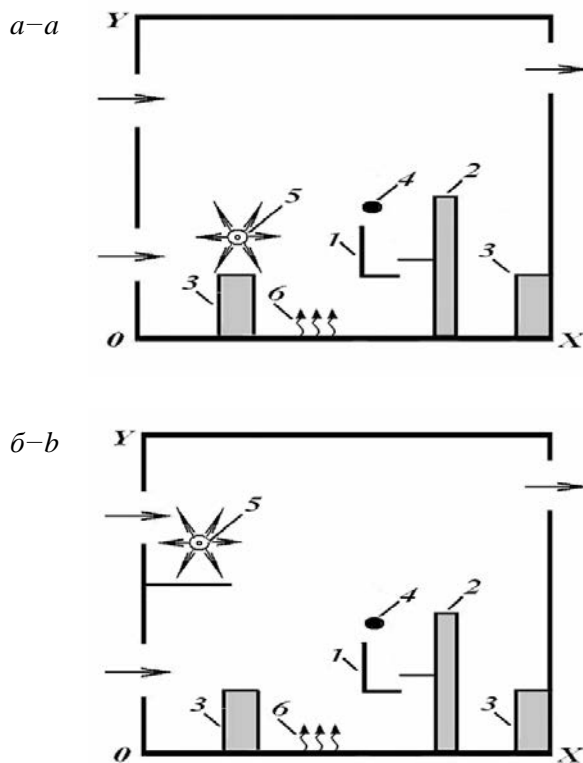


Рис. 1. Схема расчетной области:
1 – стул; 2 – рабочий стол; 3 – стеллаж;
4 – место эмиссии положительных ионов
(положение органов дыхания); 5 – ионизатор
воздуха; 6 – место эмиссии пыли

Fig.1. The computational domain:
1 – chair; 2 – work desk; 3 – rack;
4 – place of positive ions emission
(the position of the respiratory organs);
5 – air ionizer; 6 – place of dust emission

Интенсивность эмиссии отрицательных ионов от ионизатора составляет $Q_C = 90 \cdot 10^{11}$ частиц/с (первый вариант эмиссии) и $Q_C = 70 \cdot 10^{11}$ частиц/с (второй вариант эмиссии) для случая расположения ионизатора на стеллаже, показанного на рис. 1, а. Для варианта расположения ионизатора на закрепленной на стенке по-

мещения полке (рис. 1, б) интенсивность эмиссии отрицательных ионов составляет $Q_C = 70 \cdot 10^{11}$ частиц/с.

Цель численного моделирования – определить концентрацию отрицательных ионов в помещении и в зоне расположения органов дыхания человека.

Результаты численного моделирования показаны на рис. 2, 3.

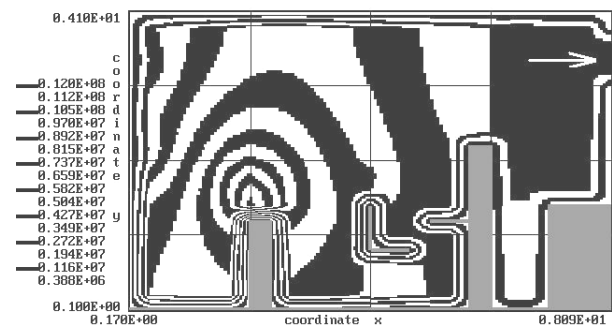


Рис. 2. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении для расположения ионизатора, соответствующего рис. 1, а ($Q_C = 70 \times 10^{11}$ частиц/с)

Fig. 2. Distribution of the negative air ions concentration in the room for ionizer location corresponding Fig. 1, a ($Q_C = 70 \times 10^{11}$ particles/s)

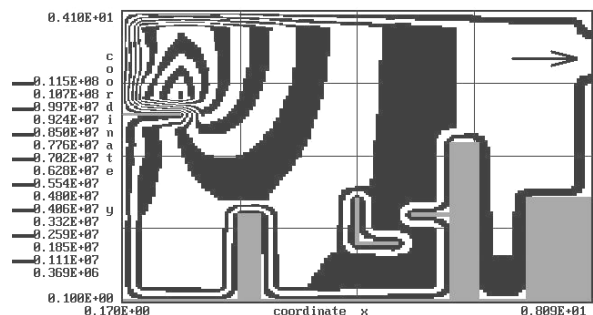


Рис. 3. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении для расположения ионизатора, соответствующего рис. 1, б ($Q_C = 70 \cdot 10^{11}$ частиц/с)

Fig. 3. Distribution of the negative air ions concentration in the room for ionizer location corresponding Fig. 1, b ($Q_C = 70 \cdot 10^{11}$ particles/s)

В результате проведенного вычислительного эксперимента установлено, что концентрация отрицательных ионов в зоне расположения органов дыхания человека составляет $C = 0,631 \cdot 10^{12}$ частиц/м³ (рис. 1, а, первый вариант эмиссии), $C = 0,48 \cdot 10^{12}$ частиц/м³ (второй

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

вариант эмиссии), и $C = 0,27 \cdot 10^{12}$ частиц/м³ для ионизатора, расположенного на полке (рис. 1, б). Таким образом, для всех рассмотренных вариантов имеет место превышение допустимой нормы, которая составляет $0,05 \times 10^{12}$ частиц/м³.

Следует отметить, что изменить интенсивность концентрационного поля ионов в помещении можно не только изменяя положение ионизатора или его интенсивность, но и путем применения экрана. Экран может быть расположен различным образом в помещении относительно ионизатора и рабочих зон. Рациональное размещение экрана в помещении может быть определено путем расчета различных вариантов его размещения с помощью разработанной численной модели. Например, выберем вариант размещения экрана перед полкой, где расположен ионизатор (рис. 4) и выполним расчет концентрационного поля отрицательных аэроионов.

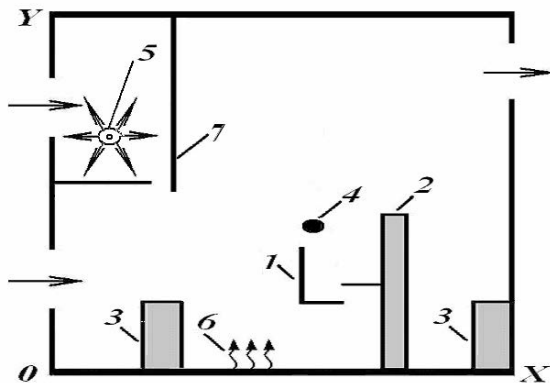


Рис. 4. Схема расчетной области:
1 – стул; 2 – рабочий стол; 3 – стеллаж;
4 – место эмиссии положительных ионов
(положение органов дыхания);
5 – ионизатор воздуха;
6 – место эмиссии пыли; 7 – экран

Fig.4. The computational domain:
1 – chair; 2 – work desk; 3 – rack;
4 – place of positive ions emission
(the position of the respiratory organs);
5 – air ionizer; 6 – place of dust emission;
7 – shield

Распределение концентрационного поля аэроионов в случае размещения экрана перед полкой, на которой установлен ионизатор, показано на рис. 5.

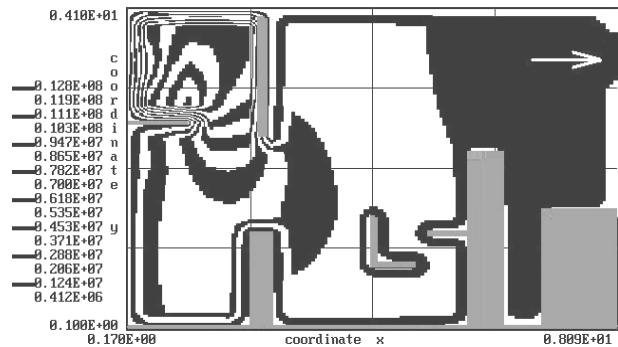


Рис. 5. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении для расположения ионизатора, соответствующего рис. 4

Fig. 5. Distribution of the negative air ions concentration in the room for ionizer location corresponding Fig. 4

Как видно из рис. 5, экран существенно повлиял на форму концентрационного поля в помещении. Это влияние проявляется и в изменении концентрации ионов на рабочем месте. Так, в зоне дыхания концентрация отрицательных ионов составляет $C = 0,14 \cdot 10^{12}$ частиц/м³. То есть, концентрация в рабочей зоне уменьшилась в два раза при использовании экрана.

В заключение отметим, что для решения задачи на базе разработанной CFD модели потребовалось порядка 2 минут компьютерного времени.

Научная новизна и практическая значимость

Разработана новая 2D CFD модель для расчета аэроионного режима в помещениях с искусственной ионизацией воздуха. Модель, основанная на применении уравнений аэродинамики, электростатики и массопереноса, позволяет учесть основные физические факторы, определяющие формирование концентрационных полей аэроионов в помещении и в рабочих зонах. Данная CFD модель позволяет рассчитывать концентрационное поле аэроионов в рабочих зонах помещения в условиях искусственной ионизации воздуха с учетом установленного оборудования и заданного местоположения ионизаторов.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Выводы

1. Разработанная 2D CFD модель для расчета аэроионного режима в помещениях с искусственной ионизацией воздуха, осуществляемой путем установки ионизатора воздуха внутри помещения, дает возможность определять концентрационное поле аэроионов в рабочих зонах.

2. Предложенная численная модель позволяет учесть при расчете размещение мебели и оборудования в помещении, местоположение источников эмиссии пыли, а также физические процессы, влияющие на формирование концентрационного поля аэроионов.

3. Дальнейшее развитие модели следует проводить в направлении создания 3D CFD модели прогноза аэроионного режима в помещениях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев, Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гулько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.
2. Беляев, Н. Н. Оценка аэроионного режима в рабочих зонах на базе CFD модели / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Зб. наук. пр. / Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ, 2015. – № 46. – С. 168–173.
3. Беляев, Н. Н. Расчет аэроионного режима в помещении и в рабочей зоне на базе численной модели / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Зб. наук. пр. / Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ, 2015. – № 47. – С. 137–143.
4. Визначення та прогнозування динаміки зміни аероіонного складу повітря виробничих приміщень / В. А. Глива, В. І. Клапченко, С. М. Пономаренко [та ін.] // Вісн. нац. техн. ун-ту України «Київський політехн. ін-т». Серія : «Гірництво». – Київ, 2010. – Вип. 19. – С. 161–168.
5. Деякі аспекти забезпечення нормативного аероіонного режиму робочого середовища приміщень спеціального призначення МНС України / І. О. Толкунов, В. В. Маринюк, І. І. Попов, В. В. Пономар // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. пр. / Нац. ун-т цивіл. захисту України. – Харків, 2008. – Вип. 8. – С. 198–206.
6. Запорожець, О. І. Нормування аероіонного складу повітря робочих приміщень та основні напрями його вдосконалення / О. І. Запорожець, В. А. Глива, О. В. Сидоров // Вісн. нац. авіац. ун-ту : зб. наук. пр. – Київ, 2011. – Вип. 1. – С. 139–143.
7. Запорожець, О. І. Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях / О. І. Запорожець, В. А. Глива, О. В. Сидоров // Вісн. нац. авіац. ун-ту : зб. наук. пр. – Київ, 2011. – Вип. 2. – С. 120–124.
8. Левченко, Л. О. Тривимірне моделювання просторових розподілів концентрацій аероіонів у повітрі приміщень / Л. О. Левченко, В. А. Глива, О. В. Сидоров // Управління розвитком складних систем : зб. наук. пр. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – Київ, 2012. – № 11. – С. 198–206.
9. Моделирование распределения концентрации ионов вблизи ионизатора / В. Е. Бахрушин, М. А. Игнашина, Д. В. Вертинский, А. Ю. Евсюков // Складні системи та процеси. – 2002. – № 1. – С. 30–36.
10. Толкунов, І. О. Біполярна іонізація повітряного середовища приміщень функціональних підрозділів мобільного госпіталю МНС / І. О. Толкунов // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. пр. / Нац. ун-т цивіл. захисту України. – Харків, 2014. – Вип. 14. – С. 161–170.
11. Толкунов, І. О. Моделювання процесів формування полів концентрації аероіонів у повітряному середовищі приміщень спеціального призначення МНС України / І. О. Толкунов, І. І. Попов // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. пр. / Нац. ун-т цивіл. захисту України. – Харків, 2010. – Вип. 12. – С. 175–184.
12. Толкунов, І. А. Теоретическое исследование процессов переноса аэроионов в потоках воздуха в помещениях специального назначения МЧС Украины / И. А. Толкунов, И. И. Попов, В. В. Барбашин // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. пр. / Нац. ун-т цивіл. захисту України. – Харків, 2010. – Вип. 11. – С. 137–145.
13. Air ion behavior in ventilated rooms / L. A. Fletcher, C. J. Noakes, P. A. Sleight [et al.] // Indoor and Built Environment. – 2008. – Vol. 17. – Iss. 2. – P. 173–182. doi: 10.1177/1420326X08089622.
14. Drexler, P. Numerical modeling of accuracy of air ion field measurement / P. Drexler, P. Fiala, K. Bartusek // J. of Electrical Engineering. – 2006. – Vol. 57, № 8/S. – P. 62–65.
15. Murakami, S. Computational wind engineering / S. Murakami // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1990. – Vol. 36, pt. 1. – P. 517–538. doi:10.1016/0167-6105(90)90335-A.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

16. Noakes, C. J. Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms [Электронный ресурс] / C. J. Noakes, P. A. Sleight, C. Beggs // Pros. of the 10th Intern. Conf. on Air Distribution in Rooms – Roomvent 2007 (13.06–15.06.2007). – Helsinki, 2007. – Режим доступа: http://eprints.whiterose.ac.uk/77-00/1/Noakes_roomvent_07.pdf. – Загл. с экрана. – Проверено : 17.09.2015.
17. The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: The experimental approach / A. Jurelionis, L. Gagytė, T. Prasauskas [et al.] // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 86. – P. 305–313. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.014.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, С. Г. ЦИГАНКОВА^{2*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Каф. «Водопостачання, водовідведення та гідравліка», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 47 02 79, ел. пошта s-tsygankova@mail.ru, ORCID 0000-0002-9837-3109

CFD МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОІОННОГО РЕЖИМУ В РОБОЧИХ ЗОНАХ В УМОВАХ ШТУЧНОЇ ІОНІЗАЦІЇ ПОВІТРЯ

Мета. Робота передбачає створення CFD моделі розрахунку аероіонного режиму в приміщеннях і в робочих зонах при штучній іонізації повітря шляхом установки іонізатора всередині приміщення з урахуванням найбільш суттєвих фізичних факторів, що впливають на формування концентраційного поля аероіонів. **Методика.** Запропонована CFD модель розрахунку аероіонного режиму в робочих зонах при штучній іонізації повітря шляхом установки іонізатора всередині приміщення заснована на застосуванні рівнянь аеродинаміки, електростатики та масопереносу. Рівняння масопереносу враховує взаємодію іонів різної полярності один із одним та з частинками пилу. Розрахунок швидкості руху повітряних потоків у приміщенні здійснювався на основі моделі потенційної течії, для чого було використано рівняння Лапласа для функції току. Для розрахунку дрейфу заряджених частинок під дією електричного поля використовувалось рівняння Пуассона для електричного потенціалу. При моделюванні враховувались: 1) вплив геометричних характеристик робочої зони; 2) місце розташування отворів припливно-витяжної вентиляції; 3) розміщення меблів та устаткування; 4) режим повітрообміну в приміщенні; 5) наявність перешкод у процесі розсіювання аероіонів; 6) конкретне місце емісії частинок пилу та іонів різної полярності та їх взаємодія в приміщенні і в робочих зонах. **Результати.** Розроблена CFD модель дозволяє визначити концентрацію негативних іонів у приміщенні і в зоні розташування органів дихання людини. Розподіл концентрації негативних аероіонів представлено у вигляді ізоліній концентраційного поля. **Наукова новизна.** Авторами створена 2D CFD модель для розрахунку аероіонного режиму в робочих зонах, яка надає можливість визначати концентраційне поле аероіонів у заданому місці в приміщенні. Запропонована модель розроблена з урахуванням: розміщення меблів та обладнання в приміщенні; геометричних характеристик приміщення; місця розташування джерел емісії пилу та іонів різної полярності; фізичних процесів, що впливають на формування концентраційного поля аероіонів. **Практична значимість.** Отримана 2D CFD модель для розрахунку аероіонного режиму в робочих зонах дозволить розраховувати концентрацію аероіонів у місці розташування дихальних органів людини з урахуванням основних фізичних факторів, які визначають формування концентраційних полів аероіонів. Це дасть можливість раціонально розташувати іонізатори в робочих приміщеннях для створення комфортних умов роботи персоналу.

Ключові слова: CFD модель; аероіонний режим; концентраційне поле аероіонів; штучна іонізація

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, С. Г. ЦИГАНКОВА^{2*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», National University of Railway Transport Named after Academician V. Lazaryan, Lazarian St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Dep. «Water Supply, Drainage and Hydraulic», State Higher Educational Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskiy St., 24-a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (0562) 47 02 79, e-mail s-tsygankova@mail.ru, ORCID 0000-0002-9837-3109

CFD SIMULATION OF AIR ION REGIME IN WORK AREAS AT CONDITION OF ARTIFICIAL AIR IONIZATION

Purpose. The paper supposes creation of a CFD model for calculating the air ion regime in the premises and in work areas at artificial ionization of the air by the ionizer installation indoors with considering the most important physical factors that influence the formation of ions concentration field. **Methodology.** The proposed CFD model for calculation of the air ion regime in work areas at artificial ionization of the air by installing ionizer indoors is based on the application of aerodynamics, electrostatics and mass transfer equations. The mass transfer equation takes into account the interaction of different polarities of ions with each other and with the dust particles. The calculation of air flow rate in the room is realized on the basis of the potential flow model by using the Laplace equation for the stream function. Poisson equation for the electric potential is used for calculation of the charged particles drift in an electric field. At the simulation to take into account: 1) influence of the working area geometric characteristics; 2) location of the ventilation holes; 3) placement of furniture and equipment; 4) ventilation regime in the room; 5) presence of obstacles on the ions dispersion process; 6) specific location of dust particles emission and ions of different polarity, and their interaction in the room and in the working zones. **Findings.** The developed CFD model allows determining the concentration of negative ions in the room and in the area of the human respiratory organs. The distribution of the negative ions concentration is presented in the form of concentration field isolines. **Originality.** The 2D CFD model for calculating the air ion regime in working areas, providing the ability to determine the ions concentration in a given place in the room was created. The proposed model is developed taking into account: placement of furniture and equipment in the room; geometric characteristics of the room; location of dust emissions sources and ions of different polarity; physical processes affecting the formation of ions concentration field. **Practical value.** The obtained 2D CFD model for calculating the air ions regime in working areas allow to calculate the concentration of ions at the location of the respiratory organs, taking into account the basic physical factors determining the formation of ions concentration fields. It will allow rationally arranged the ionizers in the working premises to create the comfortable working conditions for staff.

Keywords: CFD model; air ions regime; concentration field of air ions; artificial ionization

REFERENCES

1. Beliaev N.N., Hunko E.Yu, Rostochilo N.V. *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv* [Protection of building from hazardous substances penetration in them]. Dnipropetrovsk, Aktsent Publ., 2014. 136 p.
2. Beliaev N.N., Tsygankova S.G. Otsenka aeroionnogo rezhima v rabochnykh zonakh na baze CFD modeli [Evaluation of air ion regime in work areas on the basis of CFD models]. *Zbirnyk naukovykh prats NGU* [Proc. of NMU], 2015, no. 46, pp. 168-173.
3. Beliaev N.N., Tsygankova S.G. Raschet aeroionnogo rezhima v pomeshchenii i v rabochey zone na baze chislennoy modeli [Calculation of air ion regime in the premises and work area on the basis of a numerical model]. *Zbirnyk naukovykh prats NGU* [Proc. of NMU], 2015, no. 47, pp. 137-143.
4. Hlyva V.A., Klapchenko V.I., Ponomarenko S.M. Vyznachennia ta prohnozuvannia dynamiky zminy aerionnoho skladu povitria vyrobnychkykh prymishchen [Determination and prediction of the ionic air composition change dynamics in industrial premises]. *Visnyk natsionalnoho tekhnichnogo universitetu Ukrainy «Kyivskii politekhnicheskii institut»* [Bulletin of National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»], 2010, issue 19, pp. 161-168.
5. Tolkunov I.A., Mariniukh V.V., Popov I. I., Ponomar V.V. Deiaki aspekty zabezpechennia normatyvnoho aeroionnoho rezhymu robochoho seredovyshcha primishchen spetsialnoho pryznachennia MNS Ukrainy [Some aspects of the regulatory ionic regime in working environment of the special purpose premises of the Ukrainian Ministry of Emergencies]. *Problemy nadzvychaynykh situatsii* [Problems of Emergencies], 2008, no. 8, pp. 198-206.
6. Zaporozhets O.I., Hlyva V.A., Sidorov O.V. Normuvannia aeroionnoho skladu povitria robochykh prymishchen ta osnovni napriamy yogo vdoskonalennia [The standardization of the ionic air composition in work

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

- premises and main directions of its improvement]. *Visnyk natsionalnoho aviatsiinoho universitetu* [Bulletin of National Aviation University], 2011, no 1, pp. 139-143.
7. Zaporozhets O.I., Hlyva V.A., Sidorov O.V. Printsypy modeliuvannia aeroionnoho skladu povitria u prymishchenniakh [The principles of modeling the ionic air composition in premises]. *Visnyk natsionalnoho aviatsiinoho universitetu* [Bulletin of National Aviation University], 2011, no. 2, pp. 12-124.
 8. Levchenko L.O., Hlyva V.A., Sidorov O.V. Tryvymirne modeliuvannia prostоровykh rozpodiliv kontsentratsii aeroioniv u povitri [Three-dimensional modeling of ions concentrations spatial distributions in indoor air]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system* [Managing the development of complex systems], 2012, no. 11, pp. 198-206.
 9. Bahrushyn V.E., Ignakhina M.A., Vertinskii D.V., Yeevsiukov A.Yu. Modelirovaniye raspredeleniya kontsentratsii ionov vblizi ionizatora [Simulation of distributing concentration of ions nearly ionizator]. *Skladni systemy ta procesy – Complex systems and processes*, 2002, no. 1, pp. 30-36.
 10. Tolkunov I.A. Bipoliarnaia ionizatsia povitrianoogo seredovyshcha primishchen funktsionalnykh pidrozdiliv mobilnogo hospitaliu MNS [Bipolaris ionization air environment of premises functional units mobile hospital of the Ministry of Emergencies]. *Problemy nadzvychainykh situatsii* [Problems of Emergencies], 2014, issue 14, pp. 161-170.
 11. Tolkunov I.A., Popov I.I. Modeliuvannia protsesiv formuvannia poliv kontsetrtsii aeroioniv u povitrianomu seredovyshchi prymishchen spetsialnoho pryznachennia MNS Ukrainy [Simulation of the ions concentration fields formation in the air space of the special purpose premises of the Ukrainian Ministry of Emergencies]. *Problemy nadzvychainykh situatsii* [Problems of Emergencies], 2010, issue 12, pp. 175-184.
 12. Tolkunov I.A., Popov I.I., Barbasin V.V. Teoreticheskoye issledovaniye protsessov perenosu ionov v potokakh vozdukh v pomeshcheniakh spetsialnogo naznachenia MCHS Ukrainy [Theoretical study of the ions transport processes in the air flows in the special purpose premises of the Ukrainian Ministry of Emergencies]. *Problemy nadzvychainykh situatsii* [Problems of Emergencies], 2010, issue 12, pp. 137-145.
 13. Fletcher L.A., Noakes C.J., Sleight P.A., Beggs C.B., Shepherd S.J. Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*, 2008, vol.17, issue 2, pp. 173-182.
 14. Drexler P., Fiala P., Bartusek K. Numerical modeling of accuracy of air ion field measurement. *Journal of Electrical Engineering*, 2006, vol. 57, no. 8/S, pp. 62-65.
 15. Murakami S. Computational wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, vol. 36, part 1, pp. 517-538.
 16. Noakes C.J., Sleight C.J., Beggs C. Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms. Proc. of the 10th Intern. Conf. on Air Distribution in Rooms. Roomvent 2007, (13 -15 June 2007), Helsinki, 2007. Available at: http://eprints.whiterose.ac.uk/7700/1/Noakes_roomvent_07.pdf (Accessed 17 September 2015).
 17. Jurelionis A., Gagytė L., Prasauskas T., Čiužas D., Krugly E., Šeduikytė L., Martuzevičius D. The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: The experimental approach. *Energy and Buildings*, 2015, vol. 86, pp. 305-313.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Б. В. Виноградовым (Украина); д.т.н., проф. П. П. Ермаковым (Украина)

Поступила в редколлегию<12.11.2015

Принята к печати<14.01.2016

UDC 502.36/.504.3.054:656.2

O. V. BERLOV^{1*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail berlov@bigmir.net, ORCID 0000-0002-7442-0548

ATMOSPHERE PROTECTION IN CASE OF EMERGENCY DURING TRANSPORTATION OF DANGEROUS CARGO

Purpose. The paper highlights the development of numerical models for prediction of atmospheric pollution in case of burning of the solid rocket propellant in a railway car, situated near the building on railway territory. These models can be used in predicting the effectiveness of neutralization upon the atmosphere protection for this type of accidents. **Methodology.** To solve this problem the numerical models based on the use of Navier-Stokes equations, to determine the velocity field of the wind flow near cars and buildings, and contaminants-transfer equations in the atmosphere were developed. For the numerical integration of pollutant transport equation was used implicit «change – triangle» difference scheme. When constructing a difference scheme physical and geometric cleavage of the transfer equation is carried out in four steps. Unknown value of pollutant concentration at each step of cleavage is determined by the explicit scheme – the method of «point-to-point computation». For the numerical integration of the Navier-Stokes equations are used implicit difference schemes. When carrying out computing experiment also takes into account: the velocity profile of wind flow; interaction between the building and the wind flow and flame jet of solid rocket propellant; the presence of a railroad car; inside which there is a source of pollution; instability of pollutant emissions. On the basis of constructed numerical models was performed the computer experiment for assessing the level of air pollution at dangerous cargo rail transportation in case of emergency at railway territory. The application calculations for the timely combustion products neutralization of solid rocket propellant were carried out. **Findings.** The numerical models that let promptly calculate air contamination in case of emergency during solid rocket propellant transportation, as well as calculate the rational parameters of pollutant neutralization process were developed by the researcher. These models can be used for routine calculations of various accident scenarios simulation. **Originality.** Numerical models were developed; they take into account significant factors, influencing the pollutant dispersion process in the atmosphere. On their base a pollutant neutralization method was offered in emergency situations on the railway transport. **Practical value.** Efficient numerical models, so called «diagnostic models» were considered for the rapid calculation of the air pollution level and air protection technology in emergency situations, in particular, in the case of railway transportation the solid rocket propellant.

Keywords: train accidents; air pollution; pollutant neutralization; numerical simulation

Introduction

Accidents during transportation of toxic chemicals, for example, solid rocket propellant (Fig.1) can intensively impact on the environment [2-4, 9].

In the case of this propellant burning the great amount of toxic chemicals are dispersed in atmosphere. So it is important to predict the atmosphere pollution in the case of the possible accident and develop methods to protect atmosphere from pollution (Fig. 2) [1, 11].

That is why the prediction of the atmosphere pollution in the case of the mighty emissions during transportation is of great interest.



Fig. 1. Transport of solid rocket propellant in a railway wagon

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ



Fig. 2. General view of settlement areas:
1 – building on the territory
of station «Pavlohrad-1», 2 – train

Nowadays to predict the dimensions of the hitting area in the case of outdoor toxic chemical release the special standard model is used in Ukraine [10]. This model is formed on the basis of some empirical models and it has a lot of lacks and is, without doubt, unrealistic. The model does not take into account the influence of the wind velocity and the atmosphere diffusion on the concentration dispersion in the atmosphere. The main lack of this model is that the standard model cannot calculate the change of toxic chemical concentration in the atmosphere after the accident. In some cases Gauss model is used to predict atmosphere pollution level [5-7, 13]. It is very important to develop CFD (Computational Fluid Dynamics) models to solve the problem discussed [1, 8, 14, 15].

Purpose

The purpose of this work is the development of the numerical model to predict the atmosphere pollution in micro scale level in the case of solid propellant burning which also can be used to predict the effectiveness of neutralization for atmosphere protection for this type of accident.

Methodology

When the solid propellant burns different toxic chemicals are emitted in the atmosphere. To compute the toxic chemical (product of propellant burning) dispersion the Navier-Stokes equations and equation of mass transfer are used [14]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (2)$$

where ψ – is flow function; $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ – is vorticity; $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$, $v = \frac{\partial \psi}{\partial x}$.

This model is used to predict the air pollution near railway car with solid rocket propellant (Fig.2).

To simulate the process of toxic chemical dispersion in the atmosphere (for the distance about 300m) the 2-D transport equation is used [8, 14]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial v C}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (3)$$

where C – is the concentration of toxic chemical; u, v – are the velocity components in x, y direction respectively; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – are the coefficients of turbulent diffusion in x, y direction respectively; σ – is the parameter taking into account the process of toxic gas decay or rain wash out; x_i, y_i – are the coordinates of point source of emission; $Q_i(t)$ – is the intensity of pollutant emission; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – is Dirac delta-function.

The boundary conditions for the governing equations are discussed in [14].

In the developed numerical model, the following profile of velocity component u and coefficient of diffusion is used [5, 6]:

$$u = u_1 \left(\frac{y}{y_1} \right)^p, \quad \mu_y = k_1 \left(\frac{y}{y_1} \right)^m, \quad \mu_x = k_0 u,$$

where u_1 – is the velocity at height y_1 ; $k_1 = 0,2$; $k_0 = 0,1$; $p = 0,16$; $m \approx 1$.

Numerical integration. To solve the governing equations the implicit difference schemes were used [14, 15]. These are so called «change – triangle» difference schemes.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Findings

To minimize the extent of contamination and the risk of toxic defeat people in case of emergency during transportation of solid rocket propellant it is proposed technology, aimed at localization of the source of emission of products of combustion solid rocket propellant. It is proposed to include in the train which transports solid rocket propellant, the car with the pump unit and tank with a stock of neutralizing solution. It is also proposed to include a buffer car between the rail car where solid propellant is transported and the car with the pump unit. This buffer truck will serve as a «screen» for the protection of the car with the pump unit from heat radiation of the combustion solid rocket propellant. With this technology, was organized rapid feed of neutralizing solution into the plume of combustion products and thereby minimizing time the free flow of products of combustion solid rocket propellant in the atmosphere. In addition, unlike the traditional scheme of feeding catalyst in the form of streams offered feed through the sprinkler, which is posted on pull-rod (Fig.3). This is because the temperature of the combustion solid rocket propellant in the atmosphere is high and if you use a traditional presentation in the form of a jet, there will be rapid evaporation of droplets of reagent on the path of its movement from the installation to the jet plume.

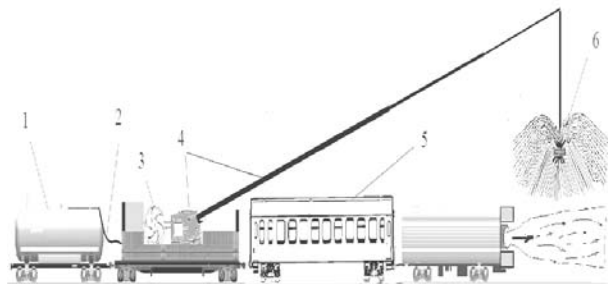


Fig. 3. Sketch of toxic chemical neutralization:
1 – vessel with the reagent, 2 – pipeline, 3 – pump,
4 – pop-arrow, 5 – buffer car, 6 – sprinkler

Problem setting– to evaluate the effectiveness of the process of neutralization of various intensities of reagent feed and placement of the sprinkler to the source of emission of hazardous substances.

The calculation is performed for the following tasks:

Scenario 1 – no neutralization;

Scenario 2 – supply of reagent is performed at a height of 13,5m and at a distance of 20 m from the source of emission. This distance is constant in all scenarios, catalyst feed rate of 1 kg/s;

Scenario 3 – the reagent feed is done at the height of 13,5m, catalyst feed rate of 8 kg/s.

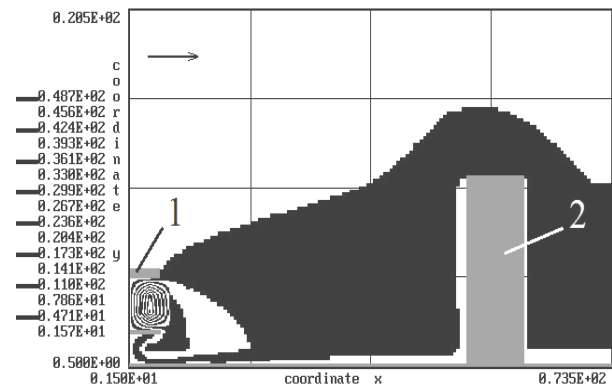


Fig. 4. Concentration contours of HCl
(no reagent supply, $t = 120$ sec):
1 – car with solid rocket propellant,
2 – building near railway station

On the base of the developed numerical models the special codes were developed. Some results of their application are shown in Fig.4-6.

The subsequent figures illustrate the area of atmospheric pollution in the case of the options considered. The first figure (Fig. 4) corresponds to the situation when there is no flow of reagent and compares the efficiency of neutralization for each option, comparing to the area of contamination with this picture.

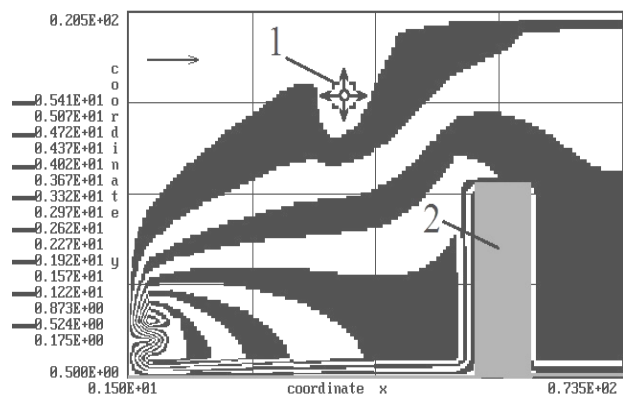


Fig. 5. Concentration contours of HCl (reagent supply, $t = 120$ sec, Scenario 2: the height of the feed catalyst 13,5 m, flow rate 1 kg/s):
1 – sprinkler; 2 – building

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

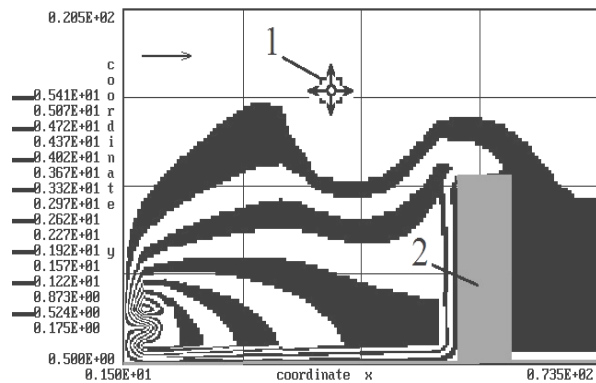


Fig. 6. Concentration contours of HCl (reagent supply, $t = 120$ sec, Scenario 3: the height of the feed catalyst 13,5 m, flow rate 8 kg/s):
1 – sprinkler; 2 – building

Results of neutralization effectiveness are shown in Tabl.1, 2.

Table 1

The efficiency of neutralization (scenario 2)

t	45 сек	75 сек	120 сек
The efficiency of neutralization	6,8%	8,2%	8,9%

Table 2

The efficiency of neutralization (scenario 3)

t	45 сек	75 сек	120 сек
The efficiency of neutralization	50%	62%	69%

Results from Tabl.1, 2 show that the rate of reagent strongly influences the effectiveness of protection. Also it is clear from Fig.5, 6 that the height of reagent supply is too high because the region near the railway car and building is still in the plume of toxic chemical.

Originality and practical value

A new numerical model to predict atmosphere pollution and neutralization of toxic chemical after accidents at railways was developed. The model is based on the 2-D transport equation. The developed model takes into account wind profile, diffusion, emission rate. This model allows evaluating

the level of atmosphere pollution and effectiveness of neutralization. The model can be useful in the field of transport routes safety prediction.

Conclusions

The article contains results of numerical simulation of air pollution near «Pavlohrad-1» station after the accident at railway. To simulate the process of air pollution the 2-D developed numerical model was used. The developed numerical model takes into account the main physical processes which influences the pollutant dispersion in atmosphere. The developed models allow simulating the process of neutralization of toxic chemical in atmosphere. The future work in this field will be connected with development of fluid dynamics models to simulate the pollutant dispersion over the complex terrain.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2013. – 159 с.
2. Беляев, Н. Н. Прогнозирование загрязнения приземного слоя атмосферы при горении твердого ракетного топлива в хранилище / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // 36. наук. пр. НГУ. – Дніпропетровськ, 2013. – № 42. – С. 160–167.
3. Беляев, Н. Н. Моделирование аварийного загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, А. В. Шевченко // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 29–38. doi: 10.15802/stp-2014/29973.
4. Берлов, А. В. Расчет загрязнения приземного слоя атмосферы при горении твердого ракетного топлива / А. В. Берлов // Наук. Вісн. буд-ва : зб. наук. пр. / Харк. нац. ун-т буд-ва та архіт. – Харків, 2014. – №1 (75). – С. 185–189.
5. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
6. Бруцкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруцкий. – Киев : Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
7. Гусев, Н. Г. Радиоактивные выбросы в биосфере / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 257 с.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

8. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
9. Машихина, П. Б. Моделирование распространения примеси в атмосфере с учетом рельефа местности / П. Б. Машихина // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 27. – С. 138–142.
10. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. – Київ, 2001. – 33 с.
11. Моделирование аварийных ситуаций на промышленных объектах и безопасность жизнедеятельности / Л. И. Антошкина, Н. Н. Беляев, Л. Ф. Долина, Е. Д. Кореньюк. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2011. – 123 с.
12. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
13. Уорк, К. Загрязнение воздуха. Источники и контроль / К. Уорк, С. Уорнер – Москва : Мир, 1980. – 539 с.
14. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Київ : Наук. думка, 1997. – 368 с.
15. Biliaiev, M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. Biliaiev // NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15.

А. В. БЕРЛОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта berlov@bigmir.net, ORCID 0000-0002-7442-0548

ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ В СЛУЧАЕ АВАРИИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ

Цель. Работа посвящена разработке численных моделей для прогноза загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива в железнодорожном вагоне, расположенном вблизи здания на примыкающей территории. Данные модели могут быть использованы при прогнозировании эффективности нейтрализации по защите атмосферы для этого типа аварий. **Методика.** Для решения поставленной задачи разработаны численные модели, основанные на применении уравнений Навье-Стокса, для определения поля скорости ветрового потока вблизи вагонов и зданий, и уравнении переноса примеси в атмосфере. Для численного интегрирования уравнения транспорта загрязнителя использовалась неявная попеременно-треугольная разностная схема. При построении разностной схемы осуществляется физическое и геометрическое расщепление уравнения переноса на четыре шага. Неизвестное значение концентрации загрязнителя на каждом шаге расщепления определяется по явной схеме – методу «бегущего счета». Для численного интегрирования уравнений Навье-Стокса применяются неявные разностные схемы. При проведении вычислительного эксперимента также учитываются: профиль скорости ветрового потока; взаимодействие ветрового потока со зданием и струей продуктов горения твердого ракетного топлива; наличие железнодорожного вагона, внутри которого находится источник загрязнения; нестационарность эмиссии загрязнителя. На основе построенных численных моделей проведен вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения атмосферы при транспортировке железнодорожным транспортом опасного груза в случае аварии на примыкающей территории. Проведены расчеты по применению своевременной нейтрализации продуктов горения твердого ракетного топлива. **Результаты.** Исследователем разработаны численные модели, которые позволяют оперативно рассчитать загрязнение атмосферы в случае аварии при транспортировке твердого ракетного топлива, а также рациональные параметры процесса нейтрализации загрязнителя. Эти модели могут использоваться для серийных расчетов по моделированию различных сценариев аварийных ситуаций. **Научная новизна.** Разработаны численные модели, позволяющие учесть существенные факторы, влияющие на процесс рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере и предложена на их базе методика нейтрализации загрязнителя при чрезвычайных ситуациях на железнодорожном транспорте. **Практическая значимость.** Рассмотрены эффективные численные модели «diagnostic models» для экспресс-расчета уровня загрязнения атмосферы и разработана технология защиты

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

атмосфери при аварийных ситуациях, в частности, в случае перевозки железнодорожным транспортом твердого ракетного топлива.

Ключевые слова: аварии на железнодорожном транспорте; загрязнение атмосферы; нейтрализация загрязнителя; численное моделирование

О. В. БЕРЛОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта berlov@bigmir.net, ORCID 0000-0002-7442-0548

ЗАХИСТ АТМОСФЕРИ У ВИПАДКУ АВАРІЇ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ

Мета. Робота присвячена розробці чисельних моделей для прогнозу забруднення атмосфери при горінні твердого ракетного палива в залізничному вагоні, розташованому поблизу будівлі на примігстральній території. Дані моделі можуть бути використані при прогнозуванні ефективності нейтралізації по захисту атмосфери для цього типу аварій. **Методика.** Для розв'язання поставленої задачі розроблені чисельні моделі, засновані на застосуванні рівнянь Нав'є-Стокса, для визначення поля швидкості вітрового потоку поблизу вагонів і будівель, та рівнянні переносу домішки в атмосфері. Для чисельного інтегрування рівняння транспорту забруднювача використовувалася неявна попеременно-трикутна різницева схема. При побудові різницевої схеми здійснюється фізичне і геометричне розщеплення рівняння переносу на чотири кроки. Невідоме значення концентрації забруднювача на кожному кроці розщеплення визначається за явною схемою – методу «біжучого рахунку». Для чисельного інтегрування рівнянь Нав'є-Стокса застосовуються неявні різницеві схеми. При проведенні обчислювального експерименту також враховуються: профіль швидкості вітрового потоку; взаємодія вітрового потоку з будівлею і струменем продуктів горіння твердого ракетного палива; наявність залізничного вагона, усередині якого знаходиться джерело забруднення; нестационарність емісії забруднювача. На основі побудованих чисельних моделей проведено обчислювальний експеримент із оцінки рівня забруднення атмосфери при транспортуванні залізничним транспортом небезпечного вантажу при аварії на примігстральній території. Проведено розрахунки по застосуванню своєчасної нейтралізації продуктів горіння твердого ракетного палива. **Результати.** Дослідником розроблено чисельні моделі, які дозволяють оперативно розрахувати забруднення атмосфери в разі аварії при транспортуванні твердого ракетного палива, а також раціональні параметри нейтралізації забруднювача. Ці моделі можуть використовуватись для серійних розрахунків різноманітних сценаріїв аварійних ситуацій. **Наукова новизна.** Розроблено чисельні моделі, що дозволяють врахувати істотні фактори, що впливають на процес розсіювання забруднюючих речовин у атмосфері та запропонована на їх базі методика нейтралізації забруднювача при надзвичайних ситуаціях на залізничному транспорті. **Практична значимість.** Розглянуто ефективні чисельні моделі «diagnostic models» для експрес-розрахунку рівня забруднення атмосфери та розроблено технологію захисту атмосфери при аварійних ситуаціях, зокрема, у разі перевезення залізничним транспортом твердого ракетного палива.

Ключові слова: аварії на залізничному транспорті; забруднення атмосфери; нейтралізація забруднювача; чисельне моделювання

REFERENCES

1. Belyayev N.N., Gunko Ye.Yu., Mashikhina P.B. *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh ekologicheskoy bezopasnosti i monitoringa chrezvychaynykh situatsiy* [Mathematical modeling in problems of environmental safety and monitoring emergencies]. Dnepropetrovsk, Aktsent PP Publ., 2013, 159 p.
2. Belyayev N.N., Berlov A.V. *Prognozirovaniye zagryazneniya prizemnogo sloya atmosfery pri gorenii tverdogo raketnogo topliva v khranilishche* [Prediction of pollution in the atmospheric surface layer during combustion of solid rocket fuel in storage]. *Zbirnyk naukovykh prats NHU* [Proc of NMU]. Dnipropetrovsk, Natsionalnyi Hirnychiy Universytet Publ., 2013, no. 42, pp. 160-167
3. Belyayev N.N., Berlov A.V., Shevchenko A.V. *Modelirovaniye aviynogo zagryazneniya atmosfery pri chrezvychaynoy situatsii v khranilishche tverdogo raketnogo topliva* [Simulation of the accidental pollution af-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

- ter the emergency in to the storage of rocket solid propellant]. *Nauka ta prohres transport – Science and Transport Progress*, 2014, no. 5 (53), pp. 29-38. doi: 10.15802/stp2014/29973.
4. Berlov A.V. Raschet zagryazneniya prizemnogo sloya atmosfery pri gorenii tverdogo raketnogo topliva [Calculation of the pollution of the ground atmospheric layer during combustion of solid rocket fuel]. *Naukovyi visnyk budivnytstva: zbirnyk naukovykh prats* [Proc. of «Scientific Bulletin of construction»], 2014, no. 1 (75), pp.185-189.
 5. Berlyand M.Ye. *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery* [Prediction and regulation of air pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 273 p.
 6. Bruyatskiy Ye.V. *Teoriya atmosfernoï diffuzii radioaktivnykh vybrosov* [The theory of atmospheric diffusion of radioactive emissions]. Kiev, Institut gidromekhaniki NAN Ukrainy Publ., 2000. 443 p.
 7. Gusev N.G., Belyaev V.A. *Radioaktivnyye vybrosy v biosfere* [Radioactive emissions in the biosphere]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 257 p.
 8. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p..
 9. Mashikhina P.B. Modelirovaniye rasprostraneniya primesi v atmosfere s uchetom relefa mestnosti [The distribution modeling of impurities in the atmosphere with taking into account of terrain]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 27, pp. 138-142.
 10. *Metodyka prohnozuvannia naslidkiv vylyvu (vykydu) nebezpechnykh khimichnykh rehovyn pry avariiakh na promyslovykh ob'ekтах i transporti* [Methods of prediction the consequences of the spout (emission) of hazardous chemicals in accidents at industrial objects and transport]. Kyiv, 2001. 33 p.
 11. Antoshkina L.I., Belyaev N.N., Dolina L.F., Korenyuk Ye.D. *Modelirovaniye avariynykh situatsiy na promyshlennykh ob'ekтах i bezopasnost zhiznedeyatelnosti* [Simulation of emergency situations at industrial facilities and life safety]. Dnipropetrovsk, Nova ideolohiia Publ., 2011. 123 p.
 12. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
 13. Uork, K., Uorner S. *Zagryazneniye vozdukha. Istochniki i kontrol* [Air pollution. Sources and control]. Moscow, Mir Publ., 1980. 539 p.
 14. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Belyaev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modelling of pollution spreading in the environment]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1997. 368 p.
 15. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 2012, pp. 87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15.

Prof. S. A. Pichugov, Dr. Sc. (Phys.-Math.) (Ukraine); Prof. S. Z. Polishhuk, Dr. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: Nov. 16, 2015

Received: Jan. 11, 2016

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

UDC 338.48-1/-6

L. V. MARTSENIUK^{1*}

^{1*}Dep. «Economics and Management», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (093) 934 18 03, e-mail rwinform1@rambler.ru, ORCID 0000-0003-4121-8826

DIRECTIONS OF EXTREME TOURISM IN UKRAINE

Purpose. In the world market of tourist services the extreme tourism is very popular, as it does not require the significant financial costs and enables year on year to increase the offers of holiday packages, associated with active travel. Ukraine has significant potential for the development of extreme kinds of rest, but it is not developed enough. Forms of extreme tourism are unknown for domestic tourists, and therefore, they formed a negative attitude. The aim of the article is the analysis of extreme resort potential of Ukraine and promotion of the development of extreme tourism destinations in the travel market. Theoretical and methodological basis of research is the system analysis of the problems of ensuring the competitiveness of the tourism industry, theoretical principles of economic science in the field of the effectiveness of extreme tourism and management of tourist flows. **Methodology.** The author offers the directions of tourist flows control, which differ from the current expansion of services to tourists in Ukraine. The development of extreme tourism with the help of co-operation of railways and sport federations was proposed. **Findings.** During the research the author proved that the implementation of the tasks will be promote: 1) increase in budget revenues at all levels of the inner extreme tourism; 2) raise the image of Ukraine and Ukrainian Railways; 3) increase the share of tourism and resorts in the gross domestic product to the level of developed countries; 4) bringing the number of employees in tourism and resorts to the level of developed countries; 5) the creation of an effective system of monitoring the quality of tourist services; 6) the creation of an attractive investment climate for attracting the investment in the broad development of tourism, engineering and transport and municipal infrastructure; 7) improvement the safety of tourists, ensure the effective protection of their rights and legitimate interests and preservation of the property. **Originality.** The author shows the theoretical generalization and new solution of a scientific problem. It manifests itself in the development of theoretical and methodological approaches to the development of extreme tourism. **Practical value.** Rational use of measures proposed by the author of directional control of tourist flows will significantly increase the country's revenues from domestic tourism.

Keywords: railway tourism; tourist flow; tourist route; extreme tourism; resort potential

Introduction

Extreme tourism is a type of tourism that is associated with a certain degree of risk, or with prohibitive physical or mental strain and stress in tough conditions.

The main thing in extreme tourism is natural settings for a selected type of holiday and experienced managers. All routes of extreme tourism have different categories of complexity. The majority does not require the years of experience and thorough

preparation, and usually they are under the power of any healthy active person. [3].

Mountain climbing, jeep tours, kayaking, diving, paragliding, rafting, industrial and mountaineering are the most popular forms of recreation.

Some travel companies offer to demanding tourists the exotic tourism. This could be a fly on the Earth's orbit, the descent from the mountains on a motorcycle, hunting for sharks under the water, traveling in the dungeon and descend from the sand dunes on a snowboard and other [2].

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

If not to take into account that the exotic tourism is expensive, we can say that an extreme tourism refers to one of the most attractive tourist recreation, because the most travelers want not only to see but to feel it. People go on holiday for emotions. They are willing to spend money for the positive and sometimes unusual emotions [13].

Problems and prospects of the extreme tourism development were studied by such scholars as I. Svida, A. Romanov, Yu. Dmytriievskyi, Ya. Arin, V. Hulciaiev. Their works analyse the foreign development of recreation extreme forms, but as for Ukraine, this area still requires the further research study.

Purpose

The article aim is to analyse the development of extreme resort potential of Ukraine and popularizing of extreme tourism destinations in the travel market.

Methodology

Ukraine has the considerable potential for extreme forms of recreation, but it is underdeveloped. The forms of extreme tourism is largely unknown to domestic tourists, so they formed inert or negative attitude.

But the global tourism industry is constantly developing and offering the new services to all tourists [1]. In recent times the great demand for not only the usual sightseeing trips and also tourism associated with the recreational activities. Ukraine has enough places where the extreme tourism can be organized. The klondike of ideas embodiment in this context can and should become Zakarpattia, Lviv and Ivano-Frankivsk region.

Each year in the Zakarpattia region the extreme competitions are hold. Among the popular places of the organized extreme sport are Mukachevo, Uzhgorod and surroundings of the Borzhava River.

Among the most popular forms of extreme tourism in our country are: mountaineering and mountain hiking; caving; skiing; white-water rafting (rafting on mountain rivers); paragliding and hang gliding.

In the Zakarpattia region the mountainous kinds of extreme tourism are popular. The most extreme form of recreation is considered the mountaineering; the tourists overcome various obstacles of varying degrees of severity.

The Carpathian mountains, located on the territory of Zakarpattia region, are relatively safe and there is the possibility to organize the climbing routes of varying difficulty. The Caucasus or the Urals are famous for the sharp slopes and dips, so to organize tours there is not the most profitable business. In Zakarpattia, if exclude from the tourist routes the most rugged mountains Gorgan, all other mountains in the region can be considered as suitable for the development of mountaineering. Today the most visited mountains are located in Volovetsk, Mizhhirsk, Rakhivsk, Velykoberezniansk, Svaliavsk and Mukachivsk districts [4].

The popularity of skiing and snowboarding increases from year to year. The highest ski base of Ukrainian Carpathians is Drahobrat where the two rope tows kilometer long lead from the height of over 1,300 m near the Stig mountain (1704 m).

If to remember the climbing routes, the hundreds of them are laid in the Smotrych canyon. There the rock canyon was washed with the Smotrych River, which forms the open loop around the old city. The height of the cliffs in the canyon reaches fifty meters.

The terrestrial kinds of extreme tourism include caving, horse riding and hunting tourism, pedestrian and combined bus-hiking, mountbiking, X-racing, sport orienteering, avtotour, rally, mototourism and survival in the wild.

As for caving, there are dozens of caves in the Zakarpattia region. The most popular among tourists are the caves near the settlements Kniahynia, Mala Uholka and cave «Druzhba», located in Tiachivsk district.

As for equestrian, hunting and walking tourism, they certainly can be developed throughout the Ukraine, because in our country there is an enough necessary resource potential. Tourists can be offered the combined tours – the combination of several kinds of active rest in one route, such as tracking and equestrian tourism.

Findings

Today in the world market of tourist services very popular is tourism on particularly dangerous routes.

Here is a short list of the popular kinds of extreme tourism in other countries.

Thus, Turkey is famous for diving. Places for diving are incredibly much. The most popular is

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

considered Bordum, Cargo and Kechek islands. On the way to the islands are beautiful underwater reefs. Catal Island is a favorite place for fans of underwater archeology. Thus here is the world's only museum of underwater treasure. Also in Turkey, there are many proposals for travel on mountain river. The most popular place for rafting fans is the mountain river Dalaman [8].

Egypt also attracts tourists with diving and exotic journey through the desert. Thailand is famous for water tourism. Spain captures with Bullfighting. Travel Agency in South America offering acquaintance with the Indian tribes. Switzerland develops the gliding and climbing actively. In Africa the tourists are offered the safari in the national parks, rafting the Nile or climbing peaks in African mountains. The trips to wild places are very popular [7]. In China, the tourists have the opportunity to learn about the ancient Chinese culture, religion, ancient monuments and exotic cuisine. Diving is pretty developed. India will delight tourists with windsurfing. More and more wishing to go to extreme climatic conditions in cruises to the Arctic and Antarctic and look at exotic animals, for example Penguins. According to statistics, one third of holidaymakers weekly go on safari or ride on a yacht, or have other recreational activities in Europe [10].

If to go back to Ukraine, it can be emphasized that in this country there are all opportunities for the development of some types of extreme tourism, but the public authorities are not given enough attention on this problem. In addition, in Ukraine the lack of objective information about the safety and availability of extreme sports encourage the domestic tourists to seek such services in other countries. Do not forget about the worsening of social and economic situation in the country, where the cost of basic necessities need to be increased, and costs on holidays are reduced accordingly. However, in Ukraine there is the resource potential for the organization of recreation available to the wider population [5].

For example, mountain bike is the downhill from the mountain on a bike, the overcoming obstacles through stones, high-speed travel through dangerous places, fast ride around the track with jumps and other obstacles.

The sport orienteering with a map and a compass can be interesting for Ukrainians. In Zakarpattia the sport orienteering competitions can be organized in the area of the Nevitskij castle.

In Zakarpattia region are the ideal preconditions for this extraordinary sport like hang-gliding and paragliding. The most favorable conditions are the territory of Rakhiv, Perechyn, Velykobereznianskyi and partially in other areas [7].

The water extreme tourism can be developed: the descent on mountain rivers by canoe. In Zakarpattia, the descent on mountain rivers by canoe can be organized (Vynohradivsk, Perechynsk, Velykoberezniansk and Uzhhorod areas) [8].

Do not forget about such a romantic and extreme kind of the rest as flying on balloons. There are excellent natural conditions for the development of aeronautics in Ukraine. The flights over the megacities above the beautiful historical places, which in our country are enough can be organized. Today in Ukraine about twenty balloons are only used that is in twenty times less than in Russia and Holland and in the three hundred times (!) in comparison with Germany.

Among the extreme kinds of sport is skydiving. So far, this kind of extreme sports is at an early stage of development in Ukraine.

Today in Ukraine there are only three large dropzones: two in Kyiv and one near Dnipropetrovsk, which is in twenty times less than in the UK.

The rafting is one of the popular kinds of sport nowadays in other countries and perspective for the development in Ukraine. Our lowland rivers without rapids are suited very well for raftings of ordinary people and not for athletes training. For the adventure-seekers the Pivdennyi Buh with its rapids and shallows will be a good variant, and for the most experienced the mountain rivers of Carpathians.

Safari is a fascinating experience. And if in the last century, it meant the hunting wild African animals, with the advent of modern photography Safari can be a photo or video hunting that is not harmful to living creatures.

Ukraine is also famous with its reserves. Today there are 17 natures, 4 biosphere reserves and 12 national parks in which the wildlife is protected by the State. Askania-Nova is one of the largest biological reserves in Europe, which collected the animals-representatives of almost all continents of the planet [6].

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

Carpathians and Precarpathians are promising areas for development of extreme tourism in the Ukrainian. Places of the photo hunt development can be: national nature parks Vyzhnytsk, Hutsulshchyna and Carpathian biosphere reserve. Aeronautics is promising to be developed in the area of the canyon valley of the middle reaches of the Dniester River with wonderful views of historic places of Khotyn and Kamenets-Podilskyi fortresses.

Originality and practical value

Ukraine with its resource potential is a country of great opportunities for the organization of active and extreme rest.

The tourist can be attracted with the element of novelty, stress and release of energy excess and the financially availability.

The railway tourist company together with the sports federations can organize the extreme tours [11].

The railway can arrange the delivery to the place of extreme kinds of tourism and accommodation in comfortable cars (among other benefits: savings in hotels and restaurants, essential travel can begin from the moment of boarding the car, accessibility from a financial point of view), and representatives of sports clubs will be responsible for the proper conduct of specific activities.

In the course of the study the list of factors that is included in the economic category «the attractiveness of the route of a tourist trip» was further developed, these factors are: most convenient time of the passenger trip, comfort of rolling stock, the number of stops and attraction sites of historical, natural and cultural heritage that will be used to set the category of the route and predict the economic efficiency of travel.

Conclusions

The world extreme tourism is growing rapidly, but Ukraine is significantly far behind the developed countries [12].

However, with well-organized approach the development of extreme tourism of the domestic tourism market is very promising.

The low level of development the tourism infrastructure and social standards of the population hinders the development of adventure

tourism in Ukraine. According to many domestic experts, there is a great potential for the extreme tourism, which can be opened with the general social and economic development of the State.

In Ukraine the development of such types of extreme tourism, as ballooning, parachute jumping, caving, rafting and safaris is considered promising.

Domestic tourism can be developed with the help of extreme tourism, and with the competent information policy and sufficient level of service the rapid development of international tourism can be expected. The proposed activities will contribute to the increase of incomes of the different levels budgets and the promotion of the country on the world market of tourist services.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Балака, Є. І. Організаційний аспект відродження та розвитку залізничного туризму на основі кластеризації / Є. І. Балака, Г. О. Сіваконева // Технолог. аудит и резервы пр-ва. – 2014. – № 1 (2). – С. 41–44.
2. Дергоусова, А. О. Позиціонування залізничного транспорту на ринку туристичних послуг / А. О. Дергоусова // Економіка. Фінанси. Право. – 2013. – № 12. – С. 4–7.
3. Марценюк, Л. В. Напрямки розвитку внутрішнього туризму в Україні / Л. В. Марценюк // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 6 (54). – С. 23–33. doi: 10.15802/stp2014-/32651.
4. Марценюк, Л. В. Основні засади розвитку транспортного туризму в Україні / Л. В. Марценюк // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 5 (47). – С. 24–32. doi: 10.15802/stp2013-/17963.
5. Перспективи розвитку залізничного туризму України на вузькоколіїних лініях Закарпаття / В. Г. Кузнєцов, П. О. Пшінько, І. В. Кліменко [та ін.] // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – С. 23–33. doi: 10.15802/stp2015-/49196.
6. Познякова, О. В. Подієвий туристський потенціал України як напрям розвитку залізничного туризму / О. В. Познякова // 36. наук. пр. Держ. екон.-технол. ун-ту трансп. Серія: «Економіка і управління». – Київ, 2012. – Вип. 21–22 (1). – С. 290–294.
7. Пшінько, О. Перспективи розвитку залізничного туризму в Україні / О. Пшінько, Р. Вернигора, Р. Коробйова // Укр. залізниці. – 2014. – № 12. – С. 38–42.

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

8. Супонєва, В. П. Розвиток залізничного туризму України та утворення нового підрозділу з управління залізничним туризмом / В. П. Супонєва // Вісн. економіки трансп. і пром-ті : зб. наук.-практ. ст. / Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2009. – Вип. 25. – С. 137–140.
9. Blancheton, B. The three systems of rail tourism: French case / B. Blancheton // Tourism Management Perspective. – 2013. – № 5. – P. 31–40. doi: 10.1016/j.tmp.2012.09.008.
10. Bramwell, B. Tourism collaboration and partnerships: Politics, practice and sustainability / B. Bramwell, B. Lane. – Clevedon : Channel View Publications, 2000. – 343 p.
11. European Tourism 2013: Trends & Prospects [Електронний ресурс]. – 2013. – Режим доступу: <https://abouttourism.wordpress.com>. – Назва з екрана. – Переглянуто : 14.12.2015.
12. Juan, G. B.. Tourism and transport systems in mountain environments: analysis of the economic efficiency of cableways in South Tyrol / G. B. Juan, D., Manuela, P. Manuela // J. of Transport Geography. – 2014. – Vol. 36. – P. 1–11. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2014.02.004.
13. Hannam, K. Developments and key issues in tourism mobilities / K. Hannam, G. Butler, C. M. Paris // Annals of Tourism Research. – 2014. – Vol. 44. – P. 171–185. doi: 10.1016/j.annals.2013.09.010.

Л. В. МАРЦЕНЮК^{1*}

^{1*}Каф. «Економіка і менеджмент», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (093) 934 18 03, ел. пошта gwinform1@rambler.ru, ORCID 0000-0003-4121-8826

НАПРАВЛЕННЯ РАЗВИТИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ТУРИЗМА В УКРАИНЕ

Цель. На мировом рынке туристических услуг экстремальный туризм пользуется большой популярностью, так как он не требует значительных финансовых затрат и позволяет из года в год в несколько раз увеличить пакеты предложений отдыха, связанного с активными путешествиями. В Украине есть значительный потенциал для развития экстремальных видов отдыха, однако он недостаточно развит. Формы экстремального туризма являются малоизвестными для отечественных туристов, поэтому к ним сформировано негативное отношение. Целью статьи является анализ экстремально-курортного потенциала Украины и разработка направлений популяризации экстремального туризма на рынке туристических услуг. Теоретическую и методологическую основу исследования составляют системный анализ проблем обеспечения конкурентоспособности туристической отрасли, теоретические положения экономической науки в области эффективности экстремального туризма и управления туристическими потоками. **Методика.** Автором предложены направления управления туристическими потоками, которые отличаются от существующих расширением сферы услуг туристам на территории Украины. Предложено развитие экстремального туризма с помощью кооперации железнодорожных компаний и спортивных федераций. **Результаты.** В ходе проведения исследования автором доказано, что выполнение поставленных задач будет содействовать: 1) увеличению доходов бюджетов всех уровней от внутреннего экстремального туризма; 2) повышению имиджа страны и украинских железных дорог; 3) повышению доли сферы туризма и курортов в структуре валового внутреннего продукта до уровня развитых стран; 4) доведению количества работников сферы туризма и курортов до уровня развитых стран; 5) созданию эффективной системы мониторинга качества туристических услуг; 6) созданию привлекательного инвестиционного климата для широкого привлечения инвестиций в развитие туристической, инженерно-транспортной и коммунальной инфраструктуры; 7) повышению безопасности туристов, обеспечению действенной защиты их прав, законных интересов и сохранения имущества. **Научная новизна.** Автором приведены теоретическое обобщение и новое решение научной задачи. Она проявляется в разработке теоретических и методологических подходов к необходимости развития экстремального туризма. **Практическая значимость.** Рационально примененные меры по предложенным автором направлениям управления туристическими потоками позволят существенно повысить поступления в бюджет страны от внутреннего туризма.

Ключевые слова: железнодорожный туризм; туристический поток; туристический маршрут; экстремальный туризм; курортный потенциал

Л. В. МАРЦЕНЮК^{1*}

^{1*}Каф. «Економіка та менеджмент», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (093) 934 18 03, ел. пошта rwinform1@rambler.ru, ORCID 0000-0003-4121-8826

НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ЕКСТРЕМАЛЬНОГО ТУРИЗМУ В УКРАЇНІ

Мета. На світовому ринку туристичних послуг екстремальний туризм користується великим попитом, тому що він не потребує значних фінансових витрат та дозволяє з року в рік у декілька разів збільшити пакети пропозицій відпочинку, пов'язаного з активними подорожами. В Україні є значний потенціал для розвитку екстремальних видів відпочинку, проте він недостатньо розвинений. Форми екстремального туризму є маловідомими для вітчизняних туристів, тому до них сформоване негативне ставлення. Метою статті є аналіз екстремально-курортного потенціалу України та розробка напрямків популяризації екстремального туризму на ринку туристичних послуг. Теоретичну та методологічну основу дослідження становлять системний аналіз проблем забезпечення конкурентоспроможності туристичної галузі, теоретичні положення економічної науки в галузі ефективності екстремального туризму й управління туристичними потоками. **Методика.** Автором запропоновано напрямки управління туристичними потоками, які відрізняються від існуючих розширенням сфери послуг туристам на території України. Запропоновано розвиток екстремального туризму за допомогою кооперації залізничних компаній та спортивних федерацій. **Результати.** У ході проведення досліджень автором доведено, що виконання поставлених завдань сприятиме: 1) збільшенню доходів бюджетів усіх рівнів від внутрішнього екстремального туризму; 2) підвищенню іміджу країни та українських залізниць; 3) підвищенню частки сфери туризму і курортів у структурі валового внутрішнього продукту до рівня розвинутих країн; 4) доведенню кількості працівників сфери туризму та курортів до рівня розвинутих країн; 5) створенню ефективної системи моніторингу якості туристичних послуг; 6) створенню привабливого інвестиційного клімату для широкого залучення інвестицій у розвиток туристичної, інженерно-транспортної та комунальної інфраструктури; 7) підвищенню безпеки туристів, забезпеченню дієвого захисту їхніх прав, законних інтересів і збереження майна. **Наукова новизна.** Автором наведено теоретичне узагальнення й нове вирішення наукової задачі. Вона виявляється в розробці теоретичних і методологічних підходів щодо необхідності розвитку екстремального туризму. **Практична значимість.** Рационально застосовані заходи за запропонованими автором напрямками управління туристичними потоками дозволять суттєво підвищити надходження до бюджету країни від внутрішнього туризму.

Ключові слова: залізничний туризм; туристичний потік; туристичний маршрут; екстремальний туризм; курортний потенціал

REFERENCES

1. Balaka Ye.I., Sivakoneva H.O. Orhanizatsiyni aspekt vidrozhennia ta rozvytku zaliznychnoho turyzmu na osnovi klasterizatsii [The organizational aspect of the revival and development of railway tourism, based on clustering]. *Tekhnologicheskiiy audit i rezervy proizvodstva – Technological Audit and Production Reserves*, 2014, no. 1 (2), pp. 41-44.
2. Derhousova A.O. Pozytsonuvannia zaliznychnoho transportu na rynku turystychnykh posluh [Positioning of railway transport in the market of tourist services]. *Ekonomika. Finansy. Pravo – Economy. Finance. Right*, 2013, no. 12, pp. 4-7.
3. Martseniuk L.V. Napriamky rozvytku vnutrishnoho turyzmu v Ukraini. [Directions for the development of domestic tourism in Ukraine]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2014, no. 6 (54), pp. 23-33. doi: 10.15802/stp2014/32651.
4. Martseniuk L.V. Osnovni zasady rozvytku transportnoho turyzmu v Ukraini [Basic principles of the transport tourism development in Ukraine]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, no. 47, pp. 24-32. doi: 10.15802/stp2013/17963.
5. Kuznetsov V.G., Pshinko P.O., Klimenko I.V., Gumenyuk A.V., Zahorulko S.M. Perspektyvy rozvytku zaliznychnoho turyzmu Ukrainy na vuzkokoliinykh liniakh Zakarpattia [Perspectives of Ukrainian Railway Tourism Development of Ukraine on narrow-gauge lines of Zakarpattia]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 4 (58), pp. 23-33. doi: 10.15802/stp2015/49196.
6. Pozniakova O.V. Podiiivyi turystskyi potentsial Ukrainy yak napriam rozvytku zaliznychnoho turyzmu [Event tourism potential of Ukraine as the development of railway tourism]. *Ekonomika i upravlinnia: Zbirnyk*

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

- naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tehnologichnoho unyversytetu transportu* [Economy and Management: Proc. of the State Economic and Technological University of Transport]. Kyiv, 2012, no. 21-22 (1), pp. 290-294.
7. Pshinko O., Vernyhora R., Korobiova R. Perspektyvy rozvytku zaliznychnoho turyzmu v Ukraini [Prospects of Ukrainian Railway Tourism Development]. *Ukrainski zaliznytsi – Ukrainian Railways*, 2014, no. 12, pp. 38-42.
 8. Suponiev V.P. Rozvytok zaliznychnoho turyzmu Ukrainy ta utvorennia novoho pidrozdilu z upravlinnia zaliznychnym turyzmozom [Development of Ukrainian railway tourism and the formation of a new unit for railway tourism]. *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti: Zbirnyk naukovopraktychnykh statei Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu* [Bulletin of Transport and Industry Economics: Proc. of the Ukrainian State Academy of Railway Transport], 2009, issue 25, pp. 137-140.
 9. Blancheton B. The three systems of rail tourism: French case. *Tourism Management Perspective*, 2013, no. 5, pp. 31-40. doi: 10.1016/j.tmp.2012.09.008.
 10. Bramwell B., Lane B. Tourism collaboration and partnerships: Politics, practice and sustainability. Clevedon, Channel View Publications, 2000. 343 p.
 11. European Tourism 2013: Trends & Prospects. 2013. Available at: <https://abouttourism.wordpress.com> (Accessed: 14 Decemder 2015).
 12. Juan G.B., Manuela D., Manuela P. Tourism and transport systems in mountain environments: analysis of the economic efficiency of cableways in South Tyrol. *Journal of Transport Geography*, 2014, vol. 36, pp. 1-11. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2014.02.004.
 13. Hannam, K., Butler G., Paris C. Developments and key issues in tourism nobilities. *Annals of Tourism Research*, 2014, no. 44, pp.171-185.

Prof. V. T. Vecherov, Sc. Tech. (Ukraine); Acc. Prof. O. V. Kakhovsa, Dr. Sc. Econ. (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: Dec. 05, 2015

Received: Feb. 10, 2016

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.463.3.083-047.44

В. М. БУБНОВ¹, И. Ю. КЕБАЛ^{2*}, Н. Б. МАНКЕВИЧ³

¹ООО «Главное специализированное конструкторское бюро вагоностроения им. Валерия Михайловича Бубнова», пл. Машиностроителей, 1, Мариуполь, Украина, 87535, тел. + 38 (0629) 56 08 67, эл. почта bubnov@azovmash.com, ORCID 0000-0003-1957-0292

^{2*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 371 51 12, эл. почта iuk1990.2013@gmail.com, ORCID 0000-0002-8408-8294

³ООО «Главное специализированное конструкторское бюро вагоностроения им. Валерия Михайловича Бубнова», пл. Машиностроителей, 1, Мариуполь, Украина, 87535, тел. +38 (0629) 51 86 43, эл. почта bubnov@azovmash.com, ORCID 0000-0002-7222-7226

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Цель. Увеличение объемов перевозок грузов требует внедрения вагонов нового поколения, которые бы смогли обеспечить все потребности перевозчиков. Но такое внедрение невозможно без обновления ремонтной базы с применением новых технологий и модернизацией ремонтного процесса. Ремонт подвижного состава является ключевым фактором, от которого необходимо отталкиваться при создании новых вагонов, так как не все изобретения возможно внедрять в сегодняшних условиях, когда большинство вагоноремонтных депо морально устарели. Цель – проанализировать возможность повышения эффективности ремонтного процесса путем внедрения новых ремонтных технологий или совершенствования существующих, что позволит повысить не только качество ремонта, но и его скорость. **Методика.** Работы по совершенствованию конструкций грузовых вагонов проводятся многими конструкторскими организациями практически во всех промышленно развитых странах. Это заставляет ремонтные организации (депо и вагоноремонтные заводы) модернизировать ремонтный процесс. Достижение поставленной цели возможно за счет совершенствования технологий ремонта и его реорганизации путем применения гибких поточных технологий, которые на сегодняшний день являются наиболее эффективными при ремонте подвижного состава. **Результаты.** При выполнении анализа проблемы было определено, что существуют вагоны различных конструкций. Большинство вагонов являются универсальными, и их ремонт не вызывает трудностей у вагоноремонтных предприятий. Однако количество специализированных вагонов является также значительным, и технологии их ремонта необходимо совершенствовать. Одной из причин такой необходимости является то, что многие модели (например, вагон-цистерна для перевозки расплавленной серы) предназначены для перевозки опасных грузов, и сбой в работе вагона в момент движения недопустим. **Научная новизна.** Авторами впервые определено направление работ при совершенствовании технологий ремонта специализированных вагонов. **Практическая значимость.** Актуальным при совершенствовании конструкций вагонов является и совершенствование существующей ремонтной базы. Кроме того, технологии ремонта, применяющиеся на сегодняшний день при ремонте вагонов, морально устарели и требуют улучшения. Рассмотренная организация ремонтного процесса имеет практическую ценность и может быть использована как при создании новых ремонтных предприятий, так и при модернизации существующих.

Ключевые слова: технология ремонта; грузовой вагон; вагон-цистерна; технологический процесс

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Введение

Железнодорожный транспорт является основным видом транспорта, осуществляющим большую часть перевозки грузов как универсальных, так и специализированных. Наибольшую часть универсальных вагонов составляют полувагоны, в то время как наибольшее количество специализированных вагонов – это вагоны-цистерны. Ремонт последних является более трудоемким, так как многие специализированные вагоны обладают более сложной конструкцией за счет установки запорной арматуры, определенных сливных устройств, теплоизоляции, тэнов и т.д. Поэтому для обеспечения достаточных объемов ремонта необходима модернизация ремонтного процесса таких вагонов.

Цель

Объемы перевозок грузов требуют внедрения вагонов нового поколения, которые бы смогли обеспечить все потребности перевозчиков. Но такое внедрение невозможно без обновления ремонтной базы с внедрением новых технологий и модернизацией ремонтного процесса. Ремонтопригодность подвижного состава является ключевым фактором, от которого необходимо отталкиваться при создании новых вагонов, так как не все узлы и детали возможно отремонтировать в условиях вагоноремонтных депо, большинство которых морально устарели и требуют совершенствования ремонтного процесса с внедрением новых технологий. Исходя из вышеизложенного, цель исследования – провести анализ возможности повышения эффективности ремонтного процесса путем внедрения новых ремонтных технологий или совершенствования существующих, что позволит повысить не только качество ремонта, но и его скорость.

