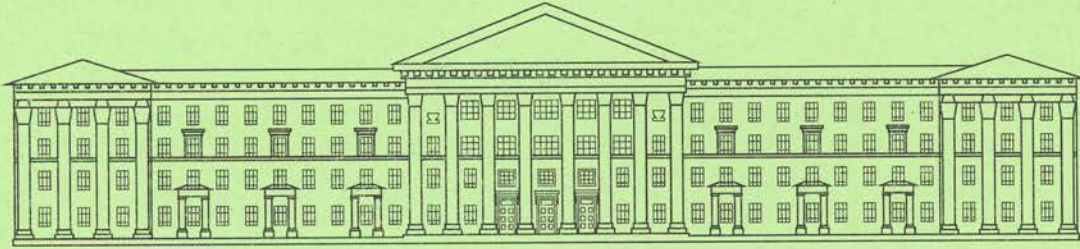




ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

5(65)

•• 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

№ 5 (65) 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

Дніпро

2016

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

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

Пшінько 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. С., Босов А. А., Вакулєнко І. О., Власова Т. І., Волкова В. Є., Габринєць В. О., Гаврилюк В. І., Гетьман Г. К., Главацький К. Ц., Гненний О. М., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобєць 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., Краснок А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган М. Б., Муха А. М., Мухіна Н. А., Настєчик М. П., Нетєса 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., Скалєзуб 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. Гедимінаса, 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. Гедимінаса, Литва); Манашкін Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковські А. (Сілезька політехніка, Республіка Польща); Стржелицькі 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 31.10.2016 р., протокол № 3

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

Адреса засновника вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010
та редакції 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

№ 5 (65) 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

Днепро

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., Боднарь Б. Е., Босов А. А., Вакуленко И. А., Власова Т. И., Волкова В. Е., Габринец 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., Жуковицкий 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., Скалзуб 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 31.10.2016 г., протокол № 3

Издатель

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (г. Днепро)

Свидетельство субъекта издательского дела ДК № 1315 от 31.03.2003 г.

Адрес
учредителя

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, Днепро, 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 NACIONAL'NOGO UNÌVERSITETU
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU

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

Scientific journal

No. 5 (65) 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

Dnipro

2016

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

Chairman of the Editorial Board of the University	Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences
Editor-in-Chief	Myamlin S. V., Doctor of Technical Sciences
Deputy Chief Editor	Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Executive Secretary	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., Gabryniec 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 академия, Republic of Poland); Szeląg 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 г. 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 31.10.2016, Protocol no. 3
Publisher	Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro) Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003
Address of Founder	St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipro, 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»

ПАМ'ЯТНІ ДАТИ

УДК 001(092):656.2

С. В. МЯМЛИН

Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 29, эл. почта sergeymyamin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

УЧЕНЫЙ-ДИНАМИК И ДИНАМИЧНЫЙ ЧЕЛОВЕК. К 80-ЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА ВИКТОРА ДАНИЛОВИЧА ДАНОВИЧА



Статья посвящается памяти известного ученого доктора технических наук, профессора Виктора Даниловича Дановича, который долгое время работал в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДИИТ).

Виктора Даниловича с ДИИТом связывает практически вся жизнь. После школы он поступает в институт, успешно заканчивает его и начинает трудовую деятельность. В ДИИТе Виктор Данилович сформировался как ученый и как педагог. Мне лично посчастливилось познакомиться с ним на третьем курсе института,

когда Виктор Данилович, который только стал профессором на кафедре строительной механики после защиты докторской диссертации, преподавал у нас на потоке вагонников дисциплину «Динамика вагонов». Его отличала высокая эрудиция, интеллигентность и чувство юмора. Вспоминается случай, когда наша факультетская команда по «интеллектуальному хоккею», в которой меня выбрали капитаном, с трепетом ожидала финальный поединок с командой преподавателей, где капитаном был как раз Виктор Данилович. Но из-за участия в испытаниях, которые проводились в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории динамики и прочности подвижного состава (ОНИЛ ДППС), он не участвовал в финальной игре, и наша команда выиграла. Затем мы уже контактировали как ученые: сначала при подготовке научной части дипломного проекта, затем при выполнении научно-исследовательских работ в ОНИЛ ДППС, при подготовке кандидатской и докторской диссертации, при подготовке многочисленных совместных научных статей и докладов на международных научных конференциях.

Энциклопедические знания и умелое владение математическим аппаратом позволяли Виктору Даниловичу справиться с различными задачами, связанными с педагогической и научной деятельностью. Он одним из первых раз-

ПАМ'ЯТНІ ДАТИ

работал пространственную математическую модель колебаний железнодорожного пути на упруго-вязком основании, которая легла в основу исследований по взаимодействию различных рельсовых экипажей и пути. Под руководством Виктора Даниловича разработаны математические модели пространственных колебаний многочисленных объектов: электровозов, тепловозов, грузовых и пассажирских вагонов, специализированного подвижного состава (железнодорожные краны, автомотрисы и т.д.) [1, 2, 4, 6–20, 22, 24, 26]. При этом рассматривалась динамика как обычных рельсовых экипажей, так и высокоскоростных. Им разработаны математические модели сцепов экипажей: вагонов, локомотива и вагонов, состоящих из от 3 до 5 единиц подвижного состава [3, 5].

Работая в тесном контакте с конструкторами и создателями новой техники, Виктор Данилович помогал решать и инженерно-технические задачи, например, по выбору рациональных параметров рессорного подвешивания и систем демпфирования колебаний, причем не только для локомотивостроительных и вагоностроительных заводов. Например, в этом направлении есть разработки для Харьковского тракторного завода (сейчас завод имени Малышева) по определению рациональных параметров системы амортизации гусеничных и колесных тракторов.

Кроме теоретических исследований, Виктор Данилович участвовал и в многочисленных экспериментальных работах по испытанию грузовых, пассажирских вагонов и специальной железнодорожной техники [21, 25]. Свой опыт и знания Виктор Данилович передавал своим ученикам и коллегам, заслужив тем самым авторитет и уважение. Его неуемная энергия помогала ему найти самовыражение не только в науке, но и в общественной работе, как в университете, так и далеко за его пределами. Виктор Данилович был настолько динамичным, что часто более молодые коллеги не успевали за ним как в принятии научных решений, так и в спортивной жизни.

Далее приведем некоторые факты его биографии Дановича Виктора Даниловича. Родился он 23 декабря 1936 года в г. Днепропетровске. Отец Данович Данил Ильич (1895–1945) был врачом. Мать Данович Мария Абрамовна – бухгалтером. В 1941 году семья эвакуировалась

в г. Доссор Гурьевской области, где отец работал в госпитале. Там же Виктор Данилович пошел в школу и закончил первый класс. В 1945 году после смерти отца семья возвратилась в г. Днепропетровск. В 1954 году Виктор Данилович закончил с золотой медалью среднюю школу № 1. В школе был старостой, председателем ученического комитета. В 1954 г. Виктор Данилович поступил на механический факультет ДИИТа, который окончил в 1959 г., получив диплом с отличием и специальность инженера путей сообщения-механика. За период обучения в институте его избирали членом общественных организаций группы и факультета. После окончания вуза получил назначение на Днепропетровский паровозоремонтный завод, где работал контролером-приемщиком ОТК в кузнечном цехе. За достигнутые успехи в производственном соревновании в 1959 году за активное участие в ремонте паровозной техники был награжден Почетной грамотой Днепропетровской областной администрации. В декабре 1959 года был переведен на станцию технической помощи Днепропетровского совнархоза на должность инженера-конструктора в тепловозной группе. В 1962 году поступал в заочную аспирантуру ДИИТа по специальности «Строительная механика», но не прошел по конкурсу. В октябре этого же года был принят ассистентом кафедры «Строительная механика» ДИИТа. В 1964 году поступил в очную аспирантуру по специальности «Строительная механика и сопротивление материалов». Срок обучения в аспирантуре был сокращен до двух лет, так как к тому времени он уже сдал два экзамена кандидатского минимума. В период обучения в аспирантуре, кроме работы над диссертацией, занимался педагогической практикой и участвовал в выполнении 6 научно-исследовательских работ в НИЛ динамики и прочности подвижного состава ДИИТа. После окончания аспирантуры в 1966 году вернулся на кафедру «Строительная механика» ассистентом. В 1968 году представил к защите диссертацию на тему «Методика выбора оптимальных параметров рессорного подвешивания грузовых вагонов», которую защитил в ноябре того же года. Виктор Данилович органично влился в Научную школу Транспортной механики [23, 27], которой руководил академик

ПАМ'ЯТНІ ДАТИ

Академії наук України Всеволод Арутюнович Лазарян, он же і був керівником кандидатської і докторської дисертації В. Д. Дановича.