Методика

Работы по совершенствованию конструкций грузовых вагонов проводятся многими конструкторскими организациями практически во всех промышленно-развитых странах. Это составляет ремонтные организации (депо и вагоноремонтные заводы) модернизировать ремонтный процесс. Достижение поставленной цели

возможно за счет совершенствования технологического ремонта и его реорганизации путем применения гибких поточных технологий, которые на сегодняшний день являются наиболее эффективными при ремонте подвижного состава.

Результаты

Начиная с 1998 г. вместе с увеличением объемов промышленного производства начался рост грузоперевозок. Грузооборот железнодорожного транспорта в период 1998–2008 гг. увеличился в 2 раза. В связи с тем, что в структуре перевозок железнодорожного транспорта значительную часть составляют сырьевые грузы – уголь, нефтяные грузы, железорудная продукция, а также строительные материалы, наибольший недостаток ощущался в полувагонах, как универсальном виде подвижного состава, и цистернах.

На рис. 1 приведена диаграмма, которая показывает процентное соотношение всех типов грузовых вагонов от общего парка. Каждому типу вагонов отвечают по три столбца: левый – процент от общего количества универсальных вагонов; средний – часть, что в настоящее время находится в собственности ператоров; правый – часть, находящаяся в собственности государства. Как мы видим из диаграммы, наибольшее количество из общего парка грузовых вагонов составляют полувагоны и цистерны. Известно, что большинство вагонов находится не в лучшем состоянии, что указывает не только на необходимость разработки новых конструкций вагонов, но и на совершенствование ремонтной базы, которая нуждается в реформировании [1].

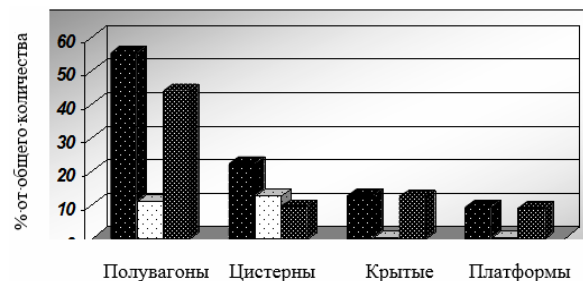


Рис. 1. Распределение грузовых вагонов

Fig. 1. Distribution of freight cars

На сегодняшний день разработано значительное количество различных типов как полу-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

вагонов с разгрузочными люками в полу [14–16, 19], так и глухонных полувагонов [13, 17, 18, 20, 21]. При этом работы по их совершенствованию ведутся большинством вагоностроительных организаций и конструкторских бюро [4, 11], так как мировая промышленность развивается все интенсивней, требуя все больших перевозок различных типов грузов. Жидкие грузы перевозятся преимущественно в вагонах-цистернах. И среди цистерн, как известно, имеются универсальные конструкции, предназначенные для перевозки широкой номенклатуры грузов, например, цистерны для перевозки светлых нефтепродуктов. Но отдельно следует выделить специализированные грузовые вагоны-цистерны для транспортировки ограниченного количества жидких грузов, такие как цистерны для перевозки сжиженного газа, цистерны для перевозки желтого фосфора, цистерны для перевозки расплавленной серы и другие. При этом, если с технологией изготовления и технологией эксплуатации таких специализированных вагонов не возникает никаких особенных проблем, то с технологией ремонта имеются определенные сложности, которые связаны именно с особенностями конструкции этих вагонов и с качеством выполнения ремонта, так как этими вагонами транспортируются опасные вещества. Поэтому совершенствование технологии ремонта специализированных грузовых вагонов представляет собой актуальную научно-прикладную проблему для железнодорожного транспорта. Ведь от уровня технического совершенства и состояния подвижного состава, условий его использования, системы ремонта и обслуживания, в конечном счете, зависит результат деятельности транспорта в целом.

Система технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов инвентарного парка предусматривает комплекс работ, предназначенных для обеспечения стабильной работы вагонного парка, поддержания его технического состояния и повышения эксплуатационной надежности. Многие инженерные и научные организации имеют наработки в направлении совершенствования технических и технологических решений по ремонту и техническому обслуживанию подвижного состава и грузовых вагонов в частности. Так, одними из первых следует отметить работы В. С. Герасимова [3],

Б. В. Быкова [2], В. Е. Пигарева [2], И. Г. Морчиладзе [5], К. В. Мотовилова [6], В. О. Шамагина [22], М. Ф. Арефьева [22], В. Н. Пасько [22], В. М. Меланина [12].

Некоторые авторы рассматривают классические технологии ремонта, такие как стационарный и поточный методы. Стационарный метод заключается в том, что все работы, связанные с ремонтом вагона, выполняются на нескольких (или даже на одном) рабочих местах. Соответственно это влечет за собой большую продолжительность цикла ремонта и, соответственно, низкую производительность. Различают две разновидности стационарного метода:

1. Стационарно-бригадный метод, когда операции всего технологического процесса выполняются на одном рабочем месте одной бригадой рабочих без регламентированного разделения труда между ними. При этом методе детали и узлы, снимаемые с вагона, после ремонта устанавливаются на тот же вагон.

2. Стационарно-узловой метод, когда разборка и сборка вагона осуществляется на одной основной позиции, а ремонт отдельных узлов, разборку и сборку их осуществляют на отдельных специализированных позициях. [12].

Поточный же метод ремонта заключается в том, что весь технологический процесс ремонта подвижного состава разбивается на равные по продолжительности операции, которые располагаются на специализированных рабочих местах в последовательности, соответствующей технологическому процессу. Вагон же перемещается с предыдущей позиции на последующую при помощи конвейера. В вагоноремонтном производстве элементы поточного метода впервые в мире были применены в 1911 г. в Омских вагонных мастерских. В 1912 г. поточный метод применялся при ремонте грузовых вагонов в Нижнеднепровских мастерских. В 1924 г. Тамбовским вагоноремонтным мастерским удалось сократить простой вагонов в ремонте в 4 раза за счет применения поточного метода [12]. Данный метод обладает значительно большей производительностью, чем стационарный. Однако и у него есть определенные недостатки, основным из которых является невозможность ремонта разных типов вагонов на одной поточной линии одновременно. Также тяжело подобрать одинаковые по объему ремонта вагоны для исключения их простоя на

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

определенной позиции. Также в процессе ремонта возможно обнаружение дефектов, не замеченных при предварительной дефектации вагона. Это негативно скажется на продолжительности ремонта не только конкретного вагона, но и всех вагонов, размещенных на этой нитке.

К прогрессивным методам ремонта подвижного состава железных дорог и промышленного транспорта необходимо отнести гибкие поточные технологии, представленные в работах Сенько В. И., Мямлина В. В., Мямлина С. В. [7–9, 23–24]. Также гибкие поточные технологии нашли свое применение в вагоноремонтных предприятиях США [25]. К особенностям этих технологий относится возможность построения логистики ремонта вагонов с максимальным использованием производственных мощностей ремонтных предприятий. И создание условий ремонта вагонов различных конструкций и сложности ремонта в одном потоке за счет формирования маршрута прохождения ремонтных позиций вагонами не только по мере освобождения последующих ремонтных модулей, а с возможностью выполнения маневров по перемещению объектов ремонта при необходимости между ремонтными позициями. То есть простой вагонов исключается за счет их индивидуального перемещения между позициями ремонта. При этом время нахождения вагонов в ремонте, по мнению исследователей этих технологий [7–10], определяется практически временем непосредственно ремонта и транспортировки без времени ожидания, как это происходит при жесткой поточной технологии, когда имеется прямая зависимость между продвижением всех вагонов, находящихся на ремонтной поточной линии. Также гибкие поточные технологии позволяют ремонтировать различные типы вагонов одновременно независимо от различий их конструкции. Так, например, вагон-цистерна для перевозки жидкой серы, имеющий сложную конструкцию кузова за счет установки тэнов для подогрева груза и теплоизоляции, может ремонтироваться одновременно с вагоном-цистерной для перевозки нефтепродуктов и даже одновременно с полувагоном. При жестком поточном методе это невозможно, так как все три типа вагонов имеют различный объем ремонта и, следовательно, различную продолжительность выполнения ремонтных работ.

Гибкие поточные технологии позволяют наиболее эффективно использовать современную технику, трудовые ресурсы, материальную базу, позволяя тем самым получить наибольшее количество отремонтированных вагонов с наименьшими затратами труда на ремонт вагона.

Выбором технологии организация ремонта грузовых вагонов не ограничивается и завершается разработкой практической реализации технологических процессов, маршрутных и операционных карт для ремонта конкретного типа грузового вагона на ремонтном предприятии с учетом конструктивных особенностей специализированных вагонов, а также производственных мощностей и технологического оборудования. Так, в ПКТБ Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна совместно со специалистами ГСКБВ разработаны уникальные технологические процессы по ремонту специализированных вагонов, таких как вагон-цистерна для перевозки сжиженного газа, вагон-цистерна для перевозки жидкой серы и других с постановкой на производство на Дарницком вагоноремонтном заводе [10]. В технологических процессах определен перечень необходимых ремонтных работ для каждого узла вагона: котла, рамы, тележек, устройств разгрузки и т.д. При этом учтены особенности конструкции конкретного типа вагонов, уровень износа его составляющих и вид ремонта (капитальный, деповской и т.д.). Отличительной чертой разработанных технологических процессов является наличие указаний по нанесению защитных покрытий на участки отремонтированных и вновь изготовленных деталей цистерн, недоступных после сборки вагонов, что дает возможность предотвратить их коррозионный износ и разрушение. Также рассмотрена модернизация цистерн, которая заключается в усилении рамы, установке дуг на котел для защиты арматуры и защитных щитов на раму вагона-цистерны. Наличие дуг дает возможность защитить арматуру от удара при перевороте вагона-цистерны. При этом дуги способны выдержать на себе массу полностью загруженной цистерны, предотвращая таким образом разгерметизацию. Установка защитных щитов обеспечивает защиту днищ котлов при аварийных столкновениях от ударов автоцепными приборами или грузом других ваго-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

нов. Такие модернизации проводятся при капитальном ремонте вагонов-цистерн. Если же в капитальный ремонт поступают вагоны, прошедшие модернизацию ранее, и вагоны, которые необходимо модернизировать вместе с ремонтом, то здесь целесообразно применение гибких поточных технологий, так как на жестких поточных линиях вагоны, модернизированные ранее, будут иметь большие простои. То есть гибкие поточные технологии удобны не только при ремонте разных типов вагонов на одном ремонтном предприятии, но и при ремонте одного типа вагонов.

Применение гибких поточных технологий положительно сказывается не только на времени простоя вагона в ремонте, но и на качестве самого ремонта. Ведь если на жестком потоке вагон будет простаивать, то на других ремонтных позициях рабочие будут торопиться, чтобы как можно больше сократить время простоя отремонтированного вагона. А это, как известно, негативно сказывается на качестве выполняемых ремонтных работ.

Необходимо также отметить, что ремонт специализированных цистерн требует повышенной ответственности, так как они предназначены для транспортировки опасных грузов.

Научная новизна и практическая значимость

Создание современного универсального и специализированного подвижного состава и модернизация существующего требует реализации научных и технических решений, направленных на совершенствование ремонтных технологий и реорганизацию ремонтных процессов. Рассмотренная организация ремонтного процесса имеет практическую ценность и может быть использована как при разработках новых ремонтных предприятий, так и при модернизации существующих.

Выводы

Таким образом, рассмотрены основные виды реализации технологии ремонта грузовых вагонов железных дорог и промышленного транспорта, определены преимущества и недостатки определенных технологий ремонта.

Сделан вывод о необходимости учета конструктивных особенностей специализированных вагонов-цистерн при разработке техноло-

гических процессов по деповскому и капитальному ремонту этих вагонов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бараш, Ю. С. Концептуальный подход к реформированию ремонтной базы для грузовых вагонов в современных рыночных условиях / Ю. С. Бараш, Ю. В. Булгакова // *Наук. вісн. НГУ*. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 3. – С. 126–133.
2. Быков, Б. В. Технология ремонта вагонов : учебник / Б. В. Быков, В. Е. Пигарев. – Москва : Желдориздат, 2001. – 559 с.
3. Герасимов, В. С. Технология вагоностроения и ремонта вагонов : учебник для вузов / В. С. Герасимов, И. Ф. Скиба, Б. М. Кернич [и др.] ; под ред. В. С. Герасимова. – Москва : Транспорт, 1988. – 381 с.
4. Кебал, И. Ю. Проектирование грузовых вагонов нового поколения / И. Ю. Кебал, С. В. Мямлин // *Подвижной состав XXI века: инновации в грузовом вагоностроении : тез. междунар. науч.-техн. конф. (25.06–28.06.2014)* / Петербург. гос. ун-т путей сообщ. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 3–25
5. Морчиладзе, И. Г. Железнодорожные цистерны : учеб. пособие / И. Г. Морчиладзе, А. П. Никодимов, М. М. Соколов. – Москва : ИБС-Холдинг, 2006. – 516 с.
6. Мотовилов, К. В. Технология производства и ремонта вагонов : учебник для вузов ж.-д. трансп. / К. В. Мотовилов, В. С. Лукашук, А. А. Петров. – Москва : Маршрут, 2003. – 382 с.
7. Мямлин, В. В. Обоснование алгоритма решения задачи векторной оптимизации по двум показателям при выборе гибкой технологии ремонта вагонов / В. В. Мямлин, А. А. Босов, С. В. Мямлин // *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 36. – С. 54–57.
8. Мямлин, В. В. Повышение надежности работы вагоноремонтных потоков за счет формирования их гибкости / В. В. Мямлин, С. В. Мямлин // *Проблемы безопасности на транспорте : материалы VI междунар. науч.-практ. конф. (29.11–30.11.2012)* / Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель, 2012. – С. 92–93.
9. Мямлин, В. В. Теоретические основы создания гибких поточных производств для ремонта подвижного состава : монография / В. В. Мямлин. – Днепропетровск : ЧФ «Стандарт-Сервис», 2014. – 380 с.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

10. Мямлін, С. В. Виконання капітального ремонту з подовженням терміну служби цистерн для перевезення аміаку / С. В. Мямлін, Ю. В. Кебал, С. Р. Колесников // Проблемы и перспективы развития ж.-д. трансп. : тез. 71 междунар. науч.-практ. конф. (14.04–15.04.2011) / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – С. 93–94.
11. Мямлин, С. В. Крышка люка универсального полувагона / С. В. Мямлин, Д. Н. Барановский, И. Ю. Кебал // Бюл. науч. работ Брянск. фил. МИИТ : сб. науч. работ / Моск. гос. ун-т путей сообщ., Брянск. фил. – Брянск, 2015. – Вып. 7. – С. 45–48.
12. Организация, планирование и управление на вагоноремонтных предприятиях : учебник для вузов ж.-д. трансп. / В. М. Меланин, С. Н. Коржин, Р. Ф. Канивец [и др.] ; под ред. В. М. Меланина. – Москва : ГОУ «Учебно-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп.», 2008. – 383 с.
13. Пат. 2391239 С1 Российская Федерация, МПК В 61 D 3/00, В 61 F 1/00. Грузовой полувагон с глухим полом / Иванов А. О., Коссов В. С., Чаркин В. А., Ноздрачев В. А., Шабеко А. П. ; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские железные дороги». – № 2009119200/11 ; заявл. 21.05.2009 ; опубл. 10.06.2010. – 6 с.
14. Пат. 2194640 С2 Российская Федерация, МПК В 61 D 3/00, В 61 D 7/00. Железнодорожный полувагон / Зоценко А. Г., Герман В. П., Демин К. П., Крючков А. В., Ефимов В. П., Малых Н. А., Андронов В. А., Даниленко Д. В., Клещевников В. А., Головизнин Б. Л., Баженовских Ю. М., Левин А. Б., Шишков В. А., Базилевич И. В., Бесчастный А. В., Шнек В. А., Шихалев В. А. ; заявитель и патентообладатель ГУП «ПО Уралвагонзавод» им. Ф.Э. Дзержинского. – № 2000126453/28 ; заявл. 20.10.2000 ; опубл. 20.12.2002. – 5 с.
15. Пат. 74610 U1 Российская Федерация, МПК В 61 D 17/06, В 61 D 3/00. Железнодорожный полувагон / Лапандин В. Д., Якин А. И., Волков В. А., Струпаев О. В., Подъяпольский Е. В. ; заявитель и патентообладатель Лапандин В. Д., Якин А. И., Волков В. А., Струпаев О. В., Подъяпольский Е. В. – № 2008111923/22 ; заявл. 31.03.2008 ; опубл. 10.07.2008. – 9 с.
16. Пат. 130565 U1 Российская Федерация, МПК В 61 D 3/00, В 61 F 1/02. Железнодорожный полувагон / Подъяпольский Е. В. ; заявитель и патентообладатель ООО «Новокузнецкий вагоностроительный завод». – № 2013114927/11 ; заявл. 03.04.2013 ; опубл. 27.07.2013. – 7 с.
17. Пат. 2137637 С1 Российская Федерация, МПК В 61 D 17/04. Железнодорожный полувагон / Потапов П. Ф., Зоценко А. Г., Крючков А. В., Герман В. П., Баженовских Ю. М., Галиева И. В., Шихалев В. А. ; заявитель и патентообладатель ГПО «Уралвагонзавод» им. Ф. Э. Дзержинского. – № 98106947/28 ; заявл. 13.04.1998 ; опубл. 20.09.1999. – 4 с.
18. Пат. 2137638 С1 Российская Федерация, МПК В 61 D 17/04. Железнодорожный полувагон / Потапов П. Ф., Зоценко А. Г., Крючков А. В., Герман В. П., Баженовских Ю. М., Цымбал В. Д., Верник В. С. ; заявитель и патентообладатель ГПО «Уралвагонзавод» им. Ф. Э. Дзержинского. – № 98107456/28 ; заявл. 13.04.1998 ; опубл. 20.09.1999. – 5 с.
19. Пат. 123383 U1 Российская Федерация, МПК В 6 D 3/00, В 61 D 17/06, В 61 D 17/08. Железнодорожный универсальный полувагон / Собержанский Н. А., Жакалов А. В. ; заявитель и патентообладатель Рижское Вагоностр. Предприятие «Балтия». – № 2012137070/11 ; заявл. 30.08.2012 ; опубл. 27.12.2012. – 4 с.
20. Пат. 6119 U Україна, МПК В 61 D 17/00. Залізничний піввагон / Баясний Е. І., Горюлько І. О., Дячук М. І., Спик В. Г., Криворучко С. Г., Пятковський І. С., Харченко С. І. ; заявник та патентовласник «ДП «Дарницький вагоноремонтний завод». – № 20040907948 ; заявл. 30.09.2004 ; опубл. 15.04.2005. – 3 с.
21. Пат. 2273575 С2 Российская Федерация, МПК В 61 D 3/00, В 61 D 17/00, В 61 F 1/02. Кузов железнодорожного полувагона с глухим полом / Приходько В. И., Прохоров В. М., Коробка Б. А., Шкабров О. А., Назаренко Л. И., Маначинский О. В., Можейко Е. Р., Шевченко Р. Ф., Фомин А. И., Шильев В. Н. ; заявитель и патентообладатель ОАО «КВСЗ». – № 2004114034/11 ; заявл. 12.05.2004 ; опубл. 01.01.2000. – 6 с.
22. Шамагін, В. О. Технологія ремонту рухомого складу : навч. посіб. / В. О. Шамагін, М. Ф. Ареф'єв, В. Н. Пасько. – Київ : Дельта, 2008. – 479 с.
23. Myamlin, V. V. Asynchronous flexible stream of wagon repair and modeling of its functioning process as aggregated system / V. V. Myamlin // TRANSBALTICA 2009 : Proc. of the 6th Intern. Sci. Conf. (22.04–23.04.2009) / Vilnius Gediminas Technical University. – Vilnius, 2009. – P. 173–178.
24. Myamlin, V. V. Searching of the ways of definition of the rational configuration of divisions of the car-repair facilities on the basis of the flexible stream on the design stage / V. V. Myamlin // ТЕКА. Commiss. of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2013. – Vol. 13, № 4. – P. 167–173.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

25. Pat. 6769162 US, МПК⁷, В 23 Р 6/00. Railcar maintenance process / Barich D. J., Barich D. M., Donahue T. P. ; assignee General Electric Company. – № 09/725656 ; Filed 29.11.2000 ; Date of Pat. 03.08.2004. – 16 p.

В. М. БУБНОВ¹, І. Ю. КЕБАЛ^{2*}, М. Б. МАНКЕВИЧ³

¹ТОВ «Головне спеціалізоване конструкторське бюро вагонобудування ім. Валерія Михайловича Бубнова», пл. Машинобудівників, 1, Маріуполь, Україна, 87535, тел. + 38 (0629) 56 08 67, ел. пошта bubnov@azovmash.com, ORCID 0000-0003-1957-0292

^{2*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. / факс +38 (056) 371 51 12, ел. пошта iuk1990.2013@gmail.com, ORCID 0000-0002-8408-8294

³ТОВ «Головне спеціалізоване конструкторське бюро вагонобудування ім. Валерія Михайловича Бубнова», пл. Машинобудівників, 1, Маріуполь, Україна, 87535, тел. + 38 (0629) 51 86 43, ел. пошта bubnov@azovmash.com, ORCID 0000-0002-7222-7226

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ РЕМОНТА СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Мета. Підвищення обсягів перевезень вантажів вимагає впровадження вагонів нового покоління, які б змогли забезпечити всі потреби перевізників. Але таке впровадження неможливе без оновлення ремонтної бази з застосуванням новітніх технологій та модернізацією ремонтного процесу. Ремонт рухомого складу є ключовим фактором, від якого необхідно відштовхуватися при створенні нових вагонів, бо не всі винаходи можливо впроваджувати в сьогоденні умови, коли більшість вагоноремонтних депо морально застаріли. Мета – проаналізувати можливість підвищення ефективності ремонтного процесу шляхом впровадження нових ремонтних технологій або вдосконалення існуючих, що дозволить підвищити не тільки якість ремонту, але і його швидкість. **Методика.** Роботи з удосконалення конструкцій вантажних вагонів проводяться багатьма конструкторськими організаціями практично у всіх промислово розвинених країнах. Це змушує ремонтні організації (депо і вагоноремонтні заводи) модернізувати ремонтний процес. Досягнення цієї мети можливо за рахунок вдосконалення технологій ремонту та його реорганізації шляхом застосування гнучких поточних технологій, які на сьогоднішній день є найбільш ефективними при ремонті рухомого складу. **Результати.** При виконанні аналізу проблеми було визначено, що існують вагони різних конструкцій. Більшість вагонів є універсальними, та їх ремонт не викликає труднощів у вагоноремонтних підприємств. Однак кількість спеціалізованих вагонів є також значною, й технології їх ремонту необхідно вдосконалювати. Однією з причин такої необхідності є те, що багато моделей (наприклад, вагон-цистерна для перевезення розплавленої сірки) призначені для перевезення небезпечних вантажів, і збій у роботі вагона в момент руху неприпустимий. **Наукова новизна.** Авторами вперше визначено напрямки робіт при вдосконаленні технологій ремонту спеціалізованих вагонів. **Практична значимість.** Актуальним при вдосконаленні конструкцій вагонів є й удосконалення існуючої ремонтної бази. Крім того, технології ремонту, які застосовуються на сьогоднішній день при ремонті вагонів, морально застаріли та вимагають удосконалення. Розглянута організація ремонтного процесу має практичну цінність та може бути використана як при розробках нових ремонтних підприємств, так і при модернізації існуючих.

Ключові слова: технологія ремонту; вантажний вагон; вагон-цистерна; технологічний процес

V. M. BUBNOV¹, I. YU. KEBAL^{2*}, M. B. MANKEVYCH³

¹GSKBV PJSC «Azovmash», Mechanical Engineers Sq., 1, Mariupol, Ukraine, 87535, tel. + 38 (0629) 56 08 67, e-mail bubnov@azovmash.com, ORCID 0000-0003-1957-0292

^{2*}Dep. «Cars and Cars Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 371 51 12, e-mail iuk1990.2013@gmail.com, ORCID 0000-0002-8408-8294

³Head Office of GSKBV PJSC «Azovmash», Mechanical Engineers Sq., 1, Mariupol, Ukraine, 87535, tel. + 38 (0629) 51 86 43, e-mail bubnov@azovmash.com, ORCID 0000-0002-7222-7226

REPAIR TECHNOLOGY IMPROVEMENT OF SPECIALIZED FREIGHT CARS

Purpose. The volume of cargo transportation demands the introduction of a new generation of cars that would be able to provide all the needs of carriers. But this is impossible without the implementation of renovation repair facilities with the introduction of new technologies and modernization of the repair process. Repair of rolling stock is a key factor that must proceed with the establishment of new cars, as not all of the inventions may be repaired in car-repair depots, most of which are obsolete. The purpose is to analyze the possibility of increasing the efficiency of the repair process by introducing new repair technologies or improving the existing ones. It will improve not only the quality of the repair, but also its rate. **Methodology.** Works on improving the designs of freight cars are held by many design organizations in almost all industrialized countries. It makes repair organizations (depots and car-repair plants) to upgrade the repair process. Achievements of this goal is possible by improving the technology renovation and reorganization through the use of flexible flow technologies, which to date are the most effective in the repair of rolling stock. **Findings.** When performing the analysis it was determined that there are different designs of cars. More of cars are all-purpose and their repair does not cause difficulties for car-repair business. However, the number of specialized cars is also significant, and the technology of their repair should be improved. One of the reasons is that many models, such as tank wagons for the carriage of sulfur, are intended for the carriage of dangerous goods and their failure at the time of motion is not permitted. **Originality.** Firstly the authors have defined direction at improving technologies of repair specialized cars. **Practical value.** Actual improvement in the construction of cars is to improve the existing repair facilities. In addition, the repair technology using nowadays when repairing cars is obsolete and requires improvement. Considered organization of the repair process is of practical value and can be used both in-time development of new repair facilities and the modernization of existing ones.

Keywords: repair technology; freight car; tank-wagon; processing

REFERENCES

1. Barash Yu.S., Bulgakova Yu.V. Kontseptualnyy podkhod k reformirovaniyu remontnoy bazy dlya gruzovykh vagonov v sovremennykh rynochnykh usloviyakh [The conceptual approach to the reform of repair facilities for freight cars in modern market conditions]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* [Bulletin of National Mining University], 2013, issue 3, pp. 126-133.
2. Bykov B.V., Pigarev V.Ye. *Tekhnologiya remonta vagonov* [Cars repair technology]. Moscow, Zheldorizdat Publ., 2001. 559 p.
3. Gerasimov V.S., Skiba I.F., Kernich B.M. *Tekhnologiya vagonostroeniya i remonta vagonov* [Technology of car-building and repairing]. Moscow, Transport Publ., 1988. 381 p.
4. Keбал I.Yu., Myamlin S.V. Proektirovaniye gruzovykh vagonov novogo pokoleniya [Designing the freight cars of new generation]. *Tezisy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Podvizhnoy sostav xxi veka: innovatsii v gruzovom vagonostroyenii (25.06–28.06.2014)»* [Proc. of the Intern. Sci. and Technical Conf. «Rolling Stock of XXI Century: Innovation in the Freight Car-Building»]. Saint-Petersburg, 2014, pp. 3-25.
5. Morchiladze I.G., Nikodimov A.P., Sokolov M.M. *Zheleznodorozhnyye tsisterny* [Cistern cars]. Moscow, IBS-Kholding Publ., 2006. 516 p.
6. Motovilov K.V., Lukashuk V.S., Petrov A.A. *Tekhnologiya proizvodstva i remonta vagonov* [Technology of cars production and repair]. Moscow, Marshrut Publ., 2003. 382 p.
7. Myamlin V.V., Bosov A.A., Myamlin S.V. Obosnovaniye algoritma resheniya zadachi vektornoy optimizatsii po dvum pokazatelyam pri vybore gibkoy tekhnologii remonta vagonov [Generalization algorithm of problem solution for vector optimization through two indexes and choose flexible technology for cars repair]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 54-57.
8. Myamlin V.V., Myamlin S.V. Povysheniye nadezhnosti raboty vagonoremontnykh potokov za schet formirovaniya ikh gibkosti [Improving the reliability of the cars repair flows due to formation of their flexibility]. *Materialy VI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy bezopasnosti na transporte (29.11–30.11.2012)»* [Proc. of VI Intern. Sci. And Pract. Conf. «Transport Safety»]. Gomel, 2012, pp. 92-93.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

9. Myamlin V.V. *Teoreticheskiye osnovy sozdaniya gibkikh potochnykh proizvodstv dlya remonta podvizhnogo sostava* [The theoretical basis for the creation of flexible production lines for the repair of rolling stock]. Dnepropetrovsk, Standart-Servis Publ., 2014. 380 p.
10. Miamlin S.V., Keбал Yu.V., Kolesnykov S.R. *Vykonannya kapitalnoho remontu z podovzhenniam terminu sluzhby tsystern dlia perevezennia amiaku* [Overall repair performance with increase the service life of tanks for ammonia transportation]. *Tezisy 71 mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta» (14.04–15.04.2011)»* [Proc. of 71st Intern. Sci. and Pract. Conf. «Questions and prospects of railway transport development»]. Dnipropetrovsk, 2011, pp. 93-94.
11. Myamlin S.V., Baranovskiy D.N., Keбал I.Yu. *Kryshka lyuka universalnogo poluvagona* [The roof-hatch cover of general-purpose gondola car]. *Byulleten nauchnykh rabot Bryanskogo filiala MIIT: sbornik nauchnykh rabot* [Bulletin of research, Bryansk branch of MIIT]. Bryansk, 2015, issue 7, pp. 45-48.
12. Melanin V.M., Korzhin S.N., Kanivets R.F. *Organizatsiya, planirovaniye i upravleniye na vagonoremontnykh predpriyatiyakh* [Organization, planning and management at car-repair enterprises]. Moscow, GOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2008. 383 p.
13. Ivanov A.O., Kossov V.S., Charkin V.A., Nozdracheva V.A., Shabeko A.P. *Gruzovoy poluvagon s glukhim polom* [Freight gondola car with solid floor]. Pat. RF, no. 2009119200/11, 2009.
14. Zotsenko A.G., German V.P., Demin K.P., Kryuchkov A.V., Yefimov V.P., Malykh N.A., Andronov V.A., Danilenko D.V., Kleshchevnikov V.A., Goloviznin B.L., Bazhenevskikh Yu.M., Levin A.B., Shishkov V.A., Bazilevich I.V., Beschastnyy A.V., Shnek V.A., Shikhalev V. A. *Zheleznodorozhnyy poluvagon* [Railway gondola car]. Patent RF, no. 2000126453/28, 2002.
15. Lapandin V.D., Yakin A.I., Volkov V.A., Strupalev O.V., Podyapolskiy Ye.V. *Zheleznodorozhnyy Poluvagon* [Railway gondola car]. Pat. RF, no. 2008111923/22, 2008.
16. Podyapolskiy Ye.V. *Zheleznodorozhnyy Poluvagon* [Railway gondola car]. Pat. RF, no. 2013114927/11, 2013.
17. Potapov P.F., Zotsenko A.G., Kryuchkov A.V., German V.P., Bazhenevskikh Yu.M., Galieva I.V., Shikhalev V.A. *Zheleznodorozhnyy Poluvagon* [Railway gondola car]. Pat. 98106947/28, 1999.
18. Potapov P.F., Zotsenko A.G., Kryuchkov A.V., German V.P., Bazhenevskikh Yu.M., Tsybmal V.D., Vernik V.S. *Zheleznodorozhnyy Poluvagon* [Railway gondola car]. Pat. 98107456/28, 1999.
19. Soberzhanskiy N.A., Zhakalov A.V. *Zheleznodorozhnyy universalnyy poluvagon* [General-purpose gondola car]. Pat. 2012137070/11, 2012.
20. Baliasnyi E.I., Horulko I.O., Diachuk M.I., Yepik V.H., Kryvoruchko S.H., Piatkovskiy I.S., Kharchenko S.I. *Zaliznychnyi pivvahn* [Railway gondola car]. Pat. 20040907948, 2005.
21. Prihodko V.I., Prokhorov V.M., Korobka B.A., Shkabrov O.A., Nazarenko L.I., Manachinskiy O.V., Mozheyko Ye.R., Shevchenko R.F., Fomin A.I., Shilyaev V.N. *Kuzov zheleznodorozhnogo poluvagona s glukhim polom* [Body of a railway gondola car with a blind floor]. Pat. 2004114034/11, 2004.
22. Shamahin V.O., Arefiev M.F., Pasko V.N. *Tekhnologiya remontu rukhomoho skladu* [Rolling stock repair technology]. Kyiv, Delta Publ., 2008. 479 p.
23. Myamlin V.V. Asynchronous flexible stream of wagon repair and modeling of its functioning process as aggregated system. *Transbaltica 2009: Proc. of the 6th Intern. Sci. Conf. (22.04–23.04.2009)*. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius, 2009, pp. 173-178.
24. Myamlin V.V. Searching of the ways of definition of the rational configuration of divisions of the car-repair facilities on the basis of the flexible stream on the design stage. *TEKA. Commiss. of Motorization and Energetics in Agriculture*, 2013, vol. 13, no. 4, pp. 167-173.
25. Barich D.J., Barich D.M., Donahue T.P. Railcar maintenance process; assignee General Electric Company. Pat. 6769162 US, МПК⁷, B 23 P 6/00. no. 09/725656, 2004. 16 p.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. С. В. Мямлиным (Украина); д.т.н., проф. О. А. Бейгулом (Украина)

Поступила в редколлегию 04.11.2015

Принята к печати 02.02.2016

УДК 629.42.016.2/5

Д. М. КИСЛИЙ^{1*}

^{1*}Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. + 38 (066) 625 18 59,
ел. пошта dmitriy.kisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЗАОЩАДЖУЮЧИХ РЕЖИМІВ
ВЕДЕННЯ ПОЇЗДІВ

Мета. Тягові розрахунки з визначенням енергозаощаджуючих траєкторій передбачають пошук раціональної залежності витрат енергоресурсів із часом ходу поїзда. При виборі енергозаощаджуючих траєкторій руху поїзда та при розробці режимних карт ведення поїздів необхідно враховувати змінні параметри, такі як: профіль ділянки, масу поїзда, серію локомотива та ін. При зростанні швидкості руху відбувається збільшення опору руху, який пропорційний квадрату швидкості, що призводить до підвищення витрат паливно-енергетичних ресурсів. Навпаки, зниження витрат через зменшення швидкості руху призводять до збільшення часу ходу поїзда, який має бути узгодженим із графіком руху та іншими техніко-економічними параметрами, залежними від швидкості руху. В статті розглянуто один із способів зменшення витрат енергоресурсів на тягу поїздів. Метою статті є зменшення витрат енергоресурсів за рахунок визначення енергозаощаджуючих режимів керування локомотивом. Це відбувається за умови оптимізації функції керуючих впливів по часу ходу поїзда та витраті енергоресурсів при веденні поїзда з моменту закінчення розгону до переходу на режим вибігу. **Методика.** Методика вибору енергозаощаджуючої траєкторії руху поїзда та управління потужністю електровозів та тепловозів із електричною передачею передбачає розрахунок багатоваріантних траєкторій із варіативними вихідними даними параметрів складу та поїзної ситуації. Методика враховує математичні методи рівномірного пошуку та параметричної оптимізації. Для рівномірності руху необхідно, щоб прискорюючі сили врівноважували сповільнюючі. **Результати.** На підставі багатоваріантних розрахунків удосконалено алгоритм визначення енергозаощаджуючих траєкторій руху поїзда, побудовано багатопараметричну функцію управління потужністю локомотива, яка дозволяє зменшити витрати енергоресурсів від 11 до 13 %, залежно від маси поїзда та поїзної ситуації. **Наукова новизна.** Автором отримані енергозаощаджуючі функції управління тягою локомотива для відповідних рівномірних швидкостей, які залежать від маси поїзда та ухилу. **Практична значимість.** На відміну від існуючих розробок раціонального ведення поїздів, дана функція потребує значно менше машинного часу при високій точності розрахунків. Це дає можливість її впровадження в бортову систему керування локомотивом та економії енергоресурсів.

Ключові слова: тягові розрахунки; енергоефективність ведення поїздів; кінетична енергія; управління потужністю; параметрична оптимізація

Вступ

Варіантів режимів ведення поїзда під час експлуатації може бути безліч, оскільки вони визначаються багатьма факторами. Це профіль колії, втрати в тягових двигунах, розташування сигналів, сигнальних знаків та ін. Багато факторів мають нестійкий характер, які впливають на режим ведення поїзда, а отже, й на енергетичні витрати. Тому ідеального повторення одного й того ж режиму ведення поїзда домогтися практично неможливо. Витрата енергоресурсів на тягу поїзда в основному залежить від режиму його ведення по ділянці. Розв'язання задачі оптимізації витрат енергії на переміщення поїзда дає можливість підвищення економічної ефективності при здійсненні перевізного процесу.

Постановка проблеми. Рівень раціональності режимів ведення поїзда можна оцінювати різними методиками та показниками, серед яких є відношення витрат енергоресурсів до часу ходу поїзда (хвилинна витрата палива). Мінімізувати цей показник можна зниженням сили тяги локомотива, що призводить до збільшення часу ходу поїзда. Але тим самим створюється умова зменшення технічної швидкості. Серед множини варіантів керуючих впливів необхідно обрати той, який буде забезпечувати суттєве зменшення витрат енергоресурсів при незначному збільшенні часу ходу поїзда.

Аналіз досліджень і публікацій. Оптимізацію керування рухом поїзда за допомогою класичного варіаційного числення вперше у СРСР

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

досліджував Ю. П. Петров [17]. Умови оптимальності ним були сформульовані у формі рівнянь Ейлера. За умови, що сила тяги може змінюватися безперервно, а коефіцієнт корисної дії тягового привода локомотива постійний, було встановлено, що оптимальна траєкторія зазвичай складається з ділянок руху по екстремалі, на якій швидкість повинна бути сталою, та ділянок руху при обмеженнях або на керування, або на швидкість

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{mv^2}{2} \right) + \omega v = \eta P,$$

де m – маса складу; η – ККД передачі від первинного двигуна до рушійних коліс локомотива; P – потужність.

Пізніше вченими активно розроблялися алгоритми оптимізації режимів керування, де теоретичне рішення виконувалося за допомогою принципу максимуму Л. С. Понтрягіна або методом динамічного програмування Р. Беллмана [3].

Принцип максимуму Понтрягіна на відміну від класичного варіаційного обчислення дозволяє розв'язувати задачі управління, в яких на керуючі параметри накладені обмеження, хоча зазвичай заздалегідь обумовлюється низка властивостей рішення. Завдяки цьому принцип максимуму є основним математичним прийомом, що використовується при розрахунку оптимального управління в багатьох важливих завданнях техніки [16, 18].

Метод Беллмана базується на принципі оптимальності «Оптимальна стратегія управління має властивість: які б не були первинний стан та рішення в початковий момент, наступні рішення повинні складати оптимальну стратегію управління відносно стану, що отриманий на початковій стадії процесу» [4]. Зниження витрат енергоресурсів за цим методом виконується мінімізацією цільової функції управління потужністю локомотива. Задача мінімізації спрощується при збільшенні кількості обмежень на рівняння руху поїзда за рахунок зменшення кількості наближень

$$f(v, t, p) = \sum_{i=1}^n \Delta e_i(v_i, t_i, p_i) \rightarrow \min,$$

де v – швидкість руху; n – кількість етапів розв'язання рівняння руху поїзда; Δe_i – витрата енергоресурсів на i -му кроці рішення.

В роботі [7] запропоновано метод оптимальності за адитивним критерієм. В рівнянні руху поїзда складовою частиною є перегрів обмоток тягових електричних машин у вигляді

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{-\tau + \tau_\infty(v, u)}{T(v, u)},$$

де τ_∞ – перегрів при встановленому режимі;

$T(v, u)$ – стала часу.

В цьому методі алгоритм знаходження оптимального управління складається з елементарних операцій Δ_k , які складають область B . Для області B визначається оптимальна траєкторія X , яка перевіряється на якість управління $I = I[X, u]$. Опис елементарної операції $\Delta(B_k)$ виконано нижченаведеними методами:

- метод різницьових рівнянь;
- оптимальний по швидкодії;
- ковзаючий режим (пилоподібний);
- ковзаючий режим з обмеженням амплітуди;
- метод лінеаризації.

В [8] розглянуто оптимізацію тягових розрахунків за мінімальними значеннями двох показників витрати часу на переміщення поїзда t та роботи сил опору руху A

$$t = \int_{s_1}^{s_2} ds/v(s) \rightarrow \min;$$

$$A = \int_{s_1}^{s_2} \omega(v) ds \rightarrow \min.$$

Оскільки при управлінні тягою по швидкодії $u_1(s)$ витрата часу буде мінімальною, то існує управління $u_2(s)$ із загальної множини $u(s) \in U$, при якому робота є мінімальною $A_2[u_2] = \min A[u]$. Під час розгляду непорівнюваних варіантів розв'язання рівняння руху поїзда V_α складається з множини траєкторій, серед яких існує оптимізована крива V^P . Отже, при $t_2 < \underline{t}$ множина $V_\alpha(t_2)$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

обмежена, опукла та компактна. При цьому оптимізація зводиться до розв'язання двох задач:

- виконання тягових розрахунків при керуванні по швидкодії;
- мінімізації сил опору руху поїзда при заданому часові ходу.

Задачу раціоналізації тягових розрахунків за методом непорівнюваних варіантів також розглянуто в [6]. Умовою раціональності режиму виступає мінімізація часу ходу поїзда та роботи сил опору руху

$$\left(\begin{matrix} t[v(s)] \\ A[v(s)] \end{matrix} \right) \rightarrow \min.$$

Першим етапом визначається максимально можлива швидкість руху по ділянці з врахуванням всіх обмежень $v_{\max}(s)$, $s \in [0, l]$, що забезпечує мінімальний час ходу поїзда. Наступною розраховується множина траєкторій

$$\tilde{V} = \{v(s) : v(s) = \alpha \cdot v_{\max}(s), s \in [0, l]\}.$$

Початкова швидкість v_0 задається у вигляді

$$v_0 = \max_{0 \leq s < l} v_{\max}(s)$$

та виконується побудова швидкості $v_*(s | \alpha, v_0)$:

$$v_*(s | \alpha, v_0) = \begin{cases} v_{\max}(s), & \text{якщо } v_{\max}(s) < v_0; \\ v_0 + \alpha(v_{\max} - v_0), & \text{якщо } v_{\max}(s) \geq v_0. \end{cases}$$

Параметр α змінюється в межах $0 \leq \alpha \leq 1$. Характер множини траєкторій $V_* = \{v_*(s | \alpha, v_0) : 0 \leq \alpha \leq 1; v_0 \in [\underline{v}, \bar{v}]\}$ наведено на рис. 1.

Вибір раціональної траєкторії з множини непорівнюваних варіантів траєкторій виконується розв'язанням задачі на умовний екстремум [5]

$$\sum_{i=1}^n A_i(t_i) \rightarrow \min.$$

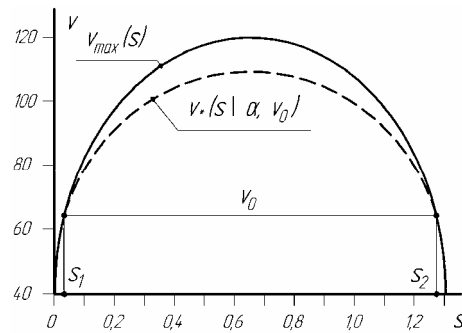


Рис. 1. Один з варіантів $v_*(s | \alpha, v_0)$ при фіксованому значенні α та v_0

Fig. 1. One of the variants $v_*(s | \alpha, v_0)$ at a fixed value α and v_0

Цей метод дозволив створити апаратно-програмний комплекс визначення індивідуальних раціональних режимів ведення.

В роботах [12, 13] автор запропонував метод зниження енерговитрат на тягу поїздів, що базується на алгоритмах динамічного програмування з обмеженням часу ходу поїзда, що заданий графіком руху з урахуванням напруги контактної мережі

$$A_e = \int_{s_n}^{s_k} \left[\frac{1}{\eta_m} \cdot F - \eta_p k_e R \right] ds,$$

де η_m , η_p – відповідно ККД локомотива в режимі тяги та рекуперації; k_e – коефіцієнт розсіювання енергії в реостатах при відсутності приймачів.

З урахуванням керуючих впливів отримано залежність

$$A_e = \frac{P + Q}{\eta_m \cdot \xi} \int_{s_n}^{s_k} \left[u_f \cdot f_{\max}(v) - \eta \cdot u_r \cdot r_{\max}(v) \right] ds,$$

де u_f , u_r – керуючі впливи відповідно.

В подальшому в роботі [15] автори запропонували систему автоматичного ведення поїздів з використанням ЕОМ та принципу максимуму в задачах динамічного програмування оптимального руху поїздів.

Система відслідковує заданий програмний час ходу поїзда в функції пройденого шляху [25].

Визначення поздовжніх сил поїзда визначається шляхом розв'язання диференційного

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

рівняння руху поїзда для центру мас введенням коефіцієнтів при множниках сили тяги $f(v)$ та гальмування $b(v)$

$$v \frac{dv}{ds} = u_f \cdot f(v) - u_b \cdot b(v) - \omega(v) - g(s),$$

де $g(s)$ – поздовжні сили поїзда в координаті s .

Для отримання значення позиції контролера машиніста відповідні коефіцієнти апроксимуються по значенню потужності локомотива.

В роботі [15] запропоновано коригування часу ходу поїзда по середній швидкості з врахуванням графікового руху поїздів, що прямують попереду й позаду шляхом регулювання перервної сили тяги (між включеннями ТЕД). Також в [2] враховано коефіцієнт повернення електричної енергії η , який визначено як математичне очікування для даної лінії.

В роботі [19] розглянуто модель, яка описує мінімум узагальненої енергії

$$\Delta J = \int_s^{s+\Delta s_i} H^*(s, v, z) ds,$$

де H^* – узагальнена сила тяги; z – позначення похідної dv/ds .

Отримана функція $v(s)$ при перерахунку з прискорюючо-сповільнюючих сил H^* є ступеневою з інтервалом Δs , а огинаюча є оптимальною траєкторією.

В математичній моделі поїзда, яку запропонували в [11], наводиться рівняння руху поїзда у вигляді функції, яка не включає масу складу Q як параметр, що впливає на питому прискорюючу силу

$$\bar{f}_{ky} = \begin{cases} \frac{1000 \cdot \psi_k(v) \cdot k_p}{1 + k_p} & \text{при обмеженні по} \\ & \text{зчепленню;} \\ F_k \left(\frac{v}{v_p} \right) \frac{1000 \cdot \psi_k(v) \cdot k_p}{(1 + k_p) k_F \cdot \beta_{\min}} & \text{при обмеженні} \\ & \text{граничною силою тяги,} \end{cases}$$

де β_{\min} – найбільший ступінь регулювання збудження; k_p – коефіцієнт маси локомотива, $k_p = P/Q$; k_F – коефіцієнт сили тяги, $k_F = F_{34}/F_{02}$.

При використанні цієї моделі для конкретної залізничної лінії при відомому профілі колії $i(s)$, траєкторія руху поїзда $v(s)$ визначається лише режимом ведення та прийнятою величиною розрахункової швидкості.

Розв'язання рівняння руху поїзда передбачає певні вимоги: вся маса поїзда сконцентрована в одній точці (в центрі поїзда) та при цьому поїзд має довжину. При сталому режимі руху та на незмінному профілі колії це не вносить похибку. Однак при перехідних режимах руху в поїзді виникають власні сили інерції від динамічного переміщення вагонів.

Мета

Метою статті є зменшення витрат енергоресурсів за рахунок визначення енергозощаджуючих режимів керування локомотивом за умови оптимізації функції керуючих впливів по часу ходу поїзда та витраті енергоресурсів при веденні поїзда з моменту закінчення розгону до переходу на режим вибігу.

Методика

Методика вибору енергозощаджуючої траєкторії руху поїзда та управління потужністю електровозів та тепловозів з електричною передачею передбачає розрахунок багатоваріантних траєкторій з варіативними вихідними даними параметрів складу та поїзної ситуації. Методика враховує математичні методи рівномірного пошуку та параметричної оптимізації.

Основний матеріал. Режим ведення поїзда складається з таких фаз:

- пуск локомотива та розгін поїзда до виходу на обрану ходову характеристику локомотива [9];
- рух при включених тягових двигунах;
- рух на вибігу при вимкнених тягових двигунах; регулювальне гальмування-пригальмовування поїзда на спусках для підтримування швидкості на заданому рівні [14];
- гальмування для зниження швидкості перед сигналами і зупинками.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Кожна з цих фаз робить істотний вплив на результати використання потужності локомотивів та витрати енергетичних ресурсів на тягу поїздів [25].

Додаткові динамічні навантаження виникають як в тяговому режимі, так і під час руху в режимі вибігу, а також в гальмівному режимі та в процесі відпускання гальм. Сили, що виникають на цих режимах, можуть досягати найбільшого значення в різних частинах поїзда залежно від однорідності вагонів та ступеня їх завантаження, а також від того, зібраний склад або розтягнутий. У вантажних поїздах ці сили можуть призводити до обриву поїзда або видавлювання вагонів, в пасажирських та приміських – до порушення комфорту пасажирів.

Значення динамічних сил залежать від маси та довжини поїзда, профілю колії, режимів тяги та гальмування, швидкості руху, зазорів в автозчепних пристроях, швидкості поширення гальмівної хвилі по довжині поїзда, типу й стану гальмівних пристроїв.

Під час руху поїзда доцільно тримати склад або в зібраному, або в розтягнутому стані. Однак це не завжди можливо під час руху реальним профілем колії. Для того щоб перевести рухомий склад із зібраного стану в розтягнутий, рукоятку контролера машиніста ставлять у поїзне положення. Щоб стиснути склад, раніше розтягнутий, поступово вимикають тягові двигуни, переводячи рукоятку контролера на нижчі позиції до нульової. Якщо цього недостатньо, то приводять в дію електричні гальма, а на локомотивах, не обладнаних електричними гальмами – пневматичні.

Умови ведення поїзда, регулювання потужності локомотива та швидкості руху значно відрізняються у вантажного й пасажирського поїздів. Вони суттєво відрізняються і всередині кожної з цих груп, наприклад, великоваговий чи порожній, а для пасажирських – швидкий або приміський.

Високі швидкості руху на коротких перегонах викликають необхідність початку гальмування при великій швидкості.

На перевалистому профілі, де чергуються підйоми, горизонтальні ділянки та спуски, доцільно вести поїзд в розтягнутому стані при включеному контролері. У цьому випадку регулюють швидкість руху шляхом зміни сили тяги. При проходженні підйомів силу тяги збі-

льшують, на горизонтальних ділянках та спусках – зменшують. Підходячи до підйому, який не можна пройти за рахунок використання кінетичної енергії, збільшують силу тяги, переводячи рукоятку контролера на вищі позиції або застосовуючи ступені ослаблення збудження.

Під час руху по ділянках з рівнинним профілем колії та відносно нечастими зупинками необхідний режим ведення, що забезпечує найменші коливання швидкості при використанні позицій, що відповідають найбільш високим значенням ККД локомотива. Зменшення нерівномірності руху дає помітний ефект внаслідок нелінійної залежності між силою опору руху і швидкістю руху.

Зазвичай профіль ділянок залізничної мережі, на яких є обмеження у використанні потужності локомотивів по зчепленню, характеризується наявністю підйомів великої крутизни, але відносно невеликої довжини. Тому при розробці та реалізації раціональних режимів ведення поїздів на таких ділянках дуже важливо поряд з реалізацією найбільших сил тяги забезпечувати максимальне використання кінетичної енергії поїзда.

Оскільки кінетична енергія пропорційна квадрату швидкості, то при підході поїзда до важких елементів профілю швидкість повинна бути найбільш допустимою, що дає можливість пройти частину підйому за рахунок накопиченої на попередніх елементах профілю кінетичної енергії поїзда.

Під час руху по підйому швидкість падає по мірі використання кінетичної енергії, струм тягових двигунів зростає, однак переходити на нижчі позиції слід тільки при досягненні струму тягових двигунів та сили тяги локомотива граничних значень.

Якщо після переходу на нижчі позиції ослаблення збудження тягових двигунів швидкість руху поїзда продовжує зменшуватись, то необхідно перейти на повне збудження. У випадках, коли після переходу зі ступенів ослабленого збудження на повне швидкість руху продовжує знижуватись, а навантаження знову досягає граничних значень, щоб не допустити спрацювання захисту, можна короткочасно перейти на послідовно-паралельне з'єднання тягових двигунів для електровозів постійного струму або на нижчу позицію для електровозів змінно-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

го струму. Для тепловозів в подібних випадках допускається швидкість нижче розрахункової, але відстань, що може проїхати поїзд, повинна бути не більше ніж 500 м.

Часто елементи профілю колії з важкими підйомами чергуються з елементами профілю меншої крутизни. Останні слід використовувати для підвищення швидкості руху та накопичення кінетичної енергії. Для цього доцільно переходити на більш глибоке ослаблення збудження або високі позиції регулювання.

Подібні умови руху наприкінці підйому можуть виявитися раціональними відносно економії електроенергії або палива в тому випадку, якщо після підйому розташована станція, на якій передбачена зупинка поїзда, або шкідливий спуск. Тоді зниження втрат енергії при подальшому гальмуванні дозволить отримати деяку економію паливно-енергетичних ресурсів [10].

Методика, що пропонується для визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів базується на рівномірному русі. Для рівномірного руху необхідно, щоб сили, створені штучно в результаті керування локомотивом, врівноважували сили опору.

Математична модель для дослідження описана в [9].

Особливі умови, які накладаються на модель: довжина ділянки $l = 20$ км; при цьому маса поїзда $P + Q$ змінюється в межах $1\,000 \div 6\,000$ т з інтервалом $1\,000$ т; межі ухилів для ділянок складають $i = -4 \div 7,5$ ‰.

Довжина ділянки $l = 20$ км зумовлена тим, що при використанні ітераційного обчислення з кількістю кроків $n = 3$ вказана довжина дає найбільш достовірний результат [21].

Нижня межа ухилу зумовлена тим, що під час руху на ділянках зі значенням ухилу $i < -2$ ‰ напрямки сили від ухилу співпадає з напрямком руху для допустимого діапазону швидкостей, тому вона буде прискорювати поїзд. Верхня межа визначена аналітично. При значеннях ухилу $i > 7,5$ ‰ режим керування відповідає найбільшій потужності локомотива.

Після розв'язання рівняння руху поїзда для конкретних вихідних даних розраховується коефіцієнт питомої витрати палива під час руху на рівномірній швидкості c

$$c = 10^6 g / t Q V^2 / 2,$$

де g – витрата палива, кг; t – час ходу поїзда, год; Q – маса складу, кг; V – швидкість руху, м/с. Таким чином розмірність коефіцієнта c

$$c = \left[\frac{\text{кг}}{\text{год} \cdot \text{МДж}} \right].$$

Приклад визначення значень коефіцієнта c для маси складу $Q = 2\,000$ т та ухилу $i = -0,5$ ‰ наводимо у вигляді табл. 1, а графічну інтерпретацію на рис. 2.

Після інтерполяції поліномом четвертого ступеня отримуємо залежність

$$\begin{aligned} c = & 2,29 \cdot 10^{-5} \cdot PKM^4 - \\ & - 6,98 \cdot 10^{-4} \cdot PKM^3 + \\ & + 8,63 \cdot 10^{-3} \cdot PKM^2 - \\ & - 4,69 \cdot 10^{-2} \cdot PKM + 0,662. \end{aligned}$$

За допомогою математичного пакету Maple [1] визначаємо мінімальне значення функції та відповідне значення аргументу.

$$\text{extrema}(c, \{ \}, PKM, 'PKM_{min}');$$

$$PKM_{min};$$

$$\{0.569815389\}$$

$$\{PKM = 5.500811924\}.$$

Оскільки значення позиції контролера машиніста може бути лише цілим числом, виконуємо округлення до найближчого цілого числа

$$PKM_{min} = 6.$$

Для деяких значень ухилу та маси складу мінімальні значення коефіцієнта питомої витрати палива c_{min} відповідають значенням рівномірної швидкості, вищої за допустиму за конструкційними параметрами рухомого складу, тому вводимо додатковий обмежувальний параметр

$$V^{р\text{івн}} \leq V^{\text{доп}}.$$

Загальна умова вибору раціонального управління

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$PKM_{\max_v}^{\min_c} = \begin{cases} c \Rightarrow \min; \\ V^{\text{рівн}} \leq V^{\text{доп}}. \end{cases}$$

Після отримання аргументів при мінімальних значеннях функції коефіцієнта питомої витрати палива під час руху з рівномірною швидкістю для $Q = 1000; 2000 \dots 6000$ та $i = -4; -2, 5 \dots 7, 5$ зводимо їх в табл. 2, а графічну інтерпретацію наводимо на рис. 3.

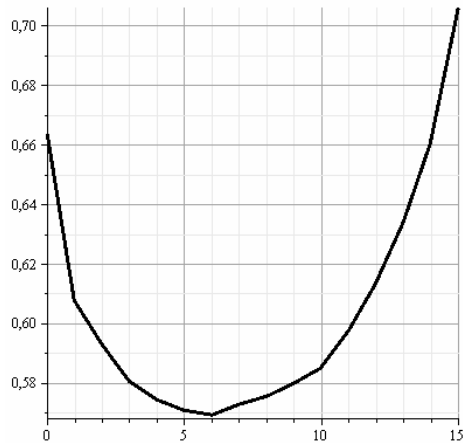


Рис. 2. Залежність коефіцієнта питомої витрати палива під час руху з рівномірною швидкістю від позиції контролера машиніста

Fig. 2. Dependence of the specific fuel consumption while driving at constant speed from the position controller driver

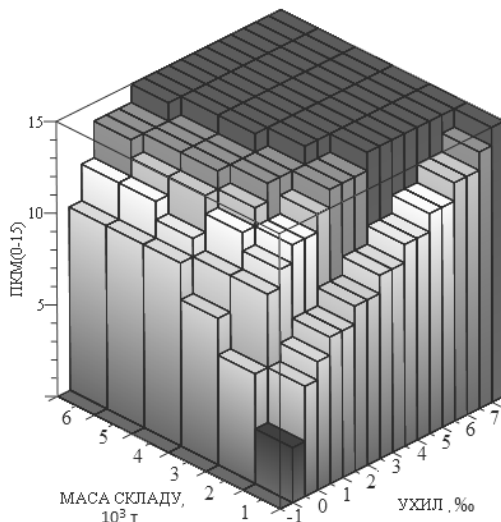


Рис. 3. Значення $PKM_{\max_v}^{\min_c}$

Fig. 3. Value $PKM_{\max_v}^{\min_c}$

Таблиця 1

Значення коефіцієнта питомої витрати палива під час руху на рівномірній швидкості

Table 1

Value of the coefficient of specific fuel consumption during movement at uniform speed

Позиція контролера машиніста	Рівномірна швидкість, км/год	c , км/год · Дж
15	133,57	0,706051
14	128,91	0,660393
13	123,51	0,634046
12	117,18	0,613325
11	110,96	0,597601
10	104,91	0,584951
9	98,03	0,579838
8	91,84	0,575596
7	85,52	0,572810
6	78,09	0,569319
5	71,29	0,570869
4	63,91	0,574193
3	49,71	0,580659
2	48,90	0,582861
1	41,43	0,597916
0	31,31	0,663379

Таблиця 2

Значення позиції контролера машиніста, відповідні мінімальним значенням коефіцієнта питомої витрати палива

Table 2

Value of the position of controller of the driver corresponding to the minimum value of the coefficient specific fuel consumption

i , %	Позиція КМ по масі складу [тис. т]					
-1,0	0	0	0	0	0	0
-0,5	3	6	8	10	10	10
0,0	6	10	10	11	12	12
0,0	7	11	12	13	13	14

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Закінчення табл. 2

End of table 2

i , ‰	Позиція КМ по масі складу [тис т]					
1,0	8	12	13	14	14	14
1,5	8	12	14	14	14	14
2,0	9	13	14	14	14	15
2,5	9	14	14	15	15	15
3,0	10	14	15	15	15	15
3,5	10	14	15	15	15	15
4,0	11	15	15	15	15	15
4,5	11	15	15	15	15	15
5,0	12	15	15	15	15	15
5,5	12	15	15	15	15	15
6,0	13	15	15	15	15	15
6,5	13	15	15	15	15	15
7,0	14	15	15	15	15	15
7,5	15	15	15	15	15	15

Відповідні значення рівномірних швидкостей наводимо в табл. 3, а графічну інтерпретацію – на рис. 4.

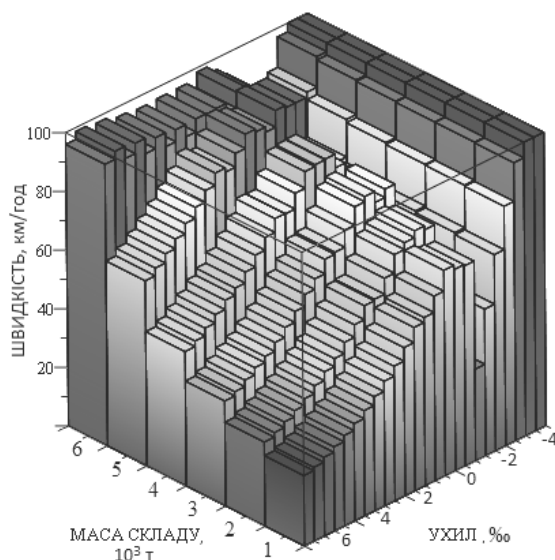
Рис. 4. Рівномірні швидкості, відповідні $PKM_{\max_V}^{\min_c}$ Fig. 4. Uniform speed corresponding to $PKM_{\max_V}^{\min_c}$

Таблица 3

Значення рівномірних швидкостей,
що відповідають $PKM_{\max_V}^{\min_c}$

Table 3

Uniform speed corresponding
to $PKM_{\max_V}^{\min_c}$

Ухил, ‰	Рівномірна швидкість [км/год] по масі поїзда [тис. т]					
-3,0	97,1	95,9	95,3	95,1	95,0	94,7
-2,5	86,6	84,1	83,0	82,3	82,0	81,6
-2,0	75,6	71,3	69,3	68,1	67,5	66,8
-1,5	64,2	57,8	54,4	52,4	51,1	50,0
-1,0	53,2	43,7	38,8	35,5	33,1	31,2
-0,5	64,7	78,1	78,7	80,7	73,6	68,1
0,0	92,9	98,2	82,8	77,8	75,0	68,6
0,5	96,1	98,3	87,6	81,6	72,7	70,0
1,0	98,6	99,0	87,3	79,8	70,3	63,0
1,5	93,1	93,3	86,7	73,5	63,9	57,4
2,0	96,3	95,0	81,0	67,7	58,5	55,7
2,5	91,4	96,1	75,7	67,0	58,0	50,5
3,0	96,2	91,2	75,8	62,1	53,2	45,9
3,5	91,7	86,5	71,1	58,4	48,9	42,5
4,0	95,9	87,9	66,7	54,3	45,1	39,0
4,5	91,8	83,7	62,7	50,6	42,3	35,9
5,0	96,6	79,6	58,9	47,2	39,3	33,2
5,5	92,8	75,8	56,5	44,2	36,6	30,8
6,0	98,0	72,3	53,3	42,0	34,2	28,7
6,5	94,5	68,9	50,4	39,5	32,0	26,8
7,0	98,7	65,8	47,7	37,2	30,1	25,1

Для можливості застосування дискретних даних матриці $PKM_{\max_V}^{\min_c}$ та відповідних рівномірних швидкостей в математичній моделі необхідно виконати інтерполяцію. Інтерполяцію виконуємо лінійним сплайном для значень маси поїзда вказаного діапазону з аргументом ухилу i . Для прикладу наведемо сплайн $PKM_{\max_V}^{\min_c}$ для маси поїзда $P + Q = 6\,000$ т

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$PKM^{6000} = \begin{cases} 0, & i < -1; \\ 20 + 20i, & i < -0,5; \\ 12 + 4i, & i < 0; \\ 12 + 4i, & i < 0,5; \\ 14, & i < 1; \\ 14, & i < 1,5; \\ 11 + 2i, & i < 2; \\ 15 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Для можливості розрахунку $PKM_{\max_v}^{\min_c}$ для проміжних значень маси поїзда застосовуємо інтерполяцію в межах конкретного ухилу i для значень маси поїзда більших та менших, ніж дане

$$PKM^{\underline{Q} \leq Q < \bar{Q}} = \left\| PKM^{\underline{Q}}(i) \cdot \left(1 - \frac{Q - \underline{Q}}{\Delta Q}\right) + PKM^{\bar{Q}}(i) \cdot \left(1 - \frac{\bar{Q} - Q}{\Delta Q}\right) \right\|.$$

Для визначення рівномірної швидкості, що відповідає $PKM^{\underline{Q} \leq Q < \bar{Q}}$, виконуємо аналогічні обчислення, але без округлення величин.

Після обчислення $PKM^{\underline{Q} \leq Q < \bar{Q}}$ визначається сила тяги

$$F_j = \frac{3,6 \cdot N_e \left(PKM^{\underline{Q} \leq Q < \bar{Q}} \right) \cdot n_c \cdot \eta_{j-1}}{V_{j-1} \pm \Delta V}$$

та розв'язується рівняння руху поїзда.

Таким чином крива $V = f(S)$ прагне до рівномірної швидкості (рис. 5).

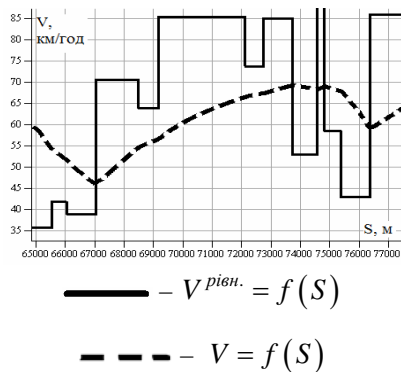


Рис. 5. Крива швидкості руху поїзда

Fig. 5. Curve of train speed movement

Крива $V^{pivn} = f(S)$ будується на підставі усереднення ухилів профілю колії по довжині поїзда з інтервалом $\Delta S = 15$ м (довжина чотиривісного вагона). Для цього виконується сплайн-інтерполяція ухилів по довжині ділянки та обирається фазова координата відправлення поїзда (станція, світлофор, пікет та ін.).

$$i^d = \begin{cases} 0; & s < 2\,000; \\ 0,5; & s < 5\,500; \\ -3; & s < 7\,500; \\ \dots & \\ -8,4; & s < 44\,000; \\ -3,2; & s < 44\,200; \\ -1; & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Для даної маси поїзда та довжини поїзда визначаються значення ухилів по осях кожного вагона і локомотива та на підставі мас останніх визначається середнє значення для центру мас поїзда.

$$i_n = \frac{1}{Q} \int_{-l_n/2}^{l_n/2} i^d Q(l_n) \cdot dS.$$

По мірі переміщення поїзда з інтервалом ΔS визначаються дискретні значення для всієї ділянки, які перебудовуються в сплайн $i = f(S)$. Останній використовується при визначенні прискорюючо-уповільнюючих сил рівняння руху поїзда

$$V_j = Re \sqrt{V_{j-1}^2 + \frac{ds \cdot \xi \cdot (f(v) - \omega(v))}{500} + \frac{ds \cdot \xi \cdot (-b_z(v) - i(S))}{500}}.$$

За вказаною методикою виконано тягово-енергетичні розрахунки для поїзда масою 3 000 т, що рухається по ділянці з поздовжнім профілем III складності в прямому та зворотному напрямках. Для порівняння розрахунки виконано за методикою ПТР [20]. Визначено узагальнений показник хвилинної витрати палива g , кг/хв. Результати наведено в табл. 4.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Таблиця 4

Результати тягово-енергетичних розрахунків

Table 4

Results of traction-energy calculations

Методика	t , хв	q , кг	g , кг/хв
ПТР	120	1555	13
	100	1063	10,7
Розглянута	131	1383	10,6
	108	927	8,6
Різниця, %	9,4	-11,1	-18,8
	8,3	-12,8	-19,5

*Примітка: в чисельнику – в прямому напрямку; в знаменнику – в зворотному напрямку

Результати

На підставі багатоваріантних розрахунків удосконалено алгоритм визначення енергозаощаджуючих траєкторій руху поїзда, побудовано багатопараметричну функцію управління потужністю локомотива, яка дозволяє зменшити витрату енергоресурсів від 11 до 13 % залежно від профілю колії, маси поїзда та поїзної ситуації порівняно з методикою [20].

Наукова новизна та практична значимість

Отримано енергозаощаджуючі функції управління тягою локомотива для відповідних рівномірних швидкостей, які залежать від маси поїзда та ухилу. На відміну від існуючих розробок раціонального ведення поїздів ця функція потребує значно менше машинного часу при високій точності розрахунків, що дає можливість її впровадження в бортову систему керування та економії енергоресурсів.

Висновки

Удосконалено алгоритм визначення енергозаощаджуючої траєкторії руху поїзда з моменту закінчення розгону до переходу на режим вибігу:

– визначено коефіцієнт питомої витрати палива під час руху на рівномірній швидкості c , фізичний зміст якого – годинна витрата палива, що приходить на 1 МДж кінетичної енергії поїзда;

– розрахунком траєкторій при варіативних вихідних даних побудовано функції зміни коефіцієнта c ;

– визначено раціональні позиції контролера машиніста для підтримання кінетичної енергії та відповідні їм рівномірні швидкості;

– побудовано аналітичні залежності раціональних позицій контролера машиніста для рівномірних швидкостей, що залежать від маси складу та ухилу, перевірено їх точність та адекватність;

– аналітично визначено економію енергоресурсів, яка складає 11–13 % порівняно з методикою [20].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аладьев, В. З. Программирование и разработка приложений в Maple : монография / В. З. Аладьев, В. К. Бойко, Е. А. Ровба. – Гродно : ГрГУ ; Таллинн : Межд. акад. ноосферы, Балт. отд. – 2007. – 456 с.
2. Баранов, Л. А. Оптимальное управление поездом метрополитена по критерию минимума энергозатрат / Л. А. Баранов, И. С. Мелёшин, Л. М. Чинь // Электротехника. – 2011. – № 8. – С. 9–14.
3. Беллман, Р. Динамическое программирование и уравнения в частных производных / Р. Беллман, Э. Энджел ; [пер. с англ. С. П. Чеботарёва] ; под ред. А. М. Летова. – Москва : Мир, 1974. – 205 с.
4. Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – Москва : Наука, 1965. – 460 с.
5. Бобыр, Д. В. Усовершенствование режимов ведения грузового поезда с электрической тягой : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Бобыр Дмитрий Валерьевич ; Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2007. – 190 с.
6. Боднар, Б. Е. О несравнимых вариантах в задаче тяговых расчетов / Б. Е. Боднар, А. А. Босов, Д. В. Бобыр // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 12. – С. 57–59.
7. Босов, А. А. Некоторые вопросы методики оптимальных тяговых расчетов на ЭЦВМ / А. А. Босов // Вопр. усовершенствования устройств электр. тяги. – 1968. – Вып. 77. – С. 108–119.
8. Босов, А. А. Параметризация в задачах векторной оптимизации / А. А. Босов, Г. К. Гетьман // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2000. – Вип. 5. – С. 62–65.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

9. Визначення енергозощаджуючих режимів розгону поїздів / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, А. М. Афанасов, Д. М. Кислий // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 40–52. doi: 10.15802/stp2015/55359.
10. Вождение поездов : пособие машинисту / Р. Г. Черепашенцев, В. А. Бирюков, В. Т. Понкрашов, А. Н. Судаловский ; под ред. Р. Г. Черепашенцева. – Москва : Транспорт, 1994. – 304 с.
11. Гетьман, Г. К. Математическая модель поезда для производства тяговых расчетов в задачах выбора параметров тяговых средств / Г. К. Гетьман // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 1999. – Вип. 1. – С. 75–79.
12. Ерофеев, Е. В. Выбор оптимального режима ведения поезда на АЦВМ с применением метода динамического программирования // Тр. МИИТ. – Москва, 1967. – Вып. 228. – С. 16–28.
13. Ерофеев, Е. В. Исследование оптимальных программ движения поезда при вариациях исходных параметров // Тр. МИИТ. – Москва, 1968. – Вып. 315. – С. 66–72.
14. Капіца, М. І. Визначення тривалості вибігу локомотива при переході з режиму тяги в режим гальмування / М. І. Капіца, Д. М. Кислий // Зб. наук. пр. / Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2013. – Вип. 136. – С. 86–92.
15. Комплексная система автоматического управления движением поездов метрополитена / Л. А. Баранов [и др.] // Автоматизация управления движением поездов метрополитена : сб. науч. тр. / ВНИИЖТ. – Москва, 1987. – С. 81–90.
16. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – 4-е изд. – Москва : Наука, 1983. – 392 с.
17. Петров, Ю. П. Очерки истории теории управления / Ю. П. Петров. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2012. – 272 с.
18. Понтрягин, Л. С. Принцип максимума в оптимальном управлении / Л. С. Понтрягин. – Москва : Наука, 1989. – 62 с.
19. Почаевец, Э. С. Исследование оптимальных тяговых режимов электроподвижного состава // Тр. МИИТ. – Москва, 1967. – Вып. 282. – С. 152–164.
20. Правила тяговых расчетов для поездной работы / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, О. А. Некрасов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с.
21. Трауб, Дж. Итерационные методы решения уравнений / Дж. Трауб ; [пер. с англ.]. – Москва : Мир, 1985. – 264 с.
22. Hui, Hu. A multi-objective trainscheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving / Hu Hui, Li Keping, Xu Xiaoming // J. of Modern Transportation. – 2013. – Vol. 21. – Iss. 1. – P. 9–16. doi: 10.1007/s40534-013-0003-1.
23. Nasr, A. An Innovative Micro Control System for Quasi-Continuous Power Transmission Systems (QCPTS) / A. Nasr, Y. J. Jozani, M. Ghazvini // Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Mechanical Systems and Control (31.10–6.11.2008). – Boston, Massachusetts, USA, 2008. – Vol. 11. – P. 219–223. doi: 10.1115/IMECE2008-67308.
24. Numerical and Experimental Investigation of Heavy Freight Train Dynamics / G. Diana, F. Cheli, P. Belforte [et al.] // Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Transportation Systems (11.11–15.11.2007). – Seattle, Washington, USA, 2007. – Vol. 16. – P. 439–448. doi: 10.1115/IMECE2007-42693.
25. Vajedi, M. Traction-Motor Power Ratio and Speed Trajectory Optimization for Power Split PHEVs Using Route Information / M. Vajedi, A. Taghavi-pour, L. N. L. Azad // Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Transportation Systems (9.11–15.11.2012). – Houston, Texas, USA, 2012. – Vol. 11: – P. 301–308. doi: 10.1115/IMECE2012-86859.

Д. Н. КИСЛИЙ^{1*}

^{1*}Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. + 38 (066) 625 18 59, эл. почта dmitriy.kisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ ВЕДЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Цель. Тяговые расчеты с определением энергосберегающих траекторий предусматривают поиск рациональной зависимости расхода энергоресурсов от времени хода поезда. При выборе энергосберегающих траекторий движения поезда и при разработке режимных карт ведения поездов необходимо учитывать пере-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

менные параметры, такие как: профиль участка, массу поезда, серию локомотива и др. При увеличении скорости движения происходит рост сопротивления движению, который пропорционален квадрату скорости, что приводит к повышению расходов топливно-энергетических ресурсов. Напротив, снижение затрат из-за уменьшения скорости движения приводят к увеличению времени хода поезда, который должен быть согласован с графиком движения и другими технико-экономическими параметрами, зависящими от скорости движения. В статье рассмотрен один из способов уменьшения расходов энергоресурсов на тягу поездов. Целью статьи является уменьшение расхода энергоресурсов за счет определения энергосберегающих режимов управления локомотивом. Это происходит при условии оптимизации функции управляющих воздействий по времени хода поезда и расхода энергоресурсов при ведении поезда от момента окончания разгона до перехода на режим выбега. **Методика.** Методика выбора энергосберегающей траектории движения поезда и управления мощностью электровозов и тепловозов с электрической передачей предусматривает расчет многовариантных траекторий с вариативными исходными данными параметров состава и поездной ситуации. Методика учитывает математические методы равномерного поиска и параметрической оптимизации. Для равномерности движения необходимо, чтобы ускоряющие силы уравнивали замедляющие. **Результаты.** На основании многовариантных расчетов усовершенствован алгоритм определения энергосберегающих траекторий движения поезда, построена многопараметрическая функция управления мощностью локомотива, которая позволяет уменьшить расход энергоресурсов от 11 до 13 %, в зависимости от массы поезда и поездной ситуации. **Научная новизна.** Автором получены энергосберегающие функции управления тягой локомотива для соответствующих равномерных скоростей, которые зависят от массы поезда и уклона. **Практическая значимость.** В отличие от существующих разработок рационального ведения поездов, данная функция требует значительно меньше машинного времени при высокой точности расчетов. Это позволяет использовать полученные алгоритмы в бортовых системах управления локомотивом и экономии энергоресурсов.

Ключевые слова: тяговые расчеты; энергоэффективность ведения поездов; кинетическая энергия; управление мощностью; параметрическая оптимизация

D. M. KYSLYI^{1*}

^{1*}Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 625 18 59, e-mail dmitriy.kislii@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

ENERGY SAVING MODES DEFINITION OF TRAINS HANDLING

Purpose. Traction calculations with the definition of energy-efficient trajectories provide search for rational energy consumption depending on the time course of the train. When selecting energy-efficient trajectory of the train and the development of regime charts conducting trains must take into account variables such as: the profile of the site, weight train, locomotive series, etc. When increasing the speed of the growth it occurs the resistance movement, which is proportional to the square of the speed, which leads to higher costs of fuel and energy resources. In contrast, the reduction of costs due to the decrease in speed leads to an increase in travel time of the train, which should be consistent with the timetable and other technical and economic parameters, depending on the speed. The article describes one way to reduce the cost of energy for traction. The aim of the article is to reduce energy consumption by identifying energy-saving control modes. It occurs with the locomotive optimization function of control actions on the running time of the train and the flow of energy in the management of the train from the end of the acceleration to go to the coasts. **Methodology.** The technique of choice of energy saving path of the train and power control and electric locomotives with electric transmission provides the calculation of multiple paths with variable input data and parameters of the composition of the train situation. The methodology takes into account the uniform mathematical methods of search and parametric optimization. For uniformity of motion needed to slow down the accelerating forces are balanced. **Findings.** On the basis of calculations of multiple advanced algorithms determine the trajectories of energy-saving trains, built multiparametric locomotive power control function, which can reduce energy consumption by 11 to 13% depending on the weight of the train and the train situation. **Originality.** The author obtained the energy-saving function of traction control of locomotive for the corresponding uniform velocity, which depends on the weight of the train and bias. **Practical value.** In contrast to existing development of rational management of trains, this function requires much less computing time with a high accuracy of calculations. It allows using the algorithms in the onboard control systems, locomotive and energy savings.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Keywords: traction calculations; the energy efficiency of trains handling; kinetic energy; power control; parameter optimization

REFERENCES

1. Aladev V.Z., Boyko V.K., Rovba Ye.A. *Programmirovaniye i razrabotka prilozheniy v Maple* [Programming and Application Development in Maple]. Grodno, GrGU; Tallinn, Mezhdunarodnaya Akademiya Noosfery, Baltiyskoye otdeleniye Publ., 2007. 456 p.
2. Baranov L.A., Meleshin I.S., Chin L.M. Optimalnoye upravleniye poyezdom metropolitena po kriteriyu minimuma energozatrat [Optimum control of the underground train accordingly the criterion of minimum energy]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2011, no. 8, pp. 9-14.
3. Bellman R., Endzhe E., Letov A.M., Chebotareva S.P. *Dinamicheskoye programmirovaniye i uravneniya v chastnykh proizvodnykh* [Dynamic programming and partial differential equations]. Moscow, Mir Publ., 1974. 205 p.
4. Bellman R., Dreyfus S. *Prikladnyye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya* [Applied problems of dynamic programming]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 460 p.
5. Bobyr D.V. *Usovershenstvovaniye rezhimov vedeniya gruzovogo poyezda s elektricheskoy tyagoy*. Kand. Diss. [Improvement the regimes for freight trains handling with electric traction. Cand. Diss.]. Dnepropetrovsk, 2007. 190 p.
6. Bodnar B.Ye., Bosov A.A., Bobyr D.V. O nesravnimyykh variantakh v zadache tyagovykh raschetov [About incomparable options in the problem of traction calculations]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport], 2006, issue 12, pp. 57-59.
7. Bosov A.A. Nekotoryye voprosy metodiki optimalnykh tyagovykh raschetov na ETsVM [Some problems of optimal traction calculations methods by computers]. *Voprosy usovershenstvovaniya ustroystv elektricheskoy tyagi – Issues of improvement of electric traction devices*, 1968, issue 77, pp. 108-119.
8. Bosov A.A., Getman G.K. Parametrizatsiya v zadachakh vektornoy optimizatsii [Parametrization in vector optimization problems]. *Zbirnyk naukovykh prats «Transport»* [Proc. «Transport»]. Dnepropetrovsk, 2000, issue 5, pp. 62-65.
9. Bodnar B.Ye., Kapitsa M.I., Afanasov A.M., Kyslyi D.M. Vyznachennia enerhozaoshchadzhuiuchykh rezhymiv rozghonu poizdiv [Definition of energy saving acceleration modes of trains]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Problem*, 2015, no. 5 (59), pp. 40-52. doi: 10.15802/stp2015/55359.
10. Cherepashenets R.G., Biryukov V.A., Ponkrashov V.T., Sudalovskiy A.N., Cherepashenets R.G. *Vozhdeniye poyezdov: posobiye mashinistu* [Trains handling: guide for the motorman]. Moscow, Transport Publ., 1994. 304 p.
11. Getman G.K. Matematicheskaya model poyezda dlya proizvodstva tyagovykh raschetov v zadachakh vybora parametrov tyagovykh sredstv [Mathematical model of a train for the production of traction calculations in problems of hauling equipment parameters choice]. *Zbirnyk naukovykh prats «Transport»* [Proc. «Transport»]. Dnepropetrovsk, 1999, issue 1, pp. 75-79.
12. Yerofeyev Ye.V. Vybory optimalnogo rezhima vedeniya poyezda na ATsVM s primeneniyyem metoda dinamicheskogo programmirovaniya [Optimal mode selection of trains handling at analog-digital computer using dynamic programming method]. *Trudy Moskovskogo instituta inzhenerov transporta* [Proc. of Moscow State University of Railway Engineering], 1967, issue 228, pp. 16-28.
13. Yerofeyev Ye.V. Issledovaniye optimalnykh programm dvizheniya poyezda pri variatsiyakh iskhodnykh parametrov [Optimal programs research of train handling through initial parameters variations]. *Trudy Moskovskogo instituta inzhenerov transporta* [Proc. of Moscow State University of Railway Engineering], 1968, issue 315, pp. 66-72.
14. Kapitsa M.I., Kyslyi D.M. Vyznachennia tryvalosti vybihiu lokomotyva pry perekhodi z rezhymu tiahly v rezhym halmuvannia [Determination the duration of locomotive rundown at the transition from traction mode to the braking mode]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu* [Proc. of Ukrainian State Academy of Railway Transport], 2013, issue 136, pp. 86-92.
15. Baranov L.A. Kompleksnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya dvizheniyem poyezdov metropolitena [Comprehensive system of automatic trains handling control in subway]. *Sbornik nauchnykh trudov «Avtomatizatsiya upravleniya dvizheniyem poyezdov metropolitena»* [Proc. «Control automation of trains handling control in subway»]. Moscow, VNIIZhT Publ., 1987, pp. 81-90.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

16. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko Ye.F. *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov* [The mathematical theory of optimal processes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 392 p.
17. Petrov Yu.P. *Ocherki istorii teorii upravleniya* [Essays on the history of management theory]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2012. 272 p.
18. Pontryagin L.S. *Printsip maksimuma v optimalnom upravlenii* [Extremum principle in optimal control]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 62 p.
19. Pochaevets E.S. Issledovaniye optimalnykh tyagovykh rezhimov elektropodvizhnogo sostava [Research of optimum traction modes of electric rolling stock]. *Trudy Moskovskogo instituta inzhenerov transporta* [Proc. of Moscow State University of Railway Engineering], 1967, issue 282, pp. 152-164.
20. Grebenyuk P.T., Dolganov A.N., Nekrasov O.A., Lisitsyn A.L., Stromskiy P.P., Borovikov A.P., Chukova T.S., Grigorenko V.G., Pervushina V.M. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* [Rules of traction calculations for train operation]. Moscow, Transport Publ., 1985. 287 p.
21. Traub Dzh. *Iteratsionnyye metody resheniya uravneniy* [Iterative methods of solving the equations]. Moscow, Mir Publ., 1985. 264 p.
22. Hui Hu, Keping Li, Xiaoming Xu. A multi-objective trainscheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving. *Journal of Modern Transportation*, 2013, vol. 21, issue 1, pp. 9-16. doi: 10.1007/s40534-013-0003-1.
23. Nasr A., Jozani Y.J., Ghazvini M. An Innovative Micro Control System for Quasi-Continuous Power Transmission Systems (QCPTS). Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Vol. 11: Mechanical Systems and Control (31.10–6.11.2008). Boston, Massachusetts, USA, pp. 219-223. doi: 10.1115/IMECE2008-67308.
24. Diana G., Cheli F., Belforte P., Melzi S., Sgroi F., Favo F. Numerical and Experimental Investigation of Heavy Freight Train Dynamics. Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Vol. 16: Transportation Systems (11.11–15.11.2007). Seattle, Washington, USA, pp. 439-448. doi: 10.1115/IMECE2007-42693.
25. Vajedi M., Taghavipour A., Azad L.N.L. Traction-Motor Power Ratio and Speed Trajectory Optimization for Power Split PHEVs Using Route Information. Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Vol. 11: Transportation Systems (9.11–15.11.2012). Houston, Texas, USA, pp. 301-308. doi: 10.1115/IMECE2012-86859.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. В. Сохацьким (Україна); д.т.н., проф. А. А. Босовим (Україна)

Надійшла до редколегії: 20.11.2015

Прийнята до друку: 21.01.2016

УДК 656.222.3:656.212.5

G. I. NESTERENKO¹, M. I. MUZYKIN^{2*}, V. L. HOROBETS³, S. I. MUZYKINA⁴¹Dep. «Management of Operational Work», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 70, e-mail galinamuzykina@rambler.ru, ORCID 0000-0003-1629-0201^{2*}Dep. «Safety of Life Activity», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 251 53 14, e-mail grafmim@rambler.ru, ORCID 0000-0003-2938-7061³Dep. «Safety of Life Activity», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 793 19 08, e-mail v-gorobets@mail.ru, ORCID 0000-0002-6537-7461⁴Dep. «Safety of Life Activity», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 082 88 27, e-mail fufei@rambler.ru, ORCID 0000-0002-5832-6949STUDY OF CAR TRAFFIC FLOW STRUCTURE ON ARRIVAL
AND DEPARTURE AT THE MARSHALLING YARD X

Purpose. The paper is aimed to analyse the existing car traffic organization at the marshalling yard aimed to reduce downtime of cars. **Methodology.** The methods of mathematical statistics allowed building the histogram of car traffic flow distribution at the marshalling yard and assessment of their parameters. The key quantitative and qualitative indicators of the station operation were analyzed. In order to analyze the effect of rehandling volume on the rehandled transit car downtime elements at the station we plotted the dependence graph of the car downtime elements on the rehandling volume. The curve variation on the graph clearly shows the effect of rehandling volume on two downtime elements: during formation and in expectation of operations. **Findings.** The question of reducing the average downtime of all car categories at the station should be solved by reducing unproductive downtime was proved. The correct determination of the average time spent by a rehandled transit car at the station is essential, especially in the conditions of new system of economic incentives. But still there is no separate methodology for determining the car downtime, which would allow to objectively consider the equipment and operation technology and exclude the possibility for subjective decisions. **Originality.** One of the main kinds of unproductive downtime during the carriage of goods by rail is a downtime on the marshalling yards in expectation of technological operations because of the system congestion. Reduction of this indicator is possible due to rational use of the marshalling yard capacity provided the rational distribution and car – and train flows between the major marshalling yards of Ukrzaliznytsia. **Practical value.** The analysis of changes in downtime elements, depending on the rehandling volume allows not only to identify the car downtime reduction methods, but also to make a correct assessment of station staff work, as well as to adjust the rate of idle wagons.

Keywords: car traffic flow; marshalling yard; rehandling volume; downtime of cars; formation parameter

Introduction

The marshalling yard is a complex set of technologically interrelated elements intended for car flow rehandling.

Marshalling yards of Ukrainian railway network are usually located at the junctions. They rehandle the flows coming from different directions. These stations were always the busiest and the capacity of the entire line is dependent on them as 70% of all car traffic flows are rehandled at the junctions. That is why, the question of improvement of marshalling yard operation at the junctions is of high importance.

Behavior of incoming and outgoing flows is one of the most important requirements for the components taken into account when describing the performance of any queuing system.

Train arrival analysis was investigated by the scientists V. M. Akulinichev, T. V. Butko, N. N. Shabalin, I. B. Sotnikov, K. K. Tal, P. S. Hruntovy, A. M. Makarochkin and others [1–14]. The studies have shown that the distribution of intervals between them with a sufficient degree of accuracy can be approximated by the exponential law or generalized Erlang law and in rare cases – by Erlang law of a higher order.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Purpose

Analysis of the existing car traffic organization at the marshalling yard aimed to reduce downtime of cars.

Methodology

Using the methods of mathematical statistics we build the histograms of car traffic flow distribution at X marshalling yard and assess their parameters (mathematical expectation, standard deviation, variation coefficient, irregularity coefficient) [1, 2, 14].

Of the total car traffic flow of the station we should distinguish the car flows in unpaired and paired directions. The general car traffic flow includes the cars of working and non-working fleet. The working cars in their turn depending on the destination station are divided into transit (with and without rehandling) and local ones [3-6].

For transit car traffic flow without rehandling, given the negligible downtime at the station and a small amount of coupled and uncoupled cars, it is possible to assume that the ingoing flow equals the outgoing one for the selected period. To determine the average value, variance and standard deviation the month car flow must be divided into intervals. Calculation of average values of the intervals in ranges, their share of the total interval weight and variances of daily transit car flow without rehandling is shown in the text. Daily transit car traffic flow without rehandling is broken into 100 *car.* intervals.

Average daily transit car traffic flow without rehandling in unpaired direction $N_{av} = 537 \text{ car}$. The variance describes the deviation of the actual number of car traffic flow from the average value and equals $28\,809 \text{ car}^2$. For ease of comparison of the car traffic flow average value and the deviation of actual car traffic flow from this average value one uses the standard deviation that equals $\sigma = 170 \text{ wag}$. Histogram of daily transit car traffic flow volume without rehandling in unpaired direction is shown in Fig. 1.

Average daily transit car traffic flow without rehandling in paired direction $N_{av} = 620 \text{ car}$. The variance is $65\,108 \text{ car}^2$. Standard deviation is $\sigma = 255 \text{ car}$. Histogram of daily transit car traffic flow volume without rehandling in paired direction is shown in Fig. 2.

Average total daily transit car traffic flow without rehandling $N_{av} = 1151 \text{ car}$. The variance is $106\,881 \text{ car}^2$. Standard deviation is $\sigma = 327 \text{ car}$. Histogram of total daily transit car traffic flow volume without rehandling is shown in Fig. 3.

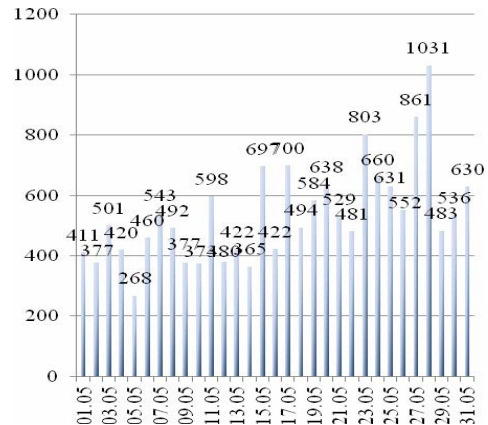


Fig. 1. Histogram of daily transit car traffic flow volume without rehandling in unpaired direction

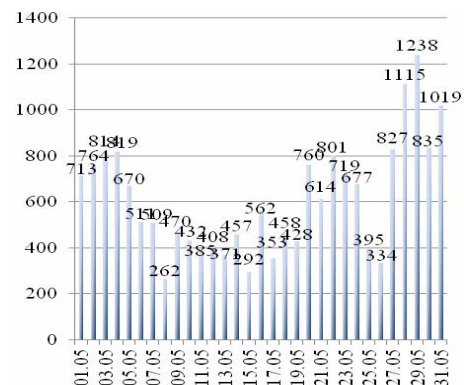


Fig. 2. Histogram of daily transit car traffic flow volume without rehandling in paired direction

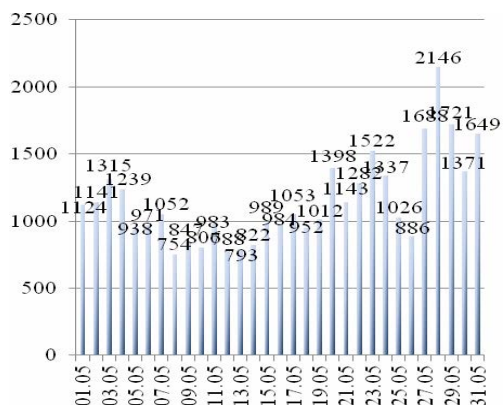


Fig. 3. Histogram of total daily transit car traffic flow volume without rehandling

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

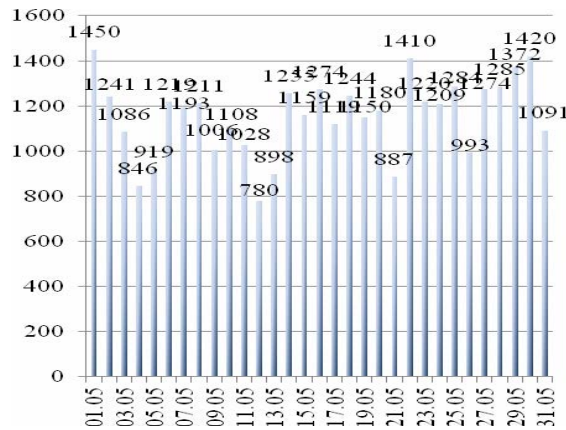


Fig. 4. Histogram of daily rehandled transit and local car traffic flow volume

Transit flow with rehandling can be combined with local one due to the fact that both car categories arrive in trains rehandled at X station. The incoming flow does not equal to the outgoing one for a certain period because of the considerable time of car stay at the station and the corner flow.

Average rehandled transit and local car traffic flow on arrival from unpaired direction is $N_{av} = 1154$ car. The variance is 31291 car^2 . Standard deviation is $\sigma = 177$ car. Histogram of daily rehandled transit and local car traffic flow volume on arrival is shown in Fig. 4.

Average daily rehandled transit and local car traffic on arrival from paired direction $N_{av} = 808$ car. The variance is 17251 car^2 . Standard deviation is $\sigma = 131$ car. Histogram of daily rehandled transit and local car traffic flow volume on arrival from paired direction is shown in Fig. 5.

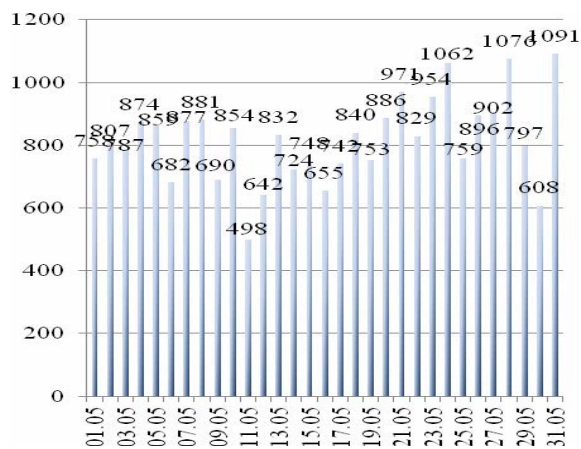


Fig. 5. Histogram of daily rehandled transit and local car traffic flow volume on arrival from paired direction

Average total daily rehandled transit and local car traffic flow on arrival $N_{av} = 1970$ car. The variance is 42056 car^2 . Standard deviation is $\sigma = 205$ car. Histogram of total daily rehandled transit and local car traffic flow volume on arrival is shown in Fig. 6.

Average daily rehandled transit and local car traffic flow on departure to unpaired direction $N_{av} = 1018$ car. The variance is 38843 car^2 . Standard deviation is $\sigma = 197$ car. Histogram of daily rehandled transit and local car traffic flow on departure to unpaired direction is shown in Fig. 7.

Average daily rehandled transit and local car traffic on departure to paired direction $N_{av} = 931$ car. $N_{sr} = 931$ wt. The variance is 22145 car^2 . Standard deviation is $\sigma = 149 \text{ car}^2$. Histogram of daily rehandled transit and local car traffic flow on departure to paired direction is shown in Fig. 8.

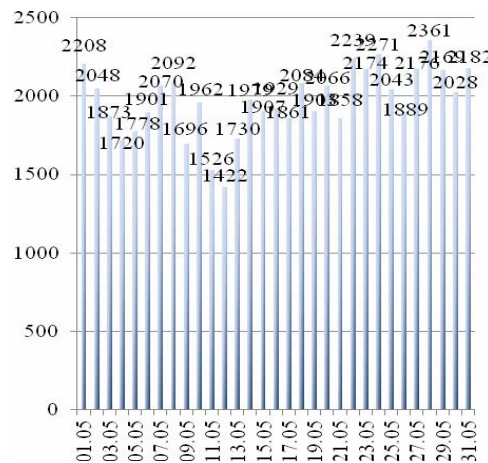


Fig. 6. Histogram of total daily rehandled transit and local car traffic flow volume on arrival

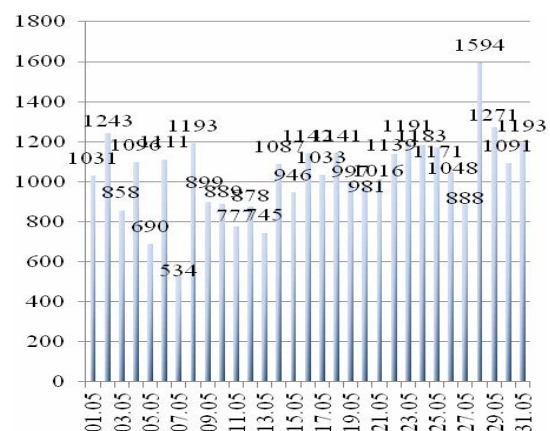


Fig. 7. Histogram of daily rehandled transit and local car traffic flow on departure to unpaired direction

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Average total daily rehandled transit and local car traffic on arrival $N_{av} = 1971$ car. The variance is 85322 car^2 . Standard deviation is $\sigma = 292$ car. Histogram of total daily rehandled transit and local

car traffic flow on departure is shown in Fig. 9.

Average daily car traffic flows on arrival and departure in unpaired and paired directions for May 2015 are shown in Fig. 10, 11.

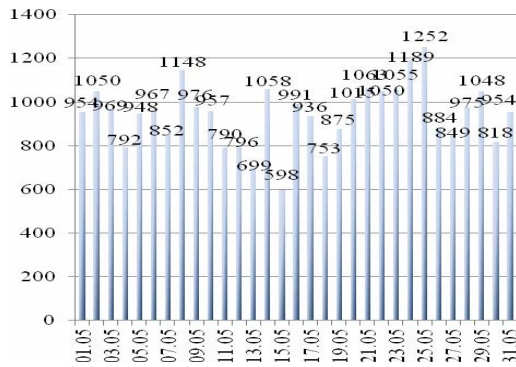


Fig. 8. Histogram of daily rehandled transit and local car traffic flow on departure to paired direction

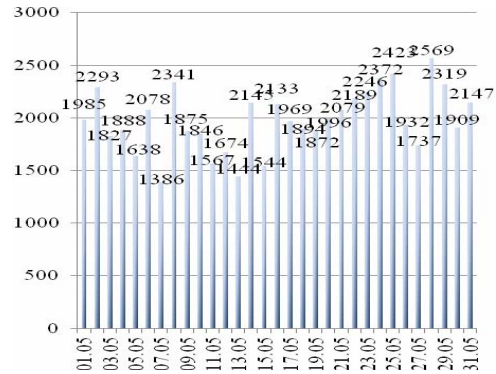


Fig. 9. Histogram of total daily rehandled transit and local car traffic flow on departure

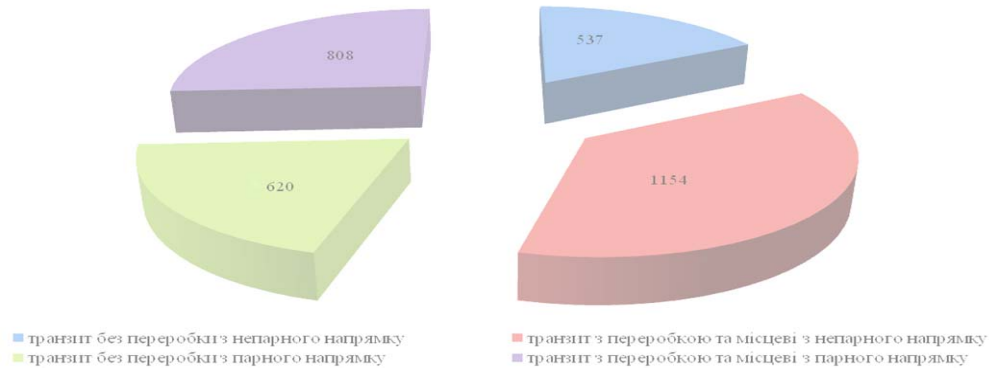


Fig. 10. Histogram of average daily car traffic flow volume on arrival for May 2015

Transit without rehandling from unpaired direction
Transit without rehandling from paired direction

Transit rehandled and local from unpaired direction
Transit rehandled and local from paired direction

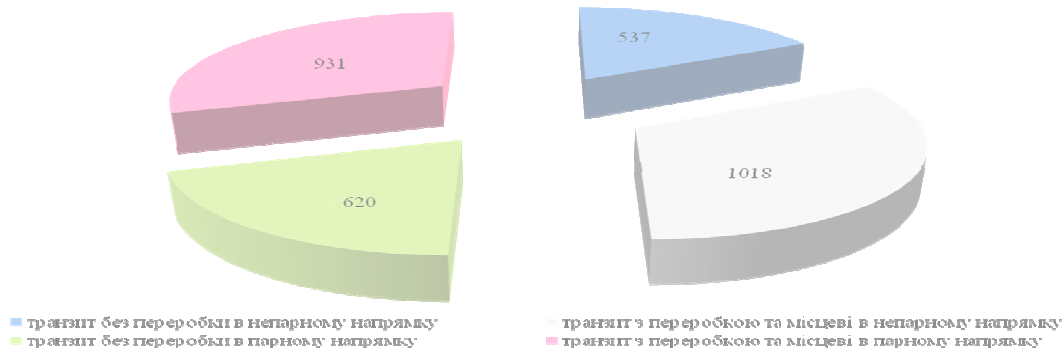


Fig. 11. Histogram of average daily car traffic flow volume on departure for May 2015

Transit without rehandling to unpaired direction
Transit without rehandling to paired direction

Transit rehandled and local to unpaired direction
Transit rehandled and local to paired direction

Table 1

**The annual analysis of total daily transit car traffic flow
volume without rehandling at X marshaling yard**

№ of range	Range limits		Range centre, min	Number of observa- tions	B_j	$N_j B_j$	$N_j^2 B_j$	h_j
	left	right		K_j				
1	679	862	771	65	0.1781	11.575	752.397	0.000973
2	862	1 045	954	86	0.2356	20.263	1 742.619	0.001288
3	1 045	1 228	1 137	75	0.2055	15.411	1 155.822	0.001123
4	1 228	1 411	1 320	41	0.1123	4.605	188.825	0.000614
5	1 411	1 594	1 503	33	0.0904	2.984	98.458	0.000494
6	1 594	1 777	1 686	28	0.0767	2.148	60.142	0.000419
7	1 777	1 960	1 869	13	0.0356	0.463	6.019	0.000195
8	1 960	2 143	2 052	12	0.0329	0.395	4.734	0.000180
9	2 143	2 326	2 235	7	0.0192	0.134	0.940	0.000105
10	2 326	2 509	2 418	5	0.0137	0.068	0.342	0.000075
Total				365	0.9123	45.866	2 638.677	

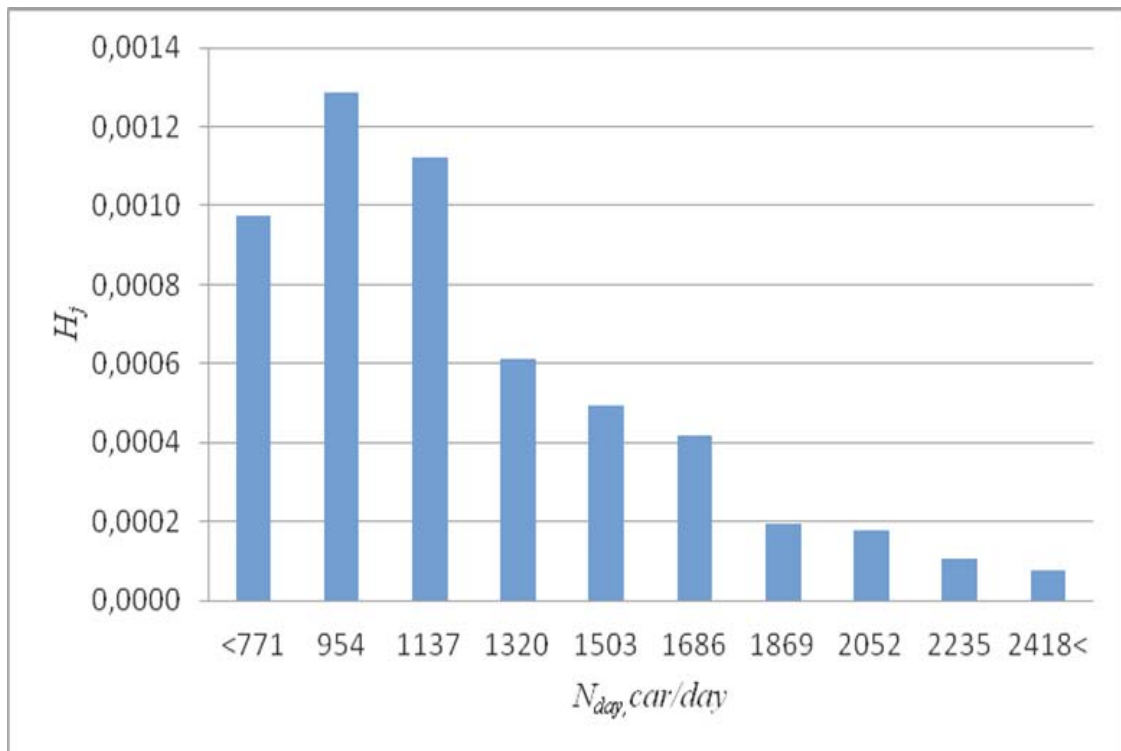


Fig. 12. Histogram of distribution of the total daily
transit car traffic flow without rehandling

Table 2

**The annual analysis of total daily rehandled transit and local car traffic flow
volume on arrival at X marshaling yard**

№ of ranges	Range limits		Range centre, min	Number of observa- tions	B_j	$N_j B_j$	$N_j^2 B_j$	h_j
	left	right		K_j				
1	1 280	1 423	1 352	5	0.1613	0.806	4.032	0.001128
2	1 423	1 566	1 495	17	0.5484	9.323	158.484	0.003835
3	1 566	1 709	1 638	27	0.8710	23.516	634.935	0.006091
4	1 709	1 852	1 781	36	1.1613	41.806	1 505.032	0.008121
5	1 852	1 995	1 924	91	2.9355	267.129	24 308.742	0.020528
6	1 995	2 138	2 067	71	2.2903	162.613	11 545.516	0.016016
7	2 138	2 281	2 210	63	2.0323	128.032	8 066.032	0.014212
8	2 281	2 424	2 353	24	0.7742	18.581	445.935	0.005414
9	2 424	2 567	2 496	19	0.6129	11.645	221.258	0.004286
10	2 567	2 710	2 639	12	0.3871	4.645	55.742	0.002707
Total				365	9.0323	592.645	44 643.226	

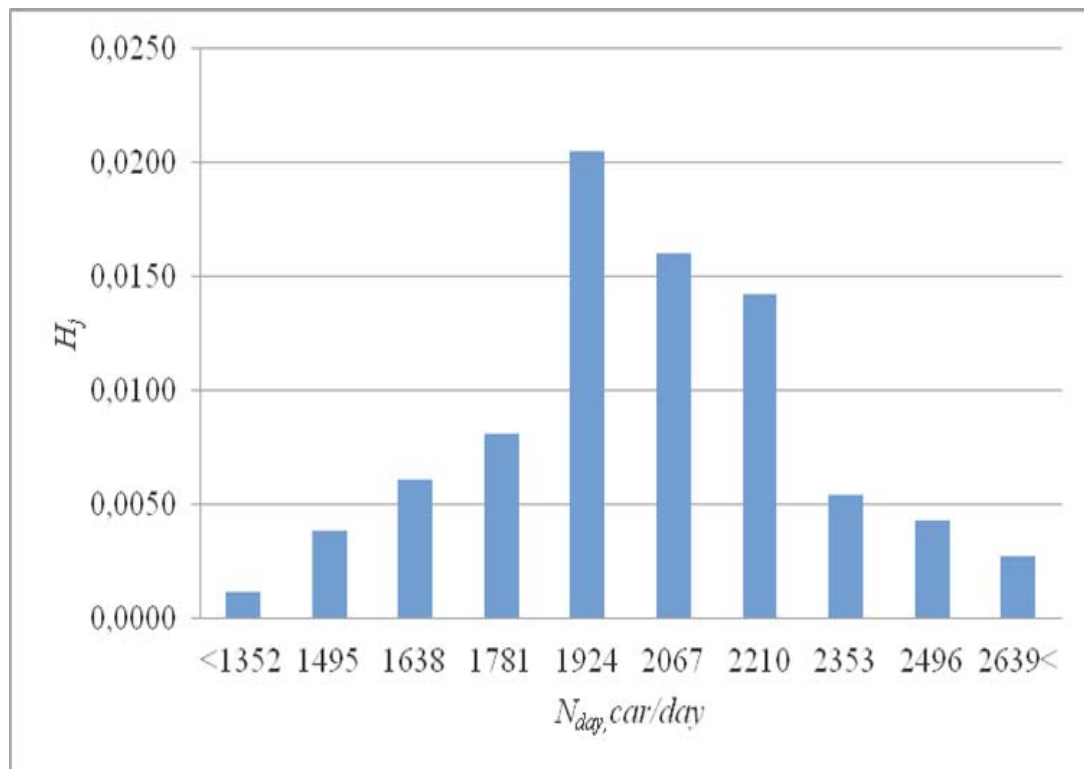


Fig. 13. Histogram of distribution of total daily
transit rehandled and local car traffic flow on arrival

Table 3

**The annual analysis of total daily rehandled transit and local car traffic flow
volume on departure at O marshaling yard**

№ of ranges	Range limits		Range centre, min	Number of observations	B_j	$N_j B_j$	$N_j^2 B_j$	h_j
	left	rights		K_j				
1	1 247	1 419	1 333	12	0.0329	0.395	4.734	0.000191
2	1 419	1 591	1 505	33	0.0904	2.984	98.458	0.000526
3	1 591	1 763	1 677	35	0.0959	3.356	117.466	0.000558
4	1 763	1 935	1 849	39	0.1068	4.167	162.518	0.000621
5	1 935	2 107	2 021	79	0.2164	17.099	1 350.792	0.001258
6	2 107	2 279	2 193	56	0.1534	8.592	481.140	0.000892
7	2 279	2 451	2 365	51	0.1397	7.126	363.427	0.000812
8	2 451	2 623	2 537	28	0.0767	2.148	60.142	0.000446
9	2 623	2 795	2 709	20	0.0548	1.096	21.918	0.000319
10	2 795	2 967	2 881	12	0.0329	0.395	4.734	0.000191
Total				365	0.9123	45.866	2 638.677	

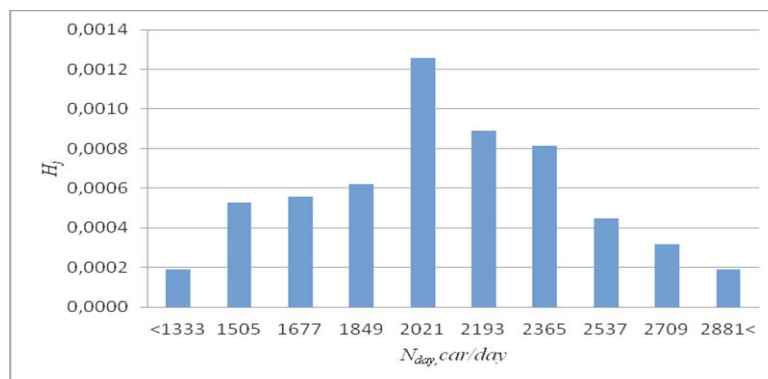


Fig. 14. Histogram of distribution of total daily transit rehandled
and local car traffic flow on departure

The law of train arrival distribution is Poisson, and the intervals between them have exponential distribution (see Table 1-3, Fig. 12-14). Irregularity of train arrivals affects the station operation and must be taken into account both when developing the procedure and when solving the problems of the station technical equipment. [7-8].

The main indicator of the marshaling yard operation is the average downtime of rehandled transit cars. Station-time of cars consists of the time taken to perform successive operations on

individual elements of the rehandling process and downtime in expectation of operations. The correct determination of the average time spent by a rehandled transit car at the station is essential, especially in the conditions of new system of economic incentives. But still there is no separate methodology for determining the wagon downtime, which would allow to objectively consider the equipment and operation technology and exclude the possibility for subjective decisions.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Total station-time of rehandled transit car consists of the following elements [9-12]:

$$t_{\text{reh}} = t_{\text{ha}} + t_{\text{qu}}^b + t_h + t_{\text{acc}} + t_{\text{qu}}^c + t_{\text{cc}} + t_{\text{hd}} + t_{\text{qu}}^d,$$

where t_{ha} – time for train handling on arrival, $t_{\text{ha}} = 0.35$ h; t_{qu}^b – average breaking-up queue time, hours; t_h – hump train breaking-up interval, $t_h = 0.37$ h; t_{acc} – average downtime of cars during formation, hours; t_{qu}^c – average composition queue time, hours; t_{cc} – time for composition completion and train launching to departure yard excluding locomotive return time, $t_{\text{cc}} = 0.44$ h; t_{hd} – time for train pre-departure handling, $t_{\text{hd}} = 0.5$ h; t_{qu}^d – departure queue time, hours.

Some downtime elements are the values, determined by the operation procedure and not dependent on the volume of work, which can be expressed as time to complete the operations.

Increase in workload leads to reduced downtime during formation but extends the queue downtime on the subsequent service element. Depending on the operation volume effect on the downtime elements, the latest can be divided into three groups

$$t_{\text{пер}} = (t_{\text{об}} + t_r + t_{\text{ф}} + t_{\text{обп}}) + t_{\text{нак}} + (t_{\text{оч}}^p + t_{\text{оч}}^{\text{ф}} + t_{\text{оч}}^o)$$

Given Pollaczek-Khinchin formula [12], the last three downtime elements can be written as

$$t_{\text{qu}}^b = \frac{Nt_h^2(v_{\text{in}}^{2.5} + v_h^2)}{48 \cdot 2Nt_h};$$

$$t_{\text{qu}}^c = \frac{Nt_c^2(1 + v_c^2)}{48M - 2Nt_c};$$

$$t_{\text{qu}}^d = \frac{NI_d^2(1 + v_d^2)}{48 - 2NI_d};$$

Average downtime during formation is determined by the formula

$$t_{\text{acc}} = \frac{ck}{N},$$

where N – number of trains rehandled at the station per day; k – number of appointments of the trains composed at the station; c – formation parameter.

In order to analyze the effect of rehandling volume on the rehandled transit car downtime elements at the station we plot the dependence graph of the car downtime elements on the rehandling volume. The dependence graph is shown in Fig. 15.

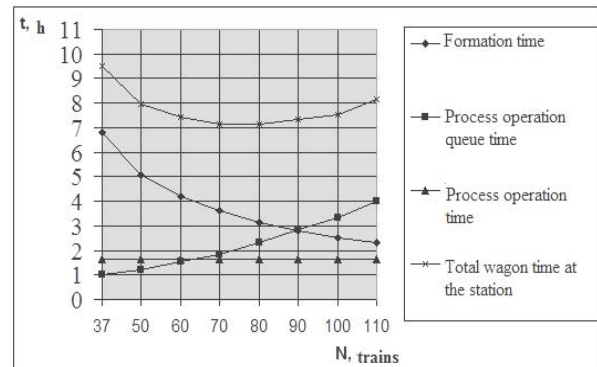


Fig. 15. Dependence of car downtime on rehandling volume

The curve variation on the graph clearly shows the effect of rehandling volume on two downtime elements: during formation and in expectation of operations.

In case of small rehandling volumes the car downtime decrease should be achieved mainly by reducing the car formation costs organizing the approach of locking groups, replacement of one-group minor purpose trains with the group ones, etc. In case of large rehandling volumes the focus should be given to reducing the time of breaking-up, composition and departure processes, in order to shorten the queue downtime.

The analysis of changes in downtime elements, depending on the rehandling volume allows not only to identify the car downtime reduction methods, but also to make a correct assessment of station staff work, as well as to adjust the rate of idle cars. The station car downtime rate is set for a specified amount of work. But the actual rehandling is different from the scheduled one. In this regard for objective evaluation of station staff work it is necessary to adjust the rate on the amount of work performed.

One of the important elements of the time spent by the cars at technical stations that affects the car traffic management system is car downtime during formation. This downtime may be determined both by total car flow, that is from the moment of arrival at the station of these specific cars and to

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

the moment of their departure from the station, and only by the flow at the marshalling track. To plan the composition for a specified period the car downtime during formation is determined with sufficient accuracy by analytical calculations. Analysis of the formation process in different conditions of car approach to the station and its operation makes it possible to determine more precisely the formation parameter c , and hence the formation car-hours for individual destinations or total value for the station.

The uncoordinated car approach to the station results in continuous formation process, with some cars queueing for the next train composition. In practice, there is uneven arrival of car groups and in different amounts, thus the formation parameter c may differ for certain destinations, and for certain categories of trains with the same destination that depart during the day. The formation parameter c is always averaged during the analytical calculations, that is its fluctuations are ignored.

One can conclude that the formation parameter is dependent on uneven approach of car groups to the station, but besides it is dependent on a significant number of factors that affect the train formation process. The average number of car groups e , forming the trains m_{om} , depend on the number of car groups of a specific destination arriving during a certain period (day or T_H).

But we need to pay attention to the fact that continuous and uniform flow to the station of car groups with the same volume does not affect the formation parameter. Thus, the formation parameter is dependent on the interval between the car group arrivals, frequency and duration of interruptions in the train formation, the value of completing group, the number of cars in the first and other groups.

Analysis of execution of the main indicators at X station was conducted for the 1st half of 2015 and is presented in Table 13.

Table 4

Analysis of execution of major quantitative and qualitative indicators

Description of indicator	Plan for 1 half year of 2015	Execution			
		1 half year of 2014	1 half year of 2015	Till 2014, %	To plan, %
Total daily departure, incl., car	3 099	5 036	3 002	60	97
– transit with rehandling, car	1 987	2 401	1 940	81	98
– transit without rehandling, car	1 092	2 540	1 002	39	92
– local, car	20	46	17	37	85
Average arrival per day, <i>train</i>	62	95	63	66	102
Average departure per day, incl., <i>train</i>	60	91	57	63	95
– own composition, <i>train</i>	–	47	39	83	–
Operating fleet, car	1 218	1 144	1 165	102	96
Average loading per day, car	–	6	3	50	–
Average unloading per day, car	–	36	7	19	–
Downtime of relanded transit cars, <i>h</i>	10.50	10.28	13.05	79	80
Downtime of transit cars without relanding, <i>h</i>	1.40	1.37	1.50	91	93
Downtime during 1 load operation, <i>h</i>	95.0	154.73	133.02	116	71
Static loading, <i>ton/car</i>	48.09	50.19	59.02	118	123
Wagon turnover, <i>car</i>	6 199	10 071	5 996	60	97

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Downtime of transit car without rehandling for the I half of 2015 is not executed and makes 1.50 hours, that is overvalued compared to the planned target by 0.10 hours. Total losses in car -hours due to non-execution of downtime for transit car without rehandling make 18,127 car -h and occurred for the following reasons:

- The target «Locomotive supply queue time» exceeds by 0.08 h (losses of 15,436 car -h) due to lack of train locomotives and foot-plate staff;
- «Departure queue time» by 0.02 h (losses of 2,691 car -h) due to occurrence of non-productive element:
 - Making way for passenger and suburban trains (losses of 217 car -h);
 - Regulation by train dispatcher (losses of 2,474 car -h).

Compared to last year fact, the downtime of transit cars without rehandling exceeded by 0.13 h. Total losses in car-hours due to non-execution of downtime for transit car without rehandling make 23,565 car -h and occurred for the following reasons:

- The target «Locomotive supply queue time» exceeds by 0.11 h (losses of 20,874 wag-h) due to lack of train locomotives and foot-plate staff;
- By 0.02 h (losses of 2,691 car -h) due to occurrence non-productive element «Departure queue time» through waiting for departure after delivery trains.

Downtime of rehandled transit car for the I half of 2015 is not executed and makes 13.05 h, that is overvalued compared to the planned target by 2.55 h. Total losses in car -hours due to non-execution of downtime for rehandled transit car make 887,586 car -h.

The element «For breaking-up» is overvalued by 0.12 h (losses of 41,769 car -h), for the following reasons:

- The target of unproductive element «Breaking-up queue time» is overvalued because of:
 - The lack of free tracks at yards «B», «D» for formation of a new train on the free track (losses weights 4,993 car-h);
 - Inability to transfer corner wagon traffic flow (losses of 27,744 car-h);
 - Work with long trains (losses of 8,220 car-h);
 - Work with nomenclature cargo (losses of 812 car-h).

The element «Formation» is overvalued by 2.35 h (total losses of 817,972 car-h) for the following reasons:

- Long-term formation of certain destinations (losses of 709,205 car -h);
- Expectation for formation completion and supply of formed trains to the departure yard due to lack of shunting locomotives (losses of 14 045 car -h);
- Downtime of wagons with guard, with destination to Volnovakha station due to lack of suitable covered cars for guard travel (losses of 10,378 car -h);
- Downtime of formed trains with destination of Donetsk railways station (total losses of 84,344 car -h)

The element «Departure» is overvalued by 0.08 h (total losses of 27 845 car-h) for the following reasons:

- the target of unproductive element «Locomotive supply queue time» is exceeded by 0.06 h (losses of 21 784 car-h) due to lack of train locomotives and foot-plate staff;
- The target of unproductive element «Departure queue time is overvalued by 0.02 h (total losses of 6,061 wag-h) because of:
 - Regulation by train dispatcher (losses of 2,656 car-h);
 - Closure of the station O at the section from the point No. 344 to 203 km pk.3, closure at the line H – I (losses of 2,395 car-h);
 - Making way for passenger and suburban trains (losses of 714 car-h);
 - Car accounting of 20.05.2015 (losses of 296 car-h).

Compared to last year fact, the downtime of transit rehandled cars exceeded by 2.77 h. Total losses in car-hours due to non-execution of downtime for transit rehandled car make 964,162 car-h.

The element «Formation» is overvalued by 2.88 h through expectation of sending the finished trains to the destination yard.

Process operation queue downtime amounted to elements:

- «from arrival to supply» – 50.36 h;
- «from cleaning to departure» – 30.41 h.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Table 5

Analysis of the local car during 1 loading operation

Description of indicator	Plan for 1 half year of 2015	Execution 1 half of 2015	Execution / plan
Downtime during 1 load operation, incl., <i>h</i>	95.00	133.02	+38.02
– from arrival to supply, <i>h</i>	29.34	60.97	+31.63
– during loading operations, <i>h</i>	38.02	28.71	-9.31
– from cleaning to departure, <i>h</i>	27.64	43.34	+15.70

Table 6

Analysis of hump operation

Description of indicator	Plan for 1 half year of 2015	Execution			
		1 half year of 2014	1 half year of 2015	Till 2014, %	To plan, %
Relandling of cars per day, incl., <i>car</i>	2 776	3 211	2 845	88.60	102.48
– unpaired system, <i>car</i>	1 442	1 582	1 521	96.14	105.48
– paired system, <i>car</i>	1 334	1 629	1 324	81.28	99.25
Repeated rehandling	–	766	942	122.98	–
Corner flow per day, incl., <i>car</i>	–	345	415	120.29	–
– unpaired system, <i>car</i>	–	176	182	103.41	–
– paired system, <i>car</i>	–	169	233	137.87	–
Local wagons per day, incl., <i>car</i>	–	421	527	125.18	–
– unpaired system, <i>car</i>	–	208	258	124.04	–
– paired system, <i>car</i>	–	213	269	126.29	–

Repeated rehandling is required for 942 *car*,
incl.:

- Corner flow wagons – 415 *car*;
- Cars from ap/tracks – 10 *car*;
- Cars of productive rehandling – 294 *car*,
incl.:
- Buffer cars for dangerous goods – 48 *car*;
- Cars of separating track after repair, cars
without documents – 56 *car*;
- Rebuilding of trains because of the cars trav-
eling by the 1st freight document – 51 *car*;
- Composition of pickup trains – 48 *car*;
- Rebuilding of trains of extra-length and
weight – 48 *car*;
- For composition of cars with metal products,
setting of covered wagon for MSS escorting – 43 *car*;

– Cars to be placed into train main part – 223
car, incl.:

- Cars, requiring MSS escorting – 92 *car*;
- Cars loaded with metal and metal products –
131 *car*.

Total car downtime at the station consists of
productive and unproductive downtime. Productive
downtime includes time for process operations,
time for car formation, while unproductive down-
time includes the process operation queue time.

The question of reducing the average downtime
of all car categories (transit without rehandling,
rehandled, local) at the station should be solved by
reducing unproductive downtime.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Findings

The methods of mathematical statistics allowed building the histogram of car traffic flow distribution at the marshalling yard and assessment of their parameters. The key quantitative and qualitative indicators of the station operation were analyzed. In order to analyze the effect of rehandling volume on the rehandled transit car downtime elements at the station we plotted the dependence graph of the car downtime elements on the rehandling volume. The curve variation on the graph clearly shows the effect of rehandling volume on two downtime elements: during formation and in expectation of operations.

In case of small rehandling volumes the car downtime decrease should be achieved mainly by reducing the car formation costs organizing the approach of locking groups, replacement of one-group minor purpose trains with the group ones, etc. In case of large rehandling volumes the focus should be given to reducing the time of breaking-up, composition and departure processes, in order to shorten the queue downtime.

Originality and practical value

One of the main kinds of unproductive downtime during the carriage of goods by rail is a downtime on the marshalling yards in expectation of technological operations because of the system congestion. Reduction of this indicator is possible due to rational use of the marshalling yard capacity provided the rational distribution and car- and train flows between the major marshalling yards of Ukrzaliznytsia. The analysis of changes in downtime elements, depending on the rehandling volume allows not only to identify the car downtime reduction methods, but also to make a correct assessment of station staff work, as well as to adjust the rate of idle cars. The rate of car downtime at the station is set for a specified amount of work. But the actual rehandling is different from the target one. In this regard the objective evaluation of station staff work requires adjustment of the rate on the amount of work performed.

Conclusions

The question of reducing the average downtime of all car categories at the station should be solved by reducing unproductive downtime. The correct

determination of the average time spent by a rehandled transit car at the station is essential, especially in the conditions of new system of economic incentives. But still there is no separate methodology for determining the car downtime, which would allow to objectively consider the equipment and operation technology and exclude the possibility for subjective decisions.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Богданов, В. М. Резервы пропускной и провозной способности / В. М. Богданов // Ж.-д. трансп. – 2008. – № 8. – С. 54–56.
2. Бутко, Т. В. До питання визначення оптимальної кількості сортувальних станцій / Т. В. Бутко, М. І. Данько, Г. М. Сіконенко // Коммунальное хоз-во городов. – Харьков, 2003. – Вып. 45. – С. 237–242.
3. Бутко, Т. В. Удосконалення управління процесом просування поїздотоків на основі стабілізації обігу вантажного вагону / Т. В. Бутко, О. В. Лаврухін, Ю. В. Доценко // Зб. наук. пр. ДонІЗТ. – Донецьк, 2010. – Вип. 22. – С. 18–26.
4. Годяев, А. И. Оценка потенциально реализуемой пропускной способности железнодорожного участка / А. И. Годяев // Вестн. ВНИИЖТа. – 2004. – № 6. – С. 29–32.
5. Луханин, Н. И. К вопросу сокращения оборота вагонов / Н. И. Луханин, Г. И. Музыкина, П. В. Бех // Заліз. трансп. України. – 2007. – № 4. – С. 69–71.
6. Макарович, А. М. Оптимизация развития пропускной способности железнодорожных линий / А. М. Макарович. – Москва : Транспорт, 1969. – 200 с.
7. Музикін, М. І. Вплив «вікон» на пропуску спроможність залізничного напрямку / М. І. Музикін, Г. І. Нестеренко // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 3 (51). – С. 24–33. doi: 10.15802/stp2014/25797.
8. Музикіна, Г. І. Вплив параметрів накопичення вагонів на їх простій на сортувальній станції / Г. І. Музикіна, Т. В. Болвановська, Є. М. Жорова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 20. – С. 198–201.
9. Сотников, Е. А. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на потребную пропускную способность участков / Е. А. Сотников, К. П. Шенфельд // Вестн. ВНИИЖТа. – 2011. – № 5. – С. 3–9.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

10. Сотников, И. Б. Взаимодействие станций и участков железных дорог / И. Б. Сотников. – Москва : Транспорт, 1976. – 268 с.
11. Шабалин, Н. Н. Оптимизация процесса переработки вагонов на станциях / Н. Н. Шабалин. – Москва : Транспорт, 1973. – 184 с.
12. Яновський, П. О. Дослідження впливу факторів на час перебування поїздів на дільницях / П. О. Яновський // Залізн. трансп. України. – 2008. – № 3. – С. 25–29.
13. Gestrelus, S. Mathematical models for optimising decision support systems in the railway industry [Електронний ресурс] / S. Gestrelus // Licentiate thesis. Malardalen University Press Licentiate Theses, Sweden. – 2015. – 42 p. – Режим доступу: mdh.diva-por-tal.org/smash/get/diva2:798-558/FULLTEXT01.pdf. – Назва з екрана. – Перевірено : 20.01.2016.
14. Railway operations, time-tabling and control / M. Marinov, I. Sahin, S. Ricci, G. Vasic-Franklin // Research in Transportation Economics. – 2015. – Vol. 41, № 1. – P. 59–75. doi:10.1016/j.ret-rec.2012.10.003.

Г. И. НЕСТЕРЕНКО¹, М. И. МУЗЫКИН^{2*}, В. Л. ГОРОБЕЦ³, С. И. МУЗЫКИНА⁴

¹ Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, эл. почта galinamuzykina@rambler.ru, ORCID 0000-0003-1629-0201

^{2*} Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (095) 251 53 14, эл. почта grafmim@rambler.ru, ORCID 0000-0003-2938-7061

³ Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 793 19 08, эл. почта v-gorobets@mail.ru, ORCID 0000-0002-6537-7461

⁴ Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (066) 082 88 27, эл. почта fufei@rambler.ru, ORCID 0000-0002-5832-6949

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВАГОНОПОТОКОВ ПО ПРИБЫТИЮ И ОТПРАВЛЕНИЮ СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ X

Цель. Научная работа своей целью имеет анализ имеющейся организации вагонопотоков по сортировочной станции с целью уменьшения простоя вагонов. **Методика.** Используя методы математической статистики, были построены гистограммы распределения вагонопотоков сортировочной станции и проведена оценка их параметров. Проанализировано выполнение основных количественных и качественных показателей работы станции. Для анализа влияния объема переработки на элементы простоя на станции транзитного вагона с переработкой построен график зависимости элементов простоя вагонов от объема переработки. Характер изменения кривых на графике наглядно отображает влияние объема переработки на два элемента простоя: под накоплением и в ожидании выполнения операций. **Результаты.** Подтверждено, что вопрос сокращения среднего времени простоя вагонов всех категорий на станции нужно решать за счет уменьшения времени непроизводительного простоя. Верное определение среднего времени нахождения на станции транзитных вагонов с переработкой имеет важное значение, тем более в условиях новой системы экономического стимулирования. Но до сих пор так и не существует отдельной методики определения простоя вагонов, которая позволяла бы объективно учитывать техническую оснащенность и технологию работы и не давала места для субъективных решений. **Научная новизна.** Одним из основных видов непроизводительного простоя при перевозке грузов железнодорожным транспортом является простой на сортировочных станциях в ожидании выполнения технологических операций из-за загруженности системы. Уменьшение этого показателя возможно при рациональном использовании пропускной способности сортировочных станций при условии рационального распределения вагоно- и поездопотоков между основными сортировочными станциями Укрзализныци. **Практическая значимость.** Анализ изменения элементов простоя в зависимости от объема переработки позволяет не только целенаправленно определять методы по сокращению простоя вагонов, но и осуществлять точную оценку работы коллектива станции, а также корректировать норму простоя вагонов.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Ключевые слова: вагонопоток; сортировочная станция; объем переработки; простой вагонов; параметр накопления.

Г. І. НЕСТЕРЕНКО¹, М. І. МУЗИКІН^{2*}, В. Л. ГОРОБЕЦЬ³, С. І. МУЗИКІНА⁴

¹Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, ел. пошта galinamuzykina@rambler.ru, ORCID 0000-0003-1629-0201

^{2*}Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (095) 251 53 14, ел. пошта grafmim@rambler.ru, ORCID 0000-0003-2938-7061

³Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 793 19 08, ел. пошта v-gorobets@mail.ru, ORCID 0000-0002-6537-7461

⁴Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (066) 082 88 27, ел. пошта fufei@rambler.ru, ORCID 0000-0002-5832-6949

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ВАГОНОПОТОКІВ ПО ПРИБУТТІ ТА ВІДПРАВЛЕННІ СОРТУВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ Х

Мета. Наукова робота має за мету аналіз наявної організації вагонопотоків по сортувальній станції із метою зменшення простою вагонів. **Методика.** Використовуючи методи математичної статистики, були побудовані гістограми розподілу вагонопотоків сортувальної станції та проведено оцінювання їх параметрів. Проаналізовано виконання основних кількісних та якісних показників роботи станції. Для аналізу впливу об'єму переробки на елементи простою на станції транзитного вагону із переробкою побудовано графік залежності елементів простою вагонів від об'єму переробки. Характер зміни кривих на графіку наглядно відображує вплив об'єму переробки на два елементи простою: під накопиченням та в очікуванні виконання операцій. **Результати.** Підтверджено, що питання скорочення середнього часу простою вагонів усіх категорій на станції потрібно вирішувати за рахунок зменшення часу непродуктивного простою. Вірне визначення середнього часу знаходження на станції транзитних вагонів із переробкою має важливе значення, тим паче в умовах нової системи економічного стимулювання. Але до цього часу так і немає окремої методики визначення простою вагонів, яка б дозволяла об'єктивно враховувати технічну оснащеність та технологію роботи і не давала місця для суб'єктивних рішень. **Наукова новизна.** Одним із основних видів непродуктивного простою при перевезенні вантажів залізничним транспортом є простій на сортувальних станціях в очікуванні виконання технологічних операцій через завантаженість системи. Зменшення цього показника можливе при раціональному використанні пропускнуої спроможності сортувальних станцій за умови раціонального розподілу вагоно- та поїздопотоків між основними сортувальними станціями Укрзалізниці. **Практична значимість.** Аналіз зміни елементів простою в залежності від об'єму переробки дозволяє не тільки цілеспрямовано визначати методи по скороченню простою вагонів, але й здійснювати вірну оцінку роботи колективу станції, а також корегувати норму простою вагонів.

Ключові слова: вагонопотік; сортувальна станція; об'єм переробки; простій вагонів; параметр накопичення.

REFERENCES

1. Bogdanov V.M. Rezervy propusknoy i provoznoy sposobnosti [Reserves of carriage and traffic capacity]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway Transport*, 2008, no. 8, pp. 54-56.
2. Butko T.V., Danko M.I., Sikonenko H.M. Do pytannia vyznachennia optymalnoi kilkosti sortovalnykh stantsii [To the question of determining the optimal number of sorting yards]. *Kommunalnoye khozyaystvo gorodov – Municipal Infrastructure of Cities*, 2003, issue 45, pp. 237-242.
3. Butko T.V., Lavrukhin O.V., Dotsenko Yu.V. Udoskonalennia upravlinnia protsesom prosuvannia poizdotokiv na osnovi stabilizatsii obihu vantazhnoho vahonu [Improving governance in the process of moving the train flows on the basis of stabilization of the turnover of the freight car]. *Zbirnyk naukovykh prats*

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu* [Proc. of the Donetsk Institute of Railway Transport]. Donetsk, 2010, issue 22, pp. 18-26.
4. Godyaev A.I. Otsenka potentsialno realizuemoi propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnogo uchastka [Evaluation of potentially feasible throughput capacity of the railway section]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of All-Russian Research Institute of Railway Transport]. Moscow, 2004, no. 6, pp. 29-32.
 5. Lukhanin N.I., Muzykina G.I., Bekh P.V. K voprosu sokrashcheniya oborota vagonov [To the reduction of rail car turnover]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2007, no. 4, pp. 69-71.
 6. Makarochkin A.M. *Optimizatsiya razvitiya propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnykh liniy* [Optimization of the development of the capacity of rail lines]. Moscow, Transport Publ., 1969. 200 p.
 7. Muzykin M.I., Nesterenko H.I. Vplyv «vikon» na propusknuyu spromozhnist zaliznychnoho napriamku [Influence of maintenance windows on the working capacity of railway route]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2014, no. 3 (51), pp. 24-33. doi: 10.15802/stp2014/25797.
 8. Muzykina H.I., Bolvanovska T.V., Zhorova Ye.M. Vplyv parametriv nakopy-chennia vahoniv na yikh prostii na sortuvannii stantsii [The influence of cars acquisition parameters on their idle hours on marshalling yard]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk national University of railway transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 20, pp. 198-201.
 9. Sotnikov Ye.A., Shenfeld K.P. Neravnomernost gruzovykh perevozok v sovremennykh usloviyakh i yeye vliyanie na potrebnuyu propusknuyu sposobnost uchastkov [The unevenness of freight transport in modern conditions and its impact on the needs of capacity areas]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of All-Russian Research Institute of Railway Transport], 2011, no. 5, pp. 3-9.
 10. Sotnikov I.B. *Vzaimodeystviye stantsiy i uchastkov zheleznykh dorog* [The interaction of stations and railways]. Moscow, Transport Publ., 1976. 268 p.
 11. Shabalin N.N. *Optimizatsiya protsessa pererabotki vagonov na stantsiyakh* [Optimization of recycling process of cars at stations]. Moscow, Transport Publ., 1973. 184 p.
 12. Yanovskiy P.O. Doslidzhennia vplyvu faktoriv na chas perebuvannia poizdiv na dilnytsiakh [Research of influence factors on the time of trains at stations]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2008, no. 3, pp. 25-29.
 13. Gestrelus S. Mathematical models for optimising decision support systems in the railway industry. Licentiate thesis. Malardalen University Press Licentiate Theses, Sweden, 2015. 42 p. Available at: mdh.diva-portal.org/smash/get/diva2:798558/FULLTEXT01.pdf (Accessed 20 January 2016).
 14. Marinov M., Sahin I., Ricci S., Vasic-Franklin G. Railway operations, time-tabling and control. *Research in Transportation Economics*, 2015, vol. 41, no. 1, pp. 59-75. doi:10.1016/j.retrec.2012.10.003.

Prof. V. I. Bobrovskiy, Dr. Sc. (Tech.) (Ukraine); Prof. T. V. Butko, Dr. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: Nov. 20, 2015

Received: Jan. 21, 2016

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

UDC 625.1.033.34

D. M. KURHAN^{1*}

^{1*}Dep. «Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kurhan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

MODELING OF DEVELOPMENT VERTICAL DEFORMATION OF RAILWAY TRACK

Purpose. State of railway track must meet the conditions of safety, comfort and smooth ride. The presence of irregularities deteriorates the dynamics of interaction of track and rolling stock, causes speed limiting, creates the possibility of movement safety violation. This brings up the question concerning the study of the factors leading to the possibility of track irregularities and the process of their development. The purpose of this paper is to analyse the processes of emergence and development of irregularities in the area of unequal vertical elasticity of railway track using mathematical modelling. **Methodology.** Railroad under the trains works as the system of elastic bodies, so the emergence and development of irregularities can be represented as the transition from elastic to permanent strain. Irregularity development will affect the dynamics of interaction between track and rolling stock not only at the wheel location directly in the area of irregularity, but also at a certain distance beyond. Therefore, to study the development of irregularities, including those along the track, it is necessary to model the process of wheel load movement along the area. The adopted model consists of a wheel set moving on inertia-free beam and resting on individual supports. It is described by Lagrange differential equations. The work introduced the hypothesis that the level of permanent strain is distributed in proportion to the dynamic deflection derivative. **Findings.** Location of vertical longwise irregularity does not necessarily reproduce the location of the problem area. While in operation the vertical irregularity extends not only in depth but also along the track, herewith the increase in length is accompanied by the displacement of local maxima and the emergence of new ones. This leads to the development of so-called «pits» when approaching unequal-elastic areas. **Originality.** The work provides further development of tasks for track and rolling stock interaction modelling, in particular aimed to take into account the unequal elasticity areas and their influence on the formation of the track irregularities. The paper proposes new approaches to modelling the transition from elastic to permanent strain that allows predicting the development of track irregularity sizes depending on the area characteristics. **Practical value.** The results obtained by the author can be used to determine the schedule for track equal elasticity renovation works, as well as to analyse the measures aimed at the prevention of irregularities in areas with variable elasticity of railway track.

Keywords: track; track irregularity; rail deflection; unequal elasticity of track; interaction of track and rolling stock; railroad crossing

Introduction

During the whole period of operation the railway track must meet the desired conditions, especially the possibility to implement the set speeds. It is the practice to assess the track state by the indices of its geometric position.

During the track operation, even if it is in full compliance with the standards, various geometric irregularities are gradually emerging and developing. Their elimination and prevention are reputed to be the main task of interim track repairs and its current maintenance [11].

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

The presence of significant irregularities deteriorates the dynamics of interaction of track and rolling stock, prevents from comfort riding and even creates the possibility of movement safety violation. When reaching a certain size the irregularities cause speed limiting [14]. This issue is of particular relevance in terms of modern trends of increasing velocity [7, 15], whereas the track maintenance rules in this case are more demanding.

Many modern scientific papers are devoted to problems related to the study of track irregularities. They cover the question of their influence on the train dynamic performance [8, 10, 17, 20], as well as the means and methods of their measurement and evaluation [12, 16], and the design of measures to strengthen the rail support layers to avoid the emergence of irregularities [18, 19, 21], etc.

This brings up the question concerning the study of the factors leading to the possibility of track irregularities and the process of their development. Given that railway track under the trains works as the system of elastic bodies, the emergence and development of irregularities can be represented as the transition from elastic to permanent strain. And that is emphasized in many scientific studies, the cause of this is usually the areas of local unequal elasticity.

Unequal elasticity of rail support can occur in different cases. This may be a result of railway track state violations – presence of track depression, unsuitable fastenings, ballast pollution, etc. [1, 20]. The most prone to the unequal elasticity development areas are those with heavy traffic or leaning on weak soils. Besides the track unequal elasticity can be caused by structural features, such as adjacency to non-ballast bridges [13], presence of crossings [6, 22], etc.

Purpose

The purpose of this paper is to analyse the processes of emergence and development of irregularities in the area of unequal vertical elasticity of railway track using mathematical modelling.

Methodology

Today there are many different methods of physical and mathematical modelling for interaction of railway track and rolling stock. Depending on the problem to be solved, one can use both relatively simple two-dimensional design models and

developed models, which include the systems with dozens of equations. Despite the fact that this refers to the interaction of track and rolling stock, still the problems focused on the rolling stock study, and those focused on the railway track study have fundamental differences. Rolling stock models are, in most cases, the systems of motion (vibrations) of the interconnected solids. Typically for the mathematical description of these models use the rail track more appropriate to describe not move through solids, and because of their deformity. Typically such models are mathematically described by D'Alembert's principle. Railway track operation is more naturally described not as motion of solids, but the strains thereof. Therefore, the railway track is more often mathematically described by the models based directly on elasticity or its numerical representations, such as FEM (finite element method) and others. Thus, using FEM, the authors of the works [9, 10] examined the accumulation process of track vertical strain in the experimental section caused by polycyclic application of force. The essence of modelling process described in these works was as follows. The first calculation resulted in sleeper displacement in a vertical plane due to the applied load. The calculation is repeated for subsequent iterations, but each sleeper displacement acquired in the previous calculation is retained in the form of air gap.

The calculation results of iterative simulation for track settlement are shown in Fig. 1. So the work [10] presents the conclusion that the increasing number of iterations (tonnage pass) leads to the development of track settlement, but the speed of this process over time decreases.

Increasing irregularity affects the dynamics of interaction between track and rolling stock. Here-with this effect will be significant not only at the wheel location directly in the area of irregularity, but also at a certain distance beyond (due to the gradual stabilization of vibrations and force redistribution among the bogie wheels). Therefore, to study the development of irregularities (including those along the track) it is necessary to model the process of wheel load movement along the area.

Given that all factors except vertical dynamics are irrelevant for this problem, we adopted a simplified model consisting of a wheel set moving on inertia-free beam (rail), resting on individual supports (sleepers). The modelling took into account the load transmitted from the wheel set, hard and

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

dissipative connections between bodies of the model, the possibility to set different hardness for each support and geometric outline of the rail in the vertical plane, Fig. 2.

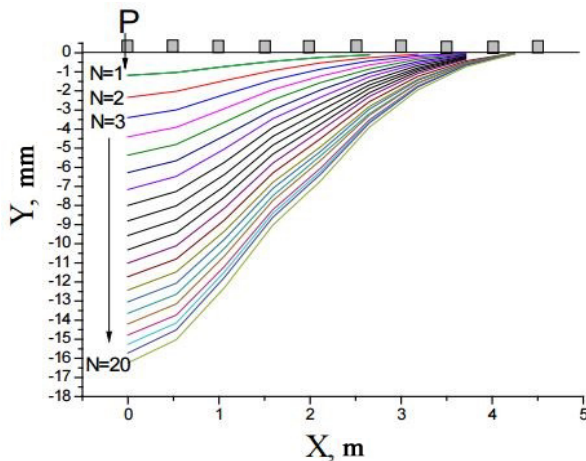


Fig. 1. Calculations results of iterative FEM modelling of track settlement [10]:

P – external load; Y – settlement; X – distance from the force application point; N – iteration number

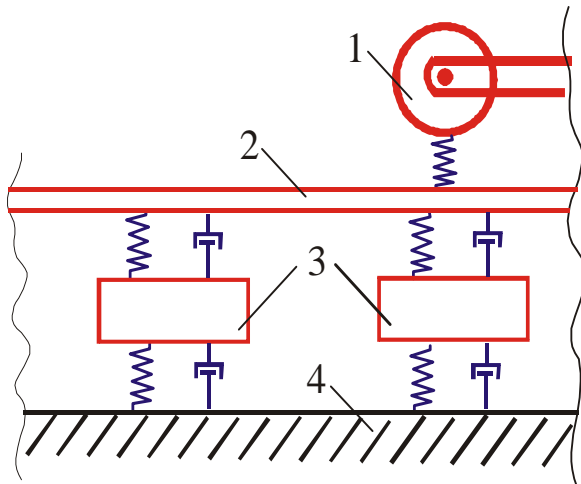


Fig. 2. Design model of interaction between track and rolling stock:

1 – wheel; 2 – rail; 3 – sleepers; 4 – sleeper support

The mathematical description of the model consists of a system of Lagrange differential equations of second kind and has no fundamental differences from similar works [2, 4].

Separation of permanent strains from total ones is a complex scientific problem, especially for multilayer systems such as railway track.

Establishing direct linear dependence of the permanent strains values on the total ones violates the adequacy of the model, especially under condi-

tions of stress, which is much lower than the level of strength (which is more typical for passenger traffic). In this case, the cause of permanent strains will be not the track deflections, but their longwise unevenness. Therefore the hypothesis was adopted that increase in permanent strains for the next step of iteration ($\Delta z_{perm}(x)$), determined by passed tonnage (T), is distributed along the area (x) in proportion to dynamic deflection derivative $z_{dyn}(x)$

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_{perm}(x) &\sim \frac{dz_{dyn}(x)}{dx}, \\ \Delta z_{perm}(x) &\leq f(T), \\ \exists x, \Delta z_{perm}(x) &= f(T) \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Findings

The proposed approach allows exploring the process of irregularity emergence caused by the track unequal elasticity and its subsequent development while in service.