В грудні 1968 г. Вищою аттестаційною комісією йому була присуджена ступінь кандидата технічних наук. В червні 1969 г. на вченому раді ДІИТа затвердили в посаді і. о. доцента. В 1970 г. був затверджений в званні доцента Вищою аттестаційною комісією. Працюючи доцентом кафедри, читав лекції і вів практичні заняття по дисциплінам: «Спротивлення матеріалів», «Теоретична механіка», «Теорія пружності», «Прикладна теорія пружності», «Теорія коливань», «Динаміка подвижного складу», «Матричні методи в будівельній механіці», «Диференціальні рівняння». Був керівником академічної групи, заступником голови профсоюзного комітету факультету обчислювальної техніки, членом редколегії інститутської газети «За кадри транспорту», головою художественної ради клубу ДІИТа, відповідальним за Студентське науково-технічне товариство при кафедрі, головою Рад молодих вчених інституту, членом обласної Ради молодих вчених, директором міської кібернетичної школи, редактором збірника праць міського наукового семінару по механіці, головою журі фестивалю-смотру художественної самодеятельності інституту. Неодноразово нагороджувався почесними грамотами і отримував подяки за активну участь в громадському житті інституту, в роботі СНТО, за хорошу організацію збирання врожаю, за участь в художественній самодеятельності, за перемоги в спортивних змаганнях. За хорошу організацію міської кібернетичної школи нагороджений в 1972 році Почесною грамотою Дніпропетровської обласної адміністрації. В 1975 році переведений на посаду старшого наукового співробітника НІЛ динаміки і надійності подвижного складу для роботи над докторською дисертацією. З 1977 по 1984 рік працював доцентом кафедри «Будівельна механіка». Постійно керував дипломниками факультету обчислювальної техніки. Він був членом ради Науково-дослідницької роботи студентів (НІРС) інституту, помічником декана факультету по НІРС, головою

ради факультету. Приймав участь в роботі товариства «Знання», брав участь в роботі методологічного семінару «Філософські питання сучасного природознавства». Вів велику науково-дослідницьку роботу, був членом спеціалізованого вченого ради по захисту дисертацій К 114:07.01. В 1982 році підвищив кваліфікацію при Московському інституті інженерів залізничного транспорту, де ознайомився з постановкою курсів по опору матеріалів, будівельній механіці і теорії пружності. В 1982 році В. Д. Данович захистив докторську дисертацію на тему «Просторові коливання вагонів на інерційному шляху». В 1984 році був затверджений в посаді професора кафедри будівельної механіки.

З 1984 по 1997 рік Віктор Данилович був професором цієї кафедри і старшим науковим співробітником Окремої науково-дослідницької лабораторії динаміки і надійності подвижного складу. Працюючи в лабораторії, Віктор Данилович керував виконанням науково-дослідницьких робіт, пов'язаних з теоретичними і експериментальними дослідженнями динаміки різних рейсових екіпажів, серед яких вантажні і пасажирські вагони, локомотиви і спеціалізований подвижний склад. З 1997 по 2000 рік професор В. Д. Данович працює керівником кафедри «Шлях і шляхове господарство», а з 2001 року – професором цієї кафедри. В цей же період Віктор Данилович активно займається громадською діяльністю. Він працює директором Дніпропетровського регіонального інституту соціальних і місцевих працівників. Віктор Данилович керував підготовкою 20 аспірантів і 1 докторанта. Він є автором більш ніж 150 наукових робіт. В 1984 році нагороджений знаком Міністерства шляхів зв'язку «Почесний залізничник», в 1986 році нагороджений «Почесним знаком» Міністерства освіти, а в 1989 році – медаллю «Ветеран праці». Помер Віктор Данилович 31 грудня 2003 року в г. Раанана (Ізраїль), де проходив лікування.

Основні напрями наукової діяльності:

– проблеми механіки транспорту, в частині розробки математичної моделі просторових коливань вагонів і локомотивів як багатомасових нелінійних механічних

ПАМ'ЯТНІ ДАТИ

ских систем во время движения по прямым и кривым участкам железнодорожного пути;

– математическое моделирование динамической нагруженности различных рельсовых экипажей;

– определение рациональных параметров систем гашения колебаний вагонов и локомотивов;

– определение безопасных условий движения обычного и специализированного подвижного состава по магистральным участкам железных дорог;

– математическое моделирование подрельсового основания в пространственной постановке для задач динамики рельсовых экипажей и взаимодействия их с железнодорожным путем;

– динамика традиционного и высокоскоростного рельсового транспорта;

– разработка новых конструкций ходовых частей вагонов и локомотивов;

– совершенствование методик проведения экспериментальных исследований различных рельсовых экипажей.

23 декабря 2016 года Виктору Даниловичу исполнилось бы 80 лет, но судьба распорядилась иначе, и уже двенадцать лет, как его нет с нами. Но светлая память о прекрасном человеке, педагоге и ученом – Дановиче Викторе Даниловиче – будет жить в наших воспоминаниях. От имени коллектива составителей выражаю благодарность жене В. Д. Дановича Элеоноре Ефимовне и сыновьям Игорю и Александру за помощь в подготовке материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Блохин, Е. П. Математическая модель пространственных колебаний четырехосного рельсового экипажа / Е. П. Блохин, В. Д. Данович, Н. И. Морозов. – Днепропетровск, 1986. – 39 с. – Рус. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 29.09.86, №7252 ж.д.
2. Блохин, Е. П. Пространственная модель упругого подшпального основания / Е. П. Блохин, В. Д. Данович, А. А. Залеская // Механика транспорта: вес поезда, скорость, безопасность движения : межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетр. гос. ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1994. – С. 4–14.
3. Данович, В. Д. Математическая модель пространственных колебаний сцепа вагонов / В. Д. Данович, Н. И. Морозов, В. А. Литвин // Проблемы механики ж.-д. транспорта. Повышение надежности и совершенствование конструкций подвиж. состава : тез. докл. Всесоюз. конф. (Днепропетровск, май 1988 г.) / Днепропетр. ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1988. – С. 81–82.
4. Данович, В. Д. Математическая модель для исследования вертикальных колебаний системы «экипаж-САУ-путевая структура» // Высокоскорост. назем. трансп. : межвуз. сб. науч. тр. – Новочеркасск, 1979. – С. 96–102.
5. Данович, В. Д. Математическая модель пространственных колебаний сцепа пяти вагонов, движущихся по прямолинейному участку пути / В. Д. Данович, А. А. Малышева // Транспорт. Нагруженность и прочность подвижного состава : сб. науч. тр. / Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск :, 1998. – С. 62–69.
6. Данович, В. Д. Математическая модель рельсового экипажа, движущегося по инерционному пути, для исследования пространственных колебаний / В. Д. Данович, Е. Ю. Трубицкая // Матер. 33-й науч.-техн. конф. / Брянск. ин-т трансп. машиностроения. – Брянск, 1972. – С. 47.
7. Данович, В. Д. Моделирование соединительных элементов типа «сухое трение» в компьютерных программах для решения задач динамики рельсовых экипажей / В. Д. Данович, В. А. Литвин // Проблемы механики залізн. трансп. Динаміка, надійність та безпека рухомого складу : тези доп. IX Міжнар. конф. (29.05–31.05.1996) / Дніпропетр. ін-т інженерів залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 1996. – С. 77.
8. Данович, В. Д. Модель рельсо-шпальной решетки в задачах взаимодействия подвижного состава и пути / В. Д. Данович, Н. В. Халипова, Н. Г. Чиликина // Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. (01.10.–02.10.1998) / Днепропетр. ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1998. – С. 9–10.
9. Данович, В. Д. О выборе расчетных параметров подрельсового основания по модели Власова / В. Д. Данович, В. С. Иккол // Тр. ДИИТа. – Днепропетровск, 1977. – Вып. 190/23. – С. 53–56.
10. Данович, В. Д. О модели упругого основания с тремя и пятью параметрами / В. Д. Данович // Тр. ДИИТа. – Днепропетровск, 1975. – Вып. 158. – С. 73–76.
11. Данович, В. Д. О связи между параметрами континуальной и дискретной моделей пути / В. Д. Данович // Проблемы механики назем. транспорта : межвуз. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 1978. – Вып. 198/20. – С. 45–50.