Let's consider the calculation procedure based on the example with actual numerical output data. We assume the railway area with the place of local unequal elasticity, described by linear change of rail support elasticity modulus from 40 to 30 MPa in the middle of the area over 5 m length [5]. This corresponds to the following sequence performed to supports (sleepers):

$$U = \{40, \dots, 40, 37, 33, 30, 33, 37, 40, \dots, 40\}. \quad (2)$$

The first calculation is performed for the track without irregularities. Figure 3 shows the modelling results in the form of the area dynamic longwise deflection caused by passing rolling stock. The deflection in the zone of constant modulus of rail support elasticity corresponds to the analytical calculations by the known formula [2, 3]

$$z(x) = \frac{Pk}{2U}, \quad (3)$$

where P – wheel vertical force acting on the rail; k – relative rigidity factor.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

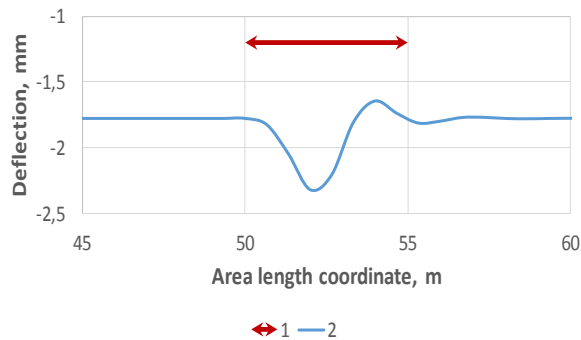


Fig. 3. Dynamic rail deflection for irregularity-free areas with local unequal elasticity:
1 – unequal elasticity zone; 2 – rail deflection

The algorithm (1) allowed determining the permanent strains and transferring them to the model as initial geometric track irregularity for the next iteration. Thus, the process of gradual development of irregularities is modelled – Fig. 4. For visual separation of results the iteration sequence in Fig. 4 is shown with omitted intermediate steps.

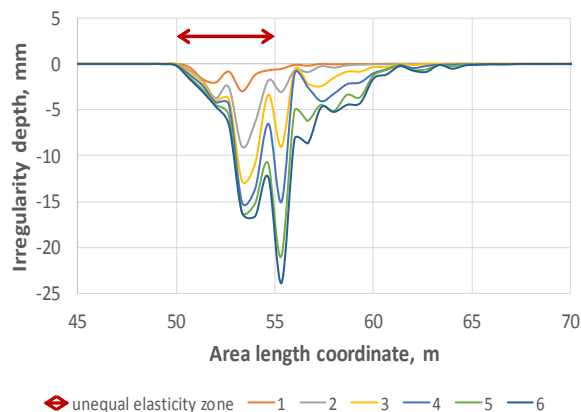


Fig. 4. Modelling of track irregularity development in the area of local unequal elasticity:
1 ... 6 – sequence of calculation iterations

Similar to the considered numerical example there were performed variant calculations for various input data. The study results allow us to establish certain tendencies. The irregularity outline, which is formed by permanent strains, reproduces neither the outline of dynamic rail deflection nor the outline of initial unequal elasticity. The permanent strains acquire a maximum at the entrance and exit of the dynamic irregularity (first it is unequal elasticity zone, which disturbs the trajectory of the wheel passing over it, and then – its merge with geometric (static) irregularity). While in operation

the vertical irregularity extends not only in depth but also along the track, herewith the increase in length is accompanied by the displacement of local maxima and the emergence of new ones. Development of irregularities with a gradual shift of peaks leads to the fact that it itself becomes more significant factor of additional force interaction compared to the original one – local unequal elasticity, causing further expansion and shift of irregularity. The result is that the geometric irregularity does not always strictly coincide with the location of cause of its formation.

In the above example (Fig. 4) the cause of irregularity formation was unequal elasticity zone. But once irregularity reaches a certain size, it is the one that defines the dynamics of interaction between track and rolling stock and, consequently, further development of the process. To demonstrate this observation the iterations in the previous example were stopped at formation of II-degree deflection [14] – the line «3» in Fig. 4. Further calculations include the constant modulus of rail support elasticity along the whole area. The resulted outline of the irregularity is shown in Fig. 5. For comparison, this figure also imposed irregularity from the previous example (line «6» in Fig. 4). Figure 5 shows that local irregularity area had already no significant effect on the development of irregularities.

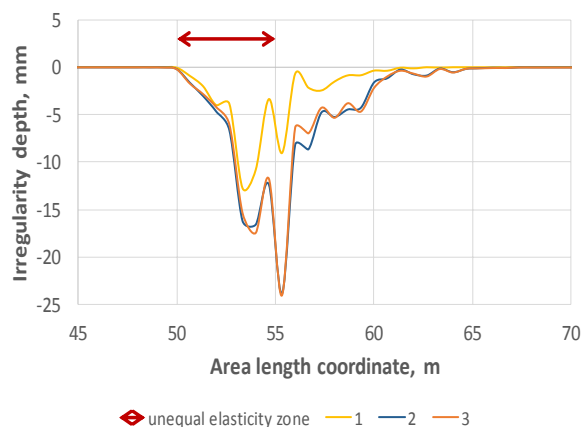


Fig. 5. Modelling of track irregularity development for different variants of area state:
1 – initial irregularity; 2 – irregularity formed in view of effect of initial unequal elasticity zone; 3 – irregularity, formed by the output of the conditions of area equal elasticity restoration

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

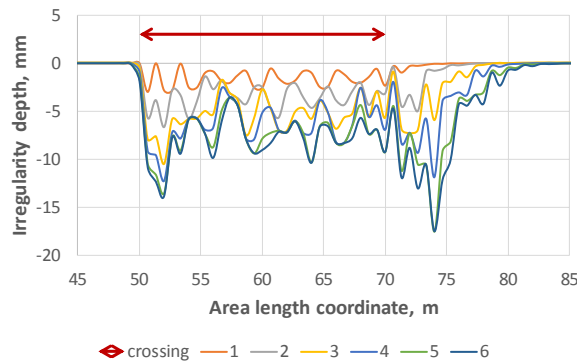


Fig. 6. Modelling of track irregularity in the crossing area:

1 ... 6 – sequence of calculation iterations

In some cases, the formation of track unequal elasticity zone might arise not from maintenance errors, but from design peculiarities, for example, transition area from ballast track to the bridge [13] or crossing zone [5, 6]. Based on the proposed method the development of vertical irregularities in the crossing zone was modelled. The crossing zone in the output data is a track area with high increase in modulus of rail support elasticity [6]:

$$U = \{40, \dots, 40, 120, \dots, 120, 40, \dots, 40\}. \quad (4)$$

The above example shows that the presence of the crossing, having formed a zone of increased modulus of rail support elasticity, provokes the emergence of track irregularity. The maximum amplitude of such irregularity will be located at the beginning and at the end of the formation. Over time of area operation, the irregularity will develop, along the track as well, that will lead to the emergence of «gaps» outside the structure. These findings correlate with the results of statistical processing of field measurements of irregularities ahead of non-ballast bridges and in the crossing area, that are given in the works [5, 6, 13] and others.

Originality and practical value

The work provides further development of tasks for track and rolling stock interaction modelling, in particular aimed to take into account the unequal elasticity areas and their influence on the formation of the track irregularities.

The paper proposes new approaches to modelling the transition from elastic to permanent strain that allows predicting the development of track

irregularity sizes depending on the area characteristics.

The obtained results can be used to determine the schedule for track equal elasticity renovation works (current maintenance, complex repairs, intermediate overhaul), as well as to analyse the measures aimed at the prevention of irregularities in areas with variable elasticity of railway track.

Conclusions

One of the main causes of geometric irregularities should be considered track unequal elasticity.

Location of vertical longwise irregularity does not necessarily reproduce the location of the problem area.

While in operation the vertical irregularity extends not only in depth but also along the track, herewith the increase in length is accompanied by the displacement of local maxima and the emergence of new ones.

The irregularity amplitude increase intensity in place of its original formation is reduced over operating time, but the process evolves in other places, resulting in development of so-called «pits» when approaching unequal-elastic areas.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Гавриленко, А. К. Учет жесткости железнодорожного пути / А. К. Гавриленко // Путь и путевое хоз-во. – 2007. – № 4. – С. 37–39.
2. Даніленко, Е. І. Залізнична колія : підруч. для вищ. навч. закл. / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 2. – 456 с.
3. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Транспорт України, 2004. – 64 с.
4. Данович, В. Д. Математическая модель взаимодействия пути и пассажирского вагона при движении по участкам произвольной кривизны / В. Д. Данович, А. Г. Рейдемейстер, Н. В. Халипова // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. держ. техн. ун-т заліз. трансп. – Дніпропетровськ, 2001. – Вип. 8. – С. 124–138.
5. Курган, Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність із урахуванням нерівнопружності підрейкової основи / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 1 (55). – С. 90–99. doi: 10.15802/stp2015/38250.
6. Курган, М. Б. Дослідження нерівностей колії в межах залізничних переїздів / М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Ф. Лужицький // Наука та

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 84–96. doi: 10.15802/stp2015/55341.
7. Курган, Н. Б. Предпосылки создания высокоскоростных магистралей в Украине / Н. Б. Курган // Укр. залізниця. – 2015. – № 5–6. – С. 16–21.
 8. Лапина, Л. Г. Анализ статистических характеристик просадок рельсовых нитей и построение базовых неровностей пути / Л. Г. Лапина // Техн. механика. – 2013. – № 1. – С. 17–24.
 9. Моделирование процесса накопления остаточных деформаций пути с использованием супер ЭВМ / В. П. Соловьев, А. В. Анисин, С. С. Надежин [и др.] // Фундаментальные исследования для долгосрочного развития ж.-д. трансп. : сб. тр. членов и науч. партнеров Объединен. ученого совета ОАО «РЖД». – Москва : Интекст, 2013. – С. 185–192.
 10. Научные основы моделирования взаимодействия пути и подвижного состава в современных условиях эксплуатации / М. М. Железнов, В. О. Певзнер, В. П. Соловьев, С. С. Надежин // Бюллетень ОУС ОАО РЖД. – 2014. – № 4. – С. 2–29.
 11. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України : ЦП-0287 / А. Бабенко, Г. Линник, К. Мойсеєнко [та ін.]. – Київ : Дедалта, 2015. – 45 с.
 12. Результаты эксплуатационных испытаний геометрически-силового метода оценки состояния пути / В. С. Коссов, А. Л. Бидуля, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 5 (47). – С. 97–104. doi: 10.15802/stp2013/17971.
 13. Талавіра, Г. М. Осідання основної площадки земляного полотна від рухомого складу на перехідних ділянках перед штучними спорудами / Г. М. Талавіра // Зб. наук. пр. Київ. ун-ту екон. і технол. трансп. Серія: «Транспортні системи і технології» / Київ. ун-т екон. і технол. трансп. – Київ, 2003. – Вип. 4. – С. 80–84.
 14. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії : ЦП-0267 / О. М. Патласов, В. В. Рибкін, Ю. В. Палейчук [та ін.] : затв. наказом Укрзалізниці № 033-Ц від 1.02.2012 р. – Київ : Транспорт України, 2012. – 25 с.
 15. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.kmu.gov.ua/kmu/docs/EA/00_Ukraine-EU_Association_Agreement_%28body%29.pdf. – Назва з екрана. – Перевірено : 29.12.2015.
 16. Уманов, М. И. Совершенствование оценки состояния пути с использованием среднеквадратических отклонений его геометрических параметров / М. И. Уманов, А. М. Патласов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40. – С. 109–114.
 17. Ушкалов, В. Ф. Расчетные возмущения для оценки динамических качеств грузовых вагонов / В. Ф. Ушкалов, Л. Г. Лапина, И. А. Машенко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 4 (46). – С. 135–144. doi: 10.15802/stp-2013/16600.
 18. Fischer, S. Investigation of inner shear resistance of geogrids built under granular protection layers and railway ballast / S. Fischer // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – Р. 97–106. doi:10.15802/stp2015/53169.
 19. Horvát, F. Evaluation of railway track geometry stabilisation effect of geogrid layers under ballast on the basis of laboratory multi-level shear box tests / F. Horvát, Sz. Fischer, Z. Major // Acta Technica Jaurinensis. – 2013. – № 2. – Р. 21–44.
 20. Lichtberger, B. Thack compendium / B. Lichtberger. – Hamburg : Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co., 2005. – 634 p.
 21. Petrenko, V. Simulation of subgrade embankment on weak base / V. Petrenko, I. Sviatko // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – Р. 198–204. doi:10.15802/stp2015/49286.
 22. Szabó, L. The Initiation of Safety-Enhancing Actions in Railway Crossings Using Modelling Procedures / L. Szabó, M. Somogyi, G. Horváth // Acta Technica Jaurinensis. – 2015. – № 2. – Р. 96–112. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n2.328.

Д. М. КУРГАН^{1*}

^{1*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Мета. Стан залізничної колії повинен відповідати умовам безпеки руху, плавності й комфортабельності їзди. Наявність нерівностей погіршує динаміку взаємодії колії та рухомого складу, стає причиною обмеження швидкості руху, створює можливість порушення умов безпеки руху. Постає питання дослідження факторів, що призводять до можливості утворення нерівностей колії та процесу їх розвитку. Метою даної роботи є аналіз процесів виникнення та розвитку нерівностей у зоні вертикальної нерівнопружності залізничної колії із застосуванням математичного моделювання. **Методика.** Залізнична колія під поїздами працює як система пружних тіл, тому поява та розвиток нерівностей можна представити як процес переходу від пружних до залишкових деформацій. Збільшення розмірів нерівності буде впливати на динаміку взаємодії колії та рухомого складу не тільки під час розташування колеса безпосередньо в зоні нерівності, а й на певній відстані за її межами. Тому для дослідження розвитку нерівності, в тому числі по довжині колії, необхідно моделювати саме процес руху колісного навантаження по ділянці. Прийнята модель, яка складається із колісної пари, що рухається по безінерційній балці та опирається на окремі опори. Вона описується системою диференціальних рівнянь Лагранжа. Введена гіпотеза, що рівень залишкових деформацій розподіляється пропорційно похідній динамічного прогину. **Результати.** Розташування вертикальної нерівності по довжині не обов'язково повторює місце положення проблемної ділянки. З часом експлуатації вертикальна нерівність поширюється не тільки в глибину, а й уздовж колії, причому збільшення довжини супроводжується зміщенням положення локальних максимумів та появою нових. Це призводить до розвитку так званих «ям» на підході до нерівнопружної ділянки. **Наукова новизна.** Набули подальшого розвитку задачі моделювання взаємодії колії і рухомого складу, зокрема для врахування ділянок нерівнопружності та їх впливу на утворення нерівностей колії. Запропоновані нові підходи щодо моделювання процесу переходу від пружних до залишкових деформацій, які дають змогу прогнозувати розвиток розмірів нерівностей колії в залежності від характеристик ділянки. **Практична значимість.** Отримані автором результати можуть бути використані для визначення термінів призначення ремонтних робіт із оновлення рівнопружності колії, а також для аналізу заходів, спрямованих на запобігання розвитку нерівностей у зонах із змінною пружністю залізничної колії.

Ключові слова: залізнична колія; нерівність колії; деформація колії; нерівнопружність колії; взаємодія колії і рухомого складу; залізничний переїзд

Д. Н. КУРГАН^{1*}

^{1*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, эл. почта kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Цель. Состояние железнодорожного пути должно соответствовать безопасности движения, плавности и комфортабельности движения. Наличие неровностей ухудшает динамику взаимодействия пути и подвижного состава, является причиной ограничения скорости движения, создает возможность нарушения условий безопасности движения. Возникает вопрос исследования факторов, которые приводят к возможности образования неровностей пути, и процесса их развития. Целью данной работы является анализ процессов возникновения и развития неровностей в зоне вертикальной неравножесткости железнодорожного пути с использованием математического моделирования. **Методика.** Железнодорожный путь под поездами работает как система упругих тел, поэтому появление и развитие неровностей можно представить как процесс перехода от упругих к остаточным деформациям. Увеличение размеров неровности будет влиять на динамику взаимодействия пути и подвижного состава не только во время нахождения колеса непосредственно в зоне неровности, а и на определенном расстоянии за ее пределами. Поэтому для исследования развития неровности, в том числе по длине пути, необходимо моделировать именно процесс движения колесной нагрузки по участку. Принята модель, состоящая из колесной пары, которая движется по безинерционной балке, опирающейся на отдельные опоры. Она описывается системой дифференциальных уравнений Лагранжа. Введе-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

на гипотеза, что уровень остаточных деформаций распределяется пропорционально производной динамического прогиба. **Результаты.** Расположение вертикальной неровности по длине не обязательно повторяет место положения проблемного участка. Со временем эксплуатации вертикальная неровность распространяется не только в глубину, но и вдоль пути, причем увеличение длины сопровождается смещением положения локальных максимумов и появлением новых. Это приводит к развитию так называемых «ям» на подходе к неравножесткому участку. **Научная новизна.** Приобрели дальнейшее развитие задачи моделирования взаимодействия пути и подвижного состава, в частности, для учета участков неравножесткости и их влияния на образование неровностей пути. **Практическая значимость.** Полученные автором результаты могут быть использованы для определения сроков проведения ремонтных работ по возобновлению равножесткости пути, а также для анализа мероприятий, направленных на предотвращение развития неровностей в зонах с переменной жесткостью железнодорожного пути.

Ключевые слова: железнодорожный путь; неровность пути; деформация пути; неравножесткость пути; взаимодействие пути и подвижного состава; железнодорожный переезд

REFERENCES

1. Gavrilenko A.K. Uchet zhestkosti zheleznodorozhnogo puti [Accounting of rigidity of a railway]. *Put i putevoye khozyaystvo – Track and Track Facilities*, 2007, no. 4, pp. 37-39.
2. Danilenko E.I. *Zaliznychna koliia. Ulashtuvannia, proektuvannia i rozrakhunky, vzaiedodiia z rukhomym skladom* [Railway track. Structure, planning and calculations, interaction with rolling stock]. Kyiv, Inpres Publ., 2010, vol. 2. 456 p.
3. Danilenko E.I., Rybkin V.V. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist. TsP-0117* [Rules of calculations of the railway track strength and stability. TsP-0117]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2004. 64 p.
4. Danovich V.D., Reydeyester A.G., Khalipova N.V. Matematicheskaya model vzaimodeystviya puti i passazhirskogo vagona pri dvizhenii po uchastkam proizvolnoy krivizny [Mathematical model of interaction between the track and the passenger car when driving on sections of arbitrary curvature]. *Transport – Transport*, 2001, vol. 8, pp. 124-138.
5. Kurhan D.M. Do vyirishennia zadach rozrakhunku kolii na mitsnist iz urakhuvanniam nerivnopruzhnosti pidreikovoii osnovy [To the solution of problems about the railways calculation for strength taking into account unequal elasticity of the subrail base]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 1 (55), pp. 90-99. doi: 10.15802/stp2015/38250.
6. Kurhan M.B., Kurhan D.M., Luzhyskyi O.F. Doslidzhennia nerivnostei kolii v mezhakh zaliznychnykh pereizdiv [Inequalities research of the track at the railroad crossings]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 5 (59), pp.84-96. doi: 10.15802/stp2015/55341.
7. Kurgan N.B. Predposylki stvoriennia vysokoskorostnykh magistralei v Ukraini [Prerequisites for creation of high-speed lines in Ukraine]. *Ukrainski zaliznytsi – Ukrainian Railways*, 2015, no. 5-6, pp. 16-21.
8. Lapina L.G. Analiz statisticheskikh kharakteristik prosadok relsovykh nitei i postroeniye bazovykh nerovnostey puti [Analysis of statistical characteristics of rail sagging and the construction of basic irregularities of the track]. *Tekhnicheskaya mekhanika – Technical Mechanics*, 2013, no. 1, pp. 17-24.
9. Solovov V.P., Anisin A.V., Nadezhin S.S., Pevzner V.O., Tretyakov I.V. Modelirovaniye protsessa nakopleniya ostatochnykh deformatsiy puti s ispolzovaniyem super EVM [Modeling of accumulation process of residual deformations of the track using a super computer]. *Fundamentalnyye issledovaniya dlya dolgosrochnogo razvitiya zheleznodorozhnogo transporta : sbornik trudov chlenov i nauchnykh partnerov. Obiedineniye uchenogo soveta OAO «RZhD»* [Fundamental research for long-term railway transport development : Proc. of members and scientific partners Association of the scientific Council of JSC «RZD»]. Moscow, Inteks Publ., 2013, pp. 185-192.
10. Zheleznov M.M., Pevzner V.O., Solovov V.P., Nadezhin S.S. Nauchnyye osnovy modelirovaniya vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava v sovremennykh usloviyakh ekspluatatsii [The scientific basis of modeling the interaction of track and rolling stock in modern conditions]. *Byulleten Obiedinennogo uchenogo soveta OAO «RZhD»* [Bulletin of the joint scientific council of JSC «RZD»], 2014, no. 4, pp. 2-29.
11. Babenko A., Lynnyk H., Moiseienko K. *Polozhennia pro provedennia planovo-zapobizhnykh remontno-koliinykh robot na zaliznytsiakh Ukrainy. TsP-0287* [The provision on scheduled preventive maintenance repair and track work on the Railways of Ukraine. TsP-0287]. Kyiv, Devalta Publ., 2015. 45 p.
12. Kossov V.S., Bidulya A.L., Krasnov O.G., Akashev M.G. Rezultaty ekspluatatsionnykh ispytaniy geometricheski-silovogo metoda otsenki sostoyaniya puti [The field test results of geometric-force method for

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- track state estimation]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, no. 5 (47), pp. 97-104. doi: 10.15802/stp2013/17971.
13. Talavira H.M. Osidannia osnovnoi ploshchadky zemlianooho polotna vid rukhomoho skladu na perekhidnykh dilianках pered shtuchnyimi sporudami [Precipitation of the main site of the subgrade from rolling stock on transient phases before man-made structures]. *Zbirnyk naukovykh prats Kyivskoho universytetu ekonomiky i tekhnolohii transportu: Seriya: «Transportni systemy i tekhnolohii»* [Proc. of Kyiv University of economy and technology of transport: Series: «Transportation systems and technologies»]. Kyiv, KUETT Publ., 2003, issue 4, pp. 80-84.
 14. Patlasov O.M., Rybkin V.V., Paleichuk Yu.V. *Tekhnichni vkazivky shchodo otsinky stanu reikovoї kolii za pokaznykamy koliiєvmirivnykh vahoniv ta zabezpechennia bezpeky rukhu poizdiv pry vidstupakh vid norm utrymannia reikovoї kolii. TsP-0267* [Technical guidance on the assessment of the condition of the track according to the indicators of the track measuring cars and ensure the safe movement of trains when deviations from the norms of keeping the track. TsP-0267]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2012. 25 p.
 15. *Uhoda pro asotsiatsiiu mizh Ukrainoiu, z odniiei storony, ta Yevropeiskym Soiuzom, yevropeiskym spivtovarystvom z atomnoi enerhii i yikhnimi derzhavamy-chlenamy, z inshoi storony* [The Association agreement between Ukraine, on the one hand, and the European Union, the European atomic energy community and their member States, on the other hand]. Available at: http://www.kmu.gov.ua/kmu/docs/EA/00_Ukraine-EU_Association_Agreement_%28body%29.pdf (Accessed 29 December 2015).
 16. Umanov M.I., Patlasov A.M. Sovershenstvovaniye otsenki sostoyaniya puti s ispolzovaniyem srednekvadraticeskikh otkloneniy ego geometricheskikh parametrov [Improving the estimation of track condition using standard deviations of its geometrical parameters]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 109-114.
 17. Ushkalov V.F., Lapina L.G., Mashchenko I.A. Raschetnyye vozmushcheniya dlya otsenki dinamicheskikh kachestv gruzovykh vagonov [Calculated disturbances for evaluation of dynamical properties of freight cars]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, no. 4 (46), pp. 135-144. doi: 10.15802/stp2013/16600.
 18. Fischer S. Investigation of inner shear resistance of geogrids built under granular protection layers and railway ballast. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 5 (59), pp. 97-106. doi:10.15802/stp2015/53169.
 19. Horvát F., Fisher Sz., Major Z. Evaluation of railway track geometry stabilisation effect of geogrid layers under ballast on the basis of laboratory multi-level shear box tests. *Acta Technica Jaurinensis*, 2013, no. 2, pp. 21-44.
 20. Lichtberger B. Thack compendium. Hamburg, Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. Publ., 2005. 634 p.
 21. Petrenko V., Sviatko I. Simulation of subgrade embankment on weak base. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 4 (58), pp. 198-204. doi:10.15802/stp2015/49286.
 22. Szabó L., Somogyi M., Horváth G. The Initiation of Safety-Enhancing Actions in Railway Crossings Using Modelling Procedures. *Acta Technica Jaurinensis*, 2015, no. 2, pp. 96-112. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n2.328.

Prof. V. D. Petrenko, D. Sc. (Tech.); (Ukraine); Prof. E. I. Danilenko D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Received: Dec. 03, 2015

Accepted: Feb. 04, 2016

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 510.25:004.422.63.05

В. И. ШИНКАРЕНКО^{1*}, Г. В. ЗАБУЛА^{2*}

^{1*}Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта shinkrenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

^{2*}Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта zabulus12@gmail.com, ORCID 0000-0002-8607-5729

КОНСТРУКТИВНАЯ МОДЕЛЬ АДАПТАЦИИ СТРУКТУР ДАННЫХ В ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ: ЧАСТЬ I. КОНСТРУИРОВАНИЕ ТЕКСТОВ ПРОГРАММ

Цель. Стремительно растущие объемы обрабатываемых данных информационных систем существенно снижают временную эффективность алгоритмов их обработки. Одним из направлений решения данной проблемы является эффективное размещение данных в оперативной памяти (ОП). Необходимо разработать модели, позволяющие автоматизировано решать задачи рационального размещения данных в ОП. **Методика.** Для моделирования процессов адаптации структур данных (СД) в ОП применена методология математико-алгоритмического конструктивизма. Данный подход предусматривает разработку конструктивно-продукционных структур (КПС) с преобразованиями специализации, интерпретации, конкретизации и реализации. Разработка КПС предусматривает определение расширяемого носителя, сигнатуры отношений, операций и конструктивной аксиоматики. Наиболее сложной и существенной частью аксиоматики является множество формируемых правил подстановки, определяющих процесс вывода соответствующих конструкций. **Результаты.** Авторами разработана система КПС, состоящая из конструктора логической структуры данных, преобразователей логической структуры в программный интерфейс и имплементацию на языке программирования, конструкторов сценариев и процессов адаптации. Результатом реализации конструктора процесса адаптации являются генерации программного текста библиотеки классов, реализующей заданную логическую структуру данных с соответствующими операциями их обработки, и ее компиляция в бинарный код. **Научная новизна.** Впервые предложена конструктивная модель процессов разработки и адаптации структур данных к различным программно-аппаратным средам. При этом адаптируется размещение данных в ОП и алгоритмы их обработки. Применение конструктивизма в моделировании позволило в рамках единого подхода и применяемых средств связать модели данных и алгоритмы их обработки с критериями эффективности. Усовершенствована методика формирования системы КПС, механизмы, связи между взаимодополняющими друг друга КПС. Модификация конструктора и преобразователей позволяет коренным образом изменять и исследовать процесс адаптации. **Практическая значимость.** Разработанная модель позволяет автоматизировать процессы рационального размещения данных в ОП, что, в свою очередь, повышает временную эффективность программ со значительной долей обработки больших и очень больших объемов данных.

Ключевые слова: структура данных; конструктивно-продукционная структура; адаптация; конструктор; преобразователь

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Введение

Существует несколько подходов формализации структур данных (СД). В большинстве из них модели данных не связаны с алгоритмами обработки. Такая связь прослеживается в работах [1, 2, 5], в которых заложены основы алгебраического аппарата, где в описание управляющих структур алгоритмов органично «встроены» данные. В [1] реализован комплексный подход на основе трехосновной алгебраической системы. При описании композиционных схем алгоритмы согласуются с управляющими структурами и СД. Описание СД в виде схем данных позволяет их детализовать, обеспечивая спецификацию данных на входе и выходе производных Д-операторов. СД могут быть реконфигурированы в соответствии с изменением алгоритма решаемой задачи.

Однако, в этом и других подходах отсутствует связь между логическим представлением данных и представлением данных в оперативной памяти в процессе выполнения обработки данных, что не позволяет решать задачи оптимизации и адаптации размещения СД в оперативной памяти (ОП) на основании критериев временной эффективности.

Проблемы формализации СД на логическом, физическом и промежуточных уровнях органично решаются средствами КПС [12].

Цель

Стремительно растущие объемы обрабатываемых данных информационных систем существенно снижают временную эффективность алгоритмов их обработки. Одним из направлений решения данной проблемы является эффективное размещение данных в оперативной памяти (ОП).

Инструментальные средства оптимизации программ не предусматривают изменений в размещении и соответствующей обработке данных в ОП. Некоторые приемы их эффективного проектирования [8-11, 14] требуют высокого уровня профессиональной подготовки специалистов и являются либо универсальными (не учитывающими особенностей программно-аппаратной среды их использования), либо узко специализированными.

Необходимы модели, позволяющие автоматизировано решать задачи рационального раз-

мещения данных в ОП с учетом программно-аппаратной среды их эксплуатации. При этом должны выполняться лишь допустимые преобразования [6] структур данных.

Методика

Обобщенной конструктивно-продукционной структурой (ОКПС) называется тройка [12]:

$$C_G = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle,$$

где M – неоднородный носитель структуры; Σ – сигнатура, состоящая из множеств операций связывания, подстановки и вывода, операций над атрибутами и отношения подстановки; Λ – конструктивная аксиоматика. Аксиоматика Λ полностью представлена в [12].

Назначение конструктивно-продукционной структуры (КПС) состоит в формировании множеств конструкций с помощью операций связывания, подстановки, вывода и др. операций, задаваемых правилами аксиоматики.

В данной работе под конструкциями понимаются формируемые конструкции логических структур данных (ЛСД), тексты программ в описательной и исполнительной форме, сценарии обработки данных, конструктивные процессы адаптации.

Для формирования конструкций необходимо выполнять ряд уточняющих преобразований ОКПС [4, 12]:

- специализация определяет предметную область: семантическую природу носителя, конечное множество операций и их семантику, атрибутику операций, порядок их выполнения и ограничения на правила подстановки;

- интерпретация заключается в связывании операций сигнатуры с алгоритмами выполнения некоторой алгоритмической структуры [13]. При интерпретации выполняется связывание информационной модели способа построения конструкций и модели исполнителя;

- конкретизация КПС заключается в расширении аксиоматики множеством правил продукций, задании конкретных множеств нетерминальных и терминальных символов с их атрибутами и, при необходимости, значений атрибутов;

- реализация КПС заключается в формировании конструкции из элементов носителя КПС путем выполнения алгоритмов, связанных

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

с операциями сигнатуры. Реализация возможна только для предварительно специализированной, интерпретированной и конкретизированной КПС [12].

Согласно аксиоматике ОКПС формой w_l с атрибутом w называется набор терминалов и нетерминалов, объединяемых операциями связывания. Конструкцией называется форма, содержащая только терминалы [12].

Правила подстановки имеют вид $\Psi_r : \langle s_r, g_r \rangle \in \Psi$, где s_r – отношения подстановки; g_r – набор операций над атрибутами. Отношение подстановки – двуместное отношение с атрибутами $w_i l_i \rightarrow w_j l_j$ [12]. Для формы $w_l l_l = w_0 \oplus (w_1 l_1, w_2 l_2, \dots, w_h l_h, \dots, w_k l_k)$ и доступного отношения подстановки $w_h l_h \rightarrow w_q l_q$ такого, что $w_h l_h \prec w_l l_l$ ($w_h l_h$ является частью $w_l l_l$), результатом трехместной операции подстановки $w_p \Rightarrow (w_h l_h, w_q l_q, w_l l_l)$ будет форма $w_l^* l_l^* = w_0 \oplus (w_1 l_1, w_2 l_2, \dots, w_q l_q, \dots, w_k l_k)$ [12], где \oplus – любая операция связывания из Σ .

Операция частичного вывода $\max_{\vec{d}, \vec{q}, m} l^* = (|\Rightarrow (\Psi, \max_{\vec{d}, \vec{q}, m} l))$ заключается в:

- выборе одного из доступных правил подстановки $\vec{d} \Psi_r : \langle s_r, g_r \rangle \in \Psi$, с отношениями подстановки s_r и выполнении на его основе операций подстановки, где \vec{d} – вектор доступности правил. Доступность правила $\vec{d} \Psi_r$ определяется значением вектора доступности: если $d_r = 1$ правило доступно, если $d_r = 0$ – правило недоступно;

- выполнении операций над атрибутами g_r .

Порядок применения операции над атрибутами в процессе выполнения операции частичного вывода задается атрибутом τ_j , где $\tau_j \in I$, $I = \{\tau_0, \tau_1\}$, $I \subset M_{KAC}$, τ_0 – операция над атрибутом выполняется перед операцией подстановки, τ_1 – после операции подстановки.

Операция полного вывода (или просто вывода) заключается в последовательном выполнении операции частичного вывода, начиная с начального нетерминала и заканчивая конструкцией, удовлетворяющей условию окончания вывода.

Условием окончания вывода является отсутствие нетерминалов в форме.

Результаты

В первой части работы представлены вспомогательные конструкторы, позволяющие конструировать множество различных вариантов размещения данных в ОП и порождающие соответствующие им программы обработки данных, таких как добавление, поиск и т.д.

Конструктор логической структуры данных. Формальной структурой для проектирования СД на логическом уровне назовем КПС C_{LD} :

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle_s \mapsto C_{LD} = \langle M_{LD}, \Sigma_{LD}, \Lambda_{LD} \rangle, (2)$$

где $s \mapsto$ – операция специализации формальных структур (операция выполняется внешним исполнителем),

$$\Sigma_{LD} = \langle \Xi_{LD}, \Theta_{LD}, \Phi_{LD}, \{\rightarrow\} \rangle, \Xi_{LD} = \{\bullet, \odot, \div\},$$

$$\Lambda_{LD} = \Lambda_1 \cup \Lambda_2 \cdot \Lambda_{LD} = \Lambda_1 \cup \Lambda_2.$$

$$\Lambda_1 = \{M_{LD} \supset (T \cup N), T = \{\downarrow x_i, s_i, x_i\}, N = \{s_i, \alpha_i\}\},$$

где $\{x_i\}$ – множество простейших элементов данных с атрибутами: типом $type$, определяющим множество допустимых значений $\downarrow x_i$, множеством допустимых операций $Op = \{o_i\}$, семантикой ϕ_i ; $\{\alpha_i\}$ – множеством нетерминалов.

Множество допустимых операций Op включает операции поиска, удаления, добавления и операции, построенные на их основе. Например, поиск по ключу, удаление нескольких элементов.

Частичная аксиоматика Λ_2 включает следующие аксиомы и инструктивные дополнения.

Операция связывания терминалов $x_i \bullet x_j$ обладает свойством симметричности:

$$\forall_{s_i} x_i \bullet_{s_i} x_j \ \& \ s_i \neq s_j \Rightarrow x_i \bullet x_j = x_j \bullet x_i.$$

Операция предназначена для связывания неоднородных элементов.

Операция связывания терминалов $x_i \odot x_j$ обладает свойством антисимметричности:

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$\forall_{s_i} x_i \odot_{s_i} x_j \ \& \ s_i = s_j \Rightarrow x_i \odot x_j \neq x_j \odot x_i.$$

Операция предназначена для связывания однородных элементов в примитивную конструкцию.

Значение трехместной операция условного выбора $\div(c, a, b)$ является a , если $c = \text{true}$ и b в противном случае.

Операции связывания имеют идентифицирующий атрибут $\rho_i \in P = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n\}$, где n – общее количество групп операций связывания в конкретизированной грамматике. Атрибут ρ_i применяется для идентификации операции связывания в различных частях ЛСД.

Для интерпретации C_{LD} построим модель исполнителя в виде базовой алгоритмической структуры (БАС) [13]:

$$C_{A,LD} = \langle M_{A,LD}, V_{A,LD}, \Sigma_{A,LD}, \Lambda_{A,LD} \rangle,$$

где $M_{A,LD}$ – неоднородный носитель, $V_{A,LD}$ – множество образующих алгоритмов базовых (элементарных) для некоторого исполнителя, $\Sigma_{A,LD}$ – сигнатура и $\Lambda_{A,LD}$ – аксиоматика. Носитель $M_{A,LD} \supset T \cup N \cup \Omega(C_{A,LD}) \cup W$, где $\Omega(C_{A,LD})$ все сформированные алгоритмами алгоритмической структуры конструкции; W – множество допустимых значений атрибутов. Множество базовых $V_{A,LD} \supset \{A_1^0 /_{A_i, A_j},$

$A_2^0 /_{Z_1, Z_2, A_i}, A_3^0 /_{l_i, l_j}, A_4^0 /_{l_i, l_j}^{\odot l_j}\}$ и сконструированных $\{A_5^0 /_{f_h, f_q, f_i}^f, A_6^0 /_{f_i, \Psi}^f, A_7^0 /_{f_i, \Psi}^f\} \cup V_W \subset \Omega(C_{A,LD})$ алгоритмов:

– выполнения операции композиции алгоритмов $A_1^0 /_{A_i, A_j}^{A_i \cdot A_j}$ ($A /_X^Y$ – алгоритм над данными из входного множества X со значениями из множества Y , A^0 – образующий алгоритм), $A_i, A_j \in \Omega(C_{A,MS})$, $A_i \cdot A_j$ – последовательное выполнение алгоритма A_j после алгоритма A_i ;

– условного выполнения алгоритма $A_2^0 /_{Z_1, Z_2, A_i}^{A_i}$, который заключается в выполнении алгоритма A_i при условии $Z_1 \supseteq Z_2$;

– связывания неоднородных элементов

$$A_3^0 /_{l_i, l_j}^{l_i \cdot l_j}, l_i, l_j \in F^*;$$

– связывания однородных элементов

$$A_4^0 /_{l_i, l_j}^{l_i \odot l_j}, l_i, l_j \in F^*;$$

– выполнения операции подстановки

$$A_5^0 /_{l_h, l_q, f_i}^{f_j}, f_i, f_j \in F, l_h, l_q \in S;$$

– выполнения операций частичного и полного вывода $A_6^0 /_{f_i, \Psi}^{f_j}, A_7^0 /_{f_i, \Psi}^{f_j}, f_i, f_j \in F$;

– выполнения операции условного выбора

$$A_8^0 /_{c, a, b}^v;$$

– множество алгоритмов, реализующих операцию над атрибутами V_W .

Интерпретация формальной структуры проектирования СД на логическом уровне:

$$\langle C_{LD} = \langle M_{LD}, \Sigma_{LD}, \Lambda_{LD} \rangle,$$

$$C_{A,LD} = \langle M_{A,LD}, \Sigma_{A,LD}, \Lambda_{A,LD} \rangle \rangle$$

$$I \mapsto {}_I C_{LD} = \langle M_{I,LD}, \Sigma_{I,LD}, \Lambda_{I,LD} \rangle,$$

где $I \mapsto$ – операция интерпретации;

$$\Lambda_{I,LD} = \Lambda_{LD} \cup \Lambda_3; \Lambda_3 = \{(A_3^0 /_{l_i, l_j}^{l_i \cdot l_j} \dashv \bullet);$$

$$(A_4^0 /_{l_i, l_j}^{l_i \odot l_j} \dashv \odot); (A_5^0 /_{l_h, l_q, f_i}^{f_j} \dashv \Rightarrow); (A_6^0 /_{f_i, \Psi}^{f_j} \dashv \Rightarrow);$$

$$(A_7^0 /_{f_i, \Psi}^{f_j} \dashv \Rightarrow); (A_8^0 /_{c, f, t}^v \dashv \div); \forall o_i \in \Phi: \exists$$

$$(A_i /_{X_i}^{Y_i} \dashv \circ_i), A_i /_{X_i}^{Y_i} \in \Omega(C_{A,LD})\}.$$

Рассмотрим одну из конкретизаций ${}_I C_{LD}$ на примере логической структуры BMP файла [7]

$${}_I C_{LD} = \langle M_{I,LD}, \Sigma_{I,LD}, \Lambda_{I,LD} \rangle$$

$$K \mapsto C_{L_{BMP}} = \langle M_{L_{BMP}}, \Sigma_{L_{BMP}}, \Lambda_{L_{BMP}} \rangle,$$

где $K \mapsto$ – операция конкретизации;

$$M_{L_{BMP}} \supset T_{LD} \cup N_{LD} \cup \mathbb{N};$$

$$\Sigma_{L_{BMP}} = \Sigma_{I,LD} \cup \Sigma_{BMP};$$

$$\Sigma_{BMP} = \{ " \leq ", " \geq ", " < ", " > ", " = ", " + " \};$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$\Lambda_{L_{BMP}} = \Lambda_{I,LD} \cup \Lambda_4 \cup \Lambda_5$. $\Lambda_4 = \{a, b, c, e, f, o, q, z, x, v\}$, $N_{LD} = \{\alpha, \beta, \delta, \eta, \varphi, \theta\}$.

Частичная аксиоматика Λ_5 включает в себя следующие правила подстановки.

Отношение s_1 определяет общую структуру файла

$$s_1 = \langle \phi \alpha \rightarrow \phi \beta_{\rho_1} \bullet \phi \delta \rangle;$$

$$\tau_{0 \rightarrow \tau} g_1 := \langle d_1 := \text{true} \rangle.$$

Сокращенный информационный заголовок BMP-файла представлен s_2 . Заголовок состоит из высоты, ширины, количества бит на пиксель

$$s_2 = \langle \phi \beta \rightarrow_{\text{type}, \phi} a_{\rho_2} \bullet_{\text{type}, \phi} b_{\rho_2} \bullet_{\text{type}, \phi} c \rangle;$$

$$\tau_{0 \rightarrow \tau} g_2 := \langle d_2 := \text{true} \rangle.$$

Следующее отношение определяет данные изображения в виде последовательности цветов в RGB-модели.

$$s_3 = \langle \phi_1 \delta \rightarrow_{\text{type}, \phi} e_{\rho_5} \odot \phi \eta \rangle;$$

$$\tau_{0 \rightarrow \tau} g_3 := \langle d_3 := \div(z \downarrow a > 256, \text{true}, \text{false}) \rangle.$$

Далее представляется изображение в виде модели Index Color

$$s_4 = \langle \phi_2 \delta \rightarrow_{\phi} \varphi_{\rho_3} \bullet \phi \theta \rangle;$$

$$\tau_{0 \rightarrow \tau} g_4 := \langle d_4 := \div(z \downarrow a \leq 256, \text{true}, \text{false}) \rangle.$$

Отношение s_5 определяет структуру палитры. Палитра представлена в виде последовательности цветов в RGB-модели

$$s_5 = \langle \phi \varphi \rightarrow_{\text{type}, \phi} f_{\rho_6} \odot \phi \eta \rangle;$$

$$\tau_{0 \rightarrow \tau} g_6 := \langle d_6 := \text{true} \rangle.$$

Данные изображения в виде индексов, указывающих на элементы палитры, определены в следующем отношении

$$s_6 = \langle \phi \theta \rightarrow_{\text{type}, \phi} p_{\rho_7} \odot_{\text{type}, \phi} q \rangle;$$

$$\tau_{0 \rightarrow \tau} g_6 := \langle d_6 := \text{true} \rangle.$$

Отношение s_7 определяет цвет в модели RGB

$$s_7 = \langle \phi \eta \rightarrow_{\text{type}, \phi} z_{\rho_3} \bullet_{\text{type}, \phi} x_{\rho_3} \bullet_{\text{type}, \phi} v \rangle;$$

$$\tau_{0 \rightarrow \tau} g_7 := \langle d_7 := \text{true} \rangle.$$

Значения атрибутов семантики приведены в табл. 1. Идентификаторы, указанные в табл. 1, используются для именования полей СД в преобразователях, приведенных далее.

Таблица 1

Table 1

Атрибут	Значение	Идентификатор
$\phi \downarrow \alpha$	ВМР файл без файлового заголовка	BMPFile
$\phi \downarrow \beta$	Информационный заголовок ВМР	InfoHeader
$\phi_1 \downarrow \delta$	Данные изображения в модели RGB	ImageDataRGB
$\phi \downarrow a$	Количество битов на пиксель	BitsPerPixel
$\phi \downarrow b$	Ширина изображения	Width
$\phi \downarrow c$	Высота изображения	Height
$\phi \downarrow f$	Массив палитры цвета RGB	Palette
$\phi \downarrow e$	Цвета RGB	RGBMatrix
$\phi_2 \downarrow \delta$	Данные изображения в модели индексированного цвета	ImageDataIndex
$\phi \downarrow \delta$	Данные изображения	ImageData
$\phi \downarrow p$	Матрица индексов цвета пикселей	IndexMatrix
$\phi \downarrow q$	Индекс цвета пикселей	Index
$\phi \downarrow \eta$	Цвет RGB	RGB
$\phi \downarrow z$	Компонента R	R
$\phi \downarrow v$	Компонента B	B

В результате реализации могут быть сформированы конструкции ЛСД, соответствующие BMP файлу, с моделью цвета:

– Index Color

$$(\text{type}, \phi a_{\rho_2} \bullet_{\text{type}, \phi} b_{\rho_2} \bullet_{\text{type}, \phi} c)_{\rho_1} \bullet ((\text{type}, \phi f_{\rho_6} \odot$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$(\text{type}, \phi \cdot \rho_3 \bullet \text{type}, \phi \cdot \rho_3 \bullet \text{type}, \phi \cdot \nu)) \cdot \rho_4 \bullet \text{type}, \phi \cdot P \cdot \rho_7 \odot_{\text{type}, \phi} q);$$

– True Color

$$(\text{type}, \phi \cdot a \cdot \rho_2 \bullet \text{type}, \phi \cdot b \cdot \rho_2 \bullet \text{type}, \phi \cdot c) \cdot \rho_1 \bullet \\ (\text{type}, \phi \cdot e \cdot \rho_5 \odot (\text{type}, \phi \cdot \rho_3 \bullet \text{type}, \phi \cdot \rho_3 \bullet \text{type}, \phi \cdot \nu)).$$

Преобразователь логической структуры данных в программный интерфейс на языке программирования. После проектирования на абстрактном и логическом уровнях следует этап проектирования СД на уровне представления (языке программирования) [7, 15].

Специализированной формальной структурой для преобразования логической СД в представление на языке программирования, C_{PLI} будет:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle \xrightarrow{s} C_{PLI} = \\ = \langle M_{S, PLI}, \Sigma_{S, PLI}, \Lambda_{S, PLI} \rangle,$$

где

$$\Sigma_{S, PLI} = \langle \Xi_{PLI}, \Theta_{PLI}, \Phi_{PLI}, \{\rightarrow\} \rangle,$$

$$\Xi_{PLI} = \{\bullet, \odot\} \cup \Xi_1,$$

$$\Phi_{PLI} = \emptyset,$$

$$\Lambda_{S, PLI} = \Lambda \cup \Lambda_6 \cup \Lambda_7,$$

$$\Lambda_6 = \{M_{PLI} \supset (T_{S, PLI} \cup N_{S, PLI}),$$

$$T_{S, PLI} = \{C_{\#}\}, \quad N_{S, PLI} = \{!a_i!\},$$

где $\{C_{\#}\}$ – ключевые слова, знаки операций и разделители языка программирования $C_{\#}$, Ξ_1 – включает единственную операцию конкатенации лексем языка программирования, знак операции везде опускается, $!a_i!$ – нетерминалы правил подстановки.

Частичная аксиоматика Λ_7 определяет состав правил подстановки: $\Psi_i : \langle s_i \rangle \in \Psi$, $s_i = \langle s_{i,1}, s_{i,2} \rangle$, где $s_{i,1}$ – правило подстановки логической структуры данных, $s_{i,2}$ – соответствующее правило подстановки для формирования текста программы.

Интерпретацию C_{PLI} выполним, используя ранее определенную алгоритмическую структуру

$$C_{A, LD} = \langle M_{A, LD}, \Sigma_{A, LD}, \Lambda_{A, LD} \rangle :$$

$$\langle C_{S, PLI} = \langle M_{S, PLI}, \Sigma_{S, PLI}, \Lambda_{S, PLI} \rangle,$$

$$C_{A, LD} = \langle M_{A, LD}, \Sigma_{A, LD}, \Lambda_{A, LD} \rangle \gg$$

$$I \mapsto I C_{PLI} = \langle M_{I, PLI}, \Sigma_{I, PLI}, \Lambda_{I, PLI} \rangle$$

где $\Lambda_{I, PLI} = \Lambda_{PLI} \cup \Lambda_{A, LD}$;

Конкретизируем структуру следующими правилами подстановки

$$I C_{PLI} = \langle M_{I, PLI}, \Sigma_{I, PLI}, \Lambda_{I, PLI} \rangle$$

$$K \mapsto C_{PLI} = \langle M_{PLI}, \Sigma_{PLI}, \Lambda_{PLI} \rangle,$$

где

$$M_{PLI} \supset T_{PLI} \cup N_{PLI};$$

$$\Sigma_{PLI} = \Sigma_{I, PLI};$$

$$\Lambda_{PLI} = \Lambda_{I, PLI} \cup \Lambda_8 \cup \Lambda_9.$$

$\Lambda_8 = \langle T_{PLI} = T_{LD} \cup T_{S, PLI} \cup \{ \text{IBMPFile, Info-Header, ImageData, BitsPerPixel, Width, Height, IMatrixRGB, IRGB, ImageDataIndex, IPalette, IndexMatrix, IMatrixIndex, R, G, B} \}, N_{PLI} =$

$$N_{LD} \cup \{ \text{!BMPFILEDECL!,}$$

$\text{!INFOHEADERDECL!, !IMAGEDATADECL!, !INFOHEADERTYPE!, !IMAGEDATATYPE!, !INFOHEADERDECL!, !IMAGEDATATYPE!, !IMAGEDATADECL!, !RGBDECL!, !RGBTYPE!} \rangle$.

Частичная аксиоматика Λ_9 включает следующие правила подстановки.

Интерфейс файла BMP, состоит из информационного заголовка и данных. Оба поля имеют соответствующий тип, декларация которого представлено следующими правилами.

$$s_1 = \langle s_{1,1}, s_{1,2} \rangle ;$$

$$s_{1,1} = \langle \phi_{\alpha} \rightarrow_{\rho \vee 0} \phi_{\beta} \bullet \phi_{\delta} \rangle ;$$

$$s_{1,2} = \langle$$

$\text{!BMPFILEDECL!} \rightarrow$

$\text{!INFOHEADERDECL! !IMAGEDATADECL!}$

interface IBMPFile {

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

!INFOHEADERTYPE! InfoHeader {get;set;} $s_6 = \langle s_{6,1}, s_{6,2} \rangle$;

!IMAGEDATATYPE! ImageData {get;set;} } > ,

Інтерфейс інформаційного заголовка со-
стоїть з трьох полів.

$$s_2 = \langle s_{2,1}, s_{2,2} \rangle$$

$$s_{2,1} = \langle \phi_\beta \rightarrow t_a \phi_a m_a a_{\rho_1} \cdot t_b \phi_b m_b b_{\rho_1} \cdot t_c \phi_c m_c c \rangle$$

$$s_{2,2} = \langle$$

!INFOHEADERTYPE! -> IInfoHeader

!INFOHEADERDECL! ->

interface IInfoHeader {
int BitsPerPixel {get;set;}
int Width {get;set;}
int Height {get;set;} } > ,

Структура даних зображення в виді мо-
дели True Color. Використовується вбудований
в .NET Framework інтерфейс IList.

$$s_3 = \langle s_{3,1}, s_{3,2} \rangle$$

$$s_{3,1} = \langle \phi_{1,\delta} \delta \rightarrow \phi_e v_e e \odot \eta \rangle$$

$$s_{3,2} = \langle$$

!IMAGEDATATYPE! -> IMatrixRGB

!IMAGEDATADECL! ->

!RGBDECL!

interface IMatrixRGB : IList< IList< !RGBTYPE!
> > { } > .

Структура даних зображення в виді мо-
дели Index Color складається з полів палитри
і матриці індексів

$$s_4 = \langle s_{4,1}, s_{4,2} \rangle$$

$$s_{4,1} = \langle \phi_{2,\delta} \delta \rightarrow \phi_\phi \phi_{\rho_2} \cdot \phi_\theta \theta \rangle$$

$$s_{4,2} = \langle$$

!IMAGEDATATYPE! -> IImageDataIndex

!IMAGEDATADECL! ->

!INDEXMATRIXDECL!

!PALETTEDECL!

interface IImageDataIndex {
!PALETTEDECL! Palette {get;set;}
!INDEXMATRIXDECL! IndexMatrix {get;set;}
} > .

Інтерфейс палитри на основі IList інтер-
фейсу

!PALETTEDECL! -> IPalette

!PALETTEDECL! ->

!RGBDECL!

interface IPalette : IList< !RGBTYPE!> { } > .

Інтерфейс матриці індексованих цве-
тов.

$$s_7 = \langle s_{7,1}, s_{7,2} \rangle$$

$$s_{7,1} = \langle \phi_\theta \theta \rightarrow v_p \phi_p p \odot v_q \phi_q q \rangle$$

$$s_{7,2} = \langle$$

!INDEXMATRIXTYPE! -> MatrixIndex

!INDEXTYPE! -> byte

!INDEXMATRIXDECL! ->

interface IMatrixIndex : IList< IList<
!INDEXTYPE! > > { } > ,

$$s_8 = \langle s_{8,1}, s_{8,2} \rangle$$

$$s_{8,1} = \langle \phi_\pi \eta \rightarrow \phi_z v_z z \cdot \phi_x v_x x \cdot \phi_y v_y y \rangle$$

$$s_{8,2} = \langle$$

!RGBTYPE! -> IRGB

!RGBDECL! ->

interface IRGB {
int R {get;set;}
int G {get;set;}
int B {get;set;} } > .

В результаті реалізації преобразователя
формується інтерфейс класів обробки
структури даних на мові програмування
C#. Одна з таких реалізацій приведена нижче.

```
interface IInfoHeader {
    int BitsPerPixel { get; set; }
    int Width { get; set; }
    int Height { get; set; } }
interface IRGB {
    int R { get; set; }
    int G { get; set; }
    int B { get; set; } }
interface IMatrixRGB : IList<IList<IRGB>> { }
interface IBMPFile {
    IInfoHeader InfoHeader { get; set; }
    IMatrixRGB ImageData {get;set;} }
```

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Преобразователь абстрактной логической структуры данных в представление имплементации на языке программирования. Специализированной формальной структурой для преобразования ЛСД в представление языка программирования назовем КПС C_{PL} :

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle \xrightarrow{s} C_{S,PL} = \langle M_{S,PL}, \Sigma_{S,PL}, \Lambda_{S,PL} \rangle,$$

где $s \mapsto$ – операция специализации формальных структур (операция выполняется внешним исполнителем),

$$\Sigma_{S,PL} = \langle \Xi_{PL}, \Theta_{PL}, \Phi_{PL}, \{\rightarrow\} \rangle,$$

$$\Xi_{PL} = \{ \bullet, \odot \},$$

$$\Lambda_{S,PL} = \Lambda_{10} \cup \Lambda_{11} \cup \Lambda_{12}.$$

$$\Lambda_{10} = \{ M_{PL} \supset (T_{S,PL} \cup N_{S,PL}) \},$$

$$T_{S,PL} = \{ C_{\#} \},$$

$$N_{S,PL} = \{ !a_i ! \},$$

Частичная аксиоматика Λ_{11} содержит следующие конструктивные дополнения.

Правила подстановки преобразователя имеют вид: $\Psi_r : \langle s_r, g_r \rangle \in \Psi, \quad s_r = \langle s_{r,1}, s_{r,2} \rangle$. Где $s_{r,1}$ – правило вывода логической структуры данных, $s_{r,2}$ – соответствующее правило вывода текста программы, g_r – атрибуты преобразования правил вывода ЛСД.

Частичная аксиоматика Λ_{12} содержит следующие конструктивные дополнения.

Конструкция преобразователя имеет вид пары: $\langle f_{C_{PL}}, \bar{R} \rangle$, где $f_{C_{PL}}$ – реализация преобразователя – текст программы имплементации операций обработки СД; $\bar{R} = \langle r_1, r_2, \dots, r_k \rangle$ – количество допустимых программных шаблонов для i -ой составляющей СД; k – количество примитивных конструкций в ЛСД.

Нетерминалы содержат атрибут $\bar{Q} = \langle q_1, q_2, \dots, q_k \rangle$, где q_i – номер конкретного программного шаблона для генерации текста программ, $0 \leq q_i \leq r_i$.

Интерпретацию C_{PL} выполним, используя ранее определенную алгоритмическую структуру $C_{A,LD} = \langle M_{A,LD}, \Sigma_{A,LD}, \Lambda_{A,LD} \rangle$.

Преобразователь логической структуры данных представляет собой модель программного интерфейса. Он является интерпретацией формальной структуры C_{PL} алгоритмической структурой $C_{A,PL}$:

$$\langle C_{S,PL} = \langle M_{S,PL}, \Sigma_{S,PL}, \Lambda_{S,PL} \rangle,$$

$$C_{A,LD} = \langle M_{A,LD}, \Sigma_{A,LD}, \Lambda_{A,LD} \rangle \rangle$$

$$\xrightarrow{I} {}_I C_{SC} = \langle M_{I,SC}, \Sigma_{I,SC}, \Lambda_{I,SC} \rangle$$

Программным шаблоном будем называть код на языке C#, который реализует примитивную конструкцию тем или иным способом (например, используя физическое представление данных в виде массива, списка, и т.п.).

Конкретизируем структуру следующими правилами подстановки

$${}_I C_{PL} = \langle M_{I,PL}, \Sigma_{I,PL}, \Lambda_{I,PL} \rangle$$

$$\xrightarrow{K} C_{PL} = \langle M_{PL}, \Sigma_{PL}, \Lambda_{PL} \rangle,$$

где

$$M_{PL} \supset N_{PL} \cup T_{PL};$$

$$\Sigma_{PL} = \Sigma_{I,PL};$$

$$\Lambda_{PLI} = \Lambda_{I,PL} \cup \Lambda_{13} \cup \Lambda_{14}.$$

$\Lambda_{13} = \{ T_{PL} = T_{PLI} \cup \{ \text{BMPFile, InfoHeader, ImageData, MatrixRGB, RGB, ImageDataIndex, Palette, IndexMatrix, MatrixIndex} \} \}$,

$$N_{PL} = N_{PLI},$$

$$\bar{R} = \langle 1, 2, 1, 1, 0, 1, 1, 2 \rangle.$$

Частичная аксиоматика Λ_{14} включает в себя следующие правила подстановки.

$$s_1 = \langle s_{1,1}, s_{1,2} \rangle;$$

$$s_{1,1} = \langle \bar{Q}_{\Phi_a} \alpha \rightarrow \bar{Q}_{\Phi_b} \beta_{p_0} \bullet \bar{Q}_{\Phi_s} \delta \rangle;$$

$$s_{1,2} = \langle$$

!BMPFILEDECL! ->

!INFOHEADERDECL! !IMAGEDATADECL!

class BMPFile {

!INFOHEADERTYPE! InfoHeader {get;set;}

!IMAGEDATATYPE! ImageData {get;set;}

BMPFile root = new BMPFile();

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

```

 $g_1 = \langle d_1 = \div(q_1 = 0, \text{true}, \text{false}) \rangle ;$ 
 $s_2 = \langle s_{2,1}, s_{2,2} \rangle ;$ 
 $s_{2,1} = \langle \bar{Q}_{s_\beta} \beta \rightarrow t_a \phi_a m_a a_{\rho_1} \bullet t_b \phi_b m_b b_{\rho_1} \bullet t_c \phi_c m_c c \rangle ;$ 
 $s_{2,2} = \langle$ 
!INFOHEADERTYPE! -> InfoHeader
!INFOHEADEREDECL! ->
class InfoHeader {
int BitsPerPixel {get;set;}
int Width {get;set;}
int Height {get;set;} } > ,
 $g_2 = \langle d_2 = \div(q_2 = 0, \text{true}, \text{false}) \rangle$ 
 $s_3 = \langle s_{2,1}, s_{3,2} \rangle ;$ 
 $s_{3,2} = \langle$ 
!INFOHEADEREDECL! ->
class InfoHeader {
LinkedList<int> internal = new LinkedList<int>();
LinkedListNode<int> GetNthNode(int index) {
var first = internal.First;
int i = 0;
while(i < index) {
first = first.Next;
++I;
}
return first;
}
public InfoHeader() {
internal.AddLast(0); // BPP
internal.AddLast(0); // W
internal.AddLast(0); // H
}
int BitsPerPixel {
get { return internal.Skip(0).First(); }
set { this.GetNthNode(0).Value = value; }
}
int Width
get { return internal.Skip(1).First(); }
set { this.GetNthNode(1).Value = value; }
}
int Height {
get { return internal.Skip(2).First(); }
set { this.GetNthNode(2).Value = value; } } } > ,
 $g_3 = \langle d_3 = \div(q_2 = 1, \text{true}, \text{false}) \rangle ;$ 
 $s_4 = \langle s_{4,1}, s_{4,2} \rangle ;$ 

```

```

 $s_{4,1} = \langle \bar{Q}_{\phi_{1,\delta}} \delta \rightarrow \phi_e v_e e \odot \bar{Q}_{\phi_\eta} \eta \rangle ;$ 
 $s_{4,2} = \langle$ 
!IMAGEDATATYPE! -> MatixRGB
!IMAGEDATADECL! ->
!RGBDECL!
class MatrixRGB :
List<List<!RGBTYPE!>> { } > ,
 $g_4 = \langle d_4 = \div(q_3 = 0, \text{true}, \text{false}) \rangle ;$ 
 $s_5 = \langle s_{5,1}, s_{5,2} \rangle ;$ 
 $s_{5,1} = \langle \bar{Q}_{\phi_{2,\delta}} \delta \rightarrow \bar{Q}_{\phi_\phi} \phi_{\rho_2} \bullet \bar{Q}_{\phi_\theta} \theta \rangle ;$ 
 $s_{5,2} = \langle$ 
!IMAGEDATATYPE! -> ImageDataIndex
!IMAGEDATADECL! ->
!INDEXMATRIXDECL!
!PALETTEDECL!
class ImageDataIndex {
!PALETTE! Palette {get;set;}
!INDEXMATRIX! IndexMatrix {get;set;} }
> ,
 $g_5 = \langle d_5 = \div(q_4 = 0, \text{true}, \text{false}) \rangle ;$ 
 $s_6 = \langle s_{6,1}, s_{6,2} \rangle ;$ 
 $s_{6,1} = \langle \bar{Q}_{\phi_\phi} \phi \rightarrow v_f \phi_f f \odot \bar{Q}_{\phi_\eta} \eta \rangle ;$ 
 $s_{6,2} = \langle$ 
!PALETTE! -> Palette
!PALETTEDECL! ->
!RGBDECL!
class Palette : Vector<!RGBTYPE!> { } > ,
 $g_6 = \langle d_6 = \div(q_6 = 0, \text{true}, \text{false}) \rangle ;$ 
 $s_7 = \langle s_{7,1}, s_{7,2} \rangle ;$ 
 $s_{7,1} = \langle \bar{Q}_{\phi_\theta} \theta \rightarrow v_p \phi_p p \odot v_q \phi_q q \rangle ;$ 
 $s_{7,2} = \langle$ 
!INDEXMATRIX! -> MatrixIndex
!INDEXTYPE! -> int
!INDEXMATRIXDECL! ->
class MatrixIndex : Matrix<!INDEXTYPE!> { }
> ,

```

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

```

g7 =< d7 = ÷(q7 = 0, true, false) >;

s8 =< s8,1, s8,2 >;

s8,1 =<  $\bar{Q}, \phi_\pi \eta \rightarrow v_z \phi_z z \bullet v_x \phi_x x \bullet v_y \phi_y y$  >;

s8,2 =<

!RGBTYPE! -> RGB
!RGBDECL! ->
class RGB {
int R {get;set;}
int G {get;set;}
int B {get;set;} }

g8 =< d8 = ÷(q8 = 0, true, false) >;

s9 =< s8,1, s9,2 >;

s9,2 =<

!LISTIMPL_DECLARE_INT_LIST! -> List<int>
internalList = new List<int>();
!LISTIMPL_FIELD_BEG! -> public int
!LISTIMPL_FIELD_MI1! -> {
get { return internalList [
!LISTIMPL_FIELD_MI2! -> ]; }
set { internalList [
!LISTIMPL_FIELD_END! -> ] = value; } }
!RGBDECL! ->
class RGB
{
!LISTIMPL_DECLARE_INT_LIST!
public RGB() { }
!LISTIMPL_FIELD_BEG! R
!LISTIMPL_FIELD_MI1! 0
!LISTIMPL_FIELD_MI2! 0
!LISTIMPL_FIELD_END!
!LISTIMPL_FIELD_BEG! G
!LISTIMPL_FIELD_MI1! 1
!LISTIMPL_FIELD_MI2! 1
!LISTIMPL_FIELD_END!
!LISTIMPL_FIELD_BEG! B
!LISTIMPL_FIELD_MI1! 2
!LISTIMPL_FIELD_MI2! 2
!LISTIMPL_FIELD_END!

g9 =< d9 = ÷(q8 = 1, true, false) >.

```

Пусть внешним исполнителем задан вектор $\bar{Q} = \langle 1, 2, 1, 1, 0, 1, 1, 2 \rangle$, тогда при реализации будет сформирована следующая имплементация программного кода на языке C#:

```

class InfoHeader {

```

```

LinkedList<int>    internalList    =    new
LinkedList<int>();
LinkedListNode<int> GetNthNode(int index) {
var first = internalList.First;
int i = 0;
while (i < index) {
first = first.Next;
++i;
}
return first;
}
public InfoHeader() {
internalList.AddLast(0); // BPP
internalList.AddLast(0); // W
internalList.AddLast(0); // H }
int BitsPerPixel {
get { return internalList.Skip(0).First(); }
set { this.GetNthNode(0).Value = value; } }
int Width {
get { return internalList.Skip(1).First(); }
set { this.GetNthNode(1).Value = value; } }
}
int Height {
get { return internalList.Skip(2).First(); }
set { this.GetNthNode(2).Value = value; } } }
class RGB {
List<int> internalList = new List<int>();
public RGB() {
internalList.Capacity = 3;
}
int R {
get { return internalList[0]; }
set { internalList[0] = value; } }
int G {
get { return internalList[1]; }
set { internalList[1] = value; } }
int B {
get { return internalList[2]; }
set { internalList[2] = value; } } }
class MatrixRGB : List<List<RGB>> { }
class BMPFile {
InfoHeader InfoHeader { get; set; }
MatrixRGB ImageData {get;set;} }

```

Выводы

Представленные конструктор логической структуры данных, преобразователи логической структуры в программный интерфейс и имплементация на языке программирования – являются неотъемлемой частью системы КПС. Основная часть системы в виде конструкторов

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

сценариев и процессов адаптации представлена во второй части статьи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акуловский, В. Г. Алгебра для описания данных в композиционных схемах алгоритмов / В. Г. Акуловский // Проблемы програмування. – 2012. – № 2-3. – С. 234–240.
2. Акуловский, В. Г. Основы алгебры алгоритмов, базирующейся на данных / В. Г. Акуловский // Проблемы програмування. – 2010. – № 2-3. – С. 89–96.
3. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – Санкт-Петербург : ООО «И. Д. Вильямс», 2011. – 1296 с.
4. Босов, А. А. Структурная сложность систем / А. А. Босов, В. М. Ильман, Н. В. Халипова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40. – С. 173–179.
5. Дорошенко, А. Е. Алгебра алгоритмов с данными и прогнозирование вычислительного процесса / А. Е. Дорошенко, В. Г. Акуловский // Проблемы програмування. – 2011. – № 3. – С. 3–10.
6. Дрожжин, В. В. Преобразование структур данных в поле структур данных / В. В. Дрожжин, А. М. Володин // Изв. Пензен. гос. пед. ун-та им. В. Г. Белинского. – Пенза, 2011. – № 26. – С. 380–385.
7. Шинкаренко, В. И. Конструкционно-продукционная модель структур данных на логическом уровне / В. И. Шинкаренко, В. М. Ильман, Г. В. Забула // Проблемы програмування. – 2014. – № 2-3. – С. 10–16.
8. Array Based HV/VH Tree: an Effective Data Structure for Layout Representation / J. Ren, W. Pan, Y. Zheng [et al.] // J. of Zhejiang University-SCIENCE C (Computers & Electronics). – 2012. – Vol. 13. – Iss. 3. – P. 232–237. doi: 10.1631/jzus.c1100193.
9. Attali, D. Efficient Data Structure for Representing and Simplifying Simplicial Complexes in High Dimensions / D. Attali, A. Lieutier, D. Salinas // Intern. J. of Computational Geometry & Applications. – 2012. – Vol. 22. – Iss. 4. – P. 279–303. doi: 10.1142/S0218195912600060.
10. Bentley, J. L. Writing Efficient Programs / J. L. Bentley. – New Jersey : Prentice-Hall in Englewood Cliffs, 1982. – 170 p.
11. Drepper, U. What Every Programmer Should Know About Memory / U. Drepper. – Raleigh : RedHat, Inc., 2007. – 114 p.
12. Shynkarenko, V. I. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure / V. I. Shynkarenko, V. M. Ilman // Cybernetics and Systems Analysis. – 2014. – Vol. 50. – Iss. 5. – P. 655–662. doi: 10.1007/s10559-014-9655-z.
13. Shynkarenko, V. I. Structural Models of Algorithms in Problems of Applied Programming. I. Formal Algorithmic Structures / V. I. Shynkarenko, V. M. Ilman, V. V. Skalozub // Cybernetics and Systems Analysis. – 2009. – Vol. 45. – Iss. 3. – P. 329–339. doi: 10.1007/s10559-009-9118-0.
14. Weiss, M. A. Data Structures and Algorithm Analysis in C++ / M. A. Weiss. – New Jersey : Pearson Education Inc., Addison-Wesley, 2014. – 656 p.
15. Ziegler, C. A. Programming System methodologies / C. A. Ziegler. – New Jersey : Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1983. – 260 p.

В. І. ШИНКАРЕНКО^{1*}, Г. В. ЗАБУЛА^{2*}

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта shinkrenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

^{2*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта zabulus12@gmail.com, ORCID 0000-0002-8607-5729

КОНСТРУКТИВНА МОДЕЛЬ АДАПТАЦІЇ СТРУКТУР ДАНИХ В ОПЕРАТИВНІЙ ПАМ'ЯТІ: ЧАСТИНА І. КОНСТРУЮВАННЯ ТЕКСТІВ ПРОГРАМ

Мета. Стрімко зростаючі обсяги оброблюваних даних інформаційних систем істотно знижують часову ефективність алгоритмів їх обробки. Одним із напрямків вирішення даної проблеми є ефективне розміщення даних в оперативній пам'яті (ОП). Необхідно розробити моделі, що дозволяють автоматизовано вирішувати

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

завдання раціонального розміщення даних в ОП. **Методика.** Для моделювання процесів адаптації структур даних (СД) в ОП застосована методологія математико-алгоритмічного конструктивізму. Даний підхід передбачає розробку конструктивно-продукційних структур (КПС) із перетвореннями спеціалізації, інтерпретації, конкретизації та реалізації. Розробка КПС передбачає визначення розширюваного носія, сигнатури відносин та операцій і конструктивної аксіоматики. Найбільш складною та істотною частиною аксіоматики є безліч формованих правил підстановки, що визначають процес виводу відповідних конструкцій. **Результати.** Авторами розроблено систему КПС, що складається з конструктора логічної структури даних, перетворювачів логічної структури в програмний інтерфейс й імплементацію на мові програмування, конструкторів сценаріїв та процесів адаптації. Результатом реалізації конструктора процесу адаптації є генерації програмного тексту бібліотеки класів, що реалізує задану логічну структуру даних із відповідними операціями їх обробки, та її компіляція в бінарний код. **Наукова новизна.** Вперше запропонована конструктивна модель процесів розробки та адаптації структур даних до різних програмно-апаратних середовищ. При цьому адаптується розміщення даних в ОП та алгоритми їх обробки. Застосування конструктивізму в моделюванні дозволило в рамках єдиного підходу та застосовуваних засобів зв'язати моделі даних і алгоритми їх обробки з критеріями ефективності. Удосконалено методику формування системи КПС, механізми, зв'язки між взаємодоповнюючими один одного КПС. Модифікація конструктора та перетворювачів дозволяє докорінно змінювати і досліджувати процес адаптації. **Практична значимість.** Розроблена модель дозволяє автоматизувати процеси раціонального розміщення даних в ОП, що, у свою чергу, підвищує часову ефективність програм зі значною часткою обробки великих і дуже великих обсягів даних.

Ключові слова: структура даних; конструктивно-продукційна структура; адаптація= конструктор; перетворювач

V. I. SHYNKARENKO^{1*}, H. V. ZABULA^{2*}

^{1*}Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail shinkrenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

^{2*}Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail zabulus12@gmail.com, ORCID 0000-0002-8607-5729

CONSTRUCTIVE MODEL OF DATA STRUCTURES ADAPTATION IN RAM: PART I. PROGRAM TEXT CONSTRUCTING

Purpose. Rapidly growing volumes of information systems data being manipulated significantly reduce the temporary algorithms efficiency of their processing. Effective data layout in RAM is one of the directions of solving this problem. It is necessary to develop the model to solve problems of efficient automated data layout in RAM. **Methodology.** For processes simulation of data structures (DS) adaptation in RAM, the methodology of mathematical and algorithmic constructivism was applied. This approach involves the development of constructive and productive structures (CPS) with transformations of specialization, interpretation, specification and implementation. CPS development provides definition of expandable vector, signature of relations, transactions and constructive axioms. The most complex and essential part of the set of axioms is generated substitution rules that determine the output process of respective structures. **Findings.** CPS system was developed by the authors, consisting of the logical structure constructor of data, converters of logical structure in to a software interface and implementation in a programming language, constructors of scenarios and adaptation processes. The result of the adaptation process constructor is software text generations of the class library that implements the specified logical data structure with appropriate processing operations and its compilation in binary code. **Originality.** Structural model of development processes and data structures adaptation to different software and hardware environments was first proposed. It adapts data layout in the RAM and data processing algorithms. Application of constructivism in simulation allowed within a single approach and applied tools linking the data models and algorithms of their processing with performance criteria. Formation methodology of CPS system, mechanisms, and links between complementary CPS were improved. Modification of the constructor and converters allows changing and exploring the process of adaptation. **Practical value.** The developed model allows automating the data layout in RAM, which in turn increases the time efficiency of programs with significant processing of large and very large volumes of data.