ПАМ'ЯТНІ ДАТИ

12. Данович, В. Д. Оценка влияния состояния тележки модели 18-100 на износ в паре «колесо-рельс» / В. Д. Данович, А. Г. Рейдемейстер // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. держ. техн. ун-т заліз. трансп. – Дніпропетровськ, 1999. – Вип. 1. – С. 135–141.
13. Данович, В. Д. Применение компьютерного моделирования при анализе случаев схода в АРМ «Ревизор по безопасности» / В. Д. Данович, С. В. Мямлин, В. А. Литвинов // Ж.-д. транспорт сегодня и завтра : тез. докл. юбил. науч.-техн. конф. / Урал. гос. акад. путей сообщ. – Екатеринбург, 1998. – Ч. 1. – С. 256–257.
14. Исследование вертикальных колебаний вагонов при помощи электронных моделей / В. А. Лазарян, В. Д. Данович, Л. А. Манашкин, Л. С. Сокол // Тр. конф. по конструкции тележек вагонов. – Ленинград, 1967.
15. Исследование вертикальных колебаний четырехосного грузового вагона с помощью электронных моделей / В. А. Лазарян, Р. Б. Грановский, В. Д. Данович, Л. А. Манашкин. – Днепропетровск, 1970. – 6 с. – Рус. – Деп. в НИИЭИР, № Д-1844.
16. К вопросу о построении математической модели напольного устройства весомера с магнитоупругим датчиком / В. Д. Данович, Л. Л. Подольский. – Днепропетровск, 1977. – 12 с. – Рус. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС, № 518/77.
17. Математическая модель вынужденных колебаний системы «поезд-экипаж-путь» для оценки износа колеса и рельса / Е. П. Блохин, В. Д. Данович, М. Л. Коротенко, Л. А. Манашкин // Пробл. механіки заліз. трансп. Динаміка, надійність та безпека рухомого складу : тези доп. ІХ Міжнар. конф. (29.05–31.05.1996) / Дніпропетр. ін-т інженерів ж.-д. трансп. – Дніпропетровськ, 1996. – С. 59–60.
18. Математическая модель для исследования динамики электровоза / С. В. Мямлин, Е. П. Блохин, В. Д. Данович, Л. А. Недужая // Соврем. пробл. машиноведения : матер. Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. инж. акад., Гомел. политехн. ин-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 1996. – С. 99–100.
19. Математическая модель пространственных колебаний магистрального грузового электровоза / Е. П. Блохин, В. Д. Данович, Л. А. Недужая. – Днепропетровск, 1996. – 12 с. – Рус. – Деп. в ГНТБ Украины 09.01.96, № 229-Ук96.
20. Математическая модель пространственных колебаний электровоза с модернизированной схемой соединения кузова с тележками / В. Д. Данович, М. Л. Коротенко, С. В. Мямлин, Л. А. Недужая // Транспорт. Повышение эффективности работы устройств электрического транспорта : межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетр. ин-т инженерів ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1999. – С. 183–190.
21. Методические вопросы динамических испытаний рельсового колесного транспорта на вибробезопасность / Е. П. Блохин, Ю. М. Черкашин, В. Д. Данович, М. Л. Коротенко, С. В. Мямлин, Р. Б. Грановский, В. Л. Горобец, Н. Я. Гаркави, Е. Ф. Федоров // Техн. механика. – 2005. – № 1. – С. 131–143.
22. Моделирование неровности пути при исследовании на АВМ колебаний движущегося четырехосного экипажа / Р. Б. Грановский, В. Д. Данович, Л. А. Манашкин, В. А. Музыкин, Л. С. Сокол // Тр. ДИИТ. – Днепропетровск, 1971. – Вып. 103. – С. 89–96.
23. Мямлин, С. В. Ретроспективный анализ формирования научного потенциала Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна / С. В. Мямлин, И. В. Агиенко // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 2 (56). – С. 7–38. – doi: 10.15802/stp2015/42158.
24. О моделях для исследования взаимодействия подвижного состава и пути / В. А. Лазарян, З. Г. Берман, Л. А. Гальченко, Р. Б. Грановский, В. Д. Данович, А. И. Залесский, С. И. Кошаченко, И. А. Литвин, Е. Ю. Трубицкая // Динамика и меры повышения эксплуат. надежности локомотивов в условиях ж. д. Урала и Сибири : тр. сетевой науч.-техн. конф. – Омск, 1973. – С. 174–177.
25. Обработка результатов ходовых испытаний железнодорожных вагонов с целью определения их динамических качеств / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, В. Д. Данович, М. Л. Коротенко, Р. Б. Грановский, С. В. Мямлин, Н. Я. Гаркави, Е. Ф. Федоров // Вісті Академії інженерних наук України: Машинобудування. – 2002. – № 4 (17). – С. 52–61.
26. Применение электронных моделей к исследованию взаимодействия пути и подвижного состава / В. Д. Данович, В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, Л. С. Сокол // Тез. докл. XVII науч.-техн. конф. ин-та / Дніпропетр. ін-т інженерів ж.-д. трансп. – Дніпропетровск, 1967. – С. 29–30.
27. Myamlin, S. V. Development of scientific school of transport mechanics: artistic legacy of Ye. P. Blokhin / S. V. Myamlin, T. O. Kolesnykova // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 1 (49). – С. 7–21. – doi: 10.15802/stp2014/22657.

ПАМ'ЯТНІ ДАТИ

УДК 001(092):656.2**С. В. МЯМЛІН^{1*}, С. С. ДОВГАНЮК^{2*}**

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 29, ел. пошта sergeyuyamlin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304,

^{2*} Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 374 00 97, ел. пошта dovghanuk@ukr.net, ORCID 0000-0003-1320-3192

ІНЖЕНЕР, МЕХАНІК, ВЧЕНИЙ. ДО 80-РІЧЧЯ З ДНЯ НАРОДЖЕННЯ ПРОФЕСОРА САВЧУКА ОРЕСТА МАКАРОВИЧА



Наукова школа надійності вагонів була започаткована в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна практично з початку заснування інституту відомим вченим в галузі вагонобудування і експлуатації рухомого складу Винокуровим Михайлом Васильовичем. Гідним продовжувачем і очільником цієї наукової школи протягом багатьох років був Савчук Орест Макарович.

Орест Макарович народився 6 листопада 1936 р. в місті Луків, що на Волині, в селянській родині. Після закінчення Луківської се-

редньої школи О. М. Савчук став студентом Механічного факультету Дніпропетровського інституту інженерів залізничного транспорту (ДІТУ). Навчався на відмінно, був активним учасником громадського життя, художньої самодіяльності, активно працював у студентському науковому гуртку. У 1957р. закінчив навчання, отримавши диплом з відзнакою. Після закінчення ДІТУ працював бригадиром, майстром транспортного цеху Дніпродзержинського металургійного комбінату. В 1959 році був запрошений до роботи на інженерну посаду в ДІТ, але у цьому ж році його направляють на роботу головним інженером колгоспу ім. Комінтерну Васильківського району. Тут молодий інженер-механік шляхів сполучення, використовуючи знання, набуті в інституті, пропонує низку новацій з механізації ремонту сільськогосподарської техніки. Під його керівництвом були побудовані зразкові механічні майстерні. В колгоспі Орест Макарович знайомиться із своєю майбутньою дружиною – вчителькою Валентиною Степанівною, з якою щасливо прожив все подальше життя. У 1961 році повернувся до ДІТУ, де почав працювати асистентом кафедри «Вагони та вагонне господарство».

Навчаючись в аспірантурі в академіка Національної академії наук України Всеволода Арутюновича Лазаряна, О. М. Савчук у 1968 р. достроково захистив кандидатську дисертацію на тему «Применение электрического моделирования к решению задач строительной механики, связанных с расчетом вагонов». У 1970 р. йому присвоєно вчене звання доцента.