Keywords: data structure; constructive and productive structure; adaptation; constructor; converter

REFERENCES

1. Akulovskiy V.G. Algebra dlya opisaniya dannykh v kompozitsionnykh skhemakh algoritmov [Algebra for describing the data in the compositional schemes of algorithms]. *Problemy prohranuvannia – Problems in Programming*, 2012, no. 2-3, pp. 234-240.
2. Akulovskiy V.G. Osnovy algebr algoritmov, baziruyushchiesya na dannykh [Basic algebra algorithms based on data]. *Problemy prohranuvannia – Problems in Programming*, 2010, no. 2-3, pp. 89-96.
3. Kormen T., Leyzerson Ch., Rivest R., Shtayn K. *Algoritmy: postroyeniye i analiz* [Algorithms: construction and analysis]. Saint-Petersburg, OOO «I. D. Vilyams» Publ., 2011. 1296 p.
4. Bosov A.A., Ilman V.M., Khalipova N.V. Strukturnaya slozhnost sistem [Structural complexity of systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 173-179.
5. Doroshenko A.Ye., Akulovskiy V.G. Algebra algoritmov s dannyimi i prognozirovaniye vychislitel'nogo protsessa [Algebra of algorithms with data and prediction computational process]. *Problemy prohranuvannia – Problems in Programming*, 2011, no. 3, pp. 3-10.
6. Drozhzhin V.V., Volodin A.M. Preobrazovaniye struktur dannykh v pole struktur dannykh [Convert data structures in the field of data structures]. *Izvestiya penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo Universiteta im. V.G. Belinskogo* [News of Penza State Pedagogical University named after V. G. Belinsky], 2011, no. 26, pp. 380-385.
7. Shinkarenko V.I., Ilman V.M., Zabula G.V. Konstruktsionno-produktsionnaya model struktur dannykh na logicheskom urovne [Construction-production model of the data structures at the logical level]. *Problemy prohranuvannia – Problems in Programming*, 2014, no. 2-3, pp. 10-16.
8. Ren J., Pan W., Zheng Y., Shi Z., Yan X. Array Based HV/VH Tree: an Effective Da-ta Structure for Layout Representation. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE C (Computers & Electronics)*, 2012, vol. 13, issue 3, pp. 232-237. doi: 10.1631/jzus.c1100193.
9. Attali D., Lieutier A., Salinas D. Efficient Data Structure for Representing and Simplifying Simplicial Complexes in High Dimensions. *Intern. Journal of Computational Geometry & Applications*, 2012, vol. 22, issue 4, pp. 279-303. doi: 10.1142/S0218195912600060.
10. Bentley J.L. Writing Efficient Programs. New Jersey, Prentice-Hall in Englewood Cliffs Publ., 1982. 170 p.
11. Drepper U. What Every Programmer Should Know About Memory. Raleigh, RedHat, Inc. Publ., 2007. 114 p.
12. Shynkarenko V.I., Ilman V.M. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2014, vol. 50, issue 5, pp. 655-662. doi: 10.1007/s10559-014-9655-z.
13. Shynkarenko V.I., Ilman V.M., Skalozub V.V. Structural Models of Algorithms in Problems of Applied Programming. I. Formal Algorithmic Structures. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2009, vol. 45, issue 3, pp. 329-339. doi: 10.1007/s10559-009-9118-0.
14. Weiss M.A. Data Structures and Algorithm Analysis in C++. New Jersey, Pearson Education Inc., Addison-Wesley Publ., 2014. 656 p.
15. Ziegler C.A. Programming System methodologies. New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs Publ., 1983. 260 p.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. В. Скалозубом (Украина); д.физ.-мат.н., проф. В. Е. Билозёровым (Украина)

Поступила в редколлегию: 14.12.2015

Принята к печати: 15.02.2016

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.15:621.9.02

В. В. НЕТРЕБКО^{1*}

^{1*}Каф. «Оборудование и технология сварочного производства», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 270 95 20, эл. почта olgavvn@mail.ru, ORCID 0000-0003-3283-0116

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ НА ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ РЕЗАНИЕМ

Цель. Данное исследование направлено на получение регрессионной зависимости обрабатываемости резанием от химического состава чугуна (C, Cr, Mn и Ni) в литом состоянии. **Методика.** Для построения математической модели использовали метод активного планирования эксперимента. Исследовали чугуны состава: 1,09–3,91 % C; 11,43–25,57 % Cr; 0,6–5,4 % Mn; 0,19–3,01 % Ni. Для точения использовали резцы с пластинами 10x10 мм из BK8 по ГОСТ 19051–80. Режимы резания: глубина резания – 0,8 мм, продольная подача – 0,15 мм/об, частота вращения шпинделя 200–630 об/мин. СОЖ (смазочно-охлаждающие жидкости) не применяли. Оценка обрабатываемости чугунов производилась путем определения линейного износа задней поверхности резца на единицу длины пути резания. **Результаты.** Получено математически вероятностное уравнение регрессионной зависимости износа резца от содержания в обрабатываемом чугуне C, Cr, Mn и Ni. Установлено, что с ростом содержания Cr в чугуне до 14,8 % износ резца снижался в результате образования карбидной эвтектики, которая разрушала сплошной каркас легированного ледебурита. Дальнейшее повышение содержания хрома способствовало появлению хромистых карбидов с высокой микротвердостью, что значительно увеличивало износ инструмента. Проведенные исследования показали, что минимальный износ резца 0,18 мкм/м наблюдался при обработке чугуна состава: 1,09 % C, 14,8 % Cr, 2,3 % Mn и 1,2 % Ni, а максимальный – 48,96 мкм/м при содержании: 3,91 % C, 11,43 % Cr, 5,4 % Mn и 0,19 % Ni. Износ резца, при обработке чугуна содержащего 3,91 % C, 25,57 % Cr, 5,4 % Mn и 0,19 % Ni, составил 47,61 мкм/м. **Научная новизна.** Автором разработана математически вероятностная модель зависимости износа резца от содержания в обрабатываемом чугуне C, Cr, Mn и Ni. **Практическая значимость.** Модель позволяет оптимизировать составы износостойких чугунов для отливок, требующих значительного объема механической обработки резанием. Рекомендованы составы чугунов для различных условий эксплуатации.

Ключевые слова: износостойкий чугун; легирование; структура; резание; износ резца

Вступление

Высокохромистые износостойкие чугуны (ИЧХ) являются многокомпонентными сплавами с разнообразными структурами и широким диапазоном физических и химических свойств. Они применяются для деталей, работающих в условиях абразивного и гидроабразивного

изнашивания. Вследствие высокой твердости и износостойкости эти материалы имеют неудовлетворительную обрабатываемость резанием. Это делает невозможным получение из них фасонных деталей, требующих значительной механической обработки [6, 8].

При механической обработке материал детали подвергается силовому и тепловому воз-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

действию в результате трения между резцом и деталью [3]. При силовом воздействии в обрабатываемом материале возникают внутренние напряжения, протекает пластическая деформация, упрочнение (наклеп). Повышение температуры в зоне резания может вызывать изменения в обрабатываемом материале, приводящие к снижению твердости [9].

Обрабатываемость резанием является комплексным показателем, зависящим от исходной структуры и свойств материала детали, состояния литой поверхности, наличия литейных дефектов (раковин), материала резца, режимов резания, процессов, вызывающих изменение структуры и свойств во время обработки и других факторов. Улучшение обрабатываемости высокохромистых чугунов достигалось за счет смягчающей термической обработки [4, 6, 8, 11, 12]. Для восстановления износостойких свойств этих материалов производилась дополнительная термическая обработка [4, 8, 13]. Такая технология является дорогостоящей и энергозатратной.

В работах [4, 6, 8, 11, 12] оценка обрабатываемости ИЧХ производилась путем сверления или методом торцевого точения. В результате этих исследований были разработаны рекомендации по выбору режимов резания для конкретных марок чугунов и деталей.

Систематизированные данные об обрабатываемости резанием ИЧХ в литом состоянии лезвийным инструментом при продольном точении практически отсутствуют.

Влияние хрома на физические и технологические свойства сплавов обуславливается его способностью: ограничивать γ – область железа; образовывать ряд непрерывных твердых растворов замещения с α – железом; снижать растворимость углерода в металлической основе и образовывать специальные карбиды. При содержании в твердом растворе до 7 % хром повышает прокаливаемость [7], а при содержании более 12,5 % сплав становится коррозионностойким [1, 7].

Влияние углерода на обрабатываемость высокохромистых чугунов обусловлено количеством карбидной фазы, ее типом, распределением и формой карбидов. В зависимости от соотно-

шения углерода и хрома в чугунах образуются карбиды Me_3C , Me_7C и $Me_{23}C_6$. Содержание углерода и хрома определяет износостойкость чугуна [6, 14, 15].

Влияние марганца определяется его аустенито- и карбидообразующими свойствами. В высокохромистых чугунах, содержащих до 0,6 % Mn, карбидообразующие свойства марганца не проявляются, он находится в твердом растворе [10]. При увеличении содержания марганца в чугуне, его содержание в первичных хромистых карбидах увеличивается, достигая равномерного распределения между карбидами и матрицей при 3–3,5 % Mn. При дальнейшем увеличении содержания марганца в чугуне, его концентрация в карбидах превышает концентрацию в металлической основе. В карбидах, в процессе охлаждения отливок или при термической обработке, протекают процессы замещения атомами хрома атомов железа и марганца, в результате которых создается химическая неоднородность металлической основы по хрому. Обоеднение хромом околокарбидных зон может приводить к снижению коррозионной стойкости [5, 15].

Никель, являясь аустенитообразующим элементом, повышает прокаливаемость, способствует твердорастворному упрочнению металлической основы и повышению вязкости разрушения сплавов.

Цель

Цель работы заключалась в получении регрессионной зависимости обрабатываемости резанием чугуна от его химического состава (C, Cr, Mn и Ni) в литом состоянии.

Методика

Использовали метод активного планирования эксперимента для построения математической модели (табл. 1).

Чугун выплавлялся в индукционной печи емкостью 60 кг с основной футеровкой.

Температура жидкого чугуна при заливке составляла 1380–1410 °С. Отливали в сухие формы цилиндрические образцы диаметром 30 мм и длиной 400 мм. Металлографический

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

анализ и испытания проводили в литом состоянии без термической обработки.

Таблица 1

**Матрица планирования
дробного факторного эксперимента 2^{4-1}**

Table 1

**Matrix of fractional factor
experiment 2^{4-1} planning**

Уровни варьирования факторов		Факторы			
		C, %	Cr, %	Mn, %	Ni, %
Основной	0	2,5	18,5	3,0	1,6
Интервал	Δ	1,0	5,0	1,7	1,0
Звездное плечо	1,414 Δ	1,41	7,07	2,4	1,41
Верхние уровни	+1	3,5	23,5	4,7	2,6
	+1,414	3,91	25,57	5,4	3,01
Нижние уровни	-1	1,5	13,5	1,3	0,6
	-1,414	1,09	11,43	0,6	0,19

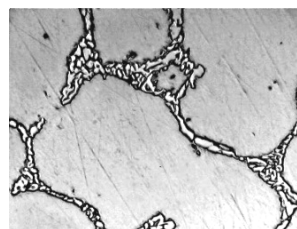
Перед испытаниями образцы обтачивались до диаметра 25 мм. Для чистового точения использовали резцы с пластинами 10x10 мм из сплава BK8 по ГОСТ 19051–80. Режимы резания: глубина резания – 0,8 мм; продольная подача – 0,15 мм/об, частота вращения шпинделя 200–630 об/мин. СОЖ не применяли. Оценка обрабатываемости чугунов производилась путем определения линейного износа задней поверхности резца на единицу длины пути резания. Анализ структуры выполняли на оптических микроскопах МИМ-8 и Sigeta MM-700 при увеличении 100–600, с использованием методик количественной металлографии [2].

Результаты

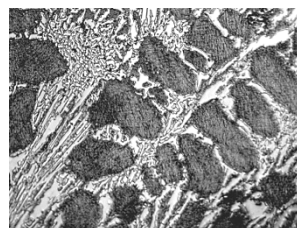
В зависимости от содержания углерода и хрома в чугуне формировались структуры с различным количеством и типом карбидов (рис. 1). При низком содержании углерода и высоком содержании хрома образовывались карбиды $(\text{Cr, Fe, Mn})_{23}\text{C}_6$. Увеличение содержания углерода при снижении количества хрома

способствовало формированию карбидов $(\text{Cr, Fe, Mn})_7\text{C}_3$. При высоком содержании углерода и низком хrome образовывались карбиды $(\text{Fe, Cr, Mn})_3\text{C}$. Структура и свойства металлической основы зависели от содержания хрома, никеля и марганца. С увеличением количества Mn и Ni металлическая основа изменялась от ферритной (мартенситной) до аустенитной.

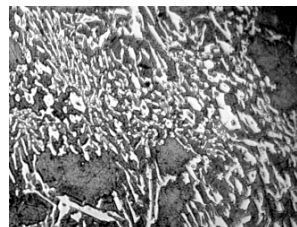
a-a



б-б



в-в



г-г

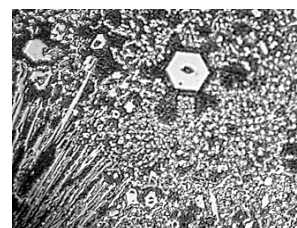


Рис. 1. Типы карбидов в чугунах, х 600:

a – карбиды $(\text{Cr, Fe, Mn})_{23}\text{C}_6$; б – карбиды $(\text{Fe, Cr, Mn})_3\text{C}$ и $(\text{Cr, Fe, Mn})_7\text{C}_3$; в – эвтектические карбиды $(\text{Cr, Fe, Mn})_7\text{C}_3$; г – эвтектические и заэвтектические карбиды $(\text{Cr, Fe, Mn})_7\text{C}_3$

Fig. 1. Carbide types in the cast irons, x 600:

a – carbides $(\text{Cr, Fe, Mn})_{23}\text{C}_6$; b – carbides $(\text{Fe, Cr, Mn})_3\text{C}$ and $(\text{Cr, Fe, Mn})_7\text{C}_3$; c – eutectic carbides $(\text{Cr, Fe, Mn})_7\text{C}_3$; d – eutectic and hypereutectic carbides $(\text{Cr, Fe, Mn})_7\text{C}_3$

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

В результате математической обработки экспериментальных данных получена регрессионная зависимость износа резца от содержания в обрабатываемом чугуна C, Cr, Mn, Ni следующего вида:

$$I, \text{ мкм/м} = 24,313 C - 3,408 Mn - 6,993 Cr + 0,948 CMn - 0,514 CCr - 1,755 CNi + 4,943 (Cr/C) + 0,514 Mn^2 + 0,216 Cr^2 + 0,797 Ni^2 - 0,136 (Cr/C)^2.$$

Данные уравнения являются математически вероятностными в соответствии с критериями Стьюдента, Фишера и Кохрена.

Физический смысл этого уравнения состоит в том, что обрабатываемость чугуна зависит от общего содержания легирующих элементов и их взаимного влияния и определяется количеством и типом карбидов, а также структурой металлической основы.

Графическое отображение этой функции представлено на рис. 2–5.

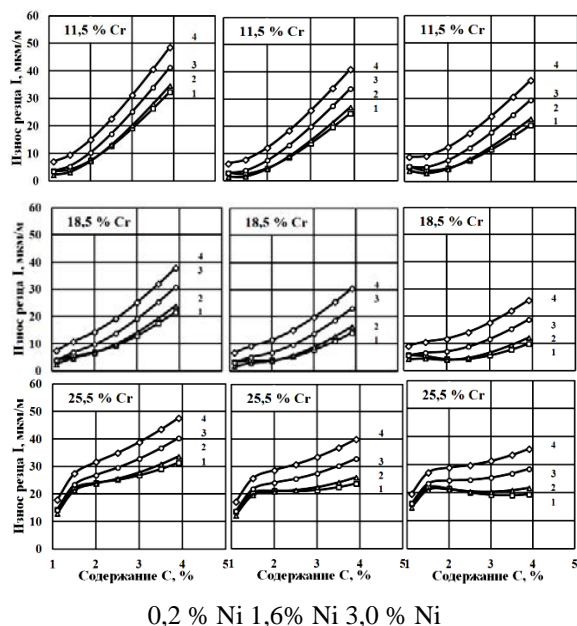


Рис. 2. Влияние C, Cr, Mn и Ni на износ резца:
1 – 0,6 % Mn; 2 – 2,0 % Mn; 3 – 4,0 % Mn; 4 – 5,4 % Mn

Fig. 2. Influence of C, Cr, Mn and Ni on the cutting tool's wear:
1 – 0.6 % Mn; 2 – 2.0 % Mn; 3 – 4.0 % Mn; 4 – 5.4 % Mn

При содержании углерода до 1,6 % влияние C, Cr, Mn и Ni было однозначным и практически не зависело от количества других элементов.

Увеличение углерода свыше 1,6 % повлияло на процессы образования карбидов и соответственно на интенсивность износа резца, которая изменялась в зависимости от количества Cr, Mn и Ni. Максимальный износ резца наблюдался при 3,91 % C (рис. 2).

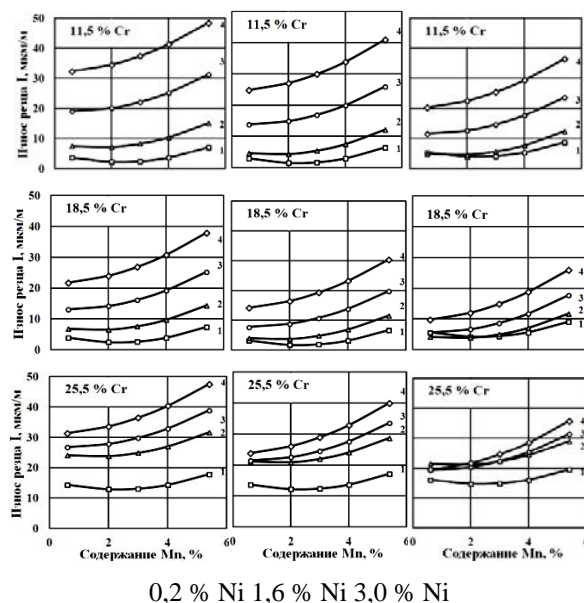


Рис. 3. Влияние C, Cr, Mn и Ni на износ резца:
1 – 1,1 % C; 2 – 2,0 % C; 3 – 3,0 % C; 4 – 3,9 % C

Fig. 3. Influence of C, Cr, Mn and Ni on the cutting tool's wear:
1 – 1.1 % C; 2 – 2.0 % C; 3 – 3.0 % C; 4 – 3.9 % C

При содержании в чугуна до 2,0 % Mn и максимальном количестве Cr и Ni увеличение содержания углерода свыше 1,6 % не оказывало значительного влияния на обрабатываемость. Практически при всевозможных сочетаниях C, Cr и Ni увеличение содержания марганца свыше 2,3 % увеличивало износ резца и ухудшало обрабатываемость чугуна за счет образования аустенита, склонного к наклепу (рис. 3).

Увеличение содержания Ni уменьшало износ резца за счет формирования аустенита, несклонного к наклепу в значительной степени. При минимальном содержании углерода в чугуна увеличение Ni свыше 2,5 % повышало износ резца за счет твердорастворного упрочнения основы (рис. 4).

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

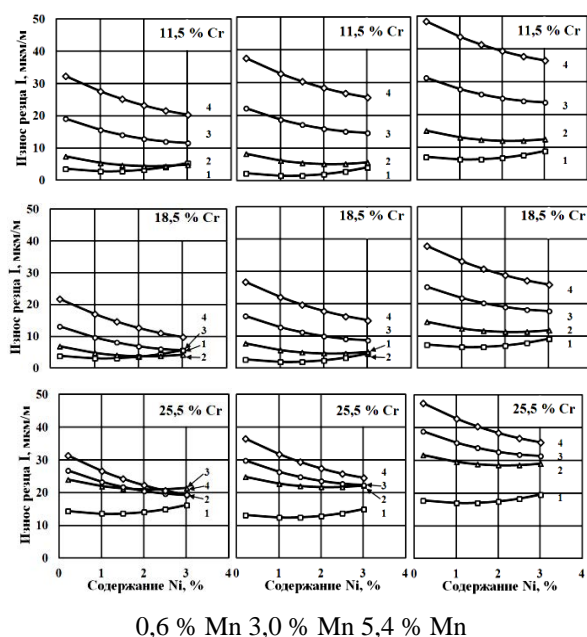


Рис. 4. Влияние C, Cr, Mn и Ni на износ резца:
1 – 1,1 % C; 2 – 2,0 % C; 3 – 3,0 % C; 4 – 3,9 % C

Fig. 4. Influence of C, Cr, Mn and Ni
on the cutting tool's wear:

1 – 1.1 % C; 2 – 2.0 % C; 3 – 3.0 % C; 4 – 3.9 % C

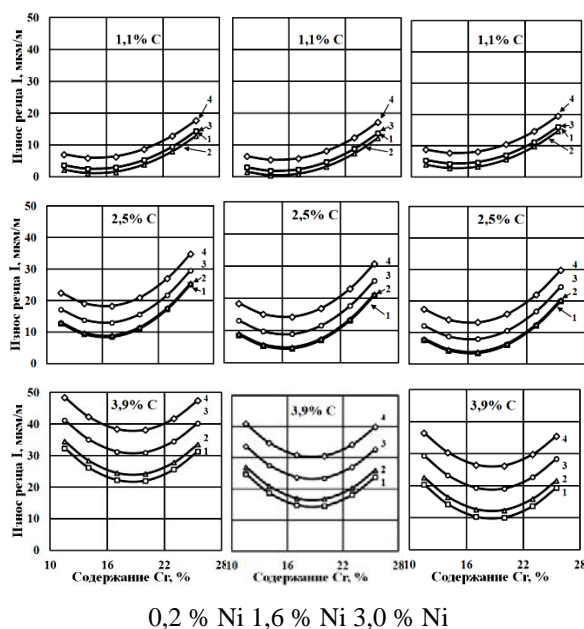


Рис. 5. Влияние C, Cr, Mn и Ni на износ резца:
1 – 0,6 % Mn; 2 – 2,0 % Mn; 3 – 4,0 % Mn; 4 – 5,4 % Mn

Fig. 5. Influence of C, Cr, Mn and Ni
on the cutting tool's wear:

1 – 0.6 % Mn; 2 – 2.0 % Mn; 3 – 4.0 % Mn; 4 – 5.4 % Mn

Влияние количества хрома в чугунах на износ резца определялось его воздействием на процессы карбидообразования (формирование карбидов $(Cr, Fe, Mn)_7C_3$) и твердорастворное упрочнение матрицы. При содержании 1,1 % C и 11,4 % Cr карбидная фаза представлена в основном карбидами цементитного типа $(Fe, Cr, Mn)_3C$, образующими сетку цементита. Увеличение хрома до 14,8 % снижало износ резца, за счет образования карбидной эвтектики, которая разрушала сетку цементита. Дальнейшее повышение содержания хрома вызывало формирование большого количества карбидов $(Cr, Fe, Mn)_7C_3$, обладающих высокой твердостью. Повышение содержания углерода в чугунах до 3,91 % увеличивало износ резца и смещало область минимального износа с 14,8 % до 20 % Cr (рис. 5). Смещение области минимального износа связано с тем, что повышение содержания углерода увеличивает количество карбидной фазы в чугунах и соответственно увеличивает количество хрома, растворенного (связанного) в карбидах цементитного типа, а также требует образование большого количества карбидной эвтектики для разрушения сетки ледебурита.

Анализ экстремумов полученной функции показал, что минимальный износ резца (0,18 мкм/м) происходит при обработке резанием чугуна, содержащего 1,09 % C, 14,8 % Cr, 2,3 % Mn и 1,2 % Ni, а максимальный (48,96 мкм/м) при 3,91 % C, 11,43 % Cr, 5,4 % Mn и 0,19 % Ni. Следует отметить, что повышение содержания хрома до 25,57 % Cr при 3,91 % C, 5,4 % Mn и 0,19 % Ni увеличивало износ резца до 47,61 мкм/м, что практически достигало уровня износа резца при обработке резанием чугуна с 11,43 % Cr.

Использование полученного уравнения регрессии позволяет прогнозировать обрабатываемость резанием лезвийным инструментом высокохромистых чугунов в литом состоянии. При этом оптимальные для конкретных условий эксплуатации структуры образуются после термической обработки.

Для литых деталей, требующих большого объема механической обработки в литом состоянии, рекомендуются составы износостойких чугунов:

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- для експлуатації в нейтральних середовищах:
2,5–3,5 % С, 17–19 % Cr, 1,5–2,0 % Mn
і 1,0–1,5 % Ni;
- для експлуатації в корозійних середовищах:
1,1–1,5 % С, 24–25,6 % Cr, 1,5–2,3 % Mn
і 1,5–2,0 % Ni.

Научная новизна и практическая значимость

Разработана математическая модель зависимости износа режущего инструмента от содержания в обрабатываемом чугуна С, Cr, Mn и Ni при обработке резанием лезвийным инструментом.

Разработанная модель позволит оптимизировать составы износостойких чугунов, требующих значительного объема механической обработки резанием лезвийным инструментом.

Выводы

1. Для деталей из высокохромистых чугунов, требующих механической обработки, содержание Mn должно быть не более 2,3 %.
2. Для условий абразивного изнашивания рекомендуются чугуны содержащие: 2,5–3,5 % С, 17–19 % Cr, 1,5–2,0 % Mn и 1,0–1,5 % Ni после термической обработки.
3. Для эксплуатации в коррозионных средах рекомендуются чугуны, содержащие: 1,1–1,5 % С, 24–25,6 % Cr, 1,5–2,3 % Mn и 1,5–2,0 % Ni после термической обработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Днепропетровск : Маковецкий, 2008. – 196 с.
2. Вакуленко, І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І. О. Вакуленко. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2010. – 124 с.
3. Вакуленко, І. О. Технологія механічної обробки металевих матеріалів / І. О. Вакуленко, Т. М. Кадильникова, С. В. Пройдак. – Дніпропетровськ : Стандарт-Сервіс, 2014. – 176 с.
4. Влияние термической обработки на свойства высокохромистого чугуна / М. Н. Беркун, И. П. Волчок, И. В. Живица, В. И. Топал // Ме-

- талловедение и термическая обработка металлов. – 1971. – № 1. – С. 64–66.
5. Волчок, И. П. Особенности легирования марганцем износостойких высокохромистых чугунов / И. П. Волчок, В. В. Нетребко // Литье и металлургия. – 2012. – № 3. – С. 162–165.
6. Гарбер, М. Е. Износостойкие белые чугуны / М. Е. Гарбер. – Москва : Машиностроение, 2010. – 280 с.
7. Гудремон, Э. Специальные стали. Т. 1 / Э. Гудремон. – Москва : Металлургия, 1966. – 736 с.
8. Структурно и неструктурно чувствительные свойства хромистых чугунов / А. А. Кириллов, В. Д. Белов, Е. В. Рожкова [и др.] // Черные металлы. – 2007. – № 9. – С. 7–13.
9. Нетребко, В. В. Влияние марганца на структуру высокохромистых чугунов / В. В. Нетребко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 167–169.
10. Нетребко, В. В. Влияние физических и тепловых процессов на структуру и свойства высокохромистого чугуна при обработке резанием / В. В. Нетребко // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 6 (54). – С. 97–103. doi: 10.15802/stp2014/33395.
11. Новые подходы к выбору режима смягчающей термической обработки высокохромистых чугунов / Ю. Г. Чабак, В. Г. Ефременко, А. С. Кравцов [и др.] // Проблемы и перспективы развития ж.-д. трансп. : тез. докл. 73 междунар. науч.-практ. конф. / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 2013. – С. 282–283.
12. Чабак, Ю. Г. Влияние режима отжига на микроструктуру и твердость высокохромистых чугунов с повышенным содержанием аустенитообразующих элементов / Ю. Г. Чабак // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднпр. гос акад. стр-ва и архит. – Днепропетровськ, 2013. – Вип. 67. – С. 188–192.
13. Чабак, Ю. Г. Структурные изменения в комплекснолегированном белом чугуна при дестабилизирующем нагреве / Ю. Г. Чабак, В. Г. Ефременко, Р. Р. Станишевский // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 38. – С. 229–232.
14. Analysis of the Structure and Abrasive Wear Resistance of White Cast Iron With Precipitates of Carbides / D. Kopyciński, M. Kawalec, A. Szczęsny [et al.] // Archives of Metallurgy and Materials. Institute of metallurgy and materials

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- science of Polish academy of sciences. – 2013. – Vol. 58. – Iss. 3. – P. 973–976. doi: 10.2478/amm-2013-0113.
15. Belikov, S. Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron / S. Belikov, I. Volchok, V. Netrebko // Archives of Metallurgy and Materials. – 2013. – Vol. 58. – Iss. 3. – P. 895–897. doi: 10.2478/amm-2013-0095.
16. Gierrek, A. Zeliwo stopowe jako tworzywo konstrukcyjne / A. Gierrek, L. Bajka. – Katowice : Slask, 1976. – 230 p.

В. В. НЕТРЕБКО^{1*}

^{1*}Каф. «Обладнання та технологія зварювального виробництва», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 27 09 520, ел. пошта olgavvn@mail.ru, ORCID 0000-0003-3283-0116

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ВИСОКОХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ НА ОБРОБЛЮВАНІСТЬ РІЗАННЯМ

Мета. Дане дослідження спрямоване на визначення регресійної залежності оброблюваності різанням від хімічного складу чавуну (C, Cr, Mn та Ni) в стані литва. **Методика.** Для побудови математичної моделі було застосовано метод активного планування експерименту. Досліджували чавуни наступного складу: 1,09...3,91 % C; 11,43...25,57 % Cr; 0,6...5,4 % Mn; 0,19...3,01 % Ni. При обробці різанням використовували різці з пластинами 10x10 мм зі сплаву BK8 по ГОСТ 19051–80. Параметри обробки: глибина різання – 0,8 мм, подача – 0,15 мм/об, частота обертання шпинделю – 200...630 об/хв. МОР (мастильно-охолоджуючі рідини) не застосовували. Оцінювання оброблюваності різанням визначали за розміром зносу різця на одиницю довжини різання. **Результати.** Отримано математично вірогідне регресивне рівняння зносу різця в залежності від вмісту в оброблюваному чавуні C, Cr, Mn та Ni. Встановлено, що збільшення вмісту Cr в чавуні до 14,8 % зменшує знос різця внаслідок утворення карбідної евтектики, яка руйнувала суцільний каркас легovanого ледебуриту. Подальше збільшення вмісту хрому сприяло появі карбідів із високою мікротвердістю, що значно збільшувало знос інструменту. Проведені дослідження виявили, що найменший знос різця 0,18 мкм/м був при обробці чавуну, якій містив: 1,09 % C, 14,8 % Cr, 2,3 % Mn та 1,2 % Ni, а найбільший знос – 48,96 мкм/м при вмісту: 3,91 % C, 11,43 % Cr, 5,4 % Mn та 0,19 % Ni. Знос різця при вмісту в чавуні 3,91 % C, 25,57 % Cr, 5,4 % Mn, 0,19 % Ni склав 47,61 мкм/м. **Наукова новизна.** Автором розроблена математично вірогідна модель залежності зносу різця від вмісту в оброблюваному чавуні C, Cr, Mn та Ni. **Практична значимість.** Рекомендована модель дозволяє оптимізувати склади зносостійких чавунів для виливків, що потребують значного об'єму механічної обробки різанням. Рекомендовані склади чавунів для різних умов експлуатації.

Ключові слова: зносостійкий чавун; легування=структура; різання=знос різця

V. V. NETREBKO^{1*}

^{1*}Dep. «Equipment and Technology of Welding Production», Zaporizhzhya National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 270 95 20, e-mail olgavvn@mail.ru, ORCID 0000-0003-3283-0116

THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION OF HIGH-CHROMIUM CAST IRONS ON THE MACHINABILITY

Purpose. This research is aimed to obtain the regression dependence of the machinability on the chemical composition of pig iron (C, Cr, Mn and Ni) in cast state. **Methodology.** The method of active experiment planning was used to build a mathematical model. Cast irons of composition 1.09...3.91 % C; 11.43...25.57 % Cr; 0.6...5.4 % Mn; 0.19...3.01 % Ni were studied. Cutting tools with plates 10x10 mm out of BK8 according to State Standard 19051-80 were used for turning. Cutting modes: cutting depth – 0.8 mm, longitudinal feed – 0.15 mm/rot., spindle's rotation frequency during turning – 200...360 rot./min. Lubricating and cooling liquids were not applied. Evaluation

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

of iron workability was produced by determining the linear tool flank wear per unit length of the cutting path. **Findings.** Mathematically probabilistic equation of the regression dependence of the cutting tool's wear on the C, Cr, Mn and Ni content in the machined cast iron were obtained. It was established that with the increase of Cr content in the cast iron to 14.8 % the cutting tool's wear decreased as a result of formation of carbide eutectic which destroyed the doped ledeburite continuous frame. Further increase of chromium content promoted appearing of chromic carbides with high microhardness which considerably increased the tool's wear. The conducted research shown that the minimum cutting tool's wear 0,18 mkm/m was observed during the machining of cast iron containing: 1.09 % C, 14.8 % Cr, 2.3 % Mn and 1.2 % Ni; and the maximum wear is 48,96 mkm/m – when the content was: 3.91 % C, 11.43 % Cr, 5.4 % Mn and 0.19 % Ni. The tool's wear reached 47.61 mkm/m during the treatment of cast iron containing 3.91 % C, 25.57 % Cr, 5.4 % Mn and 0.19 % Ni. **Originality.** Mathematically probabilistic model of the dependence of the cutting tool's wear on the C, Cr, Mn and Ni content in the machined cast iron has been elaborated by the author. **Practical value.** The model allows optimizing the compositions of wear-resistant cast irons for castings which require the significant mechanical machining. Cast irons compositions were recommended for different exploitation conditions.

Keywords: wear-resistant cast iron; alloying; structure; cutting; cutting tool's wear

REFERENCES

1. Vakulenko I.A., Bolshakov V.I. *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali* [Morphology of structure and strain hardening of steel]. Dnepropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2008. 196 p.
2. Vakulenko I.O. *Strukturnyi analiz v materialoznavstvi* [Structural analysis in material science]. Dnepropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2010. 124 p.
3. Vakulenko I.O., Kadylnykova T.M., Proidak S.V. *Tekhnologiya mekhanichnoi obrobky metalevykh materialiv* [Technology machining of metallic materials]. Dnepropetrovsk, Standart-Servis Publ., 2014. 176 p.
4. Berkun M.N., Volchok I.P., Zhivitsa I.V., Topal V.I. Vliyaniye termicheskoy obrabotki na svoystva vysokokhromistogo chuguna [Heat treatment impact on the properties of high chrome cast iron]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov – Material Science and Heat Metal Treatment*, 1971, no. 1, pp. 64-66.
5. Volchok I.P., Netrebko V.V. Osobennosti legirovaniya margantsom iznosostoykikh vysokokhromistyykh chugunov [Manganese doping features of wear-resistant and high chrome cast iron]. *Lite i metallurgiya – Casting and Metallurgy*, 2012, no. 3, pp. 162-165.
6. Garber M.Ye. *Iznosostoykiye belyye chuguny* [Wear-resistant white cast irons]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2010. 280 p.
7. Gudremont E. *Spetsialnyye stali. T. 1.* [Special steel. Vol. 1]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1966. 736 p.
8. Kirillov A.A., Belov V.D., Rozhkova Ye.V. Strukturno i nestrukturno chuvstvitelnyye svoystva khromistyykh chugunov [Structural and nonstructural sensitive properties of chromium cast iron]. *Chernyye metally – Ferrous*, 2007, no. 9, pp. 7-13.
9. Netrebko V.V. Vliyaniye margantsa na strukturu vysokokhromistyykh chugunov [The influence of manganese for structure of high-chromium white cast iron]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 167-169.
10. Netrebko V.V. Vliyaniye fizicheskikh i teplovykh protsessov na strukturu i svoystva vysokokhromistogo chuguna pri obrabotke rezaniyem [Influence of physical and heat processes on the structure and properties of high-chromium cast iron during machining]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2014, no. 6 (54), pp. 97-103. doi: 10.15802/stp2014/33395.
11. Chabak Yu.G., Yefremenko V.G., Kravtsov A.S. Novyye podkhody k vyboru rezhima smyagchayushchey termicheskoy obrabotki vysokokhromistyykh chugunov [New approaches to the selection mode of softening heat treatment of high chrome cast iron]. *Tezisy dokladov 73-y mezhduнародnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta»* [Proc. of 73^d Int. Sci. and Practical Conference «Development questions and prospects of railway transport»]. Dnepropetrovsk, 2013, pp. 282-283.
12. Chabak Yu.G. Vliyaniye rezhima otzhiga na mikrostrukturu i tverdost vysokokhromistyykh chugunov s povyshennym soderzhaniyem austenitoobrazuyushchikh elementov [Annealing cycle effect on the

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- microstructure and hardness of high chrome cast iron with a high content of austenite-promoting elements]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye»* [Proc. «Construction, Materials Science, Mechanical Engineering»]. Dnepropetrovsk, 2013, issue 67, pp. 188-192.
13. Chabak Yu.G., Yefremenko V.G., Stanishevskiy R.R. Strukturnyye izmeneniya v kompleksnolegirovannom belom chugune pri destabiliziruyushchem nagreve [Structural changes have in complex alloying white iron during destabilizing heating]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 38, pp. 229-232.
 14. Kopyciński D., Kawalec M., Szczęsny A., Gilewski R., Piasny S. Analysis of the Structure and Abrasive Wear Resistance of White Cast Iron With Precipitates of Carbides. *Archives of Metallurgy and Materials. Institute of metallurgy and materials science of Polish academy of sciences*, 2013, vol. 58, issue 3, pp. 973–976. doi: 10.2478/amm-2013-0113.
 15. Belikov S., Volchok I., Netrebko V. Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron. *Archives of Metallurgy and Materials. Institute of metallurgy and materials science of Polish academy of sciences*, 2013, vol. 58, issue 3, pp. 895-897. doi: 10.2478/amm-2013-0095.
 16. Gierek A., Bajka L. Zeliwo stopowe jako tworzywo konstrukcyjne. Katowice, Slask Publ., 1976. 230 p.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А. А. Митяевым (Украина); д.т.н., проф. И. А. Вакуленко (Украина)

Поступила в редколлегию: 20.11.2015

Принята к печати: 15.01.2016

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

UDC 621.867.21

V. M. BOHOMAZ^{1*}

^{1*}Dep. «Military training of specialists of the State special service of transport», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 793 19 09, e-mail wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

RESEARCH OF DEPENDENCE OF BELT CONVEYER DRIVE POWER ON ITS DESIGN PARAMETERS

Purpose. A drive is one of the basic elements of belt conveyers. To determine the drive power it is necessary to conduct calculations by standard methodologies expounded in modern technical literature. Such calculations demand a fair amount of time. The basic design parameters of a belt conveyer include type of load, design efficiency, geometrical dimensions and path configuration, operation conditions. The article aims to build the parametric dependence of belt conveyer drive power on its design parameters, that takes into account standard dimensions and parameters of belts, idlers and pulleys. **Methodology.** The work examines a belt conveyer with two areas: sloping and horizontal. Using the methodology for pulling calculation by means of belt conveyer encirclement, there are built parametric dependences of pull forces in the characteristic conveyer path points on the type of load, design efficiency, geometrical dimensions and path configuration, operation conditions. **Findings.** For the belt conveyers of the considered type there are built parametric dependences of drive power on type of load, design efficiency, geometrical dimensions and path configuration, operation conditions, taking into account the belt standard dimensions and corresponding assumptions in relation to idler and pulley types. **Originality.** This is the first developed parametric dependence of two-area (sloping and horizontal) belt conveyer drive power on type of load, design efficiency, geometrical dimensions and path configuration, operation conditions that takes into account standard dimensions and parameters of belts, idlers and pulleys. **Practical value.** Use of the built drive power dependences on design parameters for the belt conveyers with sloping and horizontal areas gives an opportunity of relatively rapid determination of drive power approximate value at the design stage. Also it allows quality selection of its basic elements at specific design characteristics and requirements. The offered dependences can be used for determination of general character of drive power dependence on the project efficiency.

Keywords: conveyer; belt; drive; power; efficiency; load

Introduction

Transporting machines are important elements of transport and industrial construction sector. Continuous-transport machines are the foundation of the comprehensive mechanization of cargo handling, industrial processes, they increase productivity and efficiency. The most common type of continuous transport is belt conveyors. Belt conveyors are the continuous-type machines, the main ele-

ment of which is vertically closed rubber belt that encircles the end pulleys, one of which is usually the drive one, the other – the idler one. Belt conveyors are widely used in the chemical, metallurgical, machine-building industry, for production of building materials, transport and industrial construction, at the coal preparation plants.

The main publications that describe the structure, design features, operational and design parameters of the conveyors are [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

The analysis of publications shows that for determining the conveyor drive parameters, particularly its power, it is necessary to conduct calculation for its pulleys, pulling element (belt), pulling calculation and to select the basic drive elements. The procedure of these calculations is described in detail in [7, 8]. But the use of traditional conveyor drive calculation methods takes some time. Today, the constant development of almost all industries demands more rapid decision-making in the design of continuous-transport machines, which are elements of the production lines. Therefore, to improve the belt conveyor drive design process it is desirable to determine a scheme that allows using the more simple and quick calculations to determine the necessary value of the drive power depending on the design parameters. Such a scheme is proposed for elevators in [2, 3].

Purpose

The work aims to build the parametric dependence for drive power of the belt conveyor with sloping and horizontal areas on type of load, design efficiency, geometrical dimensions and path configuration, operation conditions.

Methodology

The value of belt conveyor drive power depends on many factors. The main parameters affecting its value are: type of load, design efficiency, load lifting height and conveying distance, required load transportation path configuration, conveyor operation conditions. The design diagram

of the conveyor under study and its approximate belt tension chart are shown in Figure 1.

Initial data for design calculations of the examined belt conveyor are as follows:

- Transported material;
- Conveyor efficiency;
- Height or angle of the conveyor sloping area, H or β respectively;
- Lengths of conveyor sections and radius: L_{12} , L_{34} , L_{56} , L_{156} , L_{67} , L_{78} , R_1 m.

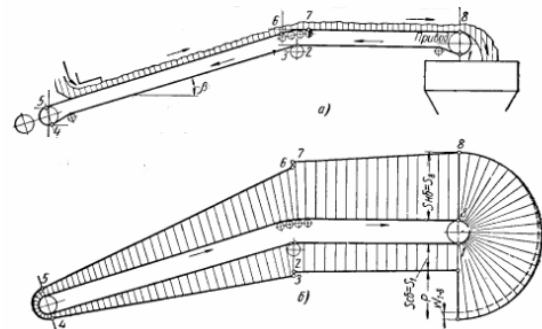


Fig. 1. Belt conveyor:
a – design diagram; b – belt tension chart

For further study we determine that the conveyor has grooved three-roller idlers with 20° angle on the loaded belt and row straight idlers – on the return belt.

Taking into account the data of the tables 8.1 and 8.2 of [8] we present in Table 1 the basic properties of the load that are needed for further calculations:

Table 1

Belt speed and load properties

Bulk load	material density ρ , t/m ³	coefficient k_{cs}	Belt speed, m/s, at the width, mm				
			400	500 and 650	800...1 200	1 200... 1 600	1 800... 2 000
sand	1.4 – 1.65	470	1.3	1.5	2.6	3.3	5.5
peat	0.33 – 0.4	550	1.3	1.5	2.6	3.3	5.5
soil	1.1 – 1.6	470	1.3	1.5	2.6	3.3	5.5
gravel	1.5 – 1.9	470	1.1	1.3	1.8	2.6	3.6
stones	1.8 – 2.2	550	–	1.3	1.3	1.8	2.6
coal	0.8 – 1.0	470	1.1	1.3	1.4	1.8	–
cement	1.0 – 1.8	470	–	1.1	1.0	–	–
crushed stone	1.3 – 1.8	550	1.1	1.3	1.8	2.6	3.6

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

The belt speed values in Table 1 are counted as the mean in a given range of possible values for the set load.

The belt width required for the set efficiency E is calculated by the formula

$$B_e \geq 1,1 \left(\sqrt{\frac{E}{k_{cs} k_{\beta} \rho v}} + 0,05 \right), \quad (1)$$

where k_{cs} – cross-section coefficient of the material on belt (Table 1); k_{β} – coefficient for cross-section decrease of the material on belt due to its partial bulking into the side opposite to the travel direction (p. 403, [8]); ρ – bulk density of transported material (Table 1), t/m^3 .

The determined belt width value is rounded up to the nearest biggest number of a standard row of belt width: 400; 500; 650; 800; 1 000; 1 200 mm.

For convenience of further research, we will do some algebraic transformation in the expression (1). The result is as follows:

$$k_{cs} \rho v (0,91 B_e - 0,05)^2 \geq \frac{E}{k_{\beta}}. \quad (2)$$

For unambiguous determination of the required width to achieve the conveyor design efficiency the ratio E/k_{β} must appertain to some range of values. These ranges are shown in Table 2. The value E/k_{β} depends on the belt width, type of load and accepted load material density. The limit values of the ranges in Table 2 are calculated for the corresponding limit values of material density. For example, for sand and belt width $B = 400$ mm the range of variation is $E/k_{\beta} = 84.3 - 99.4$, herewith 84.3 corresponds to the sand density $1.4 t/m^3$ and 99.4 – to the sand density $1.65 t/m^3$.

Example of usage of Table 1: let the load be soil with the density $\rho = 1.6 t/m^3$, the angle $\beta = 22^\circ$ and the required efficiency $E = 64 t/h$. With the help of (p. 403 [8]) we get: $k_{\beta} = 0.76$. We calculate the ratio $E/k_{\beta} = 64/0.76 = 84.2 < 99.4$, thus, this value corresponds to the width of the belt $B = 400$ mm. This width is taken for further calculations.

It should also be noted that the inequality sign must be considered in the ratio (2) as follows: the

soil density $\rho = 1.6 t/m^3$ and belt width $B = 400$ mm go with the range of values E/k_{β} [0...96.4], $B = 500$ mm – the range E/k_{β} [96.4...185], $B = 650$ mm – the range E/k_{β} [185...330.7], $B = 800$ mm – the range E/k_{β} [330.7...898.8], $B = 1000$ mm – the range E/k_{β} [898.8...1 446.1], $B = 1200$ mm – the range E/k_{β} [1446.1...2 694.4]. Accordingly, the soil density $\rho = 1.1 t/m^3$ and belt width $B = 400$ mm go with the range of values E/k_{β} [0...66.3], $B = 500$ mm – the range E/k_{β} [66.3...127.2], $B = 650$ mm – the range E/k_{β} [127.2...227.4], $B = 800$ mm – the range E/k_{β} [227.4...617.9], $B = 1000$ mm – the range E/k_{β} [617.9...994.2], $B = 1200$ mm – the range E/k_{β} [994.2...1852.4]

For further calculation the conveyor pulling element circuit is divided into straight and curved sections (see Fig. 1a). To determine the belt tension we use the method of pulling calculation by circuit.

We adopt the conveyor drive with one driving pulley, the wrap angle of which is $\gamma = 180^\circ$. The pulley surface is lined with rubber.

The efforts in the belt entering the drive pulley are determined by Euler's formula:

$$S_{eb} = S_8 \leq S_1 e^{\mu \gamma}, \quad (3)$$

where μ – friction factor between the belt and the pulley surface; γ – belt wrap angle of drive pulley, radian; $e^{\mu \gamma}$ – pulling factor (Table 3).

There are two unknown terms S_1 and S_8 in the equation (3). To formulate the second equation it is necessary to encircle the pulling circuit from point 1 to point 8, expressing the tension at all points through the tension at point 1. The specific weight of the material on belt is determined by the formula

$$q_m = \frac{Eg}{3.6v} = \beta E, \quad (4)$$

where $\beta = \frac{g}{3.6v}$ – coefficient that depends on the belt speed, $N \cdot s/kg \cdot m$.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

The specific weight of moving parts of upper and lower idlers is determined by formulas:

$$q_{ui} = G_i' / l_i'; \quad (5)$$

$$q_{li} = G_i'' / l_i'', \quad (6)$$

where G_i' , G_i'' – weight of rotating parts of upper and lower idlers respectively.

The spacing of upper and lower idlers l_i on the path is taken according to the table 8.3 [8]. The lower row idlers are arranged with the double l_i spacing.

Using the data from tables 8.3 – 8.5 [8] and the formulas (5) – (6) we calculate the specific weight of moving parts of upper and lower idlers. The following table shows the values of the specific weight of moving parts of upper and lower idlers depending on the belt width and load density.

Using the data in table 1 and the formula (4), we built dependence of the loaded material specific weight on the belt width and the conveyor efficiency. The resulted data are shown in Table 5.

Table 2

Ranges of ratio values E/k_β corresponding to type of load and belt width

Bulk load	material density ρ , t/m ³	Ranges of ratio values E/k_β , t/h, with the belt width, mm					
		400	500	650	800	1 000	1 200
sand	1.4 – 1.65	84,3-99,4	161,9-190,8	289,4-341,1	786,5-926,9	1265,3-1491,3	2357,6-2778,6
peat	0.33 – 0.4	23.3-28.2	44.6-54.1	79.8-96.7	216.9-262.9	349-423	650.3-788.3
soil	1.1 – 1.6	66.3-96.4	127.2-185	227.4-330.7	617.9-898.8	994.2-1446.1	1852.4-2694.4
grave l	1.5 – 1.9	76.5-96.9	150.3-190.4	268.7-340.4	583.3-738.9	938.5-1188.8	1990.2-2520.9
stone s	1.8 – 2.2	–	211.1-258	377.3-461.2	591.6-723.1	951.9-1163.4	1934.8-2364.8
coal	0.8 – 1.0	40.8-51	80.2-100.2	143.3-179.1	242-302.5	389.4-486.7	734.88-918.6
ce- ment	1.0 – 1.8	–	84.8-152.6	151.6-272.8	216.1-388.9	347.6-625.7	–
crush ed stone	1.3 – 1.8	77.6-107.4	152.5-211.1	272.6-377.4	591.6-819.2	951.9-1318	2018.5-2794.8

Table 3

Value of pulling factor $e^{\mu\gamma}$

μ	γ , grad (radian)				
	180 (3.14)	190 (3.22)	200 (3.50)	210 (3.67)	240 (4.19)
0.2 (without lining)	1.88	1.94	2.01	2.08	2.31
0.3 (with wood lining)	2.57	2.71	2.85	3.01	3.52
0.4 (with rubber lining)	3.52	3.78	4.05	4.34	5.35

Table 4

Specific weight of moving parts of upper and lower idlers

Belt width, mm	q_{ui} at load density ρ , N/m			q_{li} at load density ρ , N/m		
	up to 1 t/m ³	1...2 t/m ³	above 2 t/m ³	up to 1 t/m ³	1...2 t/m ³	above 2 t/m ³
400	66.7	71.4	76.9	20	21.5	23.1
500	76.7	82.1	88.5	25	26.8	28.9
650	89.3	96.2	104.2	37.5	40.4	43.8
800	157.1	169.2	183.3	61.1	71.2	77.1
1 000	192.3	208.3	227.3	84.6	91.7	100
1 200	223.1	241.7	263.6	96.2	104.2	113.7

Table 5

Dependence of loaded material specific weight q_m on belt width and conveyor efficiency

Bulk load	Belt width, mm				
	400	500 та 650	800...1200	1200...21600	1800...2000
sand	2.14E	1.85E	1.07E	0.84E	0.51E
peat	2.14E	1.85E	1.07E	0.84E	0.51E
soil	2.14E	1.85E	1.07E	0.84E	0.51E
gravel	2.53E	2.14E	1.54E	1.07E	0.77E
stones	–	2.14E	2.14E	1.54E	1.07E
coal	2.53E	2.14E	1.98E	1.54E	–
cement	–	2.53E	2.78E	–	–
crushed stone	2.53E	2.14E	1.54E	1.07E	0.77E

For clarity in subsequent calculations we adopt as a working element the conveyor fabric-ply belt by GOST 20-85 BKNL-150, whose gasket tensile strength $S_p = 150$ N/mm. In addition, further on we will assume that the conveyor operation conditions are heavy or very heavy.

The belt thickness is determined by the formula

$$\delta_b = \delta_o + i\delta_g + \delta_n, \quad (7)$$

where δ_o , δ_n – thickness of rubber gaskets from operating and non- operating belt sides; δ_g – thickness of one fabric gasket; $\delta_g = 1.6$ mm for BKNL-150-type belts.

The gasket thickness is selected subject to heavy operation conditions of the conveyor, so $\delta_o = 6$ mm, $\delta_n = 2$ mm, while

$$\delta_b = 6 + i \cdot 1.6 + 2 = 8 + i \cdot 1.6 \text{ mm.}$$

The belt running meter weight is calculated by the formula

$$q_b = 0.01B\delta_b, \quad (8)$$

where B and δ_b should be substituted in millimetres.

Using the formulas (7) – (8) we obtained the dependence of the belt linear weight value on the number of gaskets and the belt width (Table 6).

The basic principle of the encirclement method is to identify the specific points of the path, where there are changes of belt tension. Herewith the tension in the following $(i+1)$ point equals the sum of the belt tension in this (i) point and the belt transport resistance at the section between these points:

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

$$S_{i+1} = S_i + W_{i,i+1}. \quad (9)$$

Belt tension at point 2 is calculated by the formula

$$S_2 = S_1 + W_{12}, \quad (10)$$

where W_{12} – belt transport resistance at the section between the points 1 and 2;

$$W_{12} = wL_r(q_b + q_{li}). \quad (11)$$

where w – belt transport resistance (Table 7), which depends on the type of bearing, lubrication, sealing, dustiness of atmosphere and other conditions.

For further research it is assumed that $w = 0.03$ (operation conditions are heavy, lower idlers are straight, upper idlers are grooved). Using the tables 5 and 6, we obtained the expressions for tension force values at point 2, depending on the belt width and load density (Table 8).

Belt tension at point 3 is calculated by the formula

$$S_3 = k S_2, \quad (12)$$

where k – coefficient for increase in belt tension due to idler pulley rotating resistance (Table 9).

Table 6

Belt linear weight

Belt width B , mm	Belt linear weight at $i = 3$, N/m	Belt linear weight at $i = 4$, N/m	Belt linear weight at $i = 5$, N/m	Belt linear weight at $i = 6$, N/m
400	51.2	57.6	64	70.4
500	64	72	80	88
650	83.2	93.6	104	114.4
800	102.4	115.2	128	140.8
1 000	128	144	160	176
1 200	153.6	172.8	192	211.2

Table 7

Value of coefficient w

Conveyor operation conditions	Idlers	
	straight	grooved
Light	0.018	0.020
Average	0.022	0.025
Heavy, very heavy	0.030	0.030

Table 8

Belt tension at point 2

Belt width, mm	S_2 at load density ρ , N/m		
	up to 1 t/m ³	1...2 t/m ³	above 2 t/m ³
400	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 20)$	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 21.5)$	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 23.1)$
500	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 25)$	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 26.8)$	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 28.9)$
650	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 37.5)$	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 40.4)$	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 43.8)$
800	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 61.1)$	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 71.2)$	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 77.1)$
1 000	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 84.6)$	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 91.7)$	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 100)$
1 200	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 96.2)$	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 104.2)$	$S_1 + 0.03L_l(q_b + 113.7)$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

In the considered conveyor design the belt wrap angle of pulley is less than 90° (Fig. 1), thus $k = 1.03$.

Table 9

Value of coefficient k

Belt wrap angle of pulley, degrees	k
<90	1.03
90	1.04
180	1.05

Dependencies to determine the tension force value at point 3 by belt width and load density are shown in Table 10.

Belt tension at point 4 is calculated by the formula

$$S_4 = S_3 + W_{34}, \quad (13)$$

where W_{34} – belt transport resistance at the section between the points 3 and 4;

$$W_{34} = q_b L_{34} (w \cdot \cos \beta - \sin \beta) + q_{li} L_{34} w, \quad (14)$$

where w – belt transport resistance coefficient (Table 7).

If $w = 0.03$ (operation conditions are heavy, lower idlers are straight), then the dependences for tension force values at point 4 by belt width and load density are shown in Table 11.

Belt tension at point 5 is calculated by the formula

$$S_5 = k S_4, \quad (15)$$

where k – coefficient for increase in belt tension due to idler pulley rotating resistance (Table 9).

In the considered conveyor design the belt wrap angle of pulley is 180° (Fig. 1), therefore, we assume that $k = 1.05$.

Dependencies for tension force values at point 5 by belt width and load density are shown in Table 12.

Belt tension at point 6 is calculated by the formula

$$S_6 = S_5 + W_{56}, \quad (16)$$

where W_{56} – belt transport resistance at the section between the points 5 and 6;

$$W_{56} = (q_m + q_b) L_{56} (w \cdot \cos \beta + \sin \beta) + q_{li} L_{56} w, \quad (17)$$

where w – belt transport resistance coefficient (Table 7).

If $w = 0.03$ (operation conditions are heavy, upper idlers are grooved), then the dependences for tension force values at point 6 by belt width and load density are shown in Table 13.

Belt tension at point 7 is calculated by Euler's formula:

$$S_7 = S_6 e^{w\alpha}, \quad (18)$$

where w – friction factor between the belt and the idler surface; α – belt wrap angle of battery of idlers, radian.

Belt wrap angle of battery of idlers:

$$\alpha = \frac{L_{67}}{R_1}. \quad (19)$$

Dependencies for tension force values at point 7 by belt width and load density are shown in Table 14.

Table 10

Belt tension at point 3

Belt width, mm	S_3 at load density ρ , N/m		
	up to 1 t/m^3	$1 \dots 2 \text{ t/m}^3$	above 2 t/m^3
400	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 20)$	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 21.5)$	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 23.1)$
500	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 25)$	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 26.8)$	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 28.9)$
650	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 37.5)$	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 40.4)$	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 43.8)$
800	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 61.1)$	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 71.2)$	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 77.1)$
1 000	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 84.6)$	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 91.7)$	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 100)$
1 200	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 96.2)$	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 104.2)$	$1.03 S_1 + 0.031 L_1 (q_b + 113.7)$

Table 11

Belt tension at point 4

Belt width, mm	S_4 at load density ρ , N/m		
	up to 1 t/m ³	1...2 t/m ³	above 2 t/m ³
400	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+0.62(L_1+L_{34})$	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+0.66(L_1+L_{34})$	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+0.72(L_1+L_{34})$
500	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+0.77(L_1+L_{34})$	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+0.83(L_1+L_{34})$	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+0.9(L_1+L_{34})$
650	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+1.16(L_1+L_{34})$	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+1.25(L_1+L_{34})$	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+1.35(L_1+L_{34})$
800	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+2.1(L_1+L_{34})$	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+2.2(L_1+L_{34})$	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+2.39(L_1+L_{34})$
1 000	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+2.6(L_1+L_{34})$	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+2.84(L_1+L_{34})$	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+3.1(L_1+L_{34})$
1 200	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+2.98(L_1+L_{34})$	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+3.23(L_1+L_{34})$	$1.03S_1+0.031 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+3.5(L_1+L_{34})$

Table 12

Belt tension at point 5

Belt width, mm	S_5 at load density ρ , N/m		
	up to 1 t/m ³	1...2 t/m ³	above 2 t/m ³
400	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+0.65(L_1+L_{34})$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+0.7(L_1+L_{34})$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+0.75(L_1+L_{34})$
500	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+0.81(L_1+L_{34})$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+0.87(L_1+L_{34})$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+0.94(L_1+L_{34})$
650	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+1.23(L_1+L_{34})$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+1.31(L_1+L_{34})$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+1.42(L_1+L_{34})$
800	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+2.15(L_1+L_{34})$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+2.31(L_1+L_{34})$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+2.5(L_1+L_{34})$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

End of table 12

Belt width, mm	S_5 at load density ρ , N/m		
	up to 1 t/m ³	1...2 t/m ³	above 2 t/m ³
1 000	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+$ $+2.75(L_1+L_{34})$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+$ $+2.98(L_1+L_{34})$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+$ $+3.25(L_1+L_{34})$
1 200	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+$ $+3.13(L_1+L_{34})$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+$ $+3.39(L_1+L_{34})$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+L_{34}\cos\beta-32.3L_{34}\sin\beta)+$ $+3.7(L_1+L_{34})$

Table 13

Belt tension at point 6

Belt width, mm	S_6 at load density ρ , N/m		
	up to 1 t/m ³	1...2 t/m ³	above 2 t/m ³
400	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+0.65(L_1+L_{34}+3.08 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+0.7(L_1+L_{34}+3.06 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+0.75(L_1+L_{34}+3.08 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$
500	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+0.81(L_1+L_{34}+2.82 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+0.87(L_1+L_{34}+2.84 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+0.94(L_1+L_{34}+2.82 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$
650	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+1.23(L_1+L_{34}+2.18 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+1.41(L_1+L_{34}+2.2 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+1.43(L_1+L_{34}+2.2 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$
800	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+2.15(L_1+L_{34}+2.2 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+2.31(L_1+L_{34}+2.2 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+2.5(L_1+L_{34}+2.2 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$
1 000	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+2.75(L_1+L_{34}+2.1 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+2.98(L_1+L_{34}+2.1 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+3.25(L_1+L_{34}+2.1 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$
1 200	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+3.13(L_1+L_{34}+2.14 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+3.39(L_1+L_{34}+2.14 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$	$1.08S_1+0.033 q_b(L_1+$ $+(L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-$ $L_{34})\sin\beta)+$ $+3.7(L_1+L_{34}+2.14 L_{56})+$ $+q_m L_{56} (0.03\cos\beta+\sin\beta)$

Table 14

Belt tension at point 7

Belt width, mm	S_7 at load density ρ , N/m		
	up to 1 t/m ³	1...2 t/m ³	above 2 t/m ³
400	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 0.65(L_1 + L_{34} + 3.08 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 0.7(L_1 + L_{34} + 3.06 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 0.75(L_1 + L_{34} + 3.08 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$
500	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 0.81(L_1 + L_{34} + 2.82 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 0.87(L_1 + L_{34} + 2.84 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 0.94(L_1 + L_{34} + 2.82 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$
650	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 1.23(L_1 + L_{34} + 2.18 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 1.41(L_1 + L_{34} + 2.2 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 1.43(L_1 + L_{34} + 2.2 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$
800	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 2.15(L_1 + L_{34} + 2.2 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 2.31(L_1 + L_{34} + 2.2 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 2.5(L_1 + L_{34} + 2.2 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$
1 000	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 2.75(L_1 + L_{34} + 2.1 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 2.98(L_1 + L_{34} + 2.1 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 3.25(L_1 + L_{34} + 2.1 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$
1 200	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 3.13(L_1 + L_{34} + 2.14 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 3.39(L_1 + L_{34} + 2.14 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$	$e^{w\alpha} [1.08S_1 + 0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta) + 3.7(L_1 + L_{34} + 2.14 L_{56}) + q_m L_{56} (0.03\cos\beta + \sin\beta)]$

Belt tension at point 8 is calculated by the formula

$$S_8 = S_7 + W_{78}, \quad (20)$$

where W_{78} – belt transport resistance at the section between the points 7 and 8;

$$W_{78} = (q_m + q_b + q_{ui}) L_{78} w, \quad (21)$$

where w – belt transport resistance coefficient (Table 7).

If $w = 0.03$ (operation conditions are heavy, upper idlers are grooved), then the dependences for tension force values at point 8 by belt width and load density are shown in Table 15.

Table 15

Belt tension at point 8

Belt width, mm	S_8 at load density ρ , N/m		
	up to 1 t/m ³	1...2 t/m ³	above 2 t/m ³
400	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+0.65(L_1+L_{34}+3.08(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+0.7(L_1+L_{34}+3.06(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+0.75(L_1+L_{34}+3.08(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$
500	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+0.81(L_1+L_{34}+2.82(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+0.87(L_1+L_{34}+2.84(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+0.94(L_1+L_{34}+2.82(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$
650	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+1.23(L_1+L_{34}+2.18(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+1.31(L_1+L_{34}+2.2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+1.43(L_1+L_{34}+2.2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$
800	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+2.15(L_1+L_{34}+2.2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+2.31(L_1+L_{34}+2.2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+2.51(L_1+L_{34}+2.2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$
1 000	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+2.75(L_1+L_{34}+2.1(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+2.98(L_1+L_{34}+2.1(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+3.25(L_1+L_{34}+2.1(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$
1 200	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+3.13(L_1+L_{34}+2.14(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+3.39(L_1+L_{34}+2.14(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$e^{w\alpha}[1.08S_1+0.033 q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+3.7(L_1+L_{34}+2.14(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$

Findings

For convenience of further research we depict the dependencies of the table 15 in the following form:

$$S_8 = 1.08e^{w\alpha}S_1 + F_{B,\rho}(q_b, L_1, L_{34}, L_{56}, L_{78}, \beta, q_m(E)).$$

Solving the system of equations for the limiting state, in which there is no pulley slipping, we get:

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

$$S_8 = e^{\mu\gamma} S_1;$$

$$S_8 = 1.08e^{w\alpha} S_1 + F_{B,p}(q_b, L_l, L_{34}, L_{56}, L_{78}, \beta, q_m(E)). \quad (22)$$

Now equating the right parts of expressions (22), we get:

$$e^{\mu\gamma} S_1 = 1.08e^{w\alpha} S_1 + F_{B,p}(q_b, L_l, L_{34}, L_{56}, L_{78}, \beta, q_m(E)).$$

Using algebraic manipulations we obtain:

$$S_1 = \frac{F_{B,p}(q_b, L_l, L_{34}, L_{56}, L_{78}, \beta, q_m(E))}{(e^{\mu\gamma} - 1.08e^{w\alpha})}; \quad (23)$$

$$S_8 = e^{\mu\gamma} \frac{F_{B,p}(q_b, L_l, L_{34}, L_{56}, L_{78}, \beta, q_m(E))}{(e^{\mu\gamma} - 1.08e^{w\alpha})}. \quad (24)$$

The pulling effort considering the drive pulley rotation resistance is determined by the formula

$$F_o = S_8 - S_1 + (k' - 1)(S_8 + S_1), \quad (25)$$

where $k' = 1.08$ – drive pulley rotation resistance coefficient.

Substituting the expressions (23) and (24) into the formula (25) we get:

$$F_o = (1.08e^{\mu\gamma} - 0.92) \times \frac{F_{B,p}(q_b, L_l, L_{34}, L_{56}, L_{78}, \beta, q_m(E))}{(e^{\mu\gamma} - 1.08e^{w\alpha})}.$$

The belt conveyor drive is more often designed with cylindrical double reduction gear. The kinematic diagram of the drive is shown in Fig. 2.

Rated motor power is calculated by the formula

$$P_p = F_o v / 1000 \eta, \quad (26)$$

where F_o should be substituted in Newton; v – in meters per second; η – drive efficiency factor.

The drive efficiency factor is determined by the formula:

$$\eta = \eta_r \eta_c, \quad (27)$$

where $\eta_r = 0.96$ – reduction gear efficiency factor; $\eta_c = 0.98$ – coupling efficiency factor.

Thus

$$\eta = \eta_r \eta_c = 0.96 \cdot 0.98 = 0.94.$$

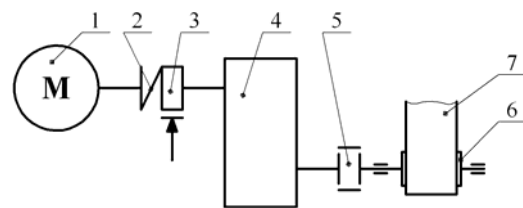


Fig. 2. Belt conveyor drive diagram:
1 – motor; 2 – elastic coupling; 3 – brakes;
4 – reduction gear; 5 – gear coupling;
6 – drive pulley; 7 – belt

The installed motor power (kW) is calculated by the formula

$$P_o = n_i P_r, \quad (28)$$

where $n_i = 1.1 \dots 1.2$ – power reserve factor.

Choosing $n_i = 1.2$ we determine the installed motor power by the formula:

$$P_i = \frac{F_o v}{833.3 \eta}. \quad (29)$$

Dependencies for the motor power value by belt width and load density are shown in Table 16.

Table 16

Calculated drive power

Belt width, mm	P_i at load density ρ , N/m		
	up to 1 t/m ³	1...2 t/m ³	above 2 t/m ³
400	$[v(1.08e^{\mu\gamma} - 0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma} - 1.08e^{w\alpha})] [0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta + L_{78}/e^{w\alpha}) + 0.65(L_1 + L_{34} + 3.08(L_{56} + L_{78}/e^{w\alpha})) + q_m(L_{56}(0.03\cos\beta + \sin\beta) + 0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[v(1.08e^{\mu\gamma} - 0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma} - 1.08e^{w\alpha})] [0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta + L_{78}/e^{w\alpha}) + 0.7(L_1 + L_{34} + 3.06(L_{56} + L_{78}/e^{w\alpha})) + q_m(L_{56}(0.03\cos\beta + \sin\beta) + 0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[v(1.08e^{\mu\gamma} - 0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma} - 1.08e^{w\alpha})] [0.033 q_b(L_1 + (L_{34} + L_{56})\cos\beta + 32.3(L_{56} - L_{34})\sin\beta + L_{78}/e^{w\alpha}) + 0.75(L_1 + L_{34} + 3.08(L_{56} + L_{78}/e^{w\alpha})) + q_m(L_{56}(0.03\cos\beta + \sin\beta) + 0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$

Belt width, mm	P_i at load density ρ , N/m		
	up to 1 t/m ³	1...2 t/m ³	above 2 t/m ³
500	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+0.81(L_1+L_{34}+2.82(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+0.87(L_1+L_{34}+2.84(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+0.94(L_1+L_{34}+2.82(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$
650	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+1.23(L_1+L_{34}+2.18(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+1.31(L_1+L_{34}+2.2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+1.43(L_1+L_{34}+2.2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$
800	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+2.15(L_1+L_{34}+2.2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+2.31(L_1+L_{34}+2.2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+2.51(L_1+L_{34}+2.2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$
1 000	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+2.75(L_1+L_{34}+2.1(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+2.98(L_1+L_{34}+2.1(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+3.25(L_1+L_{34}+2.1(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$
1	2	3	4
1 200	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+3.13(L_1+L_{34}+2.14(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+3.39(L_1+L_{34}+2.14(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[v(1.08e^{\mu\gamma}-0.92)e^{w\alpha}/833.3\eta(e^{\mu\gamma}-1.08e^{w\alpha})][0.033q_b(L_1+ (L_{34}+L_{56})\cos\beta+32.3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha})+3.7(L_1+L_{34}+2.14(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0.03\cos\beta+\sin\beta)+0.03L_{78}/e^{w\alpha})]$

Originality and practical value

We developed parametric dependence of drive power of the belt conveyor with sloping and horizontal areas on type of load, design efficiency, geometrical dimensions and path configuration, operation conditions that takes into account standard

dimensions and parameters of belts, idlers and pulleys.

Use of the built dependences gives an opportunity of relatively rapid determination of approximate value of the drive power for the belt conveyers of considered design, as well as it allows qual-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

ity selection of its basic elements at specific design characteristics and requirements.

The proposed dependences can be used for determination of general impact of the design efficiency and other parameters on the conveyor drive power.

Conclusions

For belt conveyors with sloping and horizontal areas we built parametric dependence of drive power on the design parameters: type of load, design efficiency, geometrical dimensions and path configuration, operation conditions. Such dependences allow calculating the required drive power value, taking into account the type and the physical and mechanical properties of load, the lifting height value, the transport length and design efficiency, using only one formula, chosen depending on design characteristics.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Александров, М. П. Подъемно-транспортные машины : учебник / М. П. Александров. – Москва : Высш. шк., 2000. – 522 с.
2. Богомаз, В. М. Аналіз впливу проектних характеристик елеватору на параметри його приводу / В. М. Богомаз // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 3 (57). – С. 162–175. doi: 10.15802/stp2015/46076.
3. Богомаз, В. М. Дослідження впливу проектної продуктивності елеватору на потужність його приводу / В. М. Богомаз, К. Ц. Главацький, О. А. Мазур // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 2 (56). – С. 189–206. doi: 10.15802/stp2015/42178.
4. Зенков, Р. Л. Машины непрерывного транспорта : учебник / Р. Л. Зенков, И. И. Ивашков, Л. Н. Колобов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 432 с.
5. Иванченко, Ф. К. Подъемно-транспортные машины : учебник / Ф. К. Иванченко. – Киев : Вища шк., 1993. – 413 с.
6. Катрюк, И. С. Машины непрерывного транспорта. Конструкции, проектирование и эксплуатация: учеб. пособие / И. С. Катрюк, Е. В. Мусияченко. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – 266 с.
7. Кузьмин, А. В. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин : учебн. пособие / А. В. Кузьмин. – Минск : Вышэйшая школа, 1983. – 350 с.
8. Підйомно-транспортні машини: розрахунки підймальних і транспортувальних машин : підручник / В. С. Бондарев, О. І. Дубинець, М. П. Колісник [та ін.]. – Київ : Вища шк., 2009. – 734 с.
9. Расчет и проектирование транспортных средств непрерывного действия : научное пособие для вузов / А. И. Барышев, В. А. Будишевский, А. А. Сулима, А. М. Ткачук. – Донецк : Норд-Пресс, 2005. – 689 с.
10. Ромакин, Н. Е. Машины непрерывного транспорта : учебн. пособие / Н. Е. Ромакин. – Москва : Академия, 2008. – 432 с.
11. Jamaludin, J. Development of a self-tuning fuzzy logic controller for intelligent control of elevator systems / J. Jamaludin, N. A. Rahim, W. P. Hew // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2009. – Vol. 22. – Iss. 8. – P. 1167–1178. doi: 10.1016/j.engappai.2009.04.006.
12. Kim, C. S. Nonlinear robust control of a hydraulic elevator: experiment-based modeling and two-stage Lyapunov redesign / C. S. Kim, K. S. Hong, M. K. Kim // Control Engineering Practice. – 2005. – Vol. 13. – Iss. 6. – P. 789–803. doi: 10.1016/j.conengprac.2004.09.003.
13. Strakosch, G. R. The Vertical Transportation Handbook / G. R. Strakosch, R. S. Caporale. – New York : John Wiley&Sons, 2010. – 610 p. doi: 10.1002/9780470949818.

В. М. БОГОМАЗ^{1*}

^{1*}Каф. «Військова підготовка спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 793 19 09, ел. пошта wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОТУЖНОСТІ ПРИВОДУ СТІЧКОВОГО КОНВЕЄРУ ВІД ЙОГО ПРОЕКТНИХ ПАРАМЕТРІВ

Мета. Привід є одним із основних елементів стрічкових конвеєрів. Для визначення потужності приводу необхідно провести розрахунки за стандартними методиками, які викладені в сучасній технічній літературі. Для таких розрахунків потрібно витратити достатньо багато часу. Основними проектними параметрами

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

стрічкового транспортера є: тип вантажу, проектна продуктивність, геометричні розміри та конфігурація траси, умови роботи. В статті необхідно побудувати параметричну залежність потужності приводу стрічкового конвеєру від проектних параметрів, яка враховувала б стандартні розміри і параметри стрічок, ролик-опор та барабанів. **Методика.** Розглядається стрічковий конвеєр із двома ділянками: похилою та горизонтальною. Використовуючи методику тягового розрахунку способом обходу по контуру стрічкових конвеєрів, побудовано параметричні залежності сил натягу в характерних точках траси конвеєру від типу вантажу, проектної продуктивності, геометричних розмірів та конфігурації траси конвеєру, умов роботи. **Результати.** Для стрічкових конвеєрів розглянутого типу з врахуванням стандартних розмірів стрічки та відповідними припущеннями щодо типу ролик-опор та барабанів побудовано параметричні залежності потужності приводу від типу вантажу, проектної продуктивності, геометричних розмірів і конфігурації траси конвеєру, умов роботи. **Наукова новизна.** Вперше побудована параметрична залежність потужності приводу стрічкових конвеєрів із двома ділянками (похилою та горизонтальною) від типу вантажу, проектної продуктивності, геометричних розмірів та конфігурації траси конвеєру, умов роботи. Вона враховує стандартні розміри та параметри стрічок, ролик-опор і барабанів. **Практична значимість.** Використання побудованих залежностей потужності приводу стрічкових конвеєрів із похилою та горизонтальною ділянками від проектних параметрів дає можливість відносно швидкого визначення приблизного значення потужності приводу на стадії проектування. Також можливим є виконання якісного підбору його основних елементів при конкретних проектних характеристиках та вимогах. Запропоновані залежності можуть бути використані для визначення загального характеру залежності потужності приводу від проектної продуктивності.

Ключові слова: конвеєр; стрічка; привід; потужність; продуктивність; вантаж

В. Н. БОГОМАЗ^{1*}

^{1*}Каф. «Военная подготовка специалистов Государственной специальной службы транспорта», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 793 19 09, эл. почта wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ ПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА ОТ ЕГО ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Цель. Привод является одним из основных элементов ленточных конвейеров. Для определения мощности привода необходимо провести расчеты по стандартным методикам, которые изложены в современной технической литературе. Для таких расчетов нужно потратить достаточно много времени. Основными проектными параметрами ленточных транспортеров являются: тип груза, проектная производительность, геометрические размеры и конфигурация трассы, условия работы. В статье необходимо построить параметрическую зависимость мощности привода ленточного конвейера от его проектных параметров, которая учитывала бы стандартные размеры и параметры лент, ролик-опор и барабанов. **Методика.** Рассматривается ленточный конвейер с двумя участками: наклонным и горизонтальным. Используя методику тягового расчета способом обхода по контуру ленточных конвейеров, построены параметрические зависимости сил натяжения в характерных точках трассы конвейера от типа груза, проектной производительности, геометрических размеров и конфигурации трассы, условий работы. **Результаты.** Для ленточных конвейеров рассмотренного типа с учетом стандартных размеров ленты и соответствующими предположениями относительно типов ролик-опор и барабанов построены параметрические зависимости мощности привода от типа груза, проектной производительности, геометрических размеров и конфигурации трассы, условий работы. **Научная новизна.** Впервые построена параметрическая зависимость мощности привода ленточных конвейеров с двумя участками (наклонной и горизонтальной) от типа груза, проектной производительности, геометрических размеров и конфигурации трассы, условий работы. Она учитывает стандартные размеры и параметры ленты, ролик-опор и барабанов. **Практическая значимость.** Использование построенных зависимостей мощности привода ленточных конвейеров с наклонным и горизонтальным участками дает возможность относительно быстрого определения приблизительного значения мощности привода на стадии проектирования. Также возможным является выполнение качественного подбора его основных элементов при конкретных проектных характеристиках и требованиях. Предложенные зависимости могут быть использованы для определения общего характера зависимости мощности привода от проектной производительности.

Ключевые слова: конвейер; лента; привод; мощность; производительность; груз

REFERENCES

1. Aleksandrov M.P. *Podemno-transportnyye mashiny* [Lifting and transport machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 522 p.
2. Bohomaz V.M. Analiz vplyvu proektnykh kharakterystyk elevatoru na parametry yoho pryvodu [Influence analyses of designed characteristics of the elevator to the parameters of its drive]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 3 (57), pp. 162-175. doi: 10.15802/stp2015/46076.
3. Bohomaz V.M., Hlavatskyi K.Ts., Mazur O.A. Doslidzhennia vplyvu proektnoi produktyvnosti elevatoru na potuzhnist yoho pryvodu [Research of influencing of project discriptions of elevator on parameters of its drive]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 2 (56), pp. 189-206. doi: 10.15802/stp2015/42178.
4. Zenkov R.L., Ivashkov I.I., Kolobov L.N. *Mashiny nepreryvnogo transporta* [Machines of continuous transport]. Mosocw, Mashinostroeniye Publ., 1987. 432 p.
5. Ivanchenko F.K. *Pidiomno-transportni mashyny* [Lifting and transport machines]. Kyiv, Vyshcha shkola Publ., 1993. 413 p.
6. Katryuk I.S., Musiyachenko Ye.V. *Mashiny nepreryvnogo transporta. Konstruktsii, proyektirovaniye i ekspluatatsiya* [Machines of continuous transport. Construction, design and operation]. Krasnoyarsk, IPTs KGTU Publ., 2006. 266 p.
7. Kuzmin, A.V. *Spravochnik po raschetam mekhanizmov podemno-transportnykh mashin* [Manual of calculation mechanisms of lifting and transport machines]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1983. 350 p.
8. Bondariev V.S., Dubynets O.I., Kolisnyk M.P. *Pidiomno-transportni mashyny: rozrakhunky pidiimalnykh i transportovalnykh mashyn* [Lifting and transport machines: calculations of hoisting and conveying machines]. Kyiv, Vyshcha shkola Publ., 2009. 734 p.
9. Baryshev A. I., Budishevskiy V. A., Sulima A. A., Tkachuk A. M. *Raschet i proyektirovaniye transportnykh sredstv nepreryvnogo deystviya* [Calculation and design of continuous action vehicles]. Donetsk, Nord-Press Publ., 2005. 689 p.
10. Romakin N.Ye. *Mashiny nepreryvnogo transporta* [Machines of continuous transport]. Moscow, Akademiya Publ., 2008. 432 p.
11. Jamaludin J., Rahim N.A., Hew W.P. Development of a self-tuning fuzzy logic controller for intelligent control of elevator systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, vol. 22, issue 8, pp. 1167-1178. doi: 10.1016/j.engappai.2009.04.006.
12. Kim C.S., Hong K.S., Kim M.K. Nonlinear robust control of a hydraulic elevator: experiment-based modeling and two-stage Lyapunov redesign. *Control Engineering Practice*, 2005, vol. 13, issue 6, pp. 789-803. doi: 10.1016/j.conengprac.2004.09.003.
13. Strakosch G.R., Caporale R.S. *The Vertical Transportation Handbook*. New York, John Wiley&Sons Publ., 2010. 610 p. doi: 10.1002/9780470949818.

Prof. S. V. Raksha, Sc. Tech. (Ukraine); Assos. Prof. S. V. Shatov, Sc. Tech. (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: Nov., 20. 2015

Received: Jan., 15. 2016

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК [621.822.1:621.166]:539.4

В. С. ЛОВЕЙКІН¹, Ю. В. ЧОВНЮК², А. П. ЛЯШКО^{3*}¹Каф. «Конструювання машин і обладнання», Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 12, Київ, Україна, 03041, тел. +38 (044) 527 87 34, ел. пошта lovvs@ukr.net, ORCID 0000-0003-4259-3900²Каф. «Конструювання машин і обладнання», Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 12, Київ, Україна, 03041, тел.+38 (044) 527 87 34, ел. пошта uchovnyuk@ukr.net, ORCID 0000-0002-0608-0203^{3*}Каф. «Конструювання машин і обладнання», Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 12, Київ, Україна, 03041, тел.+38 (093) 584 60 80, ел. пошта laskoanastasia1989@gmail.com, ORCID 0000-0002-3774-3348

ОСОБЛИВОСТІ КОЛИВАНЬ ПРИВОДНИХ МЕХАНІЗМІВ РОТОРІВ

Мета. Наукова робота присвячена вивченню впливу динамічних коефіцієнтів сегментних підшипників (коефіцієнтів опору і циркуляційної сили) на стійкість й субгармонійні автоколивні складові коливань ротора у нестійкій області частот обертання. **Методика.** Дослідження базується на методах: теорії коливань механічних систем із зосередженими параметрами; функцій Лагранжа; лінійної алгебри. **Результати.** Дослідниками зроблено: а) обґрунтування дискретної двомасової моделі незбалансованого ротора, в якій враховані впливи на його обертання динамічних коефіцієнтів; б) аналіз та вдосконалення методів інженерних розрахунків стійкості та параметрів субгармонічних автоколивань у нестійкій області частот обертання ротора; в) встановлення та класифікація основних причин роторних вібрацій, конструктивних чи тих, що виникли при виготовленні, складанні та експлуатації машин, а з іншої сторони, специфічних для роторних систем неконсервативних сил, які призводять при певних умовах до автоколивань; г) визначення (ідентифікація) характерних особливостей/відмінностей роторних вібрацій, котрі полягають у тому, що у переважній більшості випадків вони пов'язані з поперечними коливаннями роторів, у той час як крутні чи поздовжні коливання відіграють незрівнянно меншу роль, і тому останніми у даному дослідженні знехтувано; д) показано, що характерною особливістю функціонування роторних систем сучасних машин і агрегатів є відсутність прямого зв'язку рівня вібрації із величиною потужності, яка передається через них чи виробляється двигуном. **Наукова новизна.** У роботі авторами вперше враховані нелінійні реакції прошарку змащення підшипників, а саме: коефіцієнти опору та циркуляційної сили, які визначають динамічні коефіцієнти сегментних підшипників. **Практична значимість.** Уточнюються та суттєво вдосконалюються інженерні розрахунки стійкості та субгармонічних автоколивань ротора (незбалансованого) у нестійкій області частот його обертання. Результати даної роботи можуть бути використані для аналізу тих роторних систем, у яких при певних умовах можуть виникати вібрації, котрі не викликані якимись зовнішніми періодичними навантаженнями (або недосконалостями самого ротора) й умови їх виникнення не зв'язані з якимись (будь якими) резонансними співвідношеннями (тобто системи, в яких виникають самозбудження або автоколивання). Останні викликані дією неконсервативних сил циркуляційного типу (циркуляційні сили пов'язані з вектором переміщення ротора, а не з вектором швидкості, як це має місце в системах із «негативним» тертям). Оскільки вектор циркуляційних сил перпендикулярний до вектора переміщень ротора, то внаслідок цього такі сили можуть проявляти себе лише у механічних (роторних) системах із числом ступенів вільності руху більше одного. Окрім того, важливою особливістю циркуляційних сил є їх неконсервативність, тому результати роботи можна використати для дослідження неконсервативних роторних систем, які мають несиметричну (кососиметричну) матрицю коефіцієнтів.

Ключові слова: ротор; коливання; привід; особливості; двомасова модель

Вступ

Численні експериментальні дослідження [5] коливань приводів роторів показують, що у деяких випадках поряд з синхронною процесією з'являються несинхронні складові коливань ротора, зокрема субгармонійна складова з час-

тотою, яка дорівнює першій критичній частоті. Ця складова виникає при втраті стійкості обертання ротора [12]. Однак у деякій зоні частот обертання, яка перевищує граничну за стійкістю, амплітуди субгармоніки порівняно невеликі й практично знаходяться у припустимих грани-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

цях. Тому сам факт втрати стійкості у низці випадків ще не означає настання аварійного стану, але може слугувати діагностичним попередженням про можливий небажаний його розвиток. Тому практичний інтерес становить вивчення закономірностей розвитку амплітуд субгармонійних складових.

Найбільш суттєвий внесок у дослідженні нелінійної динаміки роторних систем у підшипниках ковзання зробили М. Адамс, Є. Г. Голоскоков, В. А. Гробов, А. І. Гурін, Ф. М. Діментберг, І. Б. Карінцев, О. С. Кельзон, Я. Кісінскі, М. В. Коровчинський, М. Я. Кушуль, Е. Л. Позняк, В. І. Сімоновський, А. Тонді, С. Шоу, М. Г. Шульженко [3, 4, 13, 23]. Проте автоколивні складові коливань ротора вивчені недостатньо.

Мета

Метою цієї роботи є вивчення впливу динамічних коефіцієнтів сегментних підшипників (коефіцієнтів опору і циркуляційної сили) на стійкість й субгармонічні автоколивні складові коливань ротора у нестійкій області частот обертання. Дослідження виконано за допомогою двомасової моделі, яка враховує нелінійні реакції прошарку змащення підшипників.

Методика

У роботі використані методи теорії коливань механічних систем із зосередженими параметрами. Математична модель коливань ротора базується на застосуванні диференціальних рівнянь, які отримані на основі встановленої функції Лагранжа. Для обчислення власних частот коливань ротора використані класичні методи лінійної алгебри.

Результати

Дискретна двомасова модель ротора. На рис. 1 наведена розрахункова схема ротора.

Дискретна двомасова модель будувалась відповідно до схеми, наведеною на рис. 2.

На рис. 2 позначено: $m_p = m_2$ – еквівалентна маса ротора; $m_n = m_1 + m_2$ – еквівалентна маса підшипників; $q = 2\delta\omega d_n$ – еквівалентний коефіцієнт циркуляційної сили; $d = 2d_n$ – еквівалентний коефіцієнт опору підшипників;

$f = 2f_n$ – еквівалентний коефіцієнт нелінійної реакції рідинного прошарку; $C = C_1 + C_2$ – еквівалентна жорсткість підшипників; ω – частота обертання ротора. Діапазони величин коефіцієнтів опору d_n , коефіцієнтів циркуляційних сил δ , нелінійного коефіцієнта жорсткості f_n , жорсткостей підшипників C_1 , C_2 варіюються при комп'ютерному дослідженні у межах значень, які вимірюються на експериментальному стенді за допомогою методів ідентифікації, викладених у [13].

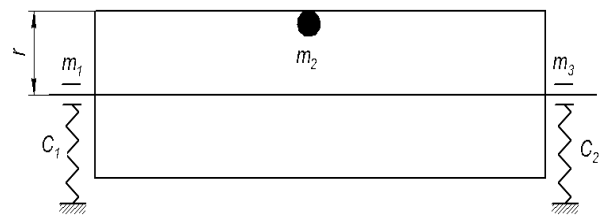


Рис. 1. Розрахункова схема модельного ротора

Fig. 1. Analytical model of rotor

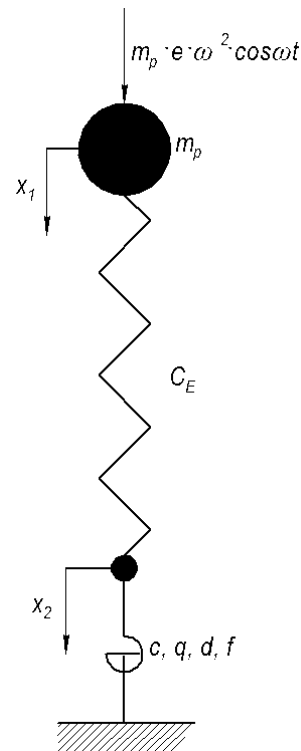


Рис. 2. Спрощена двомасова схема модельного ротора

Fig. 2. The simplified two-mass model of rotor

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Коефіцієнти m_1 , m_2 , m_3 можна визначити на основі методу розрахунку еквівалентних мас тримасової моделі за даними розрахунку власних частот та форм коливань розрахункової моделі роторної системи [3].

Значення перших трьох критичних частот, визначених за допомогою дискретної тримасової моделі, відрізняються від обчислених на ПЕОМ (модель із застосуванням методу скінченних елементів) відповідно 1,3; 24,1; 2,4 %.

Припускаючи приблизну симетрію розміщення мас на валу, приймаємо еквівалентну схему, наведену на рис. 2 вище. Слід зазначити, що використання трьох і більшої кількості масових схем суттєво ускладнює математичну модель, що призводить до збільшення часу числового інтегрування (до 8–10 годин для розрахунку одного варіанта) й у низці випадків – до накопичення неприпустимих похибок. У той же час, як показують паралельні розрахунки (для співставлення), двомасова модель дає практично ті ж результати.

Рівняння динаміки ротора, які відповідають схемі рис. 3, записуються у вигляді:

$$\begin{cases} m_p \ddot{x}_1 + C_E (x_1 - x_2) = m_p e \omega^2 \cos(\omega t), \\ m_p \ddot{y}_1 + C_E (y_1 - y_2) = m_p e \omega^2 \sin(\omega t), \\ m_n \ddot{x}_1 + C_E (x_1 - x_2) + c x_2 + d \dot{x}_2 + q y_2 + \\ \quad + f r^2 x_2 = 0, \\ m_n \ddot{y}_1 + C_E (y_1 - y_2) + c y_2 + d \dot{y}_2 - q x_2 + \\ \quad + f r^2 y_2 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де r – радіус опорних шийок ротора.

У (1) позначення: x_1 , y_1 – координати центру мас ротора; x_2 , y_2 – координати центрів перерізів під підшипниками.

Для зручності обчислень доцільно перейти до безрозмірного часу згідно з співвідношеннями:

$$\tau = \omega_6 t, \quad x(t) \rightarrow x(\tau),$$

$$\frac{dx}{dt} = \omega_6 \frac{dx}{d\tau}, \quad \frac{d^2 x}{dt^2} = \omega_6^2 \frac{d^2 x}{d\tau^2},$$

де ω_6 – базова частота обертання. Як базову частоту ω_6 беремо першу критичну частоту дискретної моделі.

Із врахуванням цих співвідношень система (1) набуває вигляду:

$$\begin{cases} m_p \omega_6^2 \ddot{x}_{1\tau\tau} + C_E (x_1 - x_2) = m_p e \omega_6^2 \bar{\omega}^2 \cos(\bar{\omega} t), \\ m_p \omega_6^2 \ddot{y}_{1\tau\tau} + C_E (y_1 - y_2) = m_p e \omega_6^2 \bar{\omega}^2 \sin(\bar{\omega} t), \\ m_n \omega_6^2 \ddot{x}_{1\tau\tau} + C_E (x_1 - x_2) + c x_2 + d \omega_6 \dot{x}_{2\tau} + \\ \quad + q y_2 + f r^2 x_2 = 0, \\ m_n \omega_6^2 \ddot{y}_{1\tau\tau} + C_E (y_1 - y_2) + c y_2 + d \omega_6 \dot{y}_{2\tau} - \\ \quad - q x_2 + f r^2 y_2 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

У (2) $\bar{\omega} = \omega / \omega_6$ – відносна частота; $C_E = 1 / \delta_{22}$ – жорсткість валу, де δ_{22} – піддатливість валу, яка дорівнює прогину у точці розміщення маси m_2 від одиничної сили, прикладеної у тій самій точці.

Аналіз динаміки ротора: аналітичний підхід. Виходячи з системи (1), визначимо спочатку власні частоти коливань роторної системи. Їх можна знайти, розв'язавши рівняння:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} = 0, \quad (3)$$

де $a_{11} = -m_p \omega^2 + C_E$; $a_{21} = a_{22} = 0$;
 $a_{31} = -m_n \omega^2 - C_E$; $a_{41} = 0$; $a_{12} = -C_E$;
 $a_{32} = C_E + C + i \omega d + f r^2$; $a_{42} = -q$; $a_{13} = 0$;
 $a_{23} = -m_p \omega^2 + C_E$; $a_{33} = 0$; $a_{43} = -m_n \omega^2 - C_E$;
 $a_{14} = 0$; $a_{24} = -C_E$; $a_{34} = q$;
 $a_{44} = C_E + C + i \omega d + f r^2$; $i^2 = -1$.

Для знаходження коренів (3) вважаємо, що всі коефіцієнти a_{kl} , $(k, l) = (\overline{1, 4})$ детермінанта (3), отримані за умови, коли $(x_{1,2}, y_{1,2}) \approx \exp(i \omega t)$, ω – шукана частота. У розгорнутому вигляді маємо замість (3) рівняння для визначення ω :

$$\begin{aligned} & (-m_p \omega^2 + C_E) \{ (-m_p \omega^2 + C_E) \times \\ & \times [(C_E + C + i \omega d + f r^2)^2 + q^2] + C_E \times \end{aligned}$$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

$$\begin{aligned} & \times \left[\left(-m_p \omega^2 + C_E \right) \left(C_E + C + i\omega d + fr^2 \right) \right] + \\ & + C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right) \times \\ & \times \left[\left(m_n \omega^2 - C_E \right) \left(C_E + C + i\omega d + fr^2 \right) + \right. \\ & \left. + C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right) \right] = 0. \end{aligned}$$

Після нескладних перетворень матимемо:

$$\begin{aligned} & \left(-m_p \omega^2 + C_E \right)^2 \left[\left(C_E + C + i\omega d + fr^2 \right)^2 + q^2 \right] + \\ & C_E^2 \left(m_n \omega^2 + C_E \right)^2 + 2 \left(m_p \omega^2 - C_E \right) C_E \times \\ & \times \left(m_n \omega^2 + C_E \right) \left(C_E + C + i\omega d + fr^2 \right) = 0. \quad (4) \end{aligned}$$

Рівняння (4) можна подати так:

$$\begin{aligned} & \left[\left(m_p \omega^2 - C_E \right) \left(C_E + C + i\omega d + fr^2 \right) + \right. \\ & \left. + C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right) \right]^2 + q^2 \left(m_p \omega^2 - C_E \right) = 0. \quad (5) \end{aligned}$$

Рівняння (5) має два співмножники, кожний з яких визначає характерні частоти системи:

$$\begin{aligned} & \left(m_p \omega^2 - C_E \right) \left(C_E + C + i\omega d + fr^2 \right) + \\ & + C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right) + iq \left(m_p \omega^2 - C_E \right) = 0; \\ & \left(m_p \omega^2 - C_E \right) \left(C_E + C + i\omega d + fr^2 \right) + \\ & + C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right) + (-i)q \left(m_p \omega^2 - C_E \right) = 0; \end{aligned}$$

або

$$\begin{cases} \left(C_E + C + i\omega d + fr^2 \right) + \frac{C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right)}{\left(m_p \omega^2 - C_E \right)} + iq1 = 0; \\ \left(C_E + C + i\omega d + fr^2 \right) + \frac{C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right)}{\left(m_p \omega^2 - C_E \right)} - iq1 = 0; \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} \left(C_E + C + fr^2 \right) + \frac{C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right)}{\left(m_p \omega^2 - C_E \right)} + i(\omega d + q) = 0; \\ \left(C_E + C + fr^2 \right) + \frac{C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right)}{\left(m_p \omega^2 - C_E \right)} - i(-\omega d + q) = 0; \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} \left(C_E + C + fr^2 \right) + \frac{C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right)}{\left(m_p \omega^2 - C_E \right)} + \\ + i(q + \omega d) = 0; \\ \left(C_E + C + fr^2 \right) + \frac{C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right)}{\left(m_p \omega^2 - C_E \right)} + \\ + i(\omega d - q) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

З другого рівняння системи (6) випливає, що у роторній системі можливі три типи коливань:

- а) затухаючі у часі, коли $\omega d > q$;
- б) незатухаючі у часі, коли $\omega d = q$;
- в) наростаючі у часі, коли $\omega d < q$.

З першого рівняння системи (6) випливає, що у роторній системі можливі затухаючі коливання, інтенсивність затихання яких у часі пропорційна $\sqrt{q + \omega d}$.

Сама частота коливань системи визначається (за умови, що дисипативні процеси справляють незначний вплив на коливний процес) з виразу:

$$\left(C_E + C + fr^2 \right) + \frac{C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right)}{\left(m_p \omega^2 - C_E \right)} \approx 0.$$

Знайдемо ці частоти коливань:

$$\begin{aligned} \omega^{(+)} &= \left[\frac{C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right)}{m_p \left(C_E + C + fr^2 \right) + m_n C_E} \right]^{1/2}; \\ \omega^{(-)} &= - \left[\frac{C_E \left(m_n \omega^2 + C_E \right)}{m_p \left(C_E + C + fr^2 \right) + m_n C_E} \right]^{1/2}. \end{aligned}$$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Знаки (+) й (–) визначають напрям обертання валу (прямий та зворотний відповідно).

Частоти $\omega^{(+)}$ і $\omega^{(-)}$ визначають критичні значення частот обертання ротора, за яких у роторній системі можливі значення коливання.

Тепер дослідимо вимушені коливання роторної системи аналітичними методами.

Використовуючи рівняння системи (2), можна її аналітично розв'язати і записати розв'язки, які відповідають правій частині перших двох рівнянь вказаної системи.

Так, змінні $x_1(\tau)$, $x_2(\tau)$ обираємо у вигляді: $x_1(\tau) = A_1 \cos(\bar{\omega}\tau)$; $x_2(\tau) = A_2 \cos(\bar{\omega}\tau)$.

Для змінних $y_1(\tau)$, $y_2(\tau)$ обираємо розв'язок так: $y_1(\tau) = B_1 \sin(\bar{\omega}\tau)$; $y_2(\tau) = B_2 \sin(\bar{\omega}\tau)$.

Тоді перші два рівняння системи (2) набудуть вигляду:

$$\begin{cases} -m_p \omega_6^2 (+\bar{\omega})^2 A_1 + C_E (A_1 - A_2) = m_p e \omega_6^2 \bar{\omega}^2; \\ -m_p \omega_6^2 (+\bar{\omega})^2 B_1 + C_E (B_1 - B_2) = m_p e \omega_6^2 \bar{\omega}^2. \end{cases} \quad (7)$$

Для двох останніх рівнянь системи (2) матимемо:

$$\begin{cases} m_n \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2 A_1 \cos(\bar{\omega}\tau) + C_E (A_2 - A_1) \times \\ \times \cos(\bar{\omega}\tau) + c A_2 \cos(\bar{\omega}\tau) + f r^2 A_2 \times \\ \times \cos(\bar{\omega}\tau) - d \omega_6 \bar{\omega} A_2 \sin(\bar{\omega}\tau) + \\ + q B_2 \sin(\bar{\omega}\tau) = 0; \\ \left[m_n \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2 B_1 + C_E (B_2 - B_1) + \right. \\ \left. + (C + f r^2) B_2 \right] \sin(\bar{\omega}\tau) - d \omega_6 \bar{\omega} B_2 \times \\ \times \cos(\bar{\omega}\tau) + q A_2 \cos(\bar{\omega}\tau) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Складемо рівняння системи (8), отримаємо:

$$\begin{cases} \left[m_n \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2 A_1 + C_E (A_2 - A_1) + c A_2 + f r^2 A_2 \right] \times \\ \times \cos(\bar{\omega}\tau) + (d \omega_6 \bar{\omega} B_2 - q A_2) \cos(\bar{\omega}\tau) = 0; \\ \left[m_n \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2 B_1 + C_E (B_2 - B_1) + (C + f r^2) B_2 \right] \times \\ \times \sin(\bar{\omega}\tau) + (d \omega_6 \bar{\omega} B_2 - q A_2) \sin(\bar{\omega}\tau) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Оскільки функції $\cos(\bar{\omega}\tau)$ та $\sin(\bar{\omega}\tau)$ лінійно незалежні, з (9) матимемо:

$$\begin{cases} m_n \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2 A_1 + C_E (A_2 - A_1) + \\ + c A_2 + f r^2 A_2 + (d \omega_6 \bar{\omega} B_2 - q A_2) = 0; \\ m_n \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2 B_1 + C_E (B_2 - B_1) + \\ + (C + f r^2) B_2 = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Тепер співставимо (7) і (10). Можна аналітично знайти їх розв'язки з таких систем рівнянь:

$$\begin{cases} \left[m_p \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2 + C_E \right] A_1 - C_E A_2 = m_p e \omega_6^2 \bar{\omega}^2; \\ \left[m_n \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2 - C_E \right] A_1 + \\ + (C_E + C + f r^2 - 2q) A_2 + 2d \omega_6 \bar{\omega} B_2 = 0; \\ \left[m_p \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2 + C_E \right] B_1 - C_E B_2 = m_p e \omega_6^2 \bar{\omega}^2; \\ \left[m_n \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2 - C_E \right] B_1 + \\ + (C_E + C + f r^2) B_2 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

З двох останніх рівнянь системи (11) легко знайти B_1 і B_2 :

$$B_1 = \frac{m_p e \omega_6^2 \bar{\omega}^2 (C_E + C + f r^2)}{\Delta};$$

$$B_2 = \frac{(C_E + m_n \omega_6^2 \bar{\omega}^2) m_p e \omega_6^2 \bar{\omega}^2}{\Delta},$$

де

$$\Delta = (m_p + m_n) \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2 C_E + \\ + (c + f r^2) [C_E + m_p \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2].$$

З перших двох рівнянь системи (11) маємо:

$$\begin{cases} \left[m_p \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2 + C_E \right] A_1 + (-C_E) A_2 = \\ = m_p e \omega_6^2 \bar{\omega}^2; \\ \left[m_n \omega_6^2 (-\bar{\omega})^2 - C_E \right] A_1 + \\ + (C_E + C + f r^2 - 2q) A_2 = -2d \omega_6 \bar{\omega} B_2. \end{cases} \quad (12)$$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Введемо позначення:

$$\left[m_p \omega_0^2 (-\bar{\omega})^2 + C_E \right] (C_E + C + fr^2 - 2q) + \\ + C_E \left[m_n \omega_0^2 (-\bar{\omega})^2 - C_E \right] = \Delta^* . \quad (13)$$

Тоді A_1 , A_2 визначимо з (12), враховуючи (13), за допомогою правила Крамера:

$$A_1 = \frac{\left[m_p \omega_0^2 \bar{\omega}^2 + C_E (C_E + C + fr^2 - 2q) + \right. \\ \left. + C_E (-2d) \omega_0 \bar{\omega} B_2 \right]}{\Delta^*};$$

$$A_2 = \frac{\left\{ \left[m_p \omega_0^2 (-\bar{\omega})^2 - C_E \right] (-2d \omega_0 \bar{\omega} B_2) - \right. \\ \left. - \left[m_n \omega_0^2 (-\bar{\omega})^2 - C_E \right] m_p e \omega_0^2 \bar{\omega}^2 \right\}}{\Delta^*}.$$

Таким чином, остаточно «вимушені» розв'язки системи (2) (які, до речі, з плином часу й залишаються, бо власні коливання системи за рахунок дисипативних процесів згасають) мають вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} y_1 &= B_1 \sin(\bar{\omega} \tau); & y_2 &= B_2 \sin(\bar{\omega} \tau); \\ B_1 &= \frac{m_p e \omega_0^2 \bar{\omega}^2 (C_E + C + fr^2)}{\Delta}; \\ B_2 &= \frac{(C_E + m_n \omega_0^2 \bar{\omega}^2) m_p e \omega_0^2 \bar{\omega}^2}{\Delta}; \\ \Delta &= (m_p + m_n) \omega_0^2 (-\bar{\omega})^2 C_E + \\ &+ (C + fr^2) [C_E + m_p \omega_0^2 (-\bar{\omega})^2]. \end{aligned} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} x_1 &= A_1 \cos(\bar{\omega} \tau); & x_2 &= A_2 \cos(\bar{\omega} \tau); \\ A_1 &= \frac{\left[m_p \omega_0^2 \bar{\omega}^2 + C_E (C_E + C + fr^2 - 2q) + \right. \\ &\quad \left. + C_E (-2d) \omega_0 \bar{\omega} B_2 \right]}{\Delta^*}; \\ A_2 &= \frac{\left[m_p \omega_0^2 (-\bar{\omega})^2 - C_E \right] (-2d \omega_0 \bar{\omega} B_2) -}{\Delta^*} - \\ &\quad - \frac{\left[m_n \omega_0^2 (-\bar{\omega})^2 - C_E \right] m_p e \omega_0^2 \bar{\omega}^2}{\Delta^*}; \\ \Delta^* &= \left[m_p \omega_0^2 (-\bar{\omega})^2 + C_E \right] (C_E + C + fr^2 - 2q) + \\ &\quad + C_E \left[m_n \omega_0^2 (-\bar{\omega})^2 - C_E \right]. \end{aligned} \right.$$

На основі формули (14) побудовано графіки залежності коливань координат центру мас ротора за таких вихідних даних: $m_p = 200$ кг; $e = 0,002$ м; $\omega_0 = 465$; $C_E = 5 \cdot 10^9$; $C = 12 \cdot 10^5$; $f = 2000$; $r = 0,026$; $m_n = 10$.

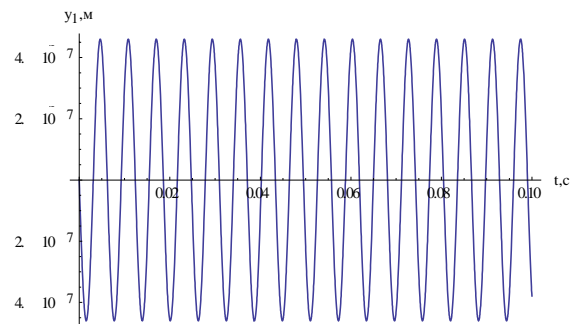


Рис. 3. Графік коливання координати y_1

Fig. 3. Oscillation graph of y_1 -coordinate

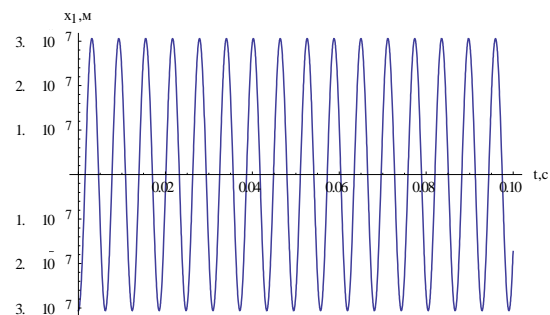


Рис. 4. Графік коливання координати x_1

Fig. 4. Oscillation graph of x_1 -coordinate

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна полягає у тому, що вперше враховані нелінійні реакції прошарку змащення підшипників, а саме: коефіцієнти (опору і циркуляційної сили), які визначають динамічні коефіцієнти сегментних підшипників.

Практична значимість роботи полягає у тому, що уточнюються і суттєво вдосконалюються інженерні розрахунки стійкості та субгармонічних автоколивань ротора (незбалансованого) у нестійкій області частот його обертання.

Висновки

1. Отримані аналітичні розв'язки задачі коливань двомасової моделі ротора, у якій враховані нелінійні реакції рідинного прошарку підшипників ковзання.

2. Отримані у роботі результати можуть бути у подальшому використані для уточнення й вдосконалення інженерних методів розрахунку подібних систем як на стадії їх проектування/конструювання, так і у режимах реальної експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бондаренко, І. О. Особливості процесу розповсюдження коливань при деформативній роботі залізничної колії // І. О. Бондаренко // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 75–83. doi: 10.15802/stp2015/55336.
- Вибрации в технике : Справочник в 6-ти т. / под. ред. В. Н. Челомей. – Москва : Машиностроение, 1980. – Т.3. – 544 с.
- Гадяка, В. Г. Математическая модель ротора турбокомпрессора для исследования несинхронных составляющих вибраций / В. Г. Гадяка, Д. В. Лейких, В. И. Симоновский // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2010. – № 2 (20). – С. 48–50.
- Гадяка, В. Г. Оценивание влияния нелинейных реакций сегментных подшипников на динамику и устойчивость роторов турбокомпрессоров / В. Г. Гадяка, Д. В. Лейких, В. И. Симоновский // Тр. МНТК / Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины – Киев, 2011. – С.17–24.
- Гадяка, В. Г. Экспериментальное исследование динамики ротора в неустойчивой области частот вращения / В. Г. Гадяка, Д. В. Лейких, В. И. Симоновский // Проблемы машиностроения. – 2009. – Вып. 12, № 5. – С. 81–85.
- Диментберг, Ф. М. Изгибные колебания вращающихся валов / Ф. М. Диментберг. – Москва : АН СССР, 1959. – 340 с.
- Іскович-Лотоцький, Р. Д. Основи резонансно-структурної теорії віброударного розвантаження транспортних засобів / Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 109–118. doi: 10.15802/stp2014/30458.
- Кельзон, А. С. Расчет и конструирование роторных машин / А. С. Кельзон, Ю. Н. Журавлев, Н. В. Январев. – Ленинград : Машиностроение, 1977. – 260 с.
- Кушуль, И. Я. Автоколебания роторов / И. Я. Кушуль. – Москва : АН СССР, 1963. – 250 с.
- Позняк, Э. Д. Автоколебания роторов со многими степенями свободы / Э. Д. Позняк // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – Москва, 1977. – № 2. – С. 40–50.
- Рагульскис, К. М. Вибрации роторных систем / К. М. Рагульскис, Р. Д. Ионушас, А. К. Бакшис. – Вильнюс : Мокслас, 1976. – 190 с.
- Симоновский, В. И. Динамика роторов центробежных машин / В. И. Симоновский. – Сумы : СумГУ, 2006. – 126 с.
- Симоновський, В. І. Уточнення математичних моделей коливальних систем за експериментальними даними / В. І. Симоновський. – Суми : СумДУ, 2010. – 92 с.
- Black, H. F. Vibration of a rotating asymmetric shaft supported in asymmetric bearing / H. F. Black, A. J. MacTernan // J. of Mechanical Engineering Sciences. – 1968. – Vol. 10. – Iss. 3. – P. 252–261. doi: 10.1243 / jmes_jour-1968_010_037_02.
- Chen, X. Q. Research on Field Balancing of Rotor / X. Q. Chen, Y. J. Jia, G. Z. Cheng // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 201–202. – P. 83–86. doi: 10.4028/www.scientific.net-amm.201-202.83.
- Köenig, E. C. Analysis for calculating lateral vibration characteristics of rotating systems with any number of flexible supports / E. C. Köenig // J. of Applied Mechanics. – 1961. – Vol. 28. – Iss. 4. – P. 585–590. doi: 10.1115/1.3641788.
- Li, C. Analysis of Loads at Crankshaft Bearing for Scroll Compressor / C. Li, Y. Yu, M. Zhao // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 160. – P. 42–46. doi: 10.4028/www.scientific.net-amm.160.42.
- Li, X. Balancing of flexible rotors without trial weights based on finite element modal analysis / X. Li, L. Zheng, Z. Liu // J. of Vibration and Con-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

- trol. – 2013. – Vol. 19. – Iss. 3. – P. 461–470. doi: 10.1177/1077546311433916.
19. Loewy, R. G. Dynamics of rotating shafts / R. G. Loewy, V. J. Piarulli. – Washington : Pergamon Press, 1969. – 300 p.
 20. Memmot, E. A. Stability and Testing of a Train of Centrifugal Compressors / E. A. Memmot // ASME 1998 Intern. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. (2.06.–5.06.1998). – Stockholm, Sweden, 1998. – Vol. 5. – P. 1–8. doi: 10.1115/98-gt-378.
 21. Morton, P. G. On the dynamics of large turbogenerator rotors / P. G. Morton // Proc. of Institute of Mechanical Engineering. – 1965. – Vol. 180. – Iss. 9. – P. 133–150. doi: 10.1243/pime_conf_-1965_180_240_02.
 22. Static Analysis on Slewing Bearing with Negative Clearance Based on ANSYS 19 / M. Qiu, J. F. Yan, L. Chen, B. H. Zhao // Applied Mechanics and Materials. – 2010. – Vol. 42. – P. 196–199. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.42.196.
 23. Sudhakar, G. N. D. S. Identification of unbalance in a rotor bearing system / G. N. D. S. Sudhakar, A. S. Sekhar // J. of Sound and Vibration. – 2011. – Vol. 330. – Iss. 10. – P. 2299–2313. doi: 10.1016/j.jsv.2010.11.028.
 24. Yuan, X. The Inner Equilibrium Analysis and Counterweight Design of Engine / X. Yuan, T. Wang, W. X. Fan // Applied Mechanics and Materials. – 2010. – Vol. 44–47. – P. 1051–1055.

В. С. ЛОВЕЙКИН¹, Ю. В. ЧОВНЮК², А. П. ЛЯШКО^{3*}

¹Каф. «Конструирование машин и оборудования», Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, ул. Героев Оборона, 12, Киев, Украина, 03041, тел. +38 (044) 527 87 34, эл. почта lovvs@ukr.net, ORCID 0000-0003-4259-3900

²Каф. «Конструирование машин и оборудования», Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, ул. Героев Оборона, 12, Киев, Украина, 03041, тел. +38 (044) 527 87 34, эл. почта uchovnyuk@ukr.net, ORCID 0000-0002-0608-0203

^{3*}Каф. «Конструирование машин и оборудования», Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, ул. Героев Оборона, 12, Киев, Украина, 03041, тел. +38 (093) 584 60 80, эл. почта laskoanastasia1989@gmail.com, ORCID 0000-0002-3774-3348

ОСОБЕННОСТИ КОЛЕБАНИЙ ПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ РОТОРОВ

Цель. Научная работа посвящена изучению влияния динамических коэффициентов сегментных подшипников (коэффициентов сопротивления и циркуляционной силы) на устойчивость и субгармоничные автоколеблющиеся составляющие колебаний ротора в неустойчивой области частот вращения. **Методика.** Исследование базируется на методах: теории колебаний механических систем с сосредоточенными параметрами; функций Лагранжа; линейной алгебры. **Результаты.** Исследователями сделано: а) обоснование дискретной двухмассовой модели несбалансированного ротора, в которой учтены влияния на его вращения динамических коэффициентов; б) анализ и совершенствование методов инженерных расчетов устойчивости и параметров субгармоничных автоколебаний в неустойчивой области частот вращения ротора; в) установка и классификация основных причин роторных вибраций, конструктивных или тех, которые возникли при изготовлении, сборке и эксплуатации машин, а с другой стороны, специфических для роторных систем неконсервативных сил, которые приводят при определенных условиях к автоколебаниям; г) определение (идентификация) характерных особенностей/различий роторных вибраций, которые заключаются в том, что в подавляющем большинстве случаев они связаны с поперечными колебаниями роторов, в то время как крутящие или продольные колебания играют несравнимо меньшую роль, и поэтому последние в данном исследовании отвергнуты; д) показано, что характерной особенностью функционирования роторных систем современных машин и агрегатов есть отсутствие прямой связи уровня вибрации с величиной мощности, которая передается через них или вырабатывается двигателем. **Научная новизна.** В работе авторами впервые учтены нелинейные реакции слоя смазки подшипников, а именно: коэффициенты сопротивления и циркуляционной силы, которые определяют динамические коэффициенты сегментных подшипников. **Практическая значимость.** Уточняются и существенно совершенствуются инженерные расчеты устойчивости и субгармоничных автоколебаний ротора (несбалансированного) в неустойчивой области частот его вращения. Результаты данной работы могут быть использованы для анализа тех роторных систем, в которых при определенных условиях могут возникать вибрации, которые не вызваны какими-то внешними периоди-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

ческими нагрузками (или несовершенствами самого ротора) и условия возникновения которых не связаны с какими-то (любыми) резонансными соотношениями (т.е. системы, в которых возникают самовозбуждения или автоколебания). Последние вызваны действием неконсервативных сил циркуляционного типа (циркуляционные силы связаны с вектором перемещения ротора, а не с вектором скорости, как это имеет место в системах с «отрицательным» трением). Поскольку вектор циркуляционных сил перпендикулярен вектору перемещений ротора, то в результате этого такие силы могут проявлять себя только в механических (роторных) системах с числом степеней свободы движения больше одного. Кроме того, важной особенностью циркуляционных сил есть их неконсервативность, поэтому результаты работы можно использовать для исследования неконсервативных роторных систем, имеющих несимметричную (кососимметричную) матрицу коэффициентов.

Ключевые слова: ротор; колебания; привод; особенности; двухмассовая модель

V. S. LOVEKIN¹, YW. V. CHOVNYUK², A. P. LYASHKO^{3*}

¹Dep. «Construction Machinery and Equipment», National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroiv Oborony St., 12, Kyiv, Ukraine, 03041, tel. +38 (044) 527 87 34, e-mail lovvs@ukr.net, ORCID 0000-0003-4259-3900

²Dep. «Construction Machinery and Equipment», National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroiv Oborony St., 12, Kyiv, Ukraine, 03041, tel. +38 (044) 527 87 34, e-mail ychovnyuk@ukr.net, ORCID 0000-0002-0608-0203

^{3*}Dep. «Construction Machinery and Equipment», National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroiv Oborony St., 12, Kyiv, Ukraine, 03041, tel. +38 (093) 584 60 80, e-mail laskoanastasia1989@gmail.com, ORCID 0000-0002-3774-3348

SPECIALTY OF ROTOR'S DRIVE MECHANISM OSCILLATIONS

Purpose. Scientific work is devoted to study the influence of dynamic coefficients of bearings segment (coefficients of resistance and recirculating power) on stability and subharmonics self-oscillating components of the rotor vibration in unstable region of rotational speeds. **Methodology.** The study is based on the methods: the theory of vibrations of mechanical systems with lumped parameters; Lagrange functions; linear algebra. **Findings.** The researchers made: a) justification of the discrete two-mass model of an unbalanced rotor, which takes into account the influence of rotation on dynamic coefficients; b) analysis and improvement of methods for engineering analysis of stability and parameter subharmonic self-oscillations in the unstable range of frequencies of rotation of the rotor; c) installation and classification of the main rotor causes of vibrations constructive or those arising in the manufacture, assembly and operation of the machine, and on the other hand, rotary systems specific for non-conservative forces, that lead under certain conditions to the self-oscillation; d) determination (identification) the characteristics/differences of rotor vibration, which lies in the fact that in most cases they are associated with the transverse vibrations of the rotors, while torsional or longitudinal oscillations play the incomparably smaller role, and therefore the last in this study were rejected; e) it is shown that the characteristic feature of the functioning of rotor systems of modern machines and units have no direct relationship with the level of vibration with amount of power that is transmitted through them or produced engine. **Originality.** In this paper the authors first considered the nonlinear response bearing lubrication layer, namely the coefficients of resistance and circulating forces that determine the dynamic coefficient of segment bearings. **Practical value.** The engineering calculations subharmonic stability and self-oscillations of the rotor (unbalanced) in unstable frequency of rotation are adjusted and significantly improved. The results of this work can be used to analyze rotary systems which under certain conditions can cause vibration that is not caused by some external periodic loads (or imperfections of the rotor) and the conditions of occurrence of which is not associated with some (any) resonant ratio (i.e., the system with self-excitation or self-oscillations). The latter are caused by the action of nonconservative forces of circulation type (circulation strength associated with the displacement vector of the rotor, not the velocity vector, as in systems with «negative» friction). As the circulating force vector is perpendicular to the vector displacement of the rotor, resulting in such a force can manifest themselves only in mechanical (rotary) systems with many degrees of freedom of movement greater than one. In addition, an important feature of the circulation of forces there should not be conservative, so the results can be used to study non-conservative rotor systems with asymmetric (skew-symmetric) matrix of coefficients.

Keywords: rotor; oscillations; actuator; characteristics; two-mass model

REFERENCES

1. Bondarenko I.O. Osoblyvosti protsesu rozpovsiudzhennia kolyvan pry deformatyvnyi roboti zaliznychnoi kolii [Process features of fluctuations propagation at stress-strain work of the railway track]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 5 (59), pp. 75-83. doi: 10.15802/stp2015/55336.
2. Chelomey V.N. *Vibratsii v tekhnike* [Vibrations in the technique]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1980. 544 p.
3. Gadyaka V.G., Leykikh D.V., Simonovskiy V.I. Matematicheskaya model rotora turbokompresora dlya isledovaniya nesinkhronnykh sostavlyayushchikh vibratsiy [A mathematical model for the study of the turbocharger rotor for asynchronous vibration components]. *Kompressornoye i energeticheskoye mashinostroyeniye – Compressor and Power Engineering*, 2010, no. 2 (20), pp. 48-50.
4. Gadyaka V.G., Leykikh D.V., Simonovskiy V.I. Otsenivaniye vliyaniya nelineynykh reaktsiy segmentnykh podshipnikov na dinamiku i ustoychivost rotorov turbokompresorov [Evaluation of the influence of nonlinear reactions of segmental bearings on the dynamics and stability of turbochargers rotors]. *Trudy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* [Proc. of Intern. Sci. and Techn. Conf.]. Kyiv, 2011, pp.17-24.
5. Gadyaka V.G., Leykikh D.V., Simonovskiy V.I. Eksperimentalnoye issledovaniye dinamiki rotora v neustoychivoy oblasti chastot vrashcheniya [Experimental study of the dynamics of the rotor in the unstable region of rotational speeds]. *Problemy mashinostroyeniya – Problems of Mechanical Engineering*, 2009, vol. 12, no. 5, pp. 81-85.
6. Dimentberg F.M. *Izhibnyye kolebaniya vrashchayushchikhsya valov* [Flexural vibrations of rotating shafts]. Moscow, AN SSSR Publ., 1959. 340 p.
7. Iskovych-Lototskiy R.D., Ivanchuk I.V., Veselovskiy Ya.P. Osnovy rezonansno-strukturnoi teorii vibroudarnoho rozvantazhennia transportnykh zasobiv [The basis of resonance-structural theory of vibration shock unloading of the vehicle]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2014, no. 5 (53), pp. 109-118. doi: 10.15802/stp2014/30458.
8. Kelzon A.S., Zhuravlev Yu.N., Yanvarev N.V. *Raschet i konstruirovaniye rotornykh mashin* [Calculation and design of rotating machines]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1977. 260 p.
9. Kushul I.Ya. *Avtokolebaniya rotorov* [Self-oscillations of the rotors]. Moscow, AN SSSR Publ., 1963. 250 p.
10. Poznyak E.D. Avtokolebaniya rotorov so mnogimi stepenyami svobody [Self-oscillations of rotors with many degrees of freedom]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela* [News of the USSR Academy of Sciences. Rigid body mechanics]. Moscow, 1977, no. 2, pp. 40-50.
11. Ragulskis K.M., Ionushas R.D., Bakshis A.K. *Vibratsii rotornykh sistem* [Vibrations of rotor systems]. Vilnyus, Mokslas Publ., 1976. 190 p.
12. Simonovskiy V.I. *Dinamika rotorov tsentrobezhnykh mashin* [Dynamics of rotors centrifugal machines]. Sumy, SumGu Publ., 2006. 126 p.
13. Symonovskiy V.I. *Utochnennia matematychnykh modelei kolyvalnykh system za eksperymentalnyy danymy* [Refinement of mathematical models of oscillatory systems from experimental data]. Sumy, SumGu Publ., 2010. 92 p.
14. Black H.F., MacTernan A.J. Vibration of a rotating asymmetric shaft supported in asymmetric bearing. *Journal of Mechanical Engineering Sciences*, 1968, vol. 10, issue 3, pp. 252-261. doi: 10.1243 / jmes_jour_1968_010_037_02.
15. Chen X.Q., Jia Y.J., Cheng G.Z. Research on Field Balancing of Rotor. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 201-202, pp. 83-86. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.201-202.83.
16. Koenig E.C. Analysis for calculating lateral vibration characteristics of rotating systems with any number of flexible supports. *Journal of Applied Mechanics*, 1961, vol. 28, issue 4, pp. 585-590. doi: 10.1115/1.3641788.
17. Li C., Yu. Y., Zhao M. Analysis of Loads at Crankshaft Bearing for Scroll Compressor. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 160, pp. 42-46. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.160.42.
18. Li X., Zheng L., Liu Z. Balancing of flexible rotors without trial weights based on finite element modal analysis. *Journal of Vibration and Control*, 2013, vol. 19, issue 3, pp. 461-470. doi: 10.1177/1077546311433916.
19. Loewy R.G., Piarulli V.J. Dynamics of rotating shafts. Washington, Pergamon Press Publ., 1969. 300 p.
20. Memmot E.A. Stability and Testing of a Train of Centrifugal Compressors. ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition (2.06.–5.06.1998). Stockholm, Sweden, 1998, vol. 5, pp. 1-8. doi: 10.1115/98-gt-378.
21. Morton P.G. On the dynamics of large turbogenerator rotors. Proc. of Institute of Mechanical Engineering, 1965, vol. 180, issue 9, pp. 133-150. doi: 10.1243/pime_conf_1965_180_240_02.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

22. Qiu M., Yan J.F., Chen L., Zhao B.H. Static Analysis on Slewing Bearing with Negative Clearance Based on ANSYS 19. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, vol. 42, pp. 196-199. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.42.196.
23. Sudhakar G.N.D.S., Sekhar A.S. Identification of un-balance in a rotor bearing system. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, vol. 330, issue 10, pp. 2299-2313. doi: 10.1016/j.jsv.2010.11.028.
24. Yuan X., Wang T., Fan W.X. The Inner Equilibrium Analysis and Counterweight Design of Engine. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, vols. 44-47, pp. 1051-1055.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. С. В. Ракшою (Україна); д.т.н., проф. В. В. Гайдайчуком (Україна)

Надійшла до редколегії: 29.10.2015

Прийнята до друку: 23.12.2015

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.867.2-253

В. В. СУГЛОБОВ^{1*}, С. В. РАКША², П. А. ГРИНЬКО^{3*}

^{1*}Каф. «Подъемно-транспортные машины и детали машин», Приазовский государственный
технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (067) 62 31 269,
эл. почта suglobov_v_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

²Каф. «Прикладная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18,
эл. почта rm@m.dit.edu.ua, ORCID 0000-0002-4118-1341

^{3*}ООО «Метинвест Холдинг», ул. Лепорского 1, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (067) 543 20 72,
эл. почта grinko-pa@rambler.ru, ORCID 0000-0002-6738-0058

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕНТРИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ БАРАБАНОВ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Цель. В исследовании необходимо: 1) обосновать центрирующую способность барабанов новой конструкции ленточных конвейеров; 2) разработать методику расчета и определения рациональных конструктивных параметров барабанов в зависимости от технических параметров ленточного конвейера (длины конвейера, ширины ленты, производительности конвейера, диаметров приводного и натяжного барабанов и др.); 3) провести экспериментальные исследования работоспособности ленточного конвейера в производственных условиях, с целью определения величины динамических нагрузок и проведения сравнительной оценки эффективности центрирующей способности общепринятых и новой конструкций барабанов. **Методика.** Для обоснования эффективности центрирующей способности барабанов новой конструкции авторами разработана математическая модель взаимодействия ленты с барабаном. Математическое моделирование взаимодействия ленты с новой конструкцией барабанов сводится к составлению дифференциального уравнения движения ленты с учетом динамической составляющей и восстанавливающей силы. Данная модель позволила оценить движение ленты в поперечном направлении с учетом рассчитанных дополнительных динамических нагрузок и центрирующей силы на исследуемом ленточном конвейере с заданными техническими параметрами. Впервые предложена методика расчета и определения рациональных параметров барабанов, которая позволяет определять конструктивные параметры центрирующих участков в зависимости от механических свойств и геометрических параметров ленты. **Результаты.** С помощью математического моделирования научно обоснован эффект центрирующей способности новой конструкции барабана, которая обеспечивает устойчивое движение ленты вдоль продольной оси конвейера. Авторами сделаны следующие выводы: 1) разработана математическая модель взаимодействия ленты с новой конструкцией барабана, которая позволила описать движение ленты в поперечном направлении с учетом действия дополнительных динамических нагрузок и восстанавливающей силы; 2) предложена методика расчета и определения рациональных параметров новой конструкции барабанов, которая позволяет определить конструктивные параметры центрирующих участков; 3) проведены экспериментальные исследования ленточного конвейера с заданными техническими параметрами в производственных условиях, которые позволили определить величину динамических нагрузок во время разгона конвейера, а также оптимизировать время пуска с учетом этих нагрузок. Так, для стационарных конвейеров при увеличении времени разгона от 10–15 с до 24 с динамические нагрузки могут быть снижены с уровня 20–35 % до уровня 9–10 % от номинальных. Сравнительная оценка экспериментальных и расчетных значений величины динамических нагрузок дает расхождение до 4 %. **Научная новизна.** Впервые предложены теоретические инструменты, которые обосновывают эффективную работоспособность новой конструкции барабанов ленточных конвейеров, а также позволяют определить их рациональные конструктивные параметры. **Практическая значимость.** Новые конструкции барабанов, а также методика расчета их конструктивных параметров могут использоваться при проектировании новых и модернизации существующих ленточных конвейеров, что позволит минимизировать время внеплановых простоев оборудования и повысить долговечность конвейерной ленты.

Ключевые слова: ленточный конвейер; барабаны; лента; самоцентрирование ленты; конструктивные параметры; математическая модель

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Введение

Машины непрерывного транспорта, а в том числе и ленточные конвейеры выполняют значимые транспортирующие функции в металлургическом производстве и портах. От их бесперебойной работы зависят технологические процессы и как следствие экономические показатели. Поэтому, исследования, направленные на повышение надежности оборудования, которое обеспечивает бесперебойные транспортные потоки, играют в данном случае значимую роль и требуют постоянного совершенствования [7, 11, 13].

Во время движения по роликоопорам конвейерная лента имеет тенденцию уходить в сторону от своего центрального положения. Боковой сход ленты происходит вследствие ряда причин, главными из которых являются: перекосы геометрических осей барабанов и опорных роликов, связанные с неточностями изготовления и монтажа.

Нецентральное движение ленты является одной из причин простоя конвейерного оборудования, просыпаний транспортируемого груза, уменьшения сроков службы ленты. На практике более трети простоев конвейеров вызвано именно боковым сходом ленты [9, 10, 12–14, 17, 18].

Для обеспечения центрального движения ленты разработана новая конструкция барабана (рис. 1). Данная конструкция защищена патентом Украины на полезную модель № UA45062 [5, 8].

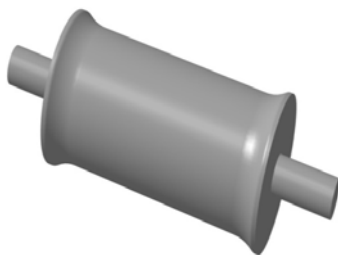


Рис. 1. Барабан ленточного конвейера

Fig. 1. Drum belt

Цель

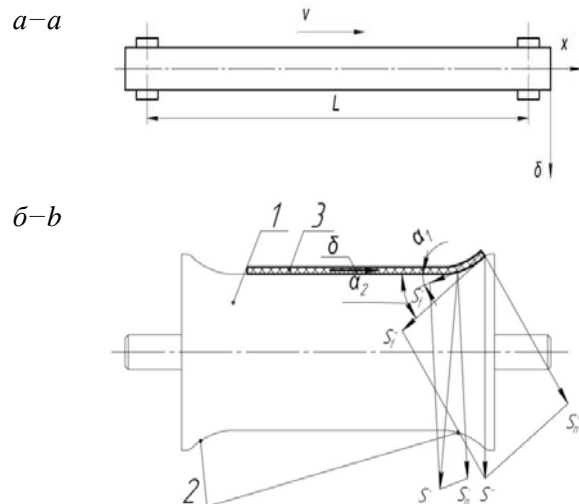
Целью данных исследований является обоснование центрирующей способности барабана новой конструкции и определение его рации-

нальных параметров. Для достижения цели предусмотрено: 1) разработать математическую модель взаимодействия ленты с новой конструкцией барабанов, обосновывающую условия центрирования ленты; 2) разработать методику расчета и определения рациональных конструктивных параметров барабанов новой конструкции в зависимости от технических характеристик ленточного конвейера (длины конвейера, ширины ленты, производительности конвейера, диаметров приводного и натяжного барабанов и др.); 3) провести экспериментальные исследования в производственных условиях.

Методика

1. *Разработка математической модели взаимодействия ленты с новой конструкцией барабана.* Для обоснования эффективности центрирующей способности барабана новой конструкции разработана математическая модель взаимодействия ленты с барабаном.

Математическое моделирование взаимодействия ленты с новой конструкцией барабанов (рис. 2) сводится к составлению дифференциального уравнения движения ленты с учетом динамической составляющей и восстанавливающей силы [2–4, 6, 15].



НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Введем следующие обозначения: ρ_l , ρ_z – плотность ленты и груза, кг/м³; v_l – продольная скорость ленты, м/с; $\sigma(x)$ – натяжение, приходящееся на единицу площади поперечного сечения, МПа; A_l , A_z – поперечное сечение ленты и груза, м²; $\delta(t)$ – поперечное смещение ленты, м; l – длина конвейера, м. Ось x направлена от натяжного барабана к приводному вдоль конвейера, ось δ перпендикулярна ей (рис. 2, а).

В первом приближении принимаем, что в боковом направлении лента движется по роликоопорам без сил сопротивления. Считаем также, что натяжной барабан обеспечивает устойчивое центральное положение ленты на роликоопорах, т.е. в этих точках контура лента как бы закреплена, и тогда $\delta(0) = 0$, $\delta(l) = 0$.

Выделим на ленте элемент длиной Δ_x ; масса этого элемента будет равна:

$$\Delta_m = (\rho_l A_l + \rho_z A_z) \Delta_x = A_l (\rho_l + \psi \rho_z) \Delta_x = \rho A \Delta_x, \quad (1)$$

где $\psi = A_z / A_l$; $\rho = \rho_l + \psi \rho_z$; $A = A_l$.

Инерционная сила в направлении δ :

$$F_{ин} = \Delta_m \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \rho \cdot A \cdot \Delta_x \frac{d^2 \delta}{dt^2}. \quad (2)$$

Спроектировав все силы на ось δ , и учитывая (2), получим:

$$\rho \cdot A \cdot \Delta_x \frac{d^2 \delta}{dt^2} = A(\sigma_x + \Delta \sigma_x) \times \sin(a_x + \Delta a) - A \cdot \sigma_x \sin a_x. \quad (3)$$

Переходя к математическим пределам, будет иметь:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{dx} [\sigma_x \sin a_x]. \quad (4)$$

Учитывая, что при малых углах справедливо соотношение: $\sin a_x = \operatorname{tg} a_x = d\delta/dx$, получим:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{dx} \left[\sigma_x \frac{d\delta}{dx} \right]. \quad (5)$$

Рассмотрим соотношение скоростей в направлении оси x и δ (рис. 2, а). Так как $\delta(t) = x(t) \frac{d\delta}{dx}$, то

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{d^2 x}{dt^2} \cdot \frac{d\delta}{dx} + 2 \frac{dx}{dt} \cdot \frac{d^2 \delta}{dx dt} + \frac{d^2}{dt^2} \left(x \frac{d\delta}{dx} \right). \quad (6)$$

Учитывая, что $d\delta/dt = v_l$, из (6) получим ускорение в направлении δ :

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{d^2 \delta}{dt^2} + 2v_l \frac{d^2 \delta}{dx dt} + 2v_l^2 \frac{d^2 \delta}{dx^2}. \quad (8)$$

Тогда уравнение (5) примет следующий вид:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{dx} \left[\sigma_x \frac{d\delta}{dx} \right] - 2v_l \frac{d^2 \delta}{dx dt} + v_l^2 \frac{d^2 \delta}{dx^2}. \quad (9)$$

Натяжение ленты $S(x)$ вдоль става по оси x меняется нелинейно.

В этом случае:

$$\frac{d}{dx} \left[\sigma_x \frac{d\delta}{dx} \right] = \frac{1}{A} \cdot \frac{d}{dx} \left[(S(x)) \frac{d\delta}{dx} \right],$$

и

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{dx} \left[\sigma_x \frac{d\delta}{dx} \right] = \frac{k}{\rho A} \cdot \frac{d\delta}{dx} + \left[\left(\frac{S(x)}{\rho A} \right) \cdot \frac{d^2 \delta}{dx^2} \right]. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9) и учитывая влияние дополнительных динамических нагрузок, получим:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \left(\frac{S(x) + W_d(x)}{\rho A} - v_l^2 \right) \frac{d^2 \delta}{dx^2} - 2v_l \frac{d^2 \delta}{dx dt} + \frac{k}{\rho A} \cdot \frac{d\delta}{dx}, \quad (11)$$

где $k = (q_l + q_z + q_p) \cdot \gamma$, Н/м; $W_d(x)$, Н – дополнительные динамические нагрузки; q_l, q_z, q_p – линейные силы тяжести ленты, груза и роликов соответственно, Н/м; γ – коэффициент сопротивления движения на грузовой ветви.

Данное уравнение получено в предположении, что силы, вызывающие боковой сход в направлении δ , перемещают ленту при отсутствии восстанавливающей силы.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Однако, новая конструкция барабанов выполнена с торцевыми криволинейными центрирующими участками, имеющих форму кривой второго порядка, на которых возникает восстанавливающая сила S_t , направленная по оси δ (рис. 2, а) в сторону продольной оси барабана [8].

Сила S_t пропорциональна синусу угла α между касательной к радиусу образующей криволинейного участка барабана и горизонтальным участком барабана (рис. 2, б). Поэтому, при малых α $\sin \alpha \approx \tan \alpha = d\delta/dx$ и

$$S_t' = \frac{d\delta}{dx}. \quad (12)$$

Тогда, подставляя центрирующую силу S_t в (11), получим:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \left(\frac{S(x) + W_d(x)}{\rho A} - v_n^2 \right) \frac{d^2\delta}{dx^2} - 2v_n \frac{d^2\delta}{dx dt} + \frac{k}{\rho A} \cdot \frac{d\delta}{dx} - S_t''. \quad (13)$$

В введенных координатах (рис. 2, б) сила S_t является центрирующей, что учтено в знаке силы в уравнении (13).

2. Методика расчета и определение рациональных параметров барабана. Новая конструкция барабана ленточного конвейера состоит из горизонтального участка 1, который сопряжен с криволинейными центрирующими ленту торцевыми участками 2, рис. 3.

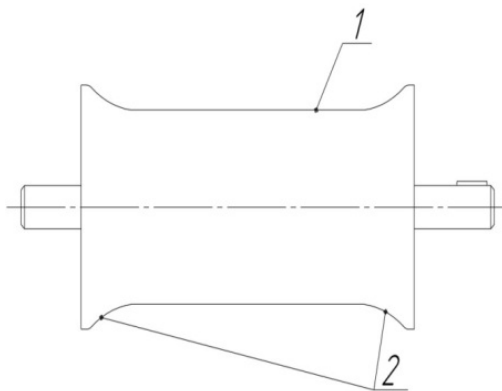


Рис. 3. Новая конструкция барабана

Fig. 3. New design of the drum

Непосредственно рабочей поверхностью служит горизонтальный участок барабана. В этом случае на ленту не действует растягивающая сила, что положительно сказывается на ее эксплуатационной стойкости.

Расчет новой конструкции барабана включает в себя:

- определение толщины стенки барабана;
- определение длины горизонтального участка барабана;
- определение оптимального радиуса криволинейных центрирующих участков;
- проверка прочностных характеристик барабана.

Геометрические расчетные параметры новой конструкции барабана показаны на рис. 4.

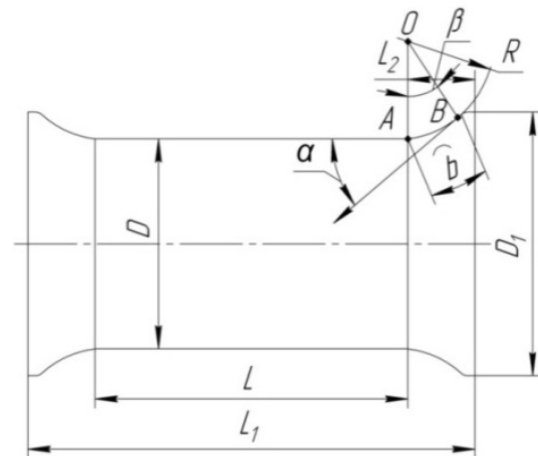


Рис. 4. Геометрические параметры новой конструкции барабана:

L_1 – длина барабана; L – длина горизонтального участка; L_2 – длина участка барабана от начала криволинейного участка до торцевой части; D_1 – диаметр барабана по торцевым участкам; D – диаметр барабана по горизонтальному участку; R – радиус образующей криволинейный участок; b – длина дуги криволинейных торцевых участков (A – точка начала дуги, B – точка окончания дуги); β – центральный угол дуги

Fig. 4. The geometrical parameters of the new design of the drum:

L_1 – length of the drum; L – length of the horizontal section; L_2 – length of the drum from the beginning of the curved portion to the end portion; D_1 – diameter of the drum over end portions; D – drum diameter of the horizontal section; R – radius forming the curved area; b – arc length of the curved end portions (A – starting point of the arc, B – end point of the arc); β – Central angle of the arc

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Толщина стенки барабана определяется по эмпирической формуле и должна быть не менее [1]:

$$\delta = 0,005D + (4...6) \text{ мм}, \quad (14)$$

где D – диаметр барабана, мм.

Длина горизонтального участка L (рис. 4) определяется исходя из ширины B выбранного типоразмера ленты:

$$L = B + 10 \text{ мм}. \quad (15)$$

Определение оптимального радиуса R криволинейных участков барабана зависит от механических свойств материала ленты и параметров ее поперечного сечения. Поэтому, с учетом цилиндрической жесткости ленты, определяется оптимальный радиус криволинейных участков барабана из условия:

$$R \geq R_1, \quad (16)$$

где R_1 – радиус цилиндрической жесткости ленты, мм; R – радиус барабана, мм.

Для резинотканевой ленты [11]:

$$R_1 = \frac{E_0 i \delta_k^2}{2 \cdot 12(1-\nu^2)} \text{ мм}, \quad (17)$$

где E_0 – модуль упругости 1 см ширины одной прокладки, Н/мм; δ_k – толщина каркаса тканевой ленты, мм; i – число прокладок ленты; ν – коэффициент Пуассона ($\nu = 0,42...0,5$).

Для резинотросовой ленты [12]:

$$R_1 = \frac{E_0 \cdot \pi \cdot d_{II}^2 \cdot z_{II} \cdot \delta^2}{2 \cdot 42t} \text{ мм} \quad (18)$$

где d_{II} – диаметр проволоки, мм; d_{II} – количество проволок в тросе; δ – толщина резинотросовой ленты, мм; t – шаг тросов, мм.

Предлагается следующий алгоритм определения длины дуги криволинейного участка барабана:

1. Определяются дополнительные динамические нагрузки, действующие на ленту во время работы конвейера.

2. Определяются суммарные усилия в ленте с учетом дополнительных динамических нагрузок.

3. Исходя из суммарного усилия в ленте, определяется угол α между касательной к радиусу, образующего криволинейный участок барабана, и горизонтальным участком барабана (из условия 19).

4. Длина дуги b центрирующего криволинейного участка равна расстоянию от точки соприкосновения касательной к радиусу образующего криволинейный участок B до точки начала горизонтального участка барабана A .

Угол α между касательной к радиусу образующего криволинейный участок барабана и горизонтальным участком барабана определяется из условия (19):

$$S_t = S \cdot \operatorname{tg} \alpha, \text{ Н} \quad (19)$$

Условие обеспечения требуемого уровня центрирующей силы:

$$S_t \geq (S + W_d) \cdot \mu, \quad (20)$$

где S – усилие в ленте, Н; S_t – тангенциальная центрирующая сила, Н; W_d – дополнительные динамические нагрузки, Н; μ – коэффициент трения между лентой и барабаном.

Длина дуги b пропорциональна ее радиусу и величине центрального угла, которая определяется по формуле:

$$b = \frac{\pi \cdot r \cdot \beta}{180}, \quad (21)$$

где r – радиус образующей криволинейный участок барабана (определяется из условия (16), мм; β – центральный угол дуги ($\beta = \alpha$), град, определяется из условия (19).

Дополнительные динамические усилия рассчитываются исходя из параметров проектируемого ленточного конвейера и условий его эксплуатации. Рассчитывают также геометрические параметры барабана, который обеспечит устойчивое движение ленты вдоль оси.

3. *Экспериментальные исследования в производственных условиях.* Целью экспериментальных исследований ленточных конвейеров в производственных условиях, являлась оценка частоты схода ленты и определение величины динамических нагрузок на действующем конвейере, а также их отклонение от расчетных значений.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Данные исследования показали, что нестационарные условия работы конвейеров приводят к сходу ленты с оси конвейера и ее различным повреждениям. Частота сходов с оси достаточно высокая (3–5 за сутки), а обычно используемая регулировка с помощью центрирующих роликов достаточно трудоемка и не всегда осуществима при некоторых видах транспортирующего материала.

Для изучения влияния динамических нагрузок на характер работы ленточных конвейеров были проведены экспериментальные исследования ленточного конвейера одного из предприятий г. Мариуполя, транспортирующего уголь. Техническая характеристика данного конвейера представлена в табл. 1.

Исследовался пуск конвейера, при котором определялась величина динамических нагрузок на приводной двигатель. Для этого был использован анализатор параметров электрической цепи Fluke 454 (Нидерланды), вмонтированный в преобразователь частоты, который питает двигатель. Данный анализатор электрической цепи обеспечивает непрерывное считывание таких параметров работы двигателя, как сила тока, A ; частота вращения, об/мин; вращающий момент, в % от номинального значения; напряжение, B на выходе преобразователя частоты; напряжение сети, B .

В табл. 2. приведены расчетные и экспериментальные значения величины динамических нагрузок при пуске данного ленточного конвейера.

Экспериментальные исследования ленточного конвейера в производственных условиях позволили определить величину динамических нагрузок во время разгона конвейера, а также оптимизировать время пуска с учетом этих нагрузок. Так, при увеличении времени разгона до 24 с, уровень динамических нагрузок составляет 9–10 % от номинального значения. При снижении времени разгона до 4 с, величина динамических нагрузок увеличивается до уровня 50–55 % от номинального значения [16].

Построены графики зависимости расчетных и экспериментальных значений моментов приводного двигателя $M_{\text{дв}}$ конвейера (в % от номинального значения) от времени разгона двигателя t , с (рис. 5) и график зависимости тяго-

вого усилия с величиной динамических нагрузок F , H от времени разгона двигателя конвейера t , с (рис. 6).