ПАМ'ЯТНІ ДАТИ

У 1974 р. доцент О. М. Савчук був обраний завідувачем кафедри «Вагони та вагонне господарство». У 1977–1979 рр. він працював на громадській роботі в ДПТі. Залишаючись завідувачем кафедри, у 1979 р. обіймає посаду проректора з наукової роботи. Протягом складних 90-х років О. М. Савчуку вдалося зберегти науково-педагогічний потенціал університету, значно розширити міжнародні наукові зв'язки, підтримувати і зміцнювати зв'язки науки з виробництвом.

У 1988 р. О. М. Савчук успішно захистив дисертацію на тему «Оптимальное проектирование и совершенствование конструкций неподдресоренных деталей ходовых частей подвижного состава» і отримав вчений ступінь доктора технічних наук. У цьому ж році він був нагороджений золотою медаллю «Виставки Досягнень Народного Господарства країни» за розробку алгоритму розрахунку роликів буксового вузла вантажного вагона з деталями із алюмінієвого сплаву, розробку рекомендацій на конструктивні параметри, лабораторні та експлуатаційні випробування.

У 1989 р. йому присвоєно вчене звання професора.

У 2001 р., посиляючись на стан здоров'я, Орест Макарович склав адміністративні повноваження, продовжуючи займатись науково-педагогічною роботою на кафедрі. Читав лекції студентам, брав участь у наукових дослідженнях та винахідницькій діяльності кафедри.

Савчук Орест Макарович пішов з життя 28 січня 2016 року.

Професор О. М. Савчук відомий вчений-механік, він розробив теоретичні та прикладні методи оптимального проектування вагонів та їх комплектуючих.

Разом із фахівцями кафедри вагонів та вагонного господарства розробив новий ремонтний профіль кочення колеса вантажного вагона, який назвали «ДПТ-УЗ». Це дозволило після його впровадження на всіх залізницях України підвищити термін експлуатації коліс та зняти напругу зі зносом коліс та рейок. Орест Макарович до того ж тривалий час очолював Галузеву науково-технічну комісію з координації робіт зі зменшення наднормативного зносу пари «колесо-рейка». Завдяки роботі Ореста Макаровича, як голови цієї комісії, та реалізації

плану заходів з попередження та зменшення зносу коліс та рейок, залізнична галузь заощадила значні ресурси, що дозволило значно покращити техніко-економічні показники всього залізничного транспорту. Він є також співавтором нових пристроїв, які удосконалюють роботу пасажирських вагонів.

Савчук О. М. опублікував понад двохсот наукових праць, є співавтором восьми підручників та посібників. Особливо поширеним став підручник для студентів вищих навчальних закладів залізничного транспорту «Рухомий склад промислового залізничного транспорту», який видавався двічі. В його творчому доробку понад 30 патентів на винаходи. Найвидатніші наукові праці професора Савчука Ореста Макаровича наведено у пристатейній літературі [1–12].

Під керівництвом О. М. Савчука захищено 11 кандидатських дисертацій.

О. М. Савчук був академіком Транспортної Академії України, Транспортної Академії РФ та Міжнародної транспортної академії наук.

За досягнуті науково-педагогічні успіхи професор О. М. Савчук нагороджений орденом Трудового Червоного Прапора, двома урядовими медалями, Грамотою Президії Верховної Ради України та Почесною грамотою Кабінету Міністрів України. Він також має вищу галузеву відзнаку «Почесний залізничник».

Колектив кафедри вагонів та вагонного господарства разом з Галузевою науково-дослідною лабораторією вагонів продовжують підготовку кадрів та розвиток наукових досліджень за напрямками педагогічної і наукової діяльності професора Савчука Ореста Макаровича. Наразі кафедра є потужним науково-педагогічним колективом гідним виконувати наукові дослідження світового рівня.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизированные системы управления предприятиями вагонного хозяйства : учеб. пособие для вузов. Ч. 1 / А. Е. Дударев, О. М. Савчук ; Днепропетр. ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Днепропетровск : ДИИТ, 1981. – 46 с.
2. Автоматизированные системы управления предприятиями вагонного хозяйства : учеб. пособие. Ч. 2 / А. Е. Дударев, О. М. Савчук, 1983. – 54 с.

ПАМ'ЯТНІ ДАТИ

3. Вагонний парк : навч. посібник для вузів / О. М. Савчук. – Харків : Техностандарт, 2010. – 200 с.
4. Пат. 25878 Україна, МПК (2006) В60В 21/00. Обід колеса залізничного рухомого складу : патент на корисну модель / Савчук О. М., Пшінько О. М., Луханін М. М., Мямлін С. В., Рейдмейстер О. Г., Савченко К. Б., Шикунов О. А. ; Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № у 2007 04051 ; заявл. 12.04.07 ; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. – 10 с.
5. Пат. 46631 А Україна, 7 В61F5/00. Візок вантажного вагона : деклараційний патент на винахід / Лашко А. Д., Савчук О. М., Мямлін С. В., Пшінько О. М., Бабаєв А. М., Кондратюк В. В. ; Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту. – № 2001106986 ; заявл. 15.10.01 ; опубл. 15.05.02, Бюл. № 5. – 4 с.
6. Пат. 87384 Україна, МПК (2014.01) В61F 7/00 В60В 37/00. Розсувна колісна пара «ДНУЗТ» [Текст] / Савчук О. М., Пшінько О. М., Мямлін С. В. – № у 2013 08302 ; заявл. 01.07.13 ; опубл. 10.02.14, Бюл. № 3. – 5 с.
7. Подвижной состав промышленного железнодорожного транспорта : учеб. для техникумов промышленного ж.-д. трансп. / В. А. Каблуков, О. М. Савчук, 1990. – 296 с.
8. Подвижной состав промышленного железнодорожного транспорта : учеб. для техникумов промышленного ж.-д. трансп. / В. А. Каблуков, О. М. Савчук, Н. Ф. Киричко. – Киев ; Донецк : Высшая школа, 1981. – 280 с.
9. Расчет вагонов на прочность при продольных ударах : учеб. пособие. Расчет динамических нагрузок. Ч. 1 / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, О. М. Савчук, А. В. Юрченко ; Днепрпетр. ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Днепрпетровск : ДИИТ, 1982. – 50 с.
10. Расчет вагонов на прочность при продольных ударах : учеб. пособие. Ч. 2. Расчет напряженного состояния / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, О. М. Савчук, А. В. Юрченко, 1983. – 65 с.
11. Расчет грузовых вагонов на прочность при ударах : учеб. пособие для вузов / Е. П. Блохин, И. Г. Барбас, Л. А. Манашкин, О. М. Савчук ; под ред. Е. П. Блохина. – Москва : Транспорт, 1989. – 230 с.
12. Швидкість вантажних вагонів : монографія / В. О. Мельничук, О. М. Савчук. – Харків : Техностандарт, 2010. – 92 с.



Робоча нарада на кафедрі

(1 ряд зліва направо – Савчук О. М., Коротєєв І. М. (завідувач кафедрою), Харитонов О. О., Осіпов О. С.; 2 ряд зліва направо – Рейдмейстер Г. В., Амосов Ю. Г., Бруякін В. К., Дударев А. С.)



Нарада зі швидкісного руху (1974 р.)



Науково-практична конференція (1967 р.)

Статтю підготовлено випускниками кафедри «Вагони та вагонне господарство» ДІТу, учнями Савчука О. М. професором Мямліним С. В. та професором Довганюком С. С.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

UDC 656.25-047.58

M. FRANEKOWA^{1*}, P. LÜLEY^{2*}

^{1*}Faculty of Electrical Engineering, University of Žilina, Univerzitná St., 8215/1, Žilina, Slovak Republic, 01026, tel. +421 (041) 513 33 46, e-mail maria.franekova@fel.uniza.sk

^{2*}Faculty of Electrical Engineering, University of Žilina, Univerzitná St., 8215/1, Žilina, Slovak Republic, 01026, tel. +421 (041) 513 33 46, e-mail peter.luley@fel.uniza.sk

MODELLING OF SAFETY-RELATED COMMUNICATIONS FOR RAILWAY APPLICATIONS

Purpose. The authors according to requirements of the standard valid for safety-related communication between interlocking systems (EN 50159) analyze the situation of message undetected which is transmitted across BSC channel. The