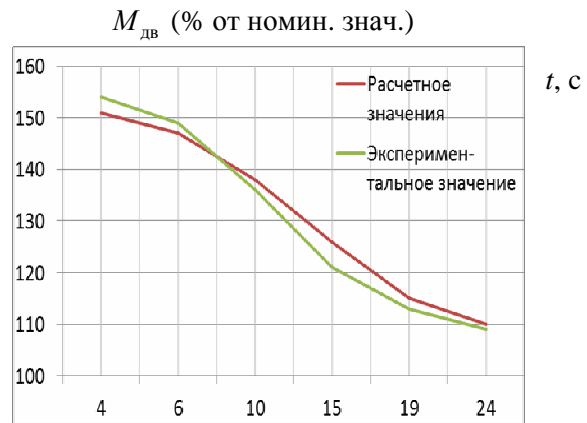


Рис. 5. График зависимости расчетных и экспериментальных значений моментов приводного двигателя $M_{\text{дв}}$ конвейера (в % от ном. значения) от времени разгона двигателя t , с)

Fig. 5. A graph of the calculated and experimental values of moments of the drive motor $M_{\text{дв}}$ of the conveyor (in % of nominal value) from the acceleration time of the engine t , c

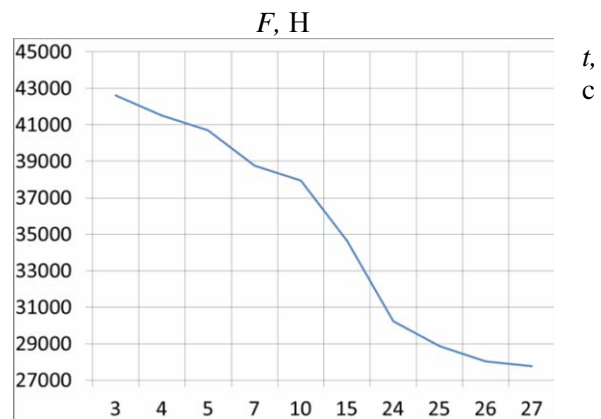


Рис. 6. График зависимости тягового усилия с величиной динамических нагрузок F , Н от времени разгона двигателя конвейера t , с

Fig. 6. Graph of the traction with the values of dyn-x loads F , Н from the conveyor motor acceleration time t , c

Таблица 1

**Техническая характеристика исследуемого
ленточного конвейера
в нестационарных условиях**

Table 1

**Technical characteristics of the test conveyor
belt under unsteady conditions**

Транспортируемый материал	Производительность, т/ч	Длина, м	Скорость движения ленты, м/с
Уголь	1 100	602	2,5

Таблица 2

**Расчетные и экспериментальные значения
величины динамических нагрузок
ленточного конвейера**

Table 2

**The calculated and experimental values
of dynamic belt loads**

Время разгона конвейера, с	Момент двигателя, % от номинального значения		Отклонение, %
	Расчетное значение	Экспериментальное значение	
4	151	154	2,0
6	147	149	1,3
10	138	136	1,4
15	126	121	3,9
19	115	113	1,7
24	110	109	1,0

Результаты

С помощью математического моделирования научно обоснован эффект центрирующей способности барабана новой конструкции, который обеспечивает самоцентрирование ленты без использования автоматизированных центрирующих устройств. Разработанная методика расчета конструктивных параметров барабана позволила учесть влияющие факторы на поперечные смещения ленты и, тем самым, оптимизировать конструкцию барабана.

Научная новизна и практическая значимость

Впервые разработана и предложена новая конструкция барабанов ленточных конвейеров и предложены теоретические инструменты, которые обосновывают ее эффективную работоспособность и позволяют определить рациональные конструктивные параметры.

Новая конструкция барабанов, а также методика расчета конструктивных параметров может использоваться при проектировании новых и модернизации существующих ленточных конвейеров, что позволит минимизировать время внеплановых простоев оборудования и повысить долговечность конвейерной ленты.

Выводы

1. Разработана математическая модель взаимодействия ленты с новой конструкцией барабана, которая позволила описать движение ленты в поперечном направлении с учетом действия дополнительных динамических нагрузок и восстанавливающей силы.

2. Предложена методика расчета и определения рациональных параметров новой конструкции барабанов, которая позволяет определить конструктивные параметры центрирующих участков.

3. Проведены экспериментальные исследования ленточного конвейера с заданными техническими параметрами в производственных условиях, которые позволили определить величину динамических нагрузок во время разгона конвейера, а также оптимизировать время пуска с учетом этих нагрузок. Так, для стационарных конвейеров при увеличении времени разгона от 10–15 до 24 с динамические нагрузки могут быть снижены с уровня 20–35 % до уровня 9–10 % от номинальных. Сравнительная оценка экспериментальных и расчетных значений величины динамических нагрузок дает расхождение до 4 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Александров, М. П. Подъемно-транспортные машины : учеб. для машиностроит. спец. вузов. / М. П. Александров. – Москва : Высш. шк., 1985. – 520 с.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

2. Биличенко, Н. Я. Экспериментальные исследования режимов запуска длинного ленточного конвейера с концевыми приводами / Н. Я. Биличенко, Н. Г. Куян // Развитие и совершенствование шахтного и карьерного трансп. – Москва : Недра, 1973. – С. 99–108.
3. Взаимодействие движущейся конвейерной ленты с перекошенным роликом / В. К. Смирнов, Е. М. Высочин, В. Я. Пошивайло, В. Ф. Монастырский // Вопросы рудничного трансп. – Киев, 1972. – Вып. 12. – С. 32–45.
4. Волотковский, В. С. Износ и долговечность конвейерных лент / В. С. Волотковский, А. Г. Нохрин, М. Ф. Герасимова. – Москва : Недра, 1976. – 176 с.
5. Гринько, П. А. Барабан циліндро-криволінійний увігнутий / П. А. Гринько, О. М. Щеглов, Р. В. Суглобов // Настоящи изследвания и развитие 2012 : материалы за VIII междунар. науч. практ. конф. (17.01–25.01.2012). – София, 2012. – Т. 20. – С. 24–26.
6. Дмитриев, В. Г. Анализ поперечного движения ленты на ставе конвейера / В. Г. Дмитриев // Шахтный и карьерный трансп. – 1974. – Вып. 1. – С. 102–109.
7. Нагорний, Є. В. Дослідження розвитку транспортного обслуговування вантажовласників у транспортних вузлах / Є. В. Нагорний, А. М. Огороков, Г. І. Переста // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 38. – С. 58–62.
8. Пат. 45062 Україна, МПК В 65 G 15/00. Барабан стрічкового конвеєра / Щеглов О. М., Суглобов В. В., Гринько П. А. (Україна) ; заявник та патентовласник Приазов. держ. техн. ун-т. – № u 200904862 ; заявл. 18.05.09 ; опубл. 26.10.09, Бюл. № 20. – 4с.
9. Покушалов, М. П. Исследование и выбор способов центрирования конвейерных лент / М. П. Покушалов // Горнорудные машины и автоматика. – Москва, 1967. – С. 58–63.
10. Расчеты и проектирование транспортных средств непрерывного действия / А. И. Барышев, В. А. Будишевский, Н. А. Складов [и др.]. – Донецк : Норд-Пресс, 2005. – 736 с.
11. Садловська, І. П. Аналіз сучасних вантажопотоків в Україні та напрями їх розвитку / І. П. Садловська // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 317–324.
12. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В. И. Галкин, В. Г. Дмитриев, В. П. Дьяченко, И. В. Запенин. – Москва : Изд-во МГГУ, 2005. – 543 с.
13. Спиваковский, А. О. Теоретические основы расчета ленточных конвейеров / А. О. Спиваковский, В. Г. Дмитриев. – Москва : Наука, 1977. – 152 с.
14. Спиваковский, А. О. Транспортирующие машины / А. О. Спиваковский В. К. Дьячков. – Москва : Машиностроение, 1983. – 488 с.
15. Шахмейстер, Л. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев. – Москва : Машиностроение, 1987. – 336 с.
16. Щеглов, О. М. Усовершенствованный привод ленточного конвейера / О. М. Щеглов, П. А. Гринько // Захист металургійних машин від поломок : міжвуз. темат. зб. наук. пр. / Приазов. держ. техн. ун-т. – Маріуполь, 2009. – Вип. 11. – С. 172–175.
17. Vulfson, I. Dynamics of cyclic machines / I. Vulfson. – New York : Springer, 2015. – 390 p. doi: 10.1007/978-3-319-12634-0.
18. Seeler, K. A. System dynamics: an introduction for mechanical engineers / K. A. Seeler. – New York : Springer, 2014. – 667 p. doi: 10.1007/978-1-4614-9152-1.

В. В. СУГЛОБОВ^{1*}, С. В. РАКША², П. А. ГРИНЬКО³

^{1*}Каф. «Підйомно-транспортні машини та деталі машин», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (067) 62 31 269, ел. пошта suglovov_v_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

²Каф. «Прикладна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта pm@m.dit.edu.ua, ORCID 0000-0002-4118-1341

³ТОВ «Метінвест Холдинг», вул. Лепорського, 1, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (067) 543 20 72, ел. пошта grinko-pa@rambler.ru, ORCID 0000-0002-6738-0058

ОБҐРУНТУВАННЯ ЦЕНТРУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ БАРАБАНІВ СТІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ

Мета. У дослідженні необхідно: 1) обґрунтувати центруючу здатність барабанів нової конструкції стрічкових конвеєрів; 2) розробити методику розрахунку та визначення раціональних конструктивних параметрів барабанів залежно від технічних параметрів стрічкового конвеєра (довжини конвеєра, ширини стрічки, продуктивності конвеєра, діаметрів приводного і натяжного барабанів та ін.); 3) провести експериментальні дослідження працездатності стрічкового конвеєра у виробничих умовах із метою визначення величини динамічних навантажень та проведення порівняльної оцінки ефективності центруючої здатності загальноприйнятих та нової конструкції барабанів. **Методика.** Для обґрунтування ефективності центруючої здатності барабанів нової конструкції, авторами розроблена математична модель взаємодії стрічки з барабаном. Математичне моделювання взаємодії стрічки з новою конструкцією барабанів зводиться до складання диференціального рівняння руху стрічки з урахуванням динамічної складової та відновлювальної сили. Ця модель дозволяє оцінити рух стрічки в поперечному напрямку з урахуванням розрахованих додаткових динамічних навантажень та центруючої сили на досліджуваному стрічковому конвеєрі із заданими технічними параметрами. Вперше запропонована методика розрахунку та визначення раціональних параметрів барабанів, яка дозволяє визначати конструктивні параметри центруючих ділянок, залежно від механічних властивостей та геометричних параметрів стрічки. **Результати.** За допомогою математичного моделювання науково обґрунтовано ефект центруючої здатності нової конструкції барабана, яка забезпечує стійкий рух стрічки уздовж поздовжньої осі конвеєра. Авторами зроблені наступні висновки: 1) розроблено математичну модель взаємодії стрічки з новою конструкцією барабана, яка дозволила описати рух стрічки в поперечному напрямку з урахуванням дії додаткових динамічних навантажень та відновлювальної сили; 2) запропонована методика розрахунку та визначення раціональних параметрів нової конструкції барабанів, яка дозволяє визначити конструктивні параметри центруючих ділянок; 3) проведені експериментальні дослідження стрічкового конвеєра із заданими технічними параметрами у виробничих умовах, які дозволили визначити величину динамічних навантажень під час розгону конвеєра, а також оптимізувати час пуску з урахуванням цих навантажень. Так, для стаціонарних конвеєрів при збільшенні часу розгону від 10–15 с до 24 с динамічні навантаження можуть бути знижені з рівня 20–35 % до рівня 9–10 % від номінальних. Порівняльна оцінка експериментальних та розрахункових значень величини динамічних навантажень дає розбіжність до 4 %. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано теоретичні інструменти, які обґрунтовують ефективну працездатність нової конструкції барабанів стрічкових конвеєрів, а також дозволяють визначити їх раціональні конструктивні параметри. **Практична значимість.** Нові конструкції барабанів, а також методика розрахунку їх конструктивних параметрів можуть використовуватися при проектуванні нових та модернізації існуючих стрічкових конвеєрів, що дозволить мінімізувати час позапланових простоїв устаткування та підвищити довговічність конвеєрної стрічки.

Ключові слова: стрічковий конвеєр; барабани; стрічка; самоцентрування стрічки; конструктивні параметри; математична модель

V. V. SUGLOBOV^{1*}, S. V. RAKSHA², P. A. HRYNKO^{3*}

^{1*}Dep. «Lifting Machinery and Machine Parts», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (067) 62 31 269, e-mail suglobov_v_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

²Dep. «Applied Mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail pm@m.dit.edu.ua ORCID 0000-0002-4118-1341

^{3*}LLC «Metinvest Holding», Leporskyi St., 1, Mariupol, Ukraine, 87500, tel.+38 (067) 543 20 72, e-mail grinko-pa@rambler.ru, ORCID 0000-0002-6738-0058

RATIONALE FOR CENTERING CAPACITY OF REDISIGNED BELT CONVEYOR DRUMS

Purpose. In the study it is necessary: 1) to justify aligning drums of a new design of belt conveyors; 2) to develop a method for calculating and determining the rational design parameters of drums depending on the technical parameters of the conveyor belt (the length of the conveyor, belt width, the performance of the conveyor, the diameter

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

of the drive and tension drums, etc.); 3) to carry out pilot studies of efficiency conveyor belt in a production environment in order to determine the magnitude of dynamic loads and a comparative evaluation of the effectiveness of the centering ability of conventional and new designs of drums. **Methodology.** To substantiate the effectiveness of the centering ability of the drums of a new design by the authors developed a mathematical model of interaction of the tape with the drum. Mathematical simulation of tape reels with new design comes to drawing up a differential equation of the belt based on the dynamic component and restoring force. This model allowed us to estimate the movement of the tape in the transverse direction based on the calculated additional dynamic loads and forces on the investigated centering a conveyor belt with given specifications. For the first time the technique of calculating and determining the rational parameters of the drums, which allows determining the design parameters of the centering portions, depending on the mechanical properties and geometric parameters of the tape. **Findings.** With the help of mathematical modeling the scientifically substantiated effect of centering the ability of the new design of the drum, which ensures stable tape running along the longitudinal axis of the conveyor. The authors made the following conclusions: 1) the mathematical model of interaction with the new belt design of the drum, which allowed to describe the belt in the transverse direction in view of additional dynamic loads and renewable power was developed; 2) the method of calculation and determination of parameters of rational design of new barrels, which allows to determine the design parameters of centering areas was proposed ; 3) the experimental studies of conveyor belt with given technical parameters in a production environment, which allowed to determine the dynamic loads during the acceleration conveyor, as well as optimize the start time to reflect these pressures was conducted. Thus, stationary conveyors with increasing acceleration of time from 10-15 to 24 with dynamic loads can be reduced from the level of 20-35% to 9-10% of the nominal. Comparative evaluation of experimental and calculated values of the magnitude of dynamic loads makes the difference to 4%. **Originality.** For the first time offered the theoretical tools that justify the effective performance of a new design of the drums of belt conveyors, as well as allow us to determine their rational design parameters. **Practical value.** New designs of drums, their method of calculation and constructive parameters can be used in the design of new and modernization of existing belt conveyors that will minimize unplanned downtime and improve the durability of the belt.

Keywords: conveyor belt; drums; tape; self-centering of the tape; design parameters; mathematical model

REFERENCES

1. Aleksandrov M.P. *Podemno-transportnye mashiny* [Lifting and transport machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 520 p.
2. Bilichenko N.Ya., Kuyan N.G. Eksperimentalnyye issledovaniya rezhimov zapuska dlennogo lentochnogo konveyera s kontsevyimi privodami [Experimental research of modes of a long run of a belt conveyor end drives]. *Razvitiye i sovershenstvovaniye shakhtnogo i karernogo transporta* [Development and improvement of the mine and quarry transport]. Moscow, Nedra Publ., 1973, pp. 99-108.
3. Smirnov V.K., Vysochin Ye.M., Poshivaylo V.Ya., Monastyrskiy V.F. Vzaimodeystviye dvizhushcheysya konveyernoy lenty s perekoshennym rolikom [The interaction of a moving conveyor belt with a skewed roller]. *Voprosy rudnichnogo transporta – The Issues of Mining Transport*, 1972, vol. 12, pp. 32-45.
4. Volotkovskiy V.S., Nokhrin A.G., Gerasimova M.F. *Izнос i dolgovechnost konveyernykh lent* [The wear and durability of conveyor belts]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 176 p.
5. Hryenko P.A., Shcheglov O. M., Suhlobov R. V. Baraban tsylindro-kryvoliniyniy uvihnutyi [The drum is cylindro-curvilinear concave]. *Nastoyashchiy izsledvaniya i razvitiye 2012 : materialy za VIII mezhdunaroduyu nauchno prakticheskuyu konferentsiyu (17.01–25.01.2012)* [The research and development 2012 : materials of VIII International Scientific and Practical Conference (17.01–25.01.2012)]. Sofiya, 2012, issue 20, pp. 24-26.
6. Dmitriyev V.G. Analiz poperechnogo dvizheniya lenty na stave konveyera [Analysis of the transverse motion of the tape on the rod conveyor]. *Shakhtnyy i karernyy transport – Mine and Quarry Transport*, 1974, vol. 1, pp. 102-109.
7. Nahorniy Ye.V., Okorokov A.M., Peresta H.I. Doslidzhennia rozvytku transportnoho obsluhovuvannia vantazhovlasnykh u transportnykh vuzlakh [The investigation of the transport system for freight owners servicing in the traffic centres]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 38, pp. 58-62.
8. Shcheglov O. M., Suhlobov V. V., Hryenko P. A. *Baraban strichkovoho konveiera* [The drum of conveyor belt]. Patent UA, no. u 200904862. 2009.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

9. Pokushalov M.P. Issledovaniye i vybor sposobov tsentrirovaniya konveyernykh lent [Research and selection of centering methods of conveyor belts]. *Gornorudnyye mashiny i avtomatika – Mining Machinery and Automation*. Moscow, 1967, pp. 58-63.
10. Baryshev A.I., Budishevskiy V.A., Sklyarov N.A. *Raschety i proektirovaniye transportnykh sredstv nepreryvnogo deystviya* [Calculations and design of transport means of continuous action]. Donetsk, Nord-Press Publ., 2005. 736 p.
11. Sadlovska I.P. Analiz suchasnykh vantazhopotokiv v Ukraini ta napriamy yikh rozvytku [Analysis of modern cargo flows in ukraine and directions of their development]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 317-324.
12. Galkin V.I., Dmitriyev V.G., Dyachenko V.P., Zapenin I. V. *Sovremennaya teoriya lentochnykh konveyerov gornykh predpriyatiy* [The modern theory of belt conveyors mining]. Moscow, Izdatelstvo MGPU Publ., 2005. 543 p.
13. Spivakovskiy A.O., Dmitriev V.G. *Teoreticheskiye osnovy rascheta lentochnykh konveyerov* [Theoretical bases of calculation of belt conveyors]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 152 p.
14. Spivakovskiy A.O., Dyachkov V.K. *Transportiruyushchiye mashiny* [Transporting machine]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1983. 488 p.
15. Shakhmeyster L.G., Dmitriev V.G. *Teoriya i raschet lentochnykh konveyerov* [Theory and calculation of belt conveyors]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1987. 336 p.
16. Shcheglov O.M., Grinko P.A. Usovershenstvovannyi privod lentochnogo konveyera [Improved drive belt conveyor]. *Zakhyst metalurhiinykh mashyn vid polomok* [Protection of metallurgical machines against damage]. Mariupol, 2009, issue 11, pp. 172-175.
17. Vulfson I. Dynamics of cyclic machines. New York, Springer Publ., 2015. 390 p. doi: 10.1007/978-3-319-12634-0.
18. Seeler K.A. System dynamics: an introduction for mechanical engineers. New York, Springer Publ., 2014. 667 p. doi: 10.1007/978-1-4614-9152-1.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А. А. Ищенко (Украина); д.т.н., проф. М. И. Катицей (Украина)

Поступила в редколлегию: 27.11.2015

Принята к печати: 21.01.2016

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463-192

Л. А. МУРАДЯН^{1*}, В. Ю. ШАПОШНИК^{2*}, А. А. МИЩЕНКО^{3*}

^{1*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, эл. почта leon59@bk.ru, ORCID 0000-0003-1781-4580

^{2*}Отраслевая научно-исследовательская лаборатория «Вагоны», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, эл. почта v.sh91@mail.ru, ORCID 0000-0003-4701-6491

^{3*}Отраслевая научно-исследовательская лаборатория «Вагоны», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ORCID 0000-0002-5543-8435

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСАМОХОДНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Цель. Научная работа предусматривает: 1) подтверждение как заявленных технических характеристик вагонов и их модификаций, так и показателей безотказной работы в течение межремонтного времени или наработки; 2) усовершенствование методологических подходов оценки эксплуатационных характеристик новой и модернизируемой техники железнодорожного транспорта на примере несамоходного подвижного состава, а именно – железнодорожных грузовых вагонов; 3) решение научно-прикладной проблемы по оценке эксплуатационных характеристик новой и модернизируемой железнодорожной техники. **Методика.** Рассмотрены основные методологические подходы к оценке эксплуатационных характеристик на примере несамоходного подвижного состава, а именно – железнодорожных грузовых вагонов. Проводится анализ безотказности вагона, который рассматривается как сложная механическая система, где все элементы системы соединены последовательно, при этом каждый из элементов включает m последовательно соединённых деталей. Отказ каждой расчетной части приведет к отказу вагона. Таким образом, вагон является системой без резервирования. **Результаты.** Усовершенствована методика оценки эксплуатационных характеристик грузовых вагонов в подконтрольной эксплуатации с учетом особенностей вагонов нового поколения. Уточнены: длительность проведения испытаний, периодичность осмотра контрольной группы вагонов, контролируемые параметры вагона, причины досрочного прекращения подконтрольной эксплуатации. Выявленные в процессе подконтрольной эксплуатации отказы разделены по их характеру. **Научная новизна.** Авторами предложена методика оценки эксплуатационных характеристик железнодорожной техники в опытной эксплуатации на примере грузовых вагонов нового поколения. **Практическая значимость.** Результаты работы позволяют оценить эксплуатационные характеристики новой и модернизируемой техники железнодорожного транспорта при проведении эксплуатационных испытаний

Ключевые слова: надежность; отказ; вероятность безотказной работы; эксплуатационные испытания; подконтрольная эксплуатация; вагоны нового поколения

Введение

Процесс создания новой техники, как правило, сопровождается выполнением комплекса теоретических и экспериментальных исследований создаваемого образца, изделия по определению его функциональных характеристик. В первую очередь разработчиков и пользователей интересуют эксплуатационные качества, так как именно эти качества определяют основные свойства изделия в эксплуатации. Поэтому не только представляет интерес, а имеет особую актуальность научно-прикладная проблема по оценке эксплуатационных характеристик новой и модернизируемой техники, а для железнодорожной техники, от которой зависит не только безопасность движения, но жизнь и здоровье людей, оценка показателей в эксплуатации имеет особо важное значение. Поэтому далее рассмотрим основные методологические подходы к оценке эксплуатационных характеристик на примере несамоходного подвижного состава, а именно железнодорожных грузовых вагонов.

Парк грузовых вагонов Украины требует пополнения его вагонами нового поколения с осевыми нагрузками до 25 тонн. Производство таких вагонов освоено в Украине на передовых предприятиях, таких как ПАО «Крюковский вагоностроительный завод» (КВБЗ), ПАО «Азовмаш», ПАО «Днепровагонмаш» (ДВМ) и др. Разработано множество моделей вагонов и их модификаций, которые требуют подтверждения как заявленных технических характеристик, так и показателей безотказной работы в течение межремонтного времени или наработки.

Цель

Усовершенствование методологических подходов оценки эксплуатационных характеристик новой и модернизируемой техники железнодорожного транспорта. Решение научно-прикладной проблемы по оценке эксплуатационных характеристик новой и модернизируемой железнодорожной техники.

Методика

Вагон относится к обслуживаемым, ремонтируемым, восстанавливаемым объектам, находящим в эксплуатации свой технический

ресурс [1]. Надежность вагона характеризуется показателями безотказности, долговечности и ремонтпригодности [6, 14]. Вопросам оценки надежности техники и железнодорожного подвижного состава посвящено большое количество как научно-технической литературы [6–8, 11, 14, 23 и др], так и нормативных документов [4, 5, 15]. Далее рассмотрим основные показатели, характеризующие безотказность работы.

При анализе безотказности вагон рассматривается как сложная механическая система, состоящая из n элементов. Будем считать, что все элементы системы соединены последовательно, при этом каждый из элементов включает m последовательно соединенных деталей. Отказ каждой расчетной части приведет к отказу вагона. Таким образом, вагон является системой без резервирования.

В качестве расчетных частей целесообразно рассматривать отдельные функциональные узлы: кузов, тележка, автотормозное оборудование, ударно-тяговое устройство и др. С учетом взаимной независимости отказов расчетных частей и отдельных деталей (элементов) вероятность безотказной работы вагона в течение срока (наработки) T определяется по формуле (1) [10, 15]:

$$P_g(T) = \prod_{i=1}^n P_i(T) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m P_{ij}(T), \quad (1)$$

где $P_i(T)$ – вероятность безотказной работы за срок T i -й расчетной части; $P_{ij}(T)$ – вероятность безотказной работы за срок T j -й детали i -й расчетной части.

Для упрощения введем предположение о независимости разных видов отказов, тогда суммарная вероятность безотказной работы элемента определяется как произведение частных вероятностей

$$P_{ij}(T) = \prod_{f=1}^k P_{ij}^f(T), \quad (2)$$

где k – число учитываемых видов отказов; P_{ij}^f – вероятность отказа вида f данного элемента.

Отказ вагона заключается в нарушении его работоспособности (рис. 1).

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

В неработоспособном состоянии вагон (элемент) не может использоваться для выполнения перевозной работы и временно (или окончательно – в случае предельного состояния) исключается из рабочего парка для производства ремонта (или списания).

Оценка показателей надежности, определяется по результатам испытаний на основании статистического учета по количеству выявленных неисправностей. По условиям и месту проведения работ, испытания делятся на типы, представленные на рис. 2.

ОТКАЗ ВАГОНА	
изменение технических характеристик вагона, его деталей или узлов, приводящее к нарушению его работоспособного состояния	
явный отказ	скрытый отказ
выявляется штатными методами в процессе технического содержания вагонов в рамках действующей технологии	выявление штатными средствами в процессе технического содержания вагонов невозможно или затруднено без изменения действующей технологии технического обслуживания

Рис. 1. Проявление отказа вагона

Fig. 1. Display of car refusal

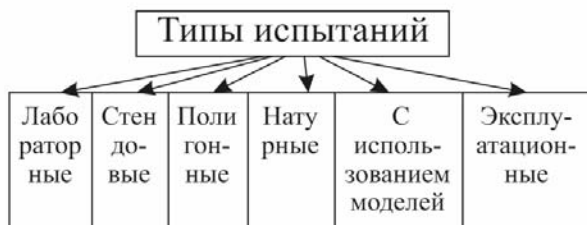


Рис. 2. Типы испытаний в зависимости от условий и места проведения работ

Fig. 2. Test types depending on conditions and test place

Для определения и оценки действительных эксплуатационных показателей надежности вагонов и их узлов при работе в реальных условиях предусмотрены эксплуатационные испытания (рис. 3).

Основными видами эксплуатационных испытаний, которым подвергаются образцы деталей, узлов и в целом единицы подвижного

состава железных дорог, являются опытная и подконтрольная эксплуатация [19, 20]. При этом решаются следующие основные задачи [21]:

- выявление закономерностей возникновения отказов в зависимости от наработки;
- определение коэффициентов готовности и использования в условиях эксплуатации;
- определение (уточнение) критериев предельного состояния и ресурса;
- расчет действительной потребности в запасных частях, расходов на эксплуатацию;
- установление ремонтпригодности;
- выявление типичных повреждений, различных видов отказов, относительной доли каждого вида в общем их числе;
- статистическая оценка стоимости ремонтов и затрат на поддержание в работоспособном состоянии от начала эксплуатации и до истечения гарантийного периода, до истощения объявленного ресурса, до списания;
- подтверждается соответствие условиям и требованиям эксплуатации;
- определяется ресурс между плановыми видами ремонта;
- накапливаются и систематизируются данные о надежности.

В период подконтрольной эксплуатации проводятся периодические осмотры (осмотры вагонов подконтрольной группы, с целью выявления скрытых отказов и отказов вследствие изнашивания) и внеплановые осмотры (осмотры с целью подтверждения факта отказа).

Проведение контроля технических параметров производится в условиях вагонного депо или пункта текущего ремонта полигона обращения вагонов, которые осуществляют подъемку вагонов, выкатку и разборку тележек, освидетельствование колесных пар и буксовых узлов. Внеплановые осмотры и контроль параметров неисправных вагонов и тележек проводятся на месте выявления неисправности (пункте технического обслуживания) или в вагонном депо.

Выявленные в процессе подконтрольной эксплуатации отказы различаются по характеру и приведены на рис. 4.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ



Рис. 3. Виды эксплуатационных испытаний

Fig. 3. Kinds of the maintenance testing



Рис. 4. Типы характера отказов

Fig. 4. Types of refusal nature

Целью подконтрольной эксплуатации также является подтверждение безопасности вагона в период его эксплуатации:

- от постройки до первого депоовского ремонта;

- между депоовскими ремонтами;

- от постройки до капитального ремонта;

Задачами подконтрольной эксплуатации являются:

- определение показателей безотказности вагона (осредненный параметр потока отказов и гамма-процентная наработка на отказ) и сравнение полученных показателей со среднесетевыми значениями;

- определение наработки вагона (пробега или срока службы) от постройки до планового ремонта или между плановыми ремонтами, обеспечивающими показатели безотказности вагона.

В процессе осмотра и контроля технических параметров:

- выявляют наличие механических и коррозионных повреждений на вагоне;

- проверяют наличие всех элементов конструкции;

- производят замеры зазоров и износов;

- проверяют параметры тормозной системы и автосцепки.

Продолжительность подконтрольной эксплуатации, на примере полувагона нового поколения, составит – до достижения пробега 500 тыс. км после постройки или 4 года эксплуатации. Периодичность проведения плановых осмотров и контроля параметров [9, 13]:

- первый – по достижении пробега 50–70 тыс. км после постройки или через год эксплуатации;

- второй – по достижении пробега 140–160 тыс. км после постройки или два года после проведения первого осмотра;

- третий – по достижении пробега 250–270 тыс. км после постройки или через три года эксплуатации;

- четвертый и далее – ежегодно до достижения пробега 500 тыс. км или срока эксплуатации 4 года (до первого планового ремонта).

При контроле технических параметров несамоходных единиц подвижного состава необходимо проконтролировать следующие параметры, приведенные в табл.1 [3, 16–18].

Таблица 1

Table 1

Контролируемые параметры вагонов (на примере полувагона нового поколения [8, 22])**Checking wagon parameters (new generation gondola model) [8, 22])**

Вид провер- ки	Узел подвиж- ного состава	Контролируемые параметры
Визуальная проверка	Кузов	<ul style="list-style-type: none"> – состояние кузова в целом и его основных несущих элементов, в том числе на наличие механических и коррозионных повреждений, прогибов и деформаций (хребтовая, шкворневые, концевые и промежуточные балки), боковых и торцевых стен (стоек и обшивки), крышек люков, наличие деформаций боковых и торцевых стен от распорных нагрузок, трещин в листах, балках и сварных соединениях; – состояние поручней и подножек составителя, лестниц, кронштейнов для крепления оборудования, обшивки, петель крышек люков и деталей их крепления; – состояние всего периметра верхней обвязки и элементов крепления грузов внутри кузова (увязочных колец и скоб); – наличие остатков груза и места его скопления, определяется необходимость проведения дополнительной зачистки
	Тележка	<p>До подъема кузова:</p> <ul style="list-style-type: none"> – наличие трещин литых деталей (боковых рам и надрессорных балок); – состояние рессорного подвешивания (наличие у пружин изломов, отколов, трещин, следов смыкания витков, наминов, потертостей); – целостность адаптера и резинометаллической прокладки адаптера; – наличие просадки скользуна (при появлении зазора между износостойкой пластиной скользуна и ответной пластиной на скользуне кузова); – положение клина относительно надрессорной балки по нижней метке индикатора, которая не должна быть выше уровня верхней поверхности надрессорной балки; – ослабление гаек крепления фрикционных планок; – состояние соединительных диагональных стержней и их креплений на боковой раме (трещины, сдвиг, деформация); – закрепление тормозных башмаков на цапфах триангелей <p>После подъема кузова:</p> <ul style="list-style-type: none"> – наличие износов на верхней износостойкой планке скользуна (по глубине индикаторов); – наличие трещин, расслоения и т.п. дефектов износостойкого полимерного вкладыша подпятника; – состояние предохранительных тросов триангеля
	Колесная пара	<ul style="list-style-type: none"> – ослабление болтов торцевого крепления кассетного подшипника на оси колесной пары; – наличие подтеков и выбросов смазки в зонах уплотнения и на колесах; – наличие трещин, сколов и деформаций наружных колец подшипников и уплотнений (после выкатки колесных пар); – наличие трещин в приободной зоне дисков колес, а также неисправностей на поверхностях катания

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Продолжение табл. 1

Continuation of table 1

Вид проверки	Узел подвижного состава	Контролируемые параметры
Визуальная проверка	Адаптер	– наличие трещин и сколов адаптеров;
	Тормозное оборудование	В отпущенном состоянии – наличие всех элементов тормозной системы: а) приборов торможения и отпуска тормозов; б) всех элементов воздухопровода пневматической части тормозной системы и арматуры соединительной; в) элементов механической части тормозной системы (тяги, рычаги, затяжки, оси, втулки, шплинты, предохранительные устройства; г) изделий крепежных (болтов, гаек, шайб, стопорных планок шплинтов и т.д.); – отсутствие повреждений (трещин, изломов, сколов, износов, вмятин и т.д.): а) приборов торможения и отпуска тормозов; б) арматуры соединительной; в) элементов механической части тормоза; – наличие заваров тормозных башмаков, повышенных износов тормозных колодок и втулок рычагов ТРП механической части тормоза
Проверка посредством измерений	Тормозное оборудование	В отпущенном состоянии: – зазор между упором вилки авторежима и контактной планкой, который не должен превышать 3 мм; – зазор между колодками и поверхностями катания колес – должен составлять от 5 до 8 мм; – износ тормозных колодок, измерением толщины колодок на расстоянии 50 мм от торцов колодок; – контрольные размеры авторегулятора и его привода; – зазора между наконечником триангеля и заклепкой (безрезьбовое крепление тормозного башмака на триангеле). В заторможенном состоянии: – выход штока поршня тормозного цилиндра; – отсутствие утечек сжатого воздуха
	Колесные пары	– прокат (износ обода); – толщина гребня; – толщина обода; – проверяется наличие неисправностей на поверхностях катания колес
	Автосцепное устройство	– проверку высоты горизонтальной оси автосцепки от уровня головок рельсов; – проверку отклонения автосцепки на центрирующей балочке; – проверку износов контура зацепления, а также работоспособности механизма сцепления; – на корпусе адаптера

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Окончание табл. 1

End of table 1

Вид проверки	Узел подвижного состава	Контролируемые параметры
Проверка посредством измерений	Тележка	<p>После выкатки тележки, до ее разборки:</p> <ul style="list-style-type: none"> – проверяется уровень возвышения контактной поверхности демпфера над верхней частью ролика скользунa; <p>После выкатки тележки, после разборки:</p> <ul style="list-style-type: none"> – производятся замеры высот пружин рессорного подвешивания и скользунa; – износ отверстия под шкворень; – после снятия полимерного вкладыша и оценки его технического состояния определяется износ опорной поверхности подпятника надрессорной балки по измеренной глубине; – определяется наличие износов между наклонными плоскостями надрессорной балки и на поверхности износостойкой планки; – проверяется состояние фрикционных клиньев, при наличии повреждений, трещин и износов вертикальной поверхности

Условием завершения испытаний является получение полного объема необходимых данных. Досрочное прекращение подконтрольной эксплуатации происходит по следующим причинам [2, 12]):

- выявление в процессе эксплуатации или при проведении периодического осмотра опасного отказа производственного или конструкционного характера;

- дважды за срок подконтрольной эксплуатации выявленное превышение осредненного параметра потока отказов вагона и/или его узлов, полученного по результатам периодического осмотра, среднесетевых значений для вагона данного типа;

- выявление по результатам периодического осмотра у любого вагона подконтрольной группы гамма-процентной наработки (срока службы и/или пробега) меньшей, чем срок службы и/или пробег вагона согласно ТУ.

По окончании подконтрольной эксплуатации составляются рекомендации по внедрению в серийное производство.

Результаты

Усовершенствована методика оценки эксплуатационных характеристик грузовых вагонов в подконтрольной эксплуатации с учетом

особенностей вагонов нового поколения. Уточнены длительность проведения испытаний, периодичность осмотра контрольной группы вагонов, контролируемые параметры вагона, причины досрочного прекращения подконтрольной эксплуатации.

Научная новизна и практическая значимость

Результаты работы позволяют оценить эксплуатационные характеристики новой и модернизируемой техники железнодорожного транспорта при проведении эксплуатационных испытаний.

Предложена методика оценки эксплуатационных характеристик железнодорожной техники в опытной эксплуатации на примере грузовых вагонов нового поколения.

Выводы

Таким образом, рассмотрены методологические основы по оценке эксплуатационных характеристик подвижного состава железных дорог на примере грузовых вагонов нового поколения, что дает основание для использования полученных результатов в практической деятельности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Болотин, М. М. Отказы и срок службы грузового вагона / М. М. Болотин, В. Г. Воротников // Мир трансп. – 2012. – № 2. – С. 152–161.
2. Верещагин, С. Б. Планирование и оценка результатов испытаний колёсных и гусеничных машин : учеб. пособие / С. Б. Верещагин. – Москва : МАДИ (ГТУ). – 2008. – 60 с.
3. ГОСТ 22235–2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузо-разгрузочных и маневровых работ. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 18 с.
4. ГОСТ 27.002–89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Москва : Изд-во стандартов, 1990. – 38 с.
5. ГОСТ Р 27.002–2009. Надёжность в технике. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 28 с.
6. Капица, М. И. Рациональная взаимосвязь между затратами на содержание локомотива и его надёжностью / М. И. Капица, И. В. Холоша // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. – Дніпропетровськ, 2001. – Вип. 8. – С. 62–65.
7. Киселев, В. И. Конструкционная надёжность узлов локомотива / В. И. Киселев, Г. В. Строков // Мир трансп. – 2013. – № 4. – С. 72–76.
8. Коротенко, М. Л. Безопасность от схода колеса с рельсов и совершенствование конструкций рельсовых экипажей : монография / М. Л. Коротенко, И. В. Клименко, В. Я. Панасенко. – Днепропетровск : Маковецкий, 2013. – 224 с.
9. Лагута, В. В. Постановка задачи определения продолжительности зон Н-характеристики при расчетах на надёжность технических объектов / В. В. Лагута, М. И. Капица // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. імені акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 22. – С. 129–131.
10. Машиностроение: энциклопедия : в 40 т. Т. IV–3. Надёжность машин / В. В. Ключев, В. В. Болотин, Ф. Р. Соснин [и др.] ; под общ. ред. В. В. Ключева. – Москва : Машиностроение, 2003. – 592 с.
11. Морозов, В. В. Надёжность пассажирских вагонов / В. В. Морозов, М. Н. Шлыгин // Ж.-д. трансп. – 2001. – № 2. – С. 59–61.
12. Мурадян, Л. А. Исследование литых железнодорожных колёс в эксплуатации производства компании «Griffin wheel company» (США) / Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник // Бюл. науч. работ Брянск. фил. МИИТ : сб. науч. работ / Моск. гос. ун-т путей сообщения, Брянск. фил. – Брянск : Дизайн-Принт, 2015. – Вып. 7, № 1. – С. 65–70.
13. Мурадян, Л. А. Определение количества объектов для проведения эксплуатационных испытаний вагонной техники / Л. А. Мурадян // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. заліз. трансп. – Харків, 2013. – Вип. 139. – С. 83–87.
14. Мямлин, С. В. Влияние параметров рессор буксового подвешивания на надёжность грузовых вагонов / С. В. Мямлин // Заліз. трансп. України. – 2001. – № 3. – С. 21–22.
15. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ГосНИИВ : ВНИИЖТ, 1996. – 317 с.
16. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №60178. Літературний твір наукового характеру «Програма та методика дослідження експлуатаційних властивостей боковин візків з використанням пружних елементів, що зменшують не обресорені частини візків вантажних вагонів» / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, А. А. Міщенко ; зареєстр. 17.06.2015. – 1с.
17. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №58830. Літературний твір наукового характеру «Програма та методика експлуатаційних випробувань вантажних напіввагонів моделі 12-7023 на візках моделі 18-7020» / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, А. А. Міщенко ; зареєстр. 26.02.2015. – 1с.
18. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №60176. Літературний твір наукового характеру «Програма та методика експлуатаційних випробувань колес грузовых вагонов» / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, В. Г. Анофрієв ; зареєстр. 17.06.2015. – 1с.
19. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения / О. М. Савчук, В. К. Бруякин [и др.] // Вагонный парк. – 2009. – № 5/6. – С. 30–32.
20. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения / О. М. Савчук, В. К. Бруякин, Л. А. Мурадян [и др.] // Вагонный парк. – 2009. – № 7/8. – С. 8–11.
21. Myamlin, S. V. Investigation of dynamic characteristics of gondola cars on perspective bogies / S. V. Myamlin, V. M. Bubnov, Ye. O. Pysmennyi // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 126–137. doi: 10.15802/stp2014/30789.
22. Railway freight car truck ZK1 // Chinese Railways Equipment. – 2013. – № 7. – Р. 56–59.
23. Rausand, M. System reliability theory: models, statistical methods, and applications / M. Rausand, A. Hoyland. – 2nd ed. – Hoboken, New Jersey : Wiley & John Sons, Inc., 2004. – 636 p.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Л. А. МУРАДЯН^{1*}, В. Ю. ШАПОШНИК^{2*}, А. А. МИЩЕНКО^{3*}

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта leon59@bk.ru, ORCID 0000-0003-1781-4580

^{2*}Галузева науково-дослідна лабораторія «Вагони», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта v.sh91@mail.ru, ORCID 0000-0003-4701-6491

^{3*}Галузева науково-дослідна лабораторія «Вагони», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ORCID 0000-0002-5543-8435

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСАМОХІДНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Мета. Наукова робота передбачає: 1) підтвердження як заявлених технічних характеристик вагонів та їх модифікацій, так і показників безвідмовної роботи протягом міжремонтного часу або напрацювання; 2) удосконалення методологічних підходів оцінки експлуатаційних характеристик нової та модернізованої техніки залізничного транспорту на прикладі несамохідного рухомого складу, а саме – залізничних вантажних вагонів; 3) рішення науково-прикладної проблеми з оцінки експлуатаційних характеристик нової та модернізованої залізничної техніки. **Методика.** Розглянуто основні методологічні підходи щодо оцінки експлуатаційних характеристик на прикладі несамохідного рухомого складу, а саме – залізничних вантажних вагонів. Проводиться аналіз безвідмовності вагона, який розглядається як складна механічна система, де всі елементи системи з'єднані послідовно, при цьому кожен із елементів включає m послідовно сполучених деталей. Відмова кожної розрахункової частини призведе до відмови вагона. Таким чином, вагон є системою без резервування. **Результати.** Удосконалено методику оцінки експлуатаційних характеристик вантажних вагонів у підконтрольній експлуатації із урахуванням особливостей вагонів нового покоління. Уточнено: тривалість проведення випробувань, періодичність огляду контрольної групи вагонів, контрольовані параметри вагона, причини дострокового припинення підконтрольної експлуатації. Виявлені в процесі підконтрольної експлуатації відмови розділені за їх характером. **Наукова новизна.** Авторами запропоновано методику оцінки експлуатаційних характеристик залізничної техніки у дослідній експлуатації на прикладі вантажних вагонів нового покоління. **Практична значимість.** Результати роботи дозволяють оцінити експлуатаційні характеристики нової та модернізованої техніки залізничного транспорту при проведенні експлуатаційних випробувань.

Ключові слова: надійність; відмова; ймовірність безвідмовної роботи; експлуатаційні випробування; підконтрольна експлуатація; вагони нового покоління

L. A. MURADIAN^{1*}, V. YU. SHAPOSHNYK^{2*}, A. A. MISCHENKO^{3*}

^{1*}Dep. «Car and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, e-mail leon59@bk.ru, ORCID 0000-0003-1781-4580

^{2*}Industry research laboratory «Cars», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, e-mail v.sh91@mail.ru, ORCID 0000-0003-4701-6491

^{3*}Industry research laboratory «Cars», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, ORCID 0000-0002-5543-8435

METHODOLOGICAL FUNDAMENTALS OF DETERMINATION OF UNPOWERED ROLLING STOCK MAINTENANCE CHARACTERISTICS

Purpose. The paper involves: 1) confirmation of the technical characteristics of cars and their modifications, as well as indicators of unfailing work probability during the time between overhauls or service hours; 2) improving the methodological approaches to assess the maintenance characteristics of new and modernized equipment of rail transport on the example of not self-propelled rolling stock, namely, railway freight cars; 3) solution of scientific and applied problems in assessment the maintenance characteristics of the new and modernized railway equipment. **Methodology.** The basic methodological approaches to the assessment of the maintenance characteristics on the example of not self-propelled rolling stock, namely, railway freight cars were considered. The analysis of the reliability of the car, which is considered as a complex mechanical system, where all system elements are connected in series, wherein each element includes m is serially connected parts. The failure of each part of the calculation will result in refusal of the car. Thus, the car is a system without redundancy. **Findings.** The evaluation technic of the maintenance characteristics of freight cars in controlled operation with taking into account the features of the new generation of cars was improved. Specified: the duration of the tests, the frequency of inspection of the control group of cars controlled by the parameters of the car, the reasons for the early termination of controlled operation. Identified failures in the process of controlled operation are divided according to their nature. **Originality.** The authors proposed a method of assessing the maintenance characteristics of railway equipment in trial operation as an example of a new generation of freight cars. **Practical value.** The results allow assessing the maintenance characteristics of new and modernized rail transport equipment during the maintenance test.

Keywords: reliability; refusal; unfailing work probability; maintenance testing; control maintenance; new car generation

REFERENCES

1. Bolotin M.M., Vorotnikov V.G. Otkazy i srok sluzhby gruzovogo vagona [Failures and service life of a freight car]. *Mir transporta – World of Transport*, 2012, no. 2, pp. 152-161.
2. Vereshchagin S.B. *Planirovaniye i otsenka rezultatov ispytaniy kolesnykh i gusenichnykh mashin* [Planning and evaluation of results of tests of wheeled and tracked vehicles]. Moscow, MADI (GTU) Publ., 2008. 60 p.
3. GOST 22235-2010. *Vagony gruzovyye magistralnykh zheleznnykh dorog kolei 1520 mm. Obshchiye trebovaniya po obespecheniyu sokhrannosti pri proizvodstve pogruzo-razgruzochnykh i manevrovnykh rabot* [State Standart 22235-2010. Freight cars of main railways of track 1520 mm. General requirements on ensuring safety in the production of loading-unloading and shunting works]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 18 p.
4. GOST 27.002-89. *Nadezhnost v tekhnike. Osnovnyye ponyatiya. Terminy i opredeleniya* [State Standart 27.002-89. Reliability in technique. Basic concepts. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 1990. 38 p.
5. GOST R 27.002-2009. *Nadezhnost v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [State Standart R 27.002-2009. Reliability in technique. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 28 p.
6. Kapitsa M.I., Kholosha I.V. Ratsionalnaya vzaimosvyaz mezhdu zatratami na sodержaniye lokomotiva i yego nadezhnostyu [Rational relationship between the cost of maintaining the locomotive and its reliability]. *Transport – Transport*, 2001, issue 8, pp. 62-65.
7. Kiselev V.I., Stokov G.V. Konstruktsionnaya nadezhnost uzlov lokomotiva [Structural reliability of the locomotive units]. *Mir transporta – World of Transport*, 2013, no. 4, pp. 72-76.
8. Korotenko M.L., Klimenko I.V., Panasenko V.Ya. *Bezopasnost ot skhoda kolese s relsov i sovershenstvovaniye konstruksiy relsovykh ekipazhey* [Security from derailing and improving the design of rail vehicles]. Dnepropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2013. 224 p.
9. Laguta V.V., Kapitsa M.I. Postanovka zadachi opredeleniya prodolzhitelnosti zon N-kharakteristiki pri raschetakh na nadezhnost tekhnicheskikh obektov [The problem of determining the length of the zones h-characteristics in calculating the reliability of technical objects]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 22, pp. 129-131.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

10. Klyuev V.V., Bolotin V.V., Sosnin F.R. *Mashinostroeniye. Entsiklopediya. Tom IV-3. Nadezhnost mashin* [Engineering. Encyclopedia. Volume IV-3. Reliability of machines]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 2003. 592 p.
11. Morozov V.V., Shlygin M.N. Nadezhnost passazhirskikh vagonov [Reliability of passenger cars]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway Transport*, 2001, no. 2, pp. 59-61.
12. Muradyan L.A., Shaposhnik V.Yu. Issledovaniye litykh zheleznodorozhnykh koles v ekspluatatsii proizvodstva kompanii «Griffin wheel company» (SShA) [The study of cast railway wheels in maintenance of manufacturing company «Griffin wheel company» (USA)]. *Byuleten nauchnykh rabot Bryanskogo filiala MIITa*. [Bulletin of the scientific work of the Bryansk branch of MIIT]. Bryansk, Dizayn-Print Publ., 2015, issue 7, no. 1, pp. 65-70.
13. Muradyan L.A. Opredeleniye kolichestva obektov dlya provedeniya ekspluatatsionnykh ispytaniy vagonnoy tekhniki [The determination of the number of objects for carrying out the operational tests of car technology]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainy derzhavnoi akademii zaliznychnoho transport* [Proc. of Ukrainian State Academy of Railway Transport]. Kharkiv, 2013, issue 139, pp. 83-87.
14. Myamlin S.V. Vliyaniye parametrov resor buksovogo podveshivaniya na nadezhnost gruzovykh vagonov [The influence of parameters of springs axle-box hanging on the reliability of freight cars]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2001, no. 3, pp. 21-22.
15. *Normy rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Norms for calculation and design of cars of Ministry of Railways of 1520 mm track (self-propelled)]. Moscow, GosNII-VNIIZhT Publ., 1996. 317 p.
16. Miamlin S.V., Muradian L.A., Shaposhnyk V.Yu., Mishchenko A.A. *Literaturnyi tvir naukovoho kharakteru «Prohrama ta metodyka doslidzhennia ekspluatatsiinykh vlastyvostei bokovyn vizkiv z vykorystanniam pruzhnykh elementiv, shcho zmenshuiut ne obresoreni chastyny vizkiv vantazhnykh vahoniv»* [Literary work of a scientific nature «Program and methodology of the study the operational properties of the sidewalls of trucks with the use of elastic elements, reduce not sprung parts of bogies for freight cars»]. Certificate UA. no. 60178. 1 p.
17. Miamlin S.V., Muradian L.A., Shaposhnyk V.Yu., Mishchenko A.A. *Literaturnyi tvir naukovoho kharakteru «Prohrama ta metodyka ekspluatatsiinykh vyprobuvan vantazhnykh napivvahoniv modeli 12-7023 na vizkakh modeli 18-7020»* [Literary work of a scientific nature «Program and methodology of operational tests freight cars models 12-7023 boggie model 18-7020»]. Certificate UA. no. 58830. 1 p.
18. Miamlin S.V., Muradian L.A., Shaposhnyk V.Yu., Anofriev V.H. *Literaturnyi tvir naukovoho kharakteru «Programma i metodika ekspluatatsionnykh ispytaniy koles gruzovykh vagonov»* [Literary work of a scientific nature «Program and methodology of operational tests of the railcar's wheels»]. Certificate UA. no. 60176. 1 p.
19. Savchuk O.M., Bruyakin V.K., Muradyan L.A., Mishchenko A.A., Mozheyko Ye.R. Ekspluatatsionnyye ispytaniya poluvagonov novogo pokoleniya [Performance tests of the new generation gondola cars]. *Vagonnyy park – Car Fleet*, 2009, no. 5/6, pp. 30-32.
20. Savchuk O.M., Bruyakin V.K., Muradyan L.A., Mishchenko A.A., Mozheyko Ye.R. Ekspluatatsionnyye ispytaniya poluva-gonov novogo pokoleniya [Performance tests of the new generation gondola cars]. *Vagonnyy park – Car Fleet*, 2009, no. 7/8, pp. 8-11.
21. Myamlin S.V., Bubnov V.M., Pysmennyi Ye.O. Investigation of dynamic characteristics of gondola cars on perspective bogies. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2014, no. 5 (53), pp. 126-137. doi: 10.15802/stp2014/30789.
22. Railway freight car truck ZK1. *Chinese Railways Equipment*, 2013, no. 7, pp. 56-59.
23. Rausand M., Hoyland A. System reliability theory: models, statistical methods, and applications. Hoboken, New Jersey, Wiley & John Sons, Inc. Publ., 2004. 636 p.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. С. В. Мямлиным (Украина); д.т.н., проф. И. Э. Мартыновым (Украина)

Поступила в редколлегию<11.11.2015

Принята к печати<14.01.2016

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4.017:625.1.032.84

А. А. ШВЕЦ^{1*}, К. И. ЖЕЛЕЗНОВ^{2*}, А. С. АКУЛОВ^{3*}, А. Н. ЗАБОЛОТНЫЙ^{4*},
Е. В. ЧАБАНЮК^{5*}

^{1*}СКТБ МСУБ, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, эл. почта angela_shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

^{2*}СКТБ МСУБ, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (095) 545 38 87, эл. почта constantinz@i.ua, ORCID 0000-0003-3648-1769

^{3*}СКТБ МСУБ, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (067) 178 16 90, эл. почта asakulov@gmail.com, ORCID 0000-0002-6123-5431

^{4*}СКТБ МСУБ, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (067) 282 13 41, эл. почта zabolotnyi@i.ua, ORCID 0000-0003-1651-7082

^{5*}СКТБ МСУБ, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (066) 633 55 95, эл. почта 457m@ukr.net, ORCID 0000-0001-5695-5955

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ СИЛ ПРИ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ОТ ВЫЖИМАНИЯ В ПОЕЗДАХ

Цель. В аналитическом исследовании рассматриваются: 1) связь между продольной силой, действующей на вагон в составе поезда; 2) боковые и вертикальные силы взаимодействия в зоне контакта колеса и рельса; 3) динамические показатели вагонов с величиной коэффициента запаса устойчивости от выжимания; 4) получение зависимостей между ними. **Методика.** Исследование проводилось аналитическим методом оценки устойчивости грузового вагона при движении с различными скоростями по прямым и кривым участкам пути. **Результаты.** В процессе исследования движения поезда, при расследовании транспортных событий, а также во время выполнения учебного задания на тренажере машиниста для оценки его действий используются величины продольных сил в межвагонных соединениях. Получено выражение для вычисления значения продольной сжимающей силы, действующей на вагон, при которой величина коэффициента запаса устойчивости от выжимания равна допустимому значению (критическая сила). Для оценки влияния на величину продольной силы скорости движения, коэффициентов вертикальной и горизонтальной динамики, а также ветровой нагрузки на боковую поверхность кузова вагона приведены результаты расчетов движения порожнего полувагона модели № 12-532 по кривой радиусом 250 м с возвышением 150 мм и поперечным разбегом рамы кузова вагона относительно оси пути в направляющем сечении в 50 мм. **Научная новизна.** В данном исследовании приведена методика определения продольной сжимающей силы, несколько отличающаяся от общепринятой. Также оценивается влияние на неё скорости движения подвижного состава, коэффициентов вертикальной и горизонтальной динамики и ветровой нагрузки на боковую поверхность кузова вагона. **Практическая значимость.** Авторами разработаны предложения по уточнению существующих методик определения значения продольной сжимающей силы, действующей на вагон, при которой величина коэффициента запаса устойчивости от выжимания будет равна допустимому значению. Это позволит оценивать устойчивость каждого вагона поезда от выжимания непосредственно во время моделирования его движения. Наиболее эффективно использовать эту методику можно в тренажерах, предназначенных для обучения машинистов безопасным способам вождения поездов, и при расследовании причин схода вагонов.

Ключевые слова: безопасность движения; ветровая нагрузка; боковая поверхность кузова; нормы расчёта; устойчивость вагонов от выжимания; скорость движения; коэффициент устойчивости; продольная сжимающая сила

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Введение

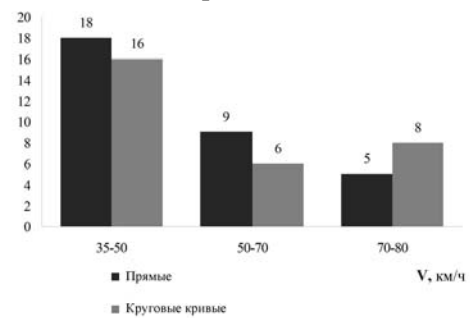
Существующие в настоящее время модели продольной динамики поездов позволяют с достаточной точностью определять величины продольных усилий, действующих на вагоны при различных режимах управления поездом. Эти модели успешно используются при оценке влияния новых элементов подвижного состава (поглощающих аппаратов, воздухораспределителей и т.д.) на продольную нагруженность поездов, при расследовании случаев серьезных транспортных событий и моделировании движения поезда при выполнении учебных заданий на тренажерах машиниста. Два последних случая отличаются от остальных тем, что используемые модели поездов, наряду с корректной оценкой скорости движения, пройденного пути и продольных сил, должны позволять оценивать устойчивость вагонов от выжимания их продольными силами.

В настоящее время при расследовании транспортных событий, связанных со сходами вагонов, оценка правильности действий машинистов производится в основном по косвенным показателям. К таким показателям, в первую очередь, относятся максимальное сжимающее усилие, действующее на сошедший вагон, и время его действия. В тренажерах, предназначенных для обучения машинистов безопасным способам вождения поездов, было бы целесообразно оценивать правильность действий машиниста «на лету», то есть непосредственно во время управления поездом. Для этих целей, в перечисленных выше случаях, правильным было бы оценивать устойчивость каждого вагона поезда от выжимания непосредственно во время моделирования его движения.

На рис. 1 приведены данные о сходах вагонов, случившихся при применении машинистами режима торможения [10] на прямых участках и в кривых радиусом 350–650 м. Из рис. 1, а видно, что наибольшее количество сходов произошло при малых скоростях движения, при средних скоростях количество сходов снижается, а при скоростях, близких к предельно допустимым значениям – в кривых вновь растет. Это может быть объяснено следующими соображениями: при малых скоростях движения тормозная сила, действующая на вагон, велика; при скоростях, близких к предельным величинам,

тормозная сила существенно уменьшается, но величина коэффициента вертикальной динамики приближается к наибольшему допустимому значению (рис. 1, б). Из-за несинхронного срабатывания воздухораспределителей соседних вагонов при малых скоростях движения возникают большие продольные квазистационарные силы, действующие на вагон, которые при прочих благоприятствующих факторах способны привести к его выжиманию. При больших скоростях движения тормозные силы снижаются почти в 2 раза, поэтому риск выжимания вагонов от действия продольных сил снижается. Одновременно с этим, большие величины коэффициента вертикальной динамики могут привести к значительному обезгруживанию набегающего колеса и сходу даже при небольших величинах продольных сил.

а–а



б–б

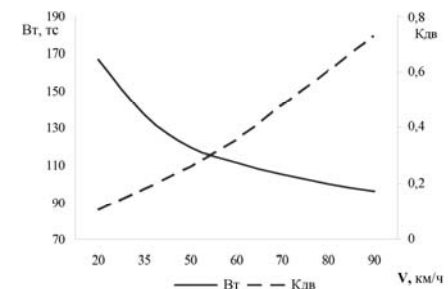


Рис. 1. Выборка информации о сходах вагонов:

а – количество сходов подвижного состава при торможении поезда; б – зависимость тормозной силы и коэффициента вертикальной динамики от скорости движения поезда

Fig. 1. Information retrieval about cars derailment:

а – the number of rolling stock derailment during braking of the train; б – dependence of the brake force and the coefficient of vertical dynamics of train speed

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Из этого следует, что при определении условий устойчивости вагонов от выжимания их продольными силами следует учитывать динамику вагона, как системы масс [11, 12, 15].

Цель

Для оценки устойчивости вагонов от выжимания продольными силами используются коэффициенты устойчивости. Величины этих коэффициентов зависят от соотношения боковых и вертикальных сил, действующих на колесо. Однако выход вышеперечисленных показателей за допустимые значения не означает, что обязательно произойдет сход. Это необходимое, но не достаточное условие для схода колеса с рельса [7].

Целью аналитического исследования связи между продольной силой, действующей на вагон, боковыми и вертикальными силами взаимодействия в зоне контакта гребня колеса и рельса, величинами коэффициентов вертикальной и горизонтальной динамики необрессоренных частей вагона с величиной коэффициента запаса устойчивости от выжимания является получение зависимостей между ними.

Методика

В [5, 6] показано, как можно оценить устойчивость вагона от выжимания продольными силами, действующими в поезде. Это делается путем расчета значения коэффициента запаса устойчивости (K_y). Приведенные там выражения достаточно громоздки, а их использование может оказаться затруднительным из-за большого количества параметров. Вместе с тем, при оценке действий машиниста, связанных с управлением поезда, почти никогда невозможно с абсолютной уверенностью сделать вывод об их правильности или ошибочности [8, 9, 13]. Из-за большого количества параметров пути и вагона, необходимых для расчета величины K_y , невозможности точного определения абсолютно всех их значений и некоторых допущений, сделанных в расчетной схеме при получении формулы расчета K_y , мы всегда имеем дело с оценочными (вероятностными) результатами. Поэтому, для оценки устойчивости вагонов достаточно определить возмож-

ность их выжимания в наихудших возможных условиях. И, если при этом возможность выжимания не подтверждается, то можно отбросить гипотезу о том, что действия машиниста стали причиной серьезных транспортных событий. Если же в наихудших условиях возможность выжимания вагона подтверждается, то, прежде чем делать окончательный вывод об ошибочности действий машиниста, следует оценить устойчивость полученного результата к вариации параметров, значения которых приняты с некоторыми допущениями. И только если в большинстве случаев вариаций параметров возможность выжимания будет подтверждена, следует считать действия машинистов ошибочными.

В основе расчета устойчивости вагонов от выжимания [5–7] лежит статическая расчетная схема. Однако вагон представляет собой достаточно сложную механическую систему со многими степенями свободы и во время движения взаимодействие между его отдельными частями и между вагоном и железнодорожным путем носит динамический характер. Динамический характер вертикальных сил взаимодействия приводит к периодическому увеличению и уменьшению вертикальных нагрузок на колесо, что напрямую влияет на возможность вкатывания колеса на рельс. Следует отметить два главных источника периодических изменений вертикальной нагрузки колеса на рельс – это боковая качка кузова (перевалка на пяте и колебания на пружинах центрального подвешивания) и вертикальные неровности рельсовых нитей. Период боковой качки кузова порожних грузовых вагонов колеблется в пределах от 200 до 300 мс. То есть в течение половины периода колебаний (100–150 мс) вертикальная нагрузка на набегающее колесо будет меньше статической, а на ненабегающее – больше. Время проследования колесом просадки пути при средней скорости движения вагона 50 км/ч и длине просадки 3 м составит примерно 220 мс. По оценке, приведенной в [1], путь, который должно пройти колесо вагона для того, чтобы гребень вкатился на головку рельса, составляет примерно 0,64 м. В [14] для колес различного профиля этот путь составляет 0,46–0,73 м. При этом время, необходимое для вкатывания колеса на рельс при скорости 50

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

км/ч, составит 33–53 мс. В [2] время, в течение которого нарушение условия устойчивости от вкатывания колеса на рельс становится опасным, составляет 50 мс. Таким образом, время, в течение которого динамические силы взаимодействия колеса и рельса меньше своих статических значений, в 3–4 раза больше времени, необходимого для вкатывания колеса на рельс. Из этого следует, что вертикальная динамика взаимодействия вагона и пути должна быть учтена при оценке устойчивости вагона от выжимания продольными силами. То же самое можно сказать о динамических добавках горизонтальных поперечных сил взаимодействия колеса и рельса.

Величины вертикальных догрузок и разгрузок колесных пар характеризуются коэффициентом вертикальной динамики ($K_{дв}$), который может принимать как отрицательные (при разгрузке), так и положительные (при догрузке) значения. Динамические добавки рамных сил принято учитывать коэффициентом горизонтальной динамики ($K_{др}$), который при увеличении бокового давления набегающего колеса на рельс принимает положительные значения, а при уменьшении этой силы – отрицательные.

С учетом вышесказанного динамические силы, действующие на первую колесную пару со стороны набегающего и ненабегающего колеса, в расчетной схеме представлены следующими выражениями:

$$\begin{cases} P_{д1,2} = P_{ст1,2} \cdot (1 + K_{двн,нн}) \\ H_{др} = H_p \cdot (1 + K_{др1}) \end{cases} \quad (1)$$

где $P_{ст1,2}$ – вертикальная статическая нагрузка на набегающее 1 и ненабегающее 2 колесо, кН; $K_{двн}$, $K_{двнн}$ – величины коэффициентов вертикальной динамики необрессоренной части вагона для тех же колес; H_p – величина рамной силы без учета поперечной динамики, кН; $K_{др1}$ – коэффициент горизонтальной динамики необрессоренной части вагона.

Кроме этого в традиционных расчетных схемах не учитывается влияние ветровой нагрузки на боковую поверхность кузова. Эта сила прикладывается к геометрическому центру боковой поверхности и определяется выражением:

$$F_b = S \cdot \rho \cdot \frac{V_b^2}{2}, \quad (2)$$

где S – площадь боковой поверхности кузова, m^2 ; ρ – плотность воздуха, Па; V – скорость ветра, м/с.

Здесь выражение $0,5\rho \cdot V_b^2$ – это давление ветра на боковую поверхность кузова. В [7] принято расчетное давление ветра равно 500 Па, площадь боковой поверхности крытого вагона колеблется в пределах от $38 m^2$ (модель 11-217) до $49 m^2$ (модель 11-260), при этом сила от ветровой нагрузки составляет 19–25 кН. Если при этом ветер направлен внутрь кривой, то сила ветровой нагрузки будет способствовать дополнительной разгрузке набегающего колеса, что существенно повлияет на условия выжимания вагона.

С учетом всего сказанного выше, составлены расчетные схемы взаимодействия вагонов между собой и с путем [5, 6]. Эти схемы представлены на рис. 2 и 3.

На рис. 2 все силы, действующие на вагон, спроектированы на плоскость пути, а также плоскости ей перпендикулярные – продольную относительно оси пути и поперечную.

Где G_0 – вес кузова вагона, кН; G_1 – вес необрессоренной части тележки, кН; α – угол наклона пути к горизонтали, рад; N_1 и N_2 – продольные усилия, действующие в автосцепках вагона, кН; Z_1 и Z_2 – вертикальные составляющие продольного усилия, кН; $2a$ – расстояние между центрами клиновых отверстий сцепленных автосцепок, м; Δ_1 – разность уровней осей автосцепок впереди вагона, м; Δ_2 – разность уровней осей автосцепок сзади вагона, м; Y_1 и Y_2 – горизонтальные поперечные составляющие продольного усилия, кН; X_1 и X_2 – горизонтальные продольные составляющие продольного усилия, кН; $h_{вр}$ – высота от УГР до верхней плоскости центрального рессорного комплекта, м; $h_{ц}$ – высота центра тяжести вагона над уровнем головок рельсов, м; h_b^* – высота от УГР до центра тяжести боковой поверхности кузова вагона над плоскостью опирания надрессорных балок, м; $G_{кп}$ – вес колес

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ной пары, кН; H_p – рамная сила, действующая на колесную пару, кН.

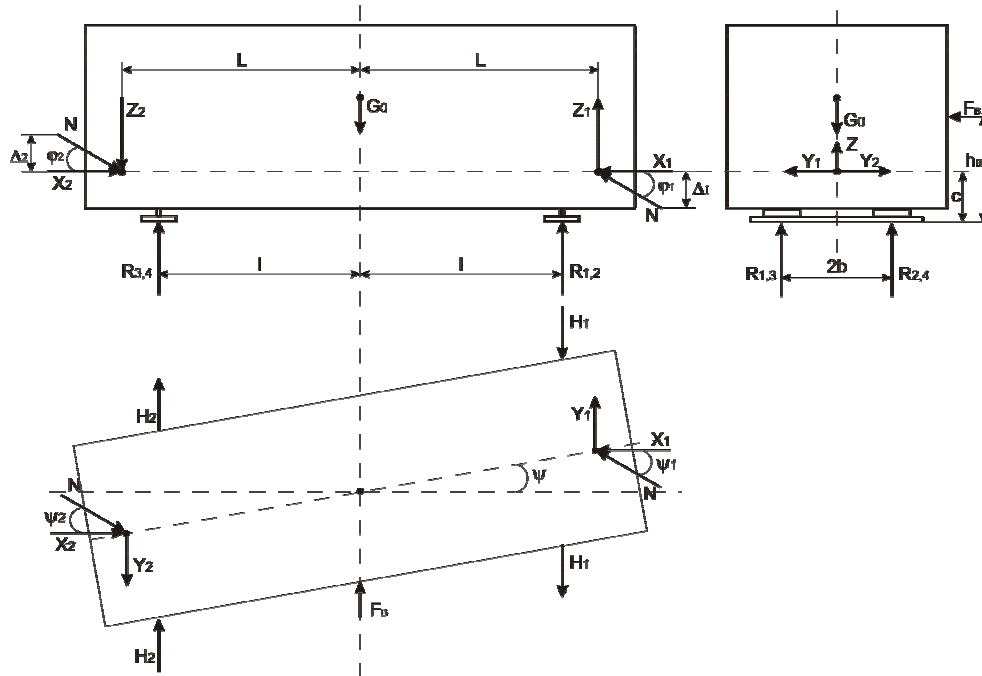


Рис. 2. Расчетная схема состава поезда и перекосы ее элементов в плане при действии продольных сжимающих сил с учетом силы ветра

Fig. 2. The analytical model of train set and distortions of its elements in plan view under action of longitudinal compressive forces, taking into account wind strength

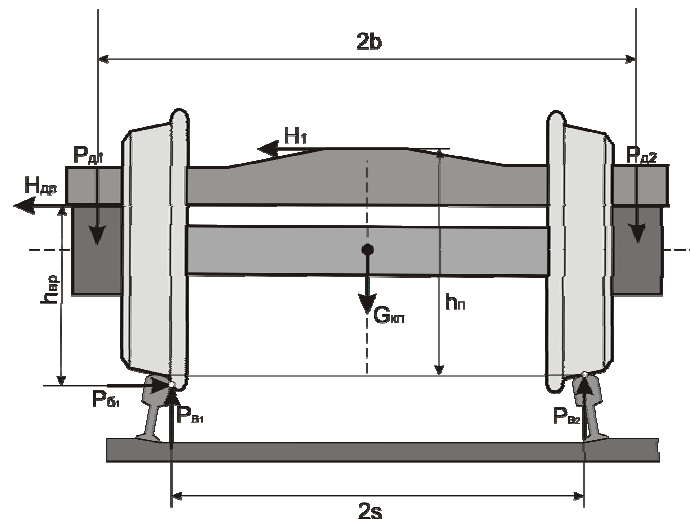


Рис. 3. Расчетная схема сил, действующих на тележку в результате продольного сжатия

Fig. 3. The analytical model of forces acting on the bogie as a result of longitudinal compression

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Зависимость для определения коэффициента запаса устойчивости от выжимания продольными силами с учетом сил инерции в кривой [5,

б] и составляющей от действия ветровой нагрузки на боковую поверхность кузова вагона имеет следующий вид:

$$K_{yb}^I = \frac{tg\beta - \mu}{1 + \mu \cdot tg\beta} \times$$

$$\times \frac{P_{вар}^{ст} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \left[\frac{\psi_a^2 \cdot h_{вр}}{2\delta_0 \cdot S} + \frac{\psi_{кр} \cdot L}{a \cdot \ell} \left(\frac{h_a}{S} + \frac{a}{\ell} \cdot \frac{h_{вр}}{S} \right) \right] + N \cdot \left[2\psi_{кр} \cdot \frac{h_a}{S} + \psi_a \cdot \frac{h_{вр}}{S} \right] + P_{ин} \cdot \frac{h_{ц}}{S} + F_{в} \cdot \frac{h_{в}^*}{S}}{\mu \cdot P_{вар}^{ст} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \left[\frac{\psi_a^2}{2\delta_0} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{вр}}{S} \right) + \frac{\psi_{кр} \cdot L}{a \cdot \ell} \left(2 \cdot \left(1 + \frac{a}{\ell} \right) - \mu \cdot \left(\frac{h_a}{S} + \frac{a}{\ell} \cdot \frac{h_{вр}}{S} \right) \right) \right] + P_{ин} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{ц}}{S} \right) +$$

$$+ N \cdot \left[2\psi_{кр} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_a}{S} \right) + \psi_a \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{вр}}{S} \right) \right] + F_{в} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{в}^*}{S} \right)} \quad (2)$$

В процессе моделирования движения поезда, то ли при расследовании транспортных событий, то ли во время выполнения учебного задания на тренажере машиниста, для оценки действий машиниста используются величины продольных сил в межвагонных соединениях. Поэтому удобнее будет в качестве критерия оценки устойчивости вагона от выжимания вместо величины K_y использовать величину продольной силы, при которой K_y меньше допустимого значения (для грузовых вагонов $[K_{уд}] = 1,2$ [7]). Эта критическая величина продольной силы может быть получена из выражения для K_y (2), путем выражения величины продольной силы ($N = S_{кр}$) через параметры вагона, пути и допустимую величину $K_y = [K_{уд}]$. Вычисления значения продольной сжимающей силы, действующей на вагон, при

которой величина коэффициента запаса устойчивости от выжимания будет равна допустимому значению (критическая сила) осуществляется по простой и широко известной зависимости как дискриминант квадратного уравнения:

$$S_{кр} = \frac{-p \pm \sqrt{p^2 - 4 \cdot k \cdot q}}{2k}. \quad (3)$$

Первый корень этого решения представляет собой искомую сжимающую продольную силу, физический смысл второго – растягивающая продольная сила, способная привести к вкатуванию колеса на рельс.

Введение динамических коэффициентов $K_1^d - K_5^d$ (4)–(8), которые будут вычисляться непосредственно во время выполнения учебной поездки на тренажере, существенно упростит выражения для определения коэффициентов квадратного уравнения (9)–(11):

$$K_1^d = K_{дг} \cdot \left[2 - \left(\mu_2 + \frac{1 + \mu_1 tg\beta}{tg\beta - \mu_1} \right) \cdot \frac{h_{вр}}{S} \right], \quad (4)$$

$$K_2^d = 2 - K_{дг} \cdot \frac{h_{вр}}{S} \cdot \left(\mu_2 + \frac{1 + \mu_1 tg\beta}{tg\beta - \mu_1} \right), \quad (5)$$

$$K_3^d = \frac{1 + \mu_1 tg\beta}{tg\beta - \mu_1} \cdot (K_{дв1} - K_{дв2}) + \left(\mu_2 + \frac{1 + \mu_1 tg\beta}{tg\beta - \mu_1} \right) \cdot \frac{b_1 K_{дв1} + b_2 K_{дв2}}{2S}, \quad (6)$$

$$K_4^d = \frac{1 + \mu_1 tg\beta}{tg\beta - \mu_1} \cdot (K_{дв1} + K_{дв2}) + \left(\mu_2 - \frac{1 + \mu_1 tg\beta}{tg\beta - \mu_1} \right) \cdot \frac{b_2 K_{дв2} - b_1 K_{дв1}}{2S}, \quad (7)$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$K_5^{\text{д}} = -\frac{1 + \mu_1 \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta - \mu_1} \cdot (K_{\text{дв1}} + K_{\text{дв2}}) + \left(\mu_2 + \frac{1 + \mu_1 \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta - \mu_1} \right) \cdot \frac{b_2 K_{\text{дв2}} - b_1 K_{\text{дв1}}}{2S}, \quad (8)$$

$$k = \frac{\psi_a^2}{2 \cdot \delta_0 \cdot C_r} \cdot K_1^{\text{д}} + \frac{\psi_{\text{кр}}}{C_r \cdot a \cdot \ell} \cdot \left[\left(1 + \frac{a}{\ell} \right) \cdot K_2^{\text{д}} - \frac{c}{b} K_3^{\text{д}} \right], \quad (9)$$

$$p = \psi_a \cdot K_1^{\text{д}} + 2\psi_{\text{кр}} \cdot \left[K_1^{\text{д}} - \frac{c}{b} K_3^{\text{д}} \right] - \varphi_{\text{экв}} \cdot K_5^{\text{д}}, \quad (10)$$

$$q = (G_0 + 2G_1) \cdot K_5^{\text{д}} + 4G_{\text{кп}} \cdot \left(\mu_2 - \frac{1 + \mu_1 \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta - \mu_1} \right) + F_{\text{в}} \cdot \left[K_1^{\text{д}} - \frac{h_{\text{в}}}{b} \cdot K_4^{\text{д}} \right], \quad (11)$$

где 2ℓ – база вагона, м; $2\delta_0$ – суммарный поперечный разбег рамы кузова вагона относительно оси пути в направляющем сечении, м; L – расстояние по горизонтали от оси вагона до центра клинового отверстия автосцепки, м; a – длина корпуса автосцепки (от оси сцепления до конца хвостовика), м; C_r – горизонтальная жесткость рессорного подвешивания одной тележки, кН/м; $2b$ – расстояние между точками приложения вертикальных сил, действующих на буксы колесной пары соответственно на набегающем и ненабегающем колесе, кН; $h_{\text{вр}}$ – высота верха рессорных комплектов над уровнем головок рельсов, м; c – вертикальное расстояние от верхней плоскости центрального рессорного комплекта до уровня оси автосцепки, м; h_a – высота оси автосцепки над уровнем головок рельсов, м; $h_{\text{в}}$ – высота центра тяжести боковой поверхности кузова вагона над плоскостью опирания надрессорных балок, м; $2S$ – расстояние между кругами катания колес, м; β – угол, образованный прямолинейной частью контура профиля гребня колеса к плоскости пути; ψ_a – угол поворота, рад;

$$\psi_a = \frac{\delta_0 \cdot L}{\ell^2} \cdot \left(1 + \frac{L}{a} \right), \quad (12)$$

$\psi_{\text{кр}}$ – угол поворота от кривой, рад;

$$\psi_{\text{кр}} = \frac{L_c}{R}, \quad (13)$$

$\varphi_{\text{экв}}$ – угол поворота в вертикальной плоскости, рад;

$$\varphi_{\text{экв}} = \varphi_1 \cdot \left(\frac{L}{\ell} + 1 \right) + \varphi_2 \cdot \left(\frac{L}{\ell} - 1 \right), \quad (14)$$

$2L_c$ – длина вагона по осям сцепления, м; R – радиус кривой, м; μ_1 – коэффициент трения гребня о выкружку головки рельса на набегающем колесе; μ_2 – коэффициент трения гребня о выкружку головки рельса на ненабегающем колесе.

Изучим влияние параметров этого выражения на величину критической силы. Основные параметры это – радиус кривой (R), величины коэффициентов вертикальной динамики со стороны набегающего ($K_{\text{двн}}$) и ненабегающего ($K_{\text{двнн}}$) колеса, величина коэффициента горизонтальной динамики ($K_{\text{дг1}}$) и ветровая нагрузка на боковую поверхность кузова ($F_{\text{в}}$). Проверка влияния этих параметров на величины критических сил выполнена для порожнего полувагона широко распространенной модели 12-532.

Для того чтобы можно было одновременно оценить влияние всех перечисленных выше параметров, диапазон изменения всех параметров приведены к диапазону ± 1 . Рассмотрим изменение параметров в следующих диапазонах:

- коэффициенты вертикальной динамики ($K_{\text{двн}}, K_{\text{двнн}}$) – $0,8 \div +0,8$;
- радиус кривой (R) $300 \div 900$ м;
- коэффициент горизонтальной динамики ($K_{\text{дг1}}$) – $0,4 \div +0,4$;
- скорость ветра $V_{\text{в}}$ – $20 \div +20$ м/с.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Результаты

После выполнения элементарных преобразований для приведения диапазонов всех параметров к интервалу ± 1 получены графики изменения величины критической силы (рис. 4).

Как следует из рис. 4, наименьшее влияние на величину критической силы оказывает величина радиуса кривой (R), а наибольшее – величина $K_{двн}$. Остальные рассмотренные параметры имеют не определяющее, но существенное влияние на величину критической силы. Таким образом, можно исключить зависимость величины критической силы от радиуса кривой, что позволит упростить выражения (9) и (10). Итак, необходимо численно оценить «цену» такого упрощения. Для сравнения в табл. 1 приведены величины критических сил, рассчитанные с учетом радиуса кривой ($S_{кр}$) и без его учета ($S_{кр}^*$). В таблице помещены результаты

только для тех моделей вагонов, для которых величина критической силы не превышает 800 кН, т.к. такие силы вполне могут возникнуть в условиях эксплуатации [3, 4]. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Из содержимого таблицы следует, что значения критических сил изменились примерно на 5–8,4 %, что в условиях неполной определенности величин параметров вагона и пути не приведет к существенному искажению результатов. Из всего этого следует вывод: при определении величины критической силы, способной привести к выжиманию вагона, можно пренебречь влиянием радиуса кривых. Окончательно выражения для расчета величины критической силы имеют вид:

$$k = \frac{\Psi_a^2}{2 \cdot \delta_0 \cdot C_r} \cdot K_1^D, \quad (15)$$

$$p = \Psi_a \cdot K_1^D - \varphi_{экр} \cdot K_5^D. \quad (16)$$

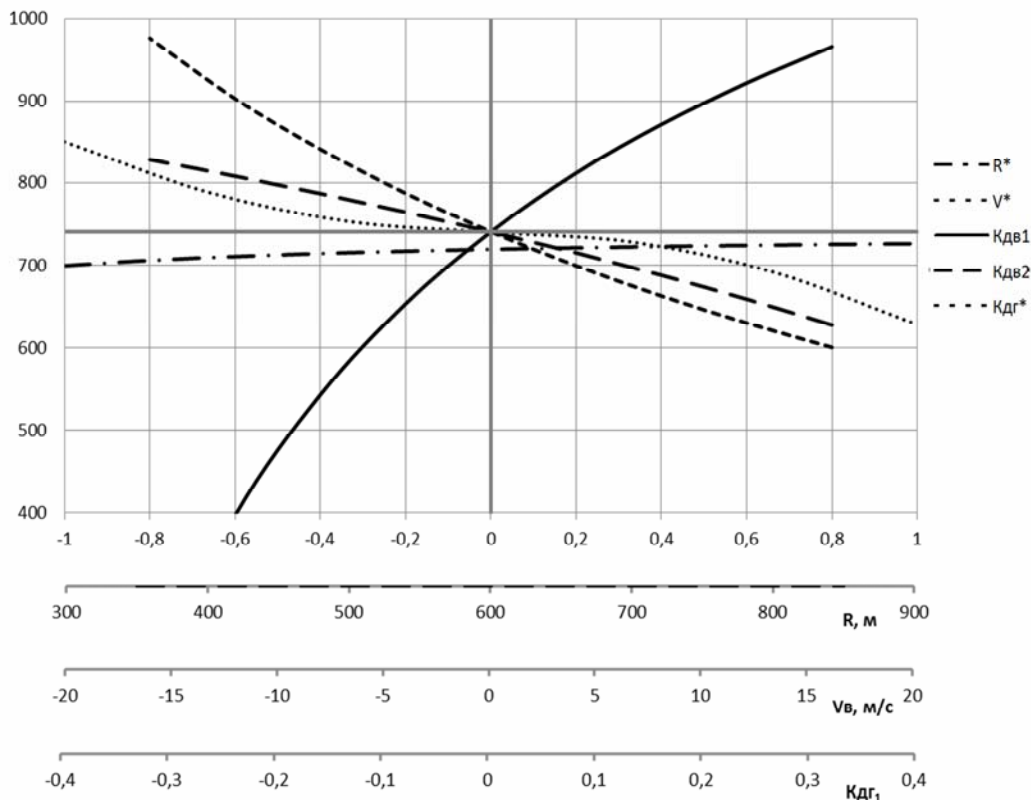


Рис. 4. Графики изменения величины критической силы

Fig. 4. The chart of change of the critical force value

Таблица 1

**Величины критической силы
при выжимании вагонов**

Table 1

**The critical force value when
car lift resistance**

Модель вагона	$S_{кр}$ [кН]	$S_{кр}^*$ [кН]	%
12-532	639	684	6,6
12-2123	710	761	6,7
12-П-153	624	670	6,9
12-1303	668	719	7,1
12-1505	606	652	7,1
11-K255	585	637	8,2
11-066	707	772	8,4
13-4012-09	578	629	8,1
13-198	686	730	6,0
13-H004	677	733	7,6
13-192	602	649	7,2
13-3103-01	642	699	8,2
15-1727	596	631	5,5
15-1404	663	711	6,8
19-758	616	660	6,7
19-1217	651	699	6,9
20-4078	663	698	5,0
20-480	623	656	5,0
55-320	634	676	6,2
20-793	642	683	6,0

Зависимость (11) остается в этом случае без изменений. Расчет возможности выжимания вагона, выполняемый при расследовании серьезных транспортных событий, следует проводить для наихудшего сочетания величин $K_{двн}$, $K_{двнн}$, $K_{дг1}$ и V_v . Таким наихудшим сочетанием параметров будет разгрузка набегающего колеса, догрузка ненабегающего, дополнительная динамическая поперечная сила, увеличивающая силу прижатия колеса к рельсу и ветровая нагрузка, направленная в сторону ненабегающего колеса (внутри кривой). В этом

случае величины $K_{двн}$ должны быть отрицательными, а величины $K_{двнн}$, $K_{дг1}$ и V_v – положительными. Вопрос о том, какие численные значения должны принимать эти параметры остается открытым. Например, величины динамических показателей ($K_{двн}$, $K_{двнн}$, $K_{дг1}$) могут быть связаны с техническим состоянием пути на момент возникновения транспортного события, а скорость и направление ветра могут быть взяты из метеосводок. И если получение информации о направлении и скорости ветра не должно вызывать особых затруднений, то нахождение связи между состоянием пути и величинами коэффициентов динамики требует дополнительных исследований. Пока можно порекомендовать вычисление величин коэффициентов динамики в зависимости от скорости движения, как указано в [7].

Величина критической силы для оценки действий машиниста при выполнении учебного задания на тренажере машиниста может быть получена без тщательного выбора вышеупомянутых параметров. В задачи обучающей программы, какой является тренажер машиниста, в этом случае входит демонстрация того, что могло бы произойти при «таких-то» действиях машиниста по управлению поездом. Поэтому в этом случае можно задать средние величины параметров при наихудшем их сочетании.

Научная новизна и практическая значимость

В данном исследовании приведена методика определения коэффициента запаса устойчивости от выжимания продольными силами, несколько отличающаяся от приведенной в [1, 8], а также оценивается влияние на этот коэффициент скорости движения подвижного состава, коэффициентов вертикальной и горизонтальной динамики, а также ветровой нагрузки на боковую поверхность кузова вагона. Разработанные предложения по уточнению существующих методик определения значения продольной сжимающей силы, действующей на вагон, при которой величина коэффициента запаса устойчивости от выжимания будет равна допустимому значению, позволят оценивать устойчивость каждого вагона поезда от выжимания непосредственно во время моделирова-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ния его движения. Наиболее эффективно использовать эту методику в тренажерах, предназначенных для обучения машинистов безопасным способам вождения поездов.

Результаты исследований нашли свое научное использование в ряде публикаций авторов в специальных и научных изданиях, выступлениях на научных конференциях.

Выводы

В результате аналитических исследований получены зависимости продольной сжимающей силы, действующей на вагон с учетом скорости его движения, коэффициентов вертикальной и горизонтальной динамики, ветровой нагрузки на боковую поверхность кузова.

Таким образом, полученные результаты расчетов позволяют объективно оценить влияние перечисленных выше параметров на величину продольной сжимающей силы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Вершинский, С. В. Динамика вагонов / С. В. Вершинский, В. И. Данилов, И. И. Челноков. – Москва : Транспорт, 1991. – 360 с.
2. Гарг, В. К. Динамика подвижного состава / В. К. Гарг, Р. В. Дуккипати ; [пер. с англ. К. Г. Бомштейна] ; под ред. Н. А. Панькина. – Москва : Транспорт, 1988. – 392 с.
3. Грузовые вагоны колеи 1520 мм железных дорог СССР : альбом. – Москва : Транспорт, 1982. – 111 с.
4. Грузовые вагоны колеи 1520 мм железных дорог СССР : альбом-справочник / М-во путей сообщ. СССР, Гл. упр. вагон. хоз-ва. – Москва : Транспорт, 1989. – 175 с.
5. К вопросу определения коэффициента запаса устойчивости от выжимания легковесных вагонов / А. А. Шве́ц, К. И. Железнов, А. С. Акулов [и др.] // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 134–148. doi: 10.15802/stp2015/57098.
6. Некоторые аспекты определения устойчивости порожних вагонов от выжимания их продольными силами в грузовых поездах / А. А. Шве́ц, К. И. Железнов, А. С. Акулов [и др.] // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – С. 175–189. doi: 10.15802/stp2015/49281.
7. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ВНИИВ ; ВНИИЖТ, 1983. – 260 с.
8. Пат. 87837 Україна. МПК G 09 B 9/04 (20.06.01). Тренажер для навчання машиніста магістрального локомотива / Железнов К. І., Акулов А. С., Євдомах Г. В., Заболотний О. М., Чабанюк Є. В., Шве́ц А. О. (Україна) ; заявник та патентовласник Дніпро-петр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № u 2013 09075 ; заявл. 19.07.13 ; опубл. 25.02.14. Бюл. № 4. – 2 с.
9. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 54184 (Україна). Комп'ютерна програма «Обучение вождению поездов машинистов магистральных локомотивов» / Железнов К. І., Акулов А. С., Євдомах Г. В., Заболотний О. М., Чабанюк Є. В., Шве́ц А. О. (Україна) ; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – заявл. 20.03.14.
10. Татуревич, А. А. Теоретические исследования устойчивости подвижного состава против схода от вкатывания гребня колеса на рельс / А. А. Татуревич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 2. – С. 133–137.
11. Anyakwo, A. A New Method for Modelling and Simulation of the Dynamic Behaviour of the Wheel-rail Contact / A. Anyakwo, C. Pislaru, A. Ball // Intern. J. of Automation and Computing. – 2012. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 237–247. doi: 10.1007/s11633-012-0640-6.
12. Marquis, B. Application of Nadal limit in the prediction of wheel climb derailment (JRC2011-56064) / B. Marquis, R. Greif // Proc. of the ASME/ASCE/IEEE. 2011 Joint Rail Conf. (16.03.–18.03.2011). – Pueblo, Colorado, USA, 2011. – P. 1–8. doi: 10.1115/jrc2011-56064.
13. Transit cooperative research program : Annual Report of Progress. – Washington : Transportation Research Board, 2014. – 112 p.
14. Track-Related Research. Vol. 5. Flange Climb Derailment Criteria and Wheel/Rail Profile Management and Maintenance Guidelines for Transit Operations. Transit cooperative research program Report 71. – Washington, 2005. – 147 p.
15. Trzaska, Z. Modeling of Energy Processes in Wheel-Rail Contacts Operating under Influence of Periodic Discontinuous Forces / Z. Trzaska // J. of Transportation Technologies. – 2012. – Vol. 2. – P. 129–143. doi: 10.4236/jtts.2012.22014.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

А. О. ШВЕЦЬ^{1*}, К. І. ЖЕЛЄЗНОВ^{2*}, А. С. АКУЛОВ^{3*}, О. М. ЗАБОЛОТНИЙ^{4*},
Є. В. ЧАБАНЮК^{5*}

^{1*}СКТБ МСУБ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, ел. пошта angela_shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

^{2*}СКТБ МСУБ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (095) 545 38 87, ел. пошта constantinz@i.ua, ORCID 0000-0003-3648-1769

^{3*}СКТБ МСУБ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (067) 178 16 90, ел. пошта asakulov@gmail.com, ORCID 0000-0002-6123-5431

^{4*}СКТБ МСУБ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (067) 282 13 41, ел. пошта zabolotnyi@i.ua, ORCID 0000-0003-1651-7082

^{5*}СКТБ МСУБ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (066) 633 55 95, ел. пошта 457m@ukr.net, ORCID 0000-0001-5695-5955

ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМИХ СИЛ ПРИ ОЦІНЮВАННІ СТІЙКОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ВІД ВИЧАВЛЮВАННЯ В ПОЇЗДАХ

Мета. В аналітичному дослідженні розглядаються: 1) зв'язок між поздовжньою силою, що діє на вагон у складі поїзда; 2) бічні та вертикальні сили взаємодії у зоні контакту колеса й рейки; 3) динамічні показники вагонів із величиною коефіцієнта запасу стійкості від вичавлювання; 4) отримання залежностей між ними. **Методика.** Дослідження проводилося аналітичним методом оцінки стійкості вантажного вагона при русі з різними швидкостями по прямих та кривих ділянках колії. **Результати.** У процесі дослідження руху поїзда, при розслідуванні транспортних подій, а також під час виконання навчального завдання на тренажері машиніста для оцінки його дій використовуються величини поздовжніх сил у міжвагонних з'єднаннях. Отримано вираз для обчислення значення поздовжньої стискаючої сили, діючої на вагон, при якій величина коефіцієнта запасу стійкості від вичавлювання дорівнюватиме допустимому значенню (критична сила). Для оцінки впливу на величину поздовжньої сили швидкості руху, коефіцієнтів вертикальної та горизонтальної динаміки, а також вітрового навантаження на бічну поверхню кузова вагона наведено результати розрахунків руху порожнього піввагона моделі № 12-532 по кривій радіусом 250 м із піднесенням 150 мм й поперечним розбігом рами кузова вагона щодо осі шляху в спрямовуючому перетині в 50 мм. **Наукова новизна.** У даному дослідженні наведено методику визначення поздовжньої стискаючої сили, яка дещо різниться від загальноприйнятої. Також оцінюється вплив на неї швидкості руху рухомого складу, коефіцієнтів вертикальної та горизонтальної динаміки й вітрового навантаження на бічну поверхню кузова вагона. **Практична значимість.** Авторами розроблено пропозиції щодо уточнення існуючих методик визначення значення поздовжньої стискаючої сили, діючої на вагон, при якій величина коефіцієнта запасу стійкості від вичавлювання дорівнюватиме допустимому значенню. Це дозволить оцінювати стійкість кожного вагона поїзда від вичавлювання безпосередньо під час моделювання його руху. Найбільш ефективно використовувати цю методику можна в тренажерах, призначених для навчання машиністів безпечним способом водіння поїздів, та при розслідуванні причин сходу вагонів.

Ключові слова: безпека руху; вітрове навантаження; бічна поверхня кузова; норми розрахунку; стійкість вагонів від вичавлювання; швидкість руху; коефіцієнт стійкості; поздовжня стискаюча сила

А. О. SHVETS^{1*}, К. І. ZHELIEZNOV^{2*}, А. С. AKULOV^{3*}, О. М. ZABOLOTNYI^{4*},
Е. В. CHABANIUK^{5*}

^{1*}EDSD MBCSS, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 214 14 19, e-mail angela_shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

^{2*}EDSD MBCSS, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 545 38 87, e-mail constantinz@i.ua, ORCID 0000-0003-3648-1769

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

^{3*}EDSD MBCSS, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 178 16 90, e-mail asakulov@gmail.com, ORCID 0000-0002-6123-5431

^{4*}EDSD MBCSS, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 282 13 41, e-mail zabolotnyi@i.ua, ORCID 0000-0003-1651-7082

^{5*}EDSD MBCSS, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 633 55 95, e-mail 457m@ukr.net, ORCID 0000-0001-5695-5955

DETERMINATION THE PERMISSIBLE FORCES IN ASSESSING THE LIFT RESISTANT FACTOR OF FREIGHT CARS IN TRAINS

Purpose. In the analytical research are considered: 1) relationships between the longitudinal force acting on the car in the train; 2) lateral and vertical forces of interaction in the contact zone «wheel – rail»; 3) dynamic indicators of cars with the magnitude of the car lift resistance factor; 4) obtaining of the dependencies between them. **Methodology.** The study was conducted by an analytical method assessing the sustainability of the freight car when driving at different speeds on the straight and curved track sections. **Findings.** In the process of studying the motion of the train, in the investigation of transport events, as well as during the training on the simulator operator, to assess the actions of the driver, the values of the longitudinal forces in the inter car connections are used. To calculate the longitudinal compressive forces, acting on the car, in which car lift resistance factor will be equal to the allowable value (critical force). To assess the impact on the value of the longitudinal force speed, coefficients of the vertical and horizontal dynamics, as well as the wind load on the side surface of the car body are the results of calculations of motion of the empty gondola car, model № 12-532 curve radius of 250 m with a rise of 150 mm and a transverse run of body of car frame relative to the track axis of the guide section 50 mm. **Originality.** In this study, the technique of determining the longitudinal compressive force was shown, that is somewhat different from the standard. So, as well as assessing the impact on it the speed of rolling coefficients of vertical and horizontal dynamics and wind load on the side surface of the car body. **Practical value.** The authors developed proposals on the enhancement of existing methods for determining the value of the longitudinal compressive forces acting on the car in which the safety value of the car lift resistance factor will be equal to the allowable value. It will evaluate the stability of each train car lift resistance factor directly during the simulation of its movement. The most effective use of this technique in the simulator designed to teach the drivers a safe way of driving trains and in the investigation of the causes of cars derailment.

Keywords: safety; wind loading; lateral surface of the body; rules for calculation; car lift resistance factor; speed; stability factor; longitudinal compressive force

REFERENCES

1. Vershinskiy S.V., Danilov V.I., Chelnokov I.I. *Dinamika vagonov* [Dynamics of cars]. Moscow, Transport Publ. 360 p.
2. Garg V.K., Dukkipati R.V., Bomshteyn K.G., Pankin N.A. *Dinamika podvizhnogo sostava* [Dynamics of rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1988. 392 p.
3. *Gruzovyye vagonny kolei 1520 mm zheleznykh dorog SSSR* [Freight cars of 1520 mm gauge railways of the USSR]. Moscow, Transport Publ., 1982. 111 p.
4. *Gruzovyye vagonny kolei 1520 mm zheleznykh dorog SSSR* [Freight cars of 1520 mm gauge railways of the USSR]. Moscow, Transport Publ., 1989. 175 p.
5. Shvyets A.A., Zhyelyeznov K.I., Akulov A.S., Zabolotnyy A.N., Chabanyuk Ye.V. K voprosu opredeleniya koeffitsienta zapasa ustoychivosti ot vyzhimaniya legkovesnykh vagonov [Determination of the issue concerning the lift resistance factor of lightweight car]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 6 (60), pp. 134–148. doi: 10.15802/stp2015/57098.
6. Shvyets A.A., Zhyelyeznov K.I., Akulov A.S., Zabolotnyy A.N., Chabanyuk Ye.V. Nekotoryye aspekty opredeleniya ustoychivosti porozhnykh vagonov ot vyzhimaniya ikh prodolnymi silami v gruzovykh poyezdakh [Some aspects of the definition of empty cars stability from squeezing their longitudinal forces in the freight train]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 4 (58), pp. 175–189. doi: 10.15802/stp2015/49281.
7. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya novykh i moderniziruemyykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Norms for calculation and design of new and modernized cars of Ministry of Railways of 1520 mm (not self-propelled)]. Moscow, VNIIV-VNIIZhT Publ., 1983. 260 p.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. Zheleznov K.I., Akulov A.S., Yevdomakha H.V., Zabolotnyi O.M., Chabaniuk Ye.V., Shvets A.O. *Trenazher dlia navchannia mashynista mahistralnoho lokomotyva* [Simulator for training the operator of the main locomotive]. Patent UA, no. u 2013 09075. 2013.
9. Zheleznov K.I., Akulov A.S., Yevdomakha H.V., Zabolotnyi O.M., Chabaniuk Ye.V., Shvets A.O. Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir No. 54184 Ukraina. Kompiuterna prohrama «Obuchenije vozhdniyu poyezdov mashinistov magistralnykh lokomotivov» [Computer program «Learning to drive trains of drivers in mainline locomotives»]. Certificate UA, no. 54184, 2014.
10. Taturevich A.A. Teoreticheskiye issledovaniya ustoychivosti podvizhnogo sostava protiv skhoda ot vkatyvaniya grebnya kolesa na rels [Theoretical studies of stability of rolling stock against derailment from the racking of the wheel flange on the rail]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2003, issue 2, pp. 133-137.
11. Anyakwo A., Pislaru C., Ball A. A New Method for Modelling and Simulation of the Dynamic Behaviour of the Wheel-rail Contact. *Intern. Journal of Automation and Computing*, 2012, vol. 9, issue 3, pp. 237-247. doi: 10.1007/s11633-012-0640-6.
12. Marquis B., Greif R. Application of Nadal limit in the prediction of wheel climb derailment (JRC2011-56064). Proc. of the ASME/ASCE/IEEE. 2011 Joint Rail Conf. (16.03.–18.03.2011). Pueblo, Colorado, USA, 2011, pp. 1-8. doi: 10.1115/jrc2011-56064.
13. Transit cooperative research program. Annual Report of Progress. Washington, Transportation Research Board Publ., 2014. 112 p.
14. Track-Related Research Volume 5. Flange Climb Derailment Criteria and Wheel/Rail Profile Management and Maintenance Guidelines for Transit Operations. Transit cooperative research program Report 71, 2005, 147 p.
15. Trzaska Z. Modeling of Energy Processes in Wheel-Rail Contacts Operating under Influence of Periodic Discontinuous Forces. *Journal of Transportation Technologies*, 2012, vol. 2, pp. 129-143. doi: 10.4236/jtts.2012.22014.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. С. В. Мямлиным (Украина); д.т.н., ст. научн. сотр. Н. А. Радченко (Украина); к.т.н. наук., ст. научн. сотр. Н. М. Хачапуридзе (Украина)

Поступила в редколлегию: 05.12.2015

Принята к печати: 15.02.2016

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 691.3:669.431.6

В. И. БОЛЬШАКОВ¹, М. А. ЕЛИСЕЕВА^{2*}, С. А. ЩЕРБАК³

¹Каф. «Материаловедение и обработка металлов», Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24 а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. - 5: +(056) 745 23 72, эл. почта bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0790-6473

^{2*}Каф. «Реконструкция и управление в строительстве», Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24 а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (096) 377 01 36, эл. почта SMU.TGO@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4474-3255

³Каф. «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24 а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (095) 243 32 09, эл. почта aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0346-4436

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ И ОСНОВНЫМИ СВОЙСТВАМИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ

Цель. В статье необходимо провести установление закономерностей влияния состава мелкозернистых бетонов, получаемых на основе доменных гранулированных шлаков, и продолжительности обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе на основные свойства материала. **Методика.** Для достижения поставленной цели в работе использован полнофакторный эксперимент типа 2^2 . В качестве переменных были приняты: соотношение между цементом и доменным гранулированным шлаком (X_1) и продолжительность обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе (X_2). Выходными факторами, т.е. контролируемыми свойствами, были: ранняя прочность в 7-суточном возрасте ($Y_1=f_{7\text{ сут}}$), стандартная прочность в 28-суточном возрасте ($Y_2=f_{28\text{ сут}}$) и средняя плотность бетона ($Y_3=\rho$), твердеющего в нормальных условиях. **Результаты.** Анализ полученных моделей регрессии свидетельствует о том, что с уменьшением содержания заполнителя в составе бетона и повышением продолжительности обработки смеси в смесителе-активаторе прочность в разные сроки твердения и плотность бетона возрастают. При этом большее влияние на свойства бетона имеет изменение состава смеси. Так, при одинаковом времени обработки смеси прочность бетона в возрасте 28 суток понижается примерно на 30 % между составом 1:3 и 1:4; на 22 % – между составом 1:4 и 1:5; на 13 % – между составом 1:5 и 1:6. Та же закономерность прослеживается и для ранней прочности бетона. Плотность бетона мало изменяется, ее кривая расположена практически в одной плоскости. Так, при равной продолжительности обработки смеси различие значений плотности для состава 1:3 и 1:9 составляет 7,6 %. Увеличение времени обработки смеси на 6 с во всем исследуемом диапазоне дает прирост прочности в 28-суточном возрасте примерно на 7–8 % для всех составов. Значение ранней прочности изменяется на 12–14 % между смесью, обработанной за 30 и 36 с. Затем на каждое последующее увеличение продолжительности обработки на 6 с это различие снижается на 1 % для всех составов. Изменение плотности бетона при варьировании времени обработки смеси фактически не изменяется и составляет 1–2 % при интервале в 6 с во всем исследуемом диапазоне для всех составов. **Научная новизна.** Впервые определены уравнения регрессии, связывающие продолжительность активации мелкозернистой бетонной смеси и ее состав с основными свойствами бетона. **Практическая значимость.** Получены уравнения регрессии и графические поверхности, по которым можно определить показатели технологических факторов, которые

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

обеспечивают получение заданной ранней, стандартной прочности и средней плотности механоактивированного мелкозернистого бетона.

Ключевые слова: механоактивированные мелкозернистые бетоны; доменные гранулированные шлаки; технологические факторы; ранняя прочность бетона; стандартная прочность бетона; средняя плотность бетона

Введение

С каждым годом вопросы ресурсосбережения и снижения материалоемкости в отрасли производства бетонов становятся все острее и актуальнее. Этого можно достигнуть путем вовлечения вторичных материальных ресурсов в качестве основного сырья, изготавливаемых строительных материалов и изделий, а также проведения специальных технологических операций, способствующих полному раскрытию и проявлению потенциальных возможностей использующихся исходных веществ, что позволит сократить их расход. Так, по нашему мнению, при производстве мелкозернистых бетонов в качестве основного сырья целесообразно применять доменные гранулированные шлаки, образующиеся в результате охлаждения побочных продуктов металлургической промышленности – огненно-жидких шлаков. А для повышения его химической активности и улучшения ряда других свойств, а также полного использования реакционной возможности цемента и исключения в составе новообразований бетона зерен непрогидратировавших клинкерных минералов проводить механоактивацию компонентов мелкозернистой бетонной смеси в смесителе-активаторе роторного типа. Технические характеристики и принцип действия данной установки раскрыты нами в работах [2; 10]. Это позволяет отказаться от природного ископаемого песка и снизить расход цемента в составе бетона при сохранении его эксплуатационных характеристик.

Проблеме эффективного использования доменных гранулированных шлаков с учетом структурных и прочих особенностей данного сырья посвящено множество работ и украинских, российских ученых [4; 5; 6; 7; 9; 11; 12], и авторов дальнего зарубежья [13–16]. Имея сходный химический состав (основные окислы CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO) с традиционными строительными материалами – песком, цементом и др. доменный гранулированный шлак является дешевым и эффективным их заменителем. Так, в работах [5; 6; 7] ученые часть

мелкого заполнителя песка в составе легких бетонов для подстилающего слоя полов рекомендуют заменить на доменный гранулированный шлак в определенном их соотношении, обеспечивающем рациональный зерновой состав компонентов бетона. В [14] авторы предлагают составы бетонов, содержащих природные и промышленные минеральные добавки (туф, доменный гранулированный шлак, золу-унос), которые заменяют часть цемента.

Цель

Установление закономерностей влияния состава мелкозернистых бетонов, получаемых на основе доменных гранулированных шлаков и продолжительности обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе, на основные свойства материала.

Методика

Для достижения поставленной цели в работе использован полнофакторный эксперимент типа 2^2 . В качестве переменных были приняты: соотношение между цементом и доменным гранулированным шлаком (X_1) и продолжительность обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе (X_2). Выходными факторами, то есть контролируемыми свойствами, были приняты ранняя прочность в 7-суточном возрасте ($Y_1=f_{7\text{сут}}$), стандартная прочность в 28-суточном возрасте ($Y_2=f_{28\text{сут}}$) и средняя плотность бетона ($Y_3=\rho$), твердевшего в нормальных условиях.

Результаты

При разработке новых составов бетонов, технологии изготовления которых отличаются от общепринятых традиционных, важно установить взаимосвязь между технологическими факторами и основными свойствами изготавливаемого материала. Это позволит получать бетон необходимого качества с заданными ранней, стандартной прочностью и средней плотностью при минимальной его себестоимости

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

через регулирование определенных значений технологических факторов.

Для этого использовался полнофакторный эксперимент типа 2^2 . При проведении исследований применялись литературные данные следующих авторов: В. А. Вознесенского, Т. В. Ляшенко, Б. Л. Огаркова, Ю. М. Баженова и Н. М. Ершовой [1; 3; 8].

В качестве технологических факторов были приняты соотношения между цементом и доменным гранулированным шлаком (X_1) и продолжительность обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе (X_2). Выходными факторами, то есть контролируемыми свойствами, были: ранняя прочность в 7-суточном возрасте ($Y_1=f_{7\text{сут}}$), стандартная прочность в 28-суточном возрасте ($Y_2=f_{28\text{сут}}$) и средняя плотность бетона ($Y_3=\rho$), твердевшего в нормальных условиях. Условия планирования эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия планирования эксперимента

Table 1

Terms of experiment design

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Состав бетона Ц:Ш	X_1	1:3	1:6	1:9	1:3
Продолжительность обработки, с	X_2	30	45	60	15

Матрица планирования эксперимента и результаты испытаний образцов представлены в табл. 2.

На основании экспериментальных данных, по формулам работ [3; 8], рассчитаны значения коэффициентов уравнений регрессии. Результаты сведены в табл. 3.

Вычисленные значения доверительного интервала для коэффициентов уравнений регрес-

сии $f_{7\text{сут}}$, $f_{28\text{сут}}$ и ρ равны 0,8682; 1,991 и 128 соответственно. Коэффициенты уравнений регрессии, абсолютные значения которых были меньше значения доверительного интервала, признавались незначимыми и вместе с соответствующими им членами уравнения исключались из него согласно [1; 3; 8].

После уточнения получены следующие уравнения регрессии, которые характеризуют взаимосвязь между параметрами оптимизации и технологическими факторами:

– ранняя прочность бетона в 7-суточном возрасте

$$f_{7\text{сут}} = 11,42 - 8,33 \cdot X_1 + 2,93 \cdot X_2 - 1,82 \cdot X_1 \cdot X_2;$$

– стандартная прочность бетона в 28-суточном возрасте

$$f_{28\text{сут}} = 20,1075 - 12,2175 \cdot X_1 + 3,4925 \cdot X_2;$$

– средняя плотность бетона

$$\rho = 1919,5 - 105,5 \cdot X_1 + 61,5 \cdot X_2.$$

Расчетные значения критерия Фишера для $f_{7\text{сут}}$, $f_{28\text{сут}}$ и ρ равны 0; 2,5036 и 0,732 соответственно, что меньше табличных данных (6,39; 6,59 и 6,59), а значит, уравнения регрессии адекватно описывают результаты эксперимента. Анализ полученных моделей регрессии свидетельствует о том, что наибольшее влияние на исследуемые характеристики бетона имеет соотношение вяжущего и заполнителя в составе бетонной смеси.

На основе полученных уравнений регрессии построены графические поверхности влияния состава бетона и продолжительности обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе на раннюю прочность в 7-суточном возрасте, стандартную прочность в 28-суточном возрасте и среднюю плотность бетона (рис. 1).

Результаты планирования свидетельствуют о том, что с уменьшением содержания заполнителя в составе бетона и повышением продолжительности обработки смеси в смесителе-активаторе, прочность в разные сроки твердения и плотность бетона возрастают. При этом большее влияние на свойства бетона имеет изменение состава смеси. Так, при одинаковом времени обработки смеси, прочность бетона в 28 суток понижается примерно на 30 % между составом 1:3 и 1:4, на 22 % между составом

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

1:4 и 1:5, на 13 % между составом 1:5 и 1:6. Как видно, существенная разница в прочности наблюдается у жирных смесей. С уменьшением содержания цемента в составе бетона значения прочности выравниваются, а кривая на рис. 1, б становится более пологой.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента и результаты испытаний образцов

Table 2

Matrix of experiment design and the results of samples tests

№ п/п	Исследуемые факторы		$f_{7 \text{ сут}}$ – ранняя прочность образцов бетона в 7-суточном возрасте, МПа		
	X_1	X_2	f_1	f_2	$f_{\text{ср.}}$
1	+1	-1	2,07	1,89	1,98
2	-1	+1	25,4	23,6	24,5
3	-1	-1	15,8	14,2	15
4	+1	+1	4,4	4,0	4,2

Окончание табл. 2

End of table 2

№ п/п	$f_{28 \text{ сут}}$ – стандартная прочность образцов бетона в 28-суточном возрасте, МПа			ρ – плотность образцов бетона, кг/м ³		
	f_1	f_2	$f_{\text{ср.}}$	ρ_1	ρ_2	$\rho_{\text{ср.}}$
1	6,69	6,03	6,36	1 825	1 745	1 785
2	39,83	35,73	37,78	2 132	2 106	2 119
3	28,54	25,2	26,87	1 963	1 899	1 931
4	9,91	8,93	9,42	1 907	1 779	1 843

Таблица 3

Коэффициенты уравнений регрессии

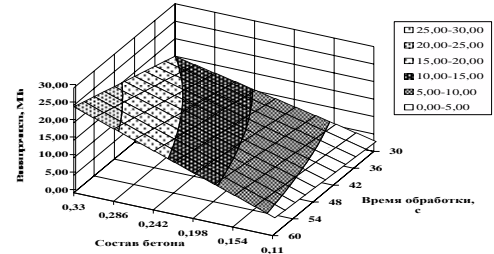
Table 3

Coefficients of regression equations

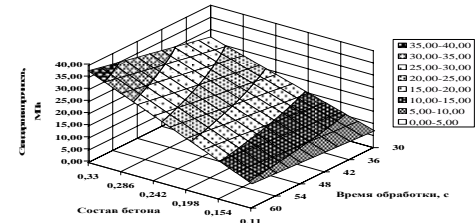
Параметр оптимизации	Коэффициенты уравнений регрессии	
	b_0	b_1
$f_{7 \text{ сут}}$	11,42	-8,33
$f_{28 \text{ сут}}$	20,1075	-12,2175
ρ	1919,5	-105,5
$f_{7 \text{ сут}}$	2,93	-1,82

$f_{28 \text{ сут}}$	3,4925	-1,96
ρ	61,5	-32,5

а–а



б–б



в–в

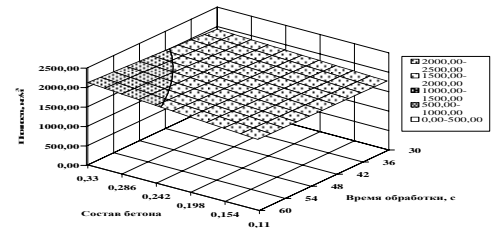


Рис. 1. Влияние состава бетона и продолжительности обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе на:
а – раннюю прочность в 7-суточном возрасте;
б – стандартную прочность в 28-суточном возрасте;
в – среднюю плотность бетона

Fig. 1. Effect of concrete mix and the processing time of concrete mix in the agitator mixer for:
а – early strength in 7-days of age; б – standard strength in 28 days of age;
с – the average density of concrete

Та же закономерность прослеживается и для ранней прочности бетона. Плотность бетона мало изменяется, ее кривая расположена практически в одной плоскости. Так, при равной продолжительности обработки смеси, различие значений плотности для состава 1:3 и 1:9 составляет 7,6 %. Увеличение времени обработки смеси на 6 с во всем исследуемом диапазоне дает прирост прочности в 28-суточном возрасте примерно на 7–8 % для всех составов. Значение ранней прочности изменяется на 12–14 % между смесью, обработанной 30 и 36 с. Затем на каждое последующее увеличение продолжи-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

тельности обработки на 6 с это различие снижается на 1 % для всех составов. Изменение плотности бетона при варьировании времени обработки смеси фактически не изменяется и составляет 1–2 % при интервале в 6 с во всем исследуемом диапазоне для всех составов.

Научная новизна и практическая значимость

Впервые определены уравнения регрессии, связывающие продолжительность активации мелкозернистой бетонной смеси и ее состав с основными свойствами бетона.

Практическая значимость. Получены уравнения регрессии и графические поверхности, по которым можно определить показатели технологических факторов, которые обеспечивают получение заданной ранней, стандартной прочности и средней плотности механоактивированного мелкозернистого бетона.

Выводы

В ходе проведенных исследований было определено влияние состава бетона и продолжительности обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе на раннюю, стандартную прочность и среднюю плотность бетона; получены уравнения регрессии, адекватно описывающие результаты эксперимента; построены графические поверхности влияния технологических факторов на исследуемые свойства материала. Анализ полученных моделей регрессии свидетельствует о том, что наибольшее влияние на исследуемые характеристики бетона имеет соотношение вяжущего и заполнителя в составе бетонной смеси. В зависимости от концентрации доменного гранулированного шлака в составе бетона можно получить изделия с классом прочности от С 5 до С 25 при средней плотности от 1 818 до 2 033 кг/м³.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баженов, Ю. М. Технология бетонов : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Ю. М. Баженов. – Москва : АСВ, 2002. – 500 с.
2. Большаков, В. И. Влияние высокоскоростной обработки доменных гранулированных шлаков на их свойства / В. И. Большаков, М. А. Елисеева, С. А. Щербак // Вісн. Придніпр. держ. акад. буд-ва та архіт. – Дніпропетровськ, 2013. – № 8. – С. 4–9.
3. Вознесенский, В. А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ : учебник / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, Б. Л. Огарков. – Київ : Вища шк., 1989. – 328 с.
4. Лужно-активовані шлакопортландцементи / П. В. Кривенко, О. М. Петропавловський, О. Г. Гелевера [та ін.] // Вісн. Донбас. нац. акад. буд-ва та архіт. – Донецьк, 2009. – № 1. – С. 123–131.
5. Нетеса, Н. И. Легкие бетоны на основе граншлака завода имени Петровского / Н. И. Нетеса, Д. В. Паланчук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 35. – С. 156–161.
6. Нетеса, Н. И. Легкие бетоны с золой уноса Приднепровской ТЭС / Н. И. Нетеса, Д. В. Паланчук, А. Н. Нетеса // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 5 (47). – С. 137–145. doi: 10.15802/stp2013/17978.
7. Нетеса, Н. И. Снижение пустотности бетонных смесей подбором рационального зернового состава компонентов / Н. И. Нетеса // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 15. – С. 200–204.
8. Обработка данных средствами Excel при планировании эксперимента : учеб. пособие для вузов / Н. М. Ершова, В. Н. Деревянко, Р. А. Тимченко, О. В. Шаповалова. – Днепропетровск : ПГАСА, 2012. – 350 с.
9. Пушкарьова, К. К. Особливості технології отримання лужного шлако-портландцементу та бетонів на його основі / К. К. Пушкарьова, О. А. Гончар, О. П. Бондаренко // Вісн. Донбас. нац. акад. буд-ва та архіт. – Донецьк, 2009. – № 1. – С. 82–88.
10. Усовершенствование технологии приготовления механоактивированных мелкозернистых бетонных смесей из доменных гранулированных шлаков / В. И. Большаков, М. А. Елисеева, О. С. Щербак [и др.] // Стр-во, материаловедение, машиностроение. Серия : Стародубовские чтения / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архит. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 67. – С. 224–228.
11. Федьнин, Н. И. Высокопрочный мелкозернистый шлакобетон / Н. И. Федьнин, М. И. Диамант. – Москва : Стройиздат, 1975. – 176 с.
12. Энерго- и ресурсосбережение при использовании техногенных материалов в технологии цемента / В. К. Классен, И. А. Шилова, Е. В. Текучева, В. В. Степанов // Строительные материалы. – 2007. – № 8. – С. 18–19.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

13. Li, C. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements / C. Li, H. Sun, L. Li // *Cement and Concrete Research*. – 2010. – Vol. 40. – Iss. 9. – P. 1341–1349. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020.
14. Maaitah, O. Utilization of natural and industrial mineral admixtures as cement substitutes for concrete production in Jordan / O. N. Maaitah, N. A. A. Hadi, M. Abdelhadi // *J. of Civil Engineering and Construction Technology*. – 2015. – Vol. 6 (4). – P. 51–58.
15. Mudersbach, D. Feingranulierter Hüttensand für die Zementherstellung / D. Mudersbach, M. Kühn, J. Geiseler // *Report des FehS-Instituts*. – 2001. – № 1. – P. 4–5.
16. Živica, V. Effectiveness of new silica fume alkali activator / V. Živica // *Cement and Concrete Composites*. – 2006. – Vol. 28. – Iss. 1. – P. 21–25. doi: 10.1016/j.cemcomcomp.2005.07.004.

В. І. БОЛЬШАКОВ¹, М. О. ЄЛИСЕЄВА^{2*}, С. А. ЩЕРБАК³

¹Каф. «Матеріалознавство та обробка матеріалів», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24 а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (056) 745 23 72, ел. пошта bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0790-6473

^{2*}Каф. «Реконструкція та управління в будівництві», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24 а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (096) 377 01 36, ел. пошта SMU.TGO@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4474-3255

³Каф. «Технологія будівельних матеріалів, виробів та конструкцій», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24 а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (095) 243 32 09, ел. пошта aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0346-4436

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІЖ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ФАКТОРАМИ ТА ОСНОВНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ МЕХАНОАКТИВОВАНИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ БЕТОНІВ

Мета. В статті необхідно провести встановлення закономірностей впливу складу дрібнозернистих бетонів, одержуваних на основі доменних гранульованих шлаків, та тривалості обробки бетонної суміші в змішувачі-активаторі на основні властивості матеріалу. **Методика.** Для досягнення поставленої мети в роботі використаний повнофакторний експеримент типу 2². В якості перемінних були прийняті: співвідношення між цементом і доменним гранульованим шлаком (X_1) та тривалість обробки бетонної суміші в змішувачі-активаторі (X_2). Вихідними факторами, тобто контрольованими властивостями, були: рання міцність в 7-добовому віці ($Y_1=f_7$ діб), стандартна міцність в 28-добовому віці ($Y_2=f_{28}$ діб) та середня щільність бетону ($Y_3=\rho$), який тверднув у нормальних умовах. **Результати.** Аналіз отриманих моделей регресії свідчить про те, що зі зменшенням вмісту заповнювача в складі бетону й підвищенням тривалості обробки суміші в змішувачі-активаторі, міцність у різний термін твердіння та щільність бетону зростають. При цьому більший вплив на властивості бетону має змінення складу суміші. Так, при однаковому терміні обробки суміші міцність бетону у віці 28 діб знижується приблизно на 30 % між складом 1:3 та 1:4; на 22 % – між складом 1:4 та 1:5; на 13 % – між складом 1:5 та 1:6. Та ж закономірність простежується і для ранньої міцності бетону. Щільність бетону мало змінюється, її крива розташована практично в одній площині. Так, при рівній тривалості обробки суміші розходження значень щільності для складу 1:3 та 1:9 становить 7,6 %. Збільшення часу обробки суміші на 6 с на всьому досліджуваному діапазоні дає приріст міцності в 28-добовому віці приблизно на 7–8 % для всіх складів. Значення ранньої міцності змінюється на 12–14 % між сумішшю, обробленою за 30 та 36 с. Потім при кожному наступному збільшенні тривалості обробки на 6 с це розходження знижується на 1 % для всіх складів. Зміна щільності бетону при варіюванні терміну обробки суміші фактично не змінюється та становить 1–2 % при інтервалі в 6 с на всьому досліджуваному діапазоні для всіх складів. **Наукова новизна.** Вперше визначені рівняння регресії, що пов'язують тривалість активації дрібнозернистої бетонної суміші та її склад із основними властивостями бетону. **Практична значимість.** Отримано рівняння регресії та графічні поверхні, за якими можливо визначити показники технологічних факторів, які забезпечують одержання заданої ранньої, стандартної міцності та середньої щільності механоактивованого дрібнозернистого бетону.

Ключові слова: механоактивовані дрібнозернисті бетони; доменні гранульовані шлаки; технологічні фактори; рання міцність бетону; стандартна міцність бетону; середня щільність бетону

V. I. BOLSHAKOV¹, M. O. YELISIEIEVA^{2*}, S. A. SHCHERBAK³¹Dep. «Materials Science», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskyi St., 24 a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. + 38 (056) 745 23 72, e-mail bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0790-6473^{2*}Dep. «Reconstruction and Management in Construction», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskyi St., 24 a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (096) 377 01 36, e-mail SMU.TGO@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4474-3255³Dep. «Building Materials, Products and Structures Technology», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskyi St., 24 a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (095) 243 32 09, e-mail aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0346-4436

CORRELATION BETWEEN TECHNOLOGICAL FACTORS AND BASIC PROPERTIES OF MECHANICALLY ACTIVATED FINE CONCRETES

Purpose. The article highlights research of the influence of fine concrete composition based on blast-furnace slag on general material properties. Time of the concrete treatment in the mixer activator is included to the influence research. **Methodology.** There was realized full factor experiment of 2^2 type with following variables: cement versus blast-furnace granulated slag ratio (X_1) and time of the treatment in the mixer-activator (X_2). Controlled properties are: early concrete strength ($Y_1=f_{7 \text{ day}}$), normal concrete strength ($Y_2=f_{28 \text{ day}}$) and average density of the concrete ($Y_3=\rho$), hardened in normal conditions. **Findings.** Regress model analysis showed that decrease of the aggregate volume in concrete and increase of the mixing time grows up the strength and density of concrete. Different composition of the concrete also significantly affects concrete properties. Thus, for the same treatment time normal concrete strength at 28-day-old reduces by about 30% for compositions proportions 1:3 and 1:4, by 22% between a 1:4 and 1:5 and by 13% for 1:5 and 1:6 cases. The same behavior is obtained for early concrete strength. Density of concrete is not influenced and influence curve is almost flat. The difference between density values for different composition proportions 1:3 and 1:9 is 7.6% at equal mixture time. The increment of mixture processing time of 6 s increase normal concrete strength at 28-day-old about 7-8 % for all compositions in the studied range. Early strength values differ by 12-14 % between treatment time 30 and 36 seconds respectively. Every next six second increase step in treatment time reduce this difference by 1% for every mix compositions. There is practically no change of concrete density during the mixture time varying. Total change is 1-2% for 6 s in the entire research range for all compositions. **Originality.** For the first time the regression equations were determined, linking the duration of the activation of fine-grained concrete mix and its composition with the basic properties of concrete. **Practical value.** Regression equations and graphical surface can provide required concrete composition for the established early and normal concrete strength as well as concrete density.

Keywords: mechanically activated fine concretes; granulated blast-furnace slags; technological factors; early concrete strength; normal concrete strength; the average density of the concrete

REFERENCES

1. Bazhenov Yu. M. *Tekhnologiya betonov* [Concretes technology]. Moscow, ASV Publ., 2002. 500 p.
2. Bolshakov V.I., Yelisieieva M.A., Shcherbak S.A. Vliyaniye vysokoskorostnoy obrabotki domennykh granulirovannykh shlakov na ikh svoystva [Influence of high-speed processing of blast-furnace granulated slag on its properties]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture], 2013, issue 8, pp. 4-9.
3. Voznesenskiy V.A., Lyashenko T.V., Ogarkov B.L. *Chislennyye metody resheniya stroitelno-tekhnologicheskikh zadach na EVM* [Numerical methods for the construction and technological problems on a computer]. Kyiv, Vyshcha Shkola Publ., 1989. 328 p.
4. Kryvenko P.V., Petropavlovskiy O.M., Helevera O.H., Vozniuk H.V., Pushkar V.I., Hots V.I., Tymoshenko S.A. Luzhno-aktyvovani shlakoportlandtsementy [Alkali-activated slag portland cements]. *Visnyk Donbaskoi natsionalnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture], 2009, issue 1, pp. 123-131.
5. Netesa N.I., Palanchuk D.V. Legkiyye betony na osnove granshlaka zavoda imeni Petrovskogo [Lightweight concretes on the basis of granulated slag from the iron and steel plant named after Petrovskiy]. *Visnyk Dni-*

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- propetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 33, pp. 156-161.
6. Netesa N.I., Palanchuk D.V., Netesa A.N. Legkiyye betony s zoloy unosa Pridneprovskoy TES [Lightweight concretes with fly-ash of Prydniprovsk thermal power station]. *Nauka ta prohres transport – Science and Transport Progress*, 2013, issue 5, pp. 137-145. doi: 10.15802/stp2013/17978.
 7. Netesa N.I. Snizheniye pustotnosti betonnykh smesey podborom ratsionalnogo zernovogo sostava komponentov [Reduction of concrete voidness mixes of rational selection of the grain components]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 15, pp. 200-204.
 8. Yershova N.M., Derevyanko V.N., Timchenko R.A., Shapovalova O.V. *Obrabotka dannykh sredstvami Exsel pri planirovanii eksperimenta* [Data processing means Exsel when planning experiments]. Dnepropetrovsk, PSACEA Publ., 2012. 350 p.
 9. Pushkarova K.K., Honchar O.A., Bondarenko O.P. Osoblyvosti tekhnolohii otrymannia luzhnoho shlakoportlandtsementu ta betoniv na yikh osnovi [Technology features of alkali slag portland cement and concretes on its basis]. *Visnyk Donbaskoi natsionalnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture], 2009, issue 1, pp. 82-88.
 10. Bolshakov V.I., Yeliseyeva M.A., Shcherbak O.S., Shcherbak S.A., Yakovenko D.D. Uovershenstvovaniye tekhnologii prigotovleniya mekhanoaktivirovannykh melkozernistykh betonnykh smesey iz domennykh granulirovannykh shlakov [Improving the technology of preparation mechanically activated fine concrete mixtures of granulated blast-furnace slags]. *Stroitelstvo, materilovedeniye, mashynostroyeniye* [Construction, Materials, Mechanical Engineering], 2013, issue 67, pp. 224-228.
 11. Fedynin N.I., Diamant M.I. *Vysokoprochnyy melkozernisty shlakobeton* [High-strength fine slag concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975. 176 p.
 12. Klassen V.K., Shilova I.A., Tekucheva Ye.V., Stepanov V.V. Energo- i resursosberezheniye pri ispolzovanii tekhnogennykh materialov v tekhnologii tsementa [Energy-saving by using man-made materials in cement technology]. *Stroitelnyye materialy – Building Materials*, 2007, no. 8, pp. 18-19.
 13. Li Chao, Sun Henghu, Li Longtu. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and meta-kaolin (Si+Al) cements. *Cement and Concrete Research*, 2010, vol. 40, pp. 1341–1349. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020.
 14. Maaitah O.V., Hadi N.A.A., Abdelhadi M. Utilization of natural and industrial mineral admixtures as cement substitutes for concrete production in Jordan. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 2015, vol. 6(4), pp. 51–58.
 15. Mudersbach D., Kühn M., Geiseler J. Feingranulierter Hüttensand für die Zementherstellung. *Report des FehS-Instituts*, 2001, no. 1, pp. 4 – 5.
 16. Živica V. Effectiveness of new silica fume alkali activator. *Cement and Concrete Composites*, 2006, vol. 28, no. 1, pp. 21–25. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2005.07.004.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Н. И. Нетесой (Украина); д.т.н., проф. Н. В. Шпирько (Украина)

Поступила в редколлегию: 06.08.2015

Принята к печати: 05.01.2016

ЗМІСТ

ЮВІЛЯРИ

80 РОКІВ ШАФРАНУ ЛЕОНІДУ МОІСЕСВИЧУ	7
---	---

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

В. І. ГАВРИЛЮК, О. М. ВОЗНЯК, В. В. МЕЛЕШКО

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ПОЇЗДА НА ДІЛЯНЦІ НАБЛИЖЕННЯ ДО ПЕРЕЇЗДУ	9
--	---

А. Ю. ЖУРАВЛЬОВ

ПРО МЕТОД РОЗРАХУНКУ РЕЙКОВИХ КІЛ ІЗ УРАХУВАННЯМ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЕРОМАГНЕТИКІВ В УМОВАХ ВПЛИВУ ЗАВАД ТЯГОВОГО СТРУМУ	19
---	----

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

М. М. БІЛЯЄВ, Л. Я. МУНТЯН

ЕКСПРЕС-МЕТОД ОЦІНКИ ПОТЕНЦІЙНОГО ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РИЗИКУ ПРИ АВАРІЯХ НА ТРАНСПОРТІ	30
---	----

М. М. БІЛЯЄВ, С. Г. ЦІГАНКОВА

CFD МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОІОННОГО РЕЖИМУ В РОБОЧИХ ЗОНАХ В УМОВАХ ШТУЧНОЇ ІОНІЗАЦІЇ ПОВІТРЯ	39
--	----

О. В. БЕРЛОВ

ЗАХИСТ АТМОСФЕРИ У ВИПАДКУ АВАРІЇ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ	48
---	----

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

Л. В. МАРЦЕНЮК

НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ЕКСТРЕМАЛЬНОГО ТУРИЗМУ В УКРАЇНІ	55
--	----

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В. М. БУБНОВ, І. Ю. КЕБАЛ, М. Б. МАНКЕВИЧ

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТА СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ	62
--	----

Д. М. КИСЛИЙ

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЗАОЩАДЖУЮЧИХ РЕЖИМІВ ВЕДЕННЯ ПОЇЗДІВ	71
---	----

Г. І. НЕСТЕРЕНКО, М. І. МУЗИКІН, В. Л. ГОРОБЕЦЬ, С. І. МУЗИКІНА

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ВАГОНОПОТОКІВ ПО ПРИБУТТІ ТА ВІДПРАВЛЕННІ СОРТУВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ Х	85
---	----

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Д. М. КУРГАН

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ	100
--	-----

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

В. І. ШИНКАРЕНКО, Г. В. ЗАБУЛА

КОНСТРУКТИВНА МОДЕЛЬ АДАПТАЦІЇ СТРУКТУР ДАНИХ В ОПЕРАТИВНІЙ ПАМ'ЯТІ: ЧАСТИНА І. КОНСТРУЮВАННЯ ТЕКСТІВ ПРОГРАМ	109
--	-----

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

В. В. НЕТРЕБКО

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ВИСОКОХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ НА ОБРОБЛЮВАНІСТЬ РІЗАННЯМ	122
--	-----

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

В. М. БОГОМАЗ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОТУЖНОСТІ ПРИВОДУ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА
ВІД ЙОГО ПРОЕКТНИХ ПАРАМЕТРІВ 131

В. С. ЛОВЕЙКІН, Ю. В. ЧОВНЮК, А. П. ЛЯШКО

ОСОБЛИВОСТІ КОЛИВАНЬ ПРИВОДНИХ МЕХАНІЗМІВ РОТОРІВ..... 147

В. В. СУГЛОБОВ, С. В. РАКША, П. А. ГРИНЬКО

ОБГРУНТУВАННЯ ЦЕНТРУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ
БАРАБАНІВ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ 158

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Л. А. МУРАДЯН, В. Ю. ШАПОШНИК, А. А. МИЩЕНКО

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
НЕСАМОХІДНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ 169

А. О. ШВЕЦЬ, К. І. ЖЕЛІЗНОВ, А. С. АКУЛОВ, О. М. ЗАБОЛОТНИЙ, Є. В. ЧАБАНЮК

ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМИХ СИЛ ПРИ ОЦІНЮВАННІ СТІЙКОСТІ
ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ВІД ВИЧАВЛЮВАННЯ В ПОЇЗДАХ..... 180

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

В. І. БОЛЬШАКОВ, М. О. ЄЛІСЄЄВА, С. А. ЩЕРБАК

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІЖ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ФАКТОРАМИ
ТА ОСНОВНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ МЕХАНОАКТИВОВАНИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ БЕТОНІВ 193

СОДЕРЖАНИЕ

ЮБИЛЯРЫ

80 ЛЕТ ШАФРАНУ ЛЕОНИДУ МОИСЕЕВИЧУ	7
---	---

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

В. И. ГАВРИЛЮК, О. М. ВОЗНЯК, В. В. МЕЛЕШКО ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОЕЗДА НА УЧАСТКЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ К ПЕРЕЕЗДУ	9
А. Ю. ЖУРАВЛЕВ О МЕТОДАХ РАСЧЕТА РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ ТЯГОВОГО ТОКА	19

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

Н. Н. БЕЛЯЕВ, Л. Я. МУНТЯН ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РИСКА ПРИ АВАРИЯХ НА ТРАНСПОРТЕ	30
Н. Н. БЕЛЯЕВ, С. Г. ЦЫГАНКОВА CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В РАБОЧИХ ЗОНАХ В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА	39
А. В. БЕРЛОВ ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ В СЛУЧАЕ АВАРИИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ	48

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Л. В. МАРЦЕНЮК НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ТУРИЗМА В УКРАИНЕ	55
--	----

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

В. М. БУБНОВ, И. Ю. КЕБАЛ, Н. Б. МАНКЕВИЧ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ	62
Д. Н. КИСЛЫЙ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ ВЕДЕНИЯ ПОЕЗДОВ	71
Г. И. НЕСТЕРЕНКО, М. И. МУЗЫКИН, В. Л. ГОРОБЕЦ, С. И. МУЗЫКИНА ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВАГОНОПОТОКОВ ПО ПРИБЫТИЮ И ОТПРАВЛЕНИЮ СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ X	85

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ

Д. Н. КУРГАН МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ	100
---	-----

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В. И. ШИНКАРЕНКО, Г. В. ЗАБУЛА КОНСТРУКТИВНАЯ МОДЕЛЬ АДАПТАЦИИ СТРУКТУР ДАННЫХ В ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ: ЧАСТЬ I. КОНСТРУИРОВАНИЕ ТЕКСТОВ ПРОГРАММ	109
---	-----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В. В. НЕТРЕБКО ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ НА ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ РЕЗАНИЕМ	122
--	-----

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА. МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ

В. Н. БОГОМАЗ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ ПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА
ОТ ЕГО ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ..... 131

В. С. ЛОВЕЙКИН, Ю. В. ЧОВНЮК, А. П. ЛЯШКО

ОСОБЕННОСТИ КОЛЕБАНИЙ ПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ РОТОРОВ 147

В. В. СУГЛОВ, С. В. РАКША, П. А. ГРИНЬКО

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕНТРИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ
БАРАБАНОВ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА..... 158

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

Л. А. МУРАДЯН, В. Ю. ШАПОШНИК, А. А. МИЩЕНКО

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСАМОХОДНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА..... 169

А. А. ШВЕЦ, К. И. ЖЕЛЕЗНОВ, А. С. АКУЛОВ, А. Н. ЗАБОЛОТНЫЙ, Е. В. ЧАБАНЮК

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ СИЛ ПРИ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ
ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ОТ ВЫЖИМАНИЯ В ПОЕЗДАХ 180

ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

В. И. БОЛЬШАКОВ, М. А. ЕЛИСЕЕВА, С. А. ЩЕРБАК

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ
И ОСНОВНЫМИ СВОЙСТВАМИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ 193

CONTENTS

HERO OF THE DAY

THE 80TH ANNIVERSARY OF THE BIRTH OF SHAFRAN LEONID MOISEYEVICH.....	7
--	---

TRANSPORT AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

V. I. HAVRYLIUK, O. M. VOZNYAK, V. V. MELESHKO

IMPROVING THE POSITIONING ACCURACY OF TRAIN ON THE APPROACH SECTION TO THE RAILWAY CROSSING	9
--	---

A. Y. ZHURAVLEV

ABOUT TRACK CIRCUIT CALCULATION METHOD DEPENDENT ON FERROMAGNET PROPERTIES IN CONDITIONS OF TRACTION CURRENT NOISE INFLUENCE	19
---	----

TRANSPORT ECOLOGY

M. M. BILIAIEV, L. Y. MUNTYAN

EXPRESS METHOD OF ESTIMATION OF THE POTENTIAL TERRITORIAL RISK IN CASE OF ACCIDENTS ON TRANSPORT	30
---	----

M. M. BILIAIEV, S. G. TSYGANKOVA

CFD SIMULATION OF AIR ION REGIME IN WORK AREAS AT CONDITION OF ARTIFICIAL AIR IONIZATION.....	39
--	----

A. V. BERLOV

ATMOSPHERE PROTECTION IN CASE OF EMERGENCY DURING TRANSPORTATION OF DANGEROUS CARGO	48
--	----

ECONOMICS AND MANAGEMENT

L. V. MARTSENYUK

DIRECTIONS OF EXTREME TOURISM IN UKRAINE.....	55
---	----

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

V. M. BUBNOV, I. YU. KEBAL, M. B. MANKEVYCH

REPAIR TECHNOLOGY IMPROVEMENT OF SPECIALIZED FREIGHT CARS.....	62
--	----

D. M. K[SLYK

ENERGY SAVING MODES DEFINITION OF TRAINS HANDLING	71
---	----

G. I. NESTERENKO, M. I. MUZYKIN, V. L. HOROBETS, S. I. MUZYKINA

STUDY OF THE STRUCTURE FLOWS CARS ON ARRIVAL AND DEPARTURE IN THE MARSHALLING YARD X	85
---	----

RAILWAY TRACK

D. M. KURHAN

MODELING OF DEVELOPMENT VERTICAL DEFORMATION OF RAILWAY TRACK	100
---	-----

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING

V. I. SHYNKARENKO, H. V. ZABULA

CONSTRUCTIVE MODEL OF DATA STRUCTURES ADAPTATION IN RAM: PART I. PROGRAM TEXT CONSTRUCTING	109
---	-----

MATERIAL SCIENCE

V. V. NETREBKO

THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION OF HIGH-CHROMIUM CAST IRONS ON THE MACHINABILITY	122
---	-----

NON-TRADITIONAL TRANSPORT MODES. MACHINES AND MECHANISMS

V. M. BOHOMAZ

RESEARCH OF DEPENDENCE OF BELT CONVEYER DRIVE POWER
ON ITS DESIGN PARAMETERS 131

V. S. LOVEYKIN, Y. V. CHOVNYYUK, A. P. LYASHKO

SPECIALTY OF ROTOR'S DRIVE MECHANISM OSCILLATIONS 147

V. V. SUGLOBOV, S. V. RAKSHA, P. A. HRYNKO

RATIONALE FOR CENTERING CAPACITY OF REDISIGNED BELT CONVEYOR DRUMS 158

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

L. A. MURADIAN, V. YU. SHAPOSHNYK, A. A. MISCHENKO

METHODOLOGICAL FUNDAMENTALS OF DETERMINATION
OF UNPOWERED ROLLING STOCK MAINTENANCE CHARACTERISTICS..... 169

A. O. SHVETS, K. I. ZHELIEZNOV, A. S. AKULOV, O. M. ZABOLOTNYI, E. V. CHABANIUK

DETERMINATION THE PERMISSIBLE FORCES IN ASSESSING
THE LIFT RESISTANT FACTOR OF FREIGHT CARS IN TRAINS 180

TRANSPORT CONSTRUCTION

V. I. BOLSHAKOV, M. O. YELISIEIEVA, S. A. SHCHERBAK

CORRELATION BETWEEN TECHNOLOGICAL FACTORS
AND BASIC PROPERTIES OF MECHANICALLY ACTIVATED FINE CONCRETES 193

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською, російською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word 2003 або більш ранній версії – файли *.doc (файли *.docx, *.docm не приймаються). Для набору формул використовується MathType 5.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Рекомендуємо скористатися правилами до оформлення статей журналу: <http://library.diit.edu.ua/HTMLs/scientists/Vumogu/Vumogu.pdf>.

Для здачі статті до друку автору/авторам необхідно:

1. Для електронної інформації сформувати всі матеріали в п'яти файлах:

- **Перший** – із текстом статті та анотацій з ключовими словами. Назва файлу – прізвище та ініціали автора (першого співавтора) латинськими літерами, наприклад: Ivanov_II_stattia.doc.
- **Другий** – з розширеними відомостями про автора/авторів (прізвище, ім'я, по батькові; посада; науковий ступінь; учене звання; місце роботи або навчання; адреса електронної пошти; номери контактних телефонів). Назва файлу – Ivanov_II_vidomosti.doc.
- **Третій** – рецензія (відсканована). Назва файлу – Ivanov_II_recenziia.jpg.
- **Четвертий** – Експертний висновок (відсканований, складається у вільній формі). Назва файлу – Ivanov_II_vysnovok.jpg.
- **П'ятий** – Ліцензійний договір (відсканований). Назва файлу – Ivanov_II_dogovir.jpg. Текст договору: <http://library.diit.edu.ua/HTMLs/scientists/Vumogu/license.doc>.

2. Для друкованої інформації. До редакції надаються особисто або надсилаються поштою такі матеріали: 1) два друкованих примірники рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи; 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів; 3) оригінал експертного висновку; 4) рекомендація до друку за підписом відповідального редактора розділу (для співробітників ДНУЗТ).

Відповідальність за зміст статті, правильність, точність і коректність цитування, посилань та перекладу покладається на авторів.

Остаточне рішення щодо публікації ухвалює редакційна колегія журналу.

Статті, відхилені редакційною колегією, повертаються авторам для доопрацювання.

Шановні автори, запрошуємо до співробітництва!

З питань опублікування звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
вул. Лазаряна, 2,
м. Дніпропетровськ,
Україна,
49010
e-mail: visnik@diit.edu.ua
Адреса сайту журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

З питань придбання примірників журналу телефонуйте за номером (056) 776 90 59 Грідасова А. В.

події

ШАНОВНІ КОЛЕГИ!

В журналі розпочато публікацію статей, рекомендованих до друку науковими комітетами міжнародних наукових конференцій за такими напрямками:

- Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту.
- Проблеми механіки залізничного транспорту.
- Проблеми економіки транспорту.
- Екологічний інтелект.
- Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд.

Запрошуємо організаторів міжнародних наукових заходів до співпраці з метою оприлюднення найбільш вагомих наукових результатів.

Так, 9–11 вересня 2015 р. у місті Львові відбулася Міжнародна науково-практична конференція «Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд», присвячена доктору технічних наук Соколу Едуарду Миколайовичу і організована Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Укрзалізницею, Львівською філією ДІІТу та Львівським науково-дослідним інститутом судових експертиз.

У конференції взяло участь 125 науковців та спеціалістів з 26 організацій, у тому числі: 18 докторів наук, представники Міністерства інфраструктури, Міністерства юстиції, Укрзалізниці, вищих навчальних закладів, наукових та науково-дослідних установ і підприємств України, Німеччини, Литви, Вірменії та Польщі.

На пленарних та секційних засіданнях заслухано 70 доповідей з питань підвищення безпеки руху, методики та методології експертних досліджень рухомого складу залізниць, автотранспортних засобів, інженерних споруд, під-

вищення їх експлуатаційної надійності та безпечності, оцінки економічної ефективності запропонованих заходів.

На конференції відмічено, що пріоритетним напрямом розвитку транспортної галузі є забезпечення безпеки. У даному аспекті важливим є профілактична роль експертних досліджень випадків транспортних пригод. Ретельний науковий аналіз причин, що призводять до транспортних пригод, дозволяє розробити рекомендації з недопущення їх у майбутньому, вносити зміни у нормативні документи, удосконалювати конструкцію транспортних засобів та інженерних споруд.

25–27 травня 2016 р. у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна відбудеться XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми механіки залізничного транспорту. Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу та енергозбереження». Конференція проводиться кожні 4 роки за участю представників вищих навчальних закладів і науково-дослідних інститутів, залізниць, локомотивної вагонобудівних заводів багатьох країн світу. Це підтверджує зацікавленість виробників у нових технологіях і наукових розробках, пов'язаних з роботою залізничного транспорту. Обмін знаннями і досвідом вчених та інженерів, які представляють наукові школи різних країн, особливо важливі в умовах інтеграції економіки, глобалізації економіки і поглиблення інтеграційних процесів.

На конференції будуть працювати секції:

- безпека руху поїздів, перехідні режими, енергозбереження;
- взаємодія рухомого складу та колії, знос коліс і рейок;
- міцність, надійність.

Для нотаток

.

Для нотаток

.

Для нотаток

.

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№ 1 (61) 2016

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – А. І. Миргородська
Комп'ютерне верстання – Л. А. Кобулія
Літературна обробка – О. М. Врублевська

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 24,18. Тираж 300 пр. Зам. № 113.

**Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.dnupetrovsk.ua, visnik@dnupetrovsk.ua

Адреса дільниці оперативної поліграфії:

вул. Лазаряна, 2, кім. 1201, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 47-19-66, факс: +38 (056) 47-19-83



Научное издание

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ. ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

**(НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА. ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА)**

№ 1 (61) 2016

(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – А. И. Миргородская
Компьютерная верстка – Л. А. Кобулия
Литературная обработка – О. М. Врублевская

Формат 60×84¹/₈. Ус. печат. лист 24,18. Тираж 300 экз. Зак. № 113

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна**

Адрес редакции, издателя:

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Днепропетровск, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.dnupetrovsk.ua, visnik@dnupetrovsk.ua

Адрес участка оперативной полиграфии:

ул. Лазаряна, 2, ком. 1201, г. Днепропетровск, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 47-19-66, факс: +38 (056) 47-19-83



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU. VISNIK DNIPROPETROVS'KOGO NACIONAL'NOGO
UNIVERSITETU ZALIZNICHNOGO TRANSPORTU**

**(SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS. BULLETIN OF DNIPROPETROVSK NATIONAL
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN)**

No. 1 (61) 2016

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – A. I. Myrhorodska
Computer makeup – L. A. Kobuliya
Redaction – O. M. Vrublevska

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 24,18. Circulation 300. Order no. 113.

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.dnupetrovsk.ua, visnik@dnupetrovsk.ua

Address of small offset printing office

Lazaryan St., 2, r. 1201, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 47-19-66, Fax: +38 (056) 47-19-83



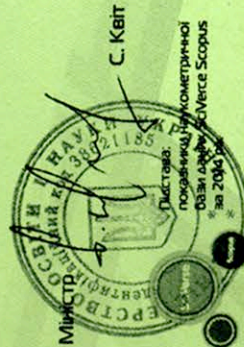
СУЧАСНІ ЗАКЛАДИ ОСВІТИ - 2015
Шоста Міжнародна виставка

CERTIFICATE

якості наукових публікацій
УДОСТОЄНИЙ

**Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна**

Міністерство освіти і науки України



С. Квіт

Національна академія
педагогічних наук України



Президент

В. Кремень

Асоціація користувачів
Української науково-освітньої
телекомунікаційної мережі «Уран»

Голова Ради

Ю. Якименко





ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2016. 1(61). 1-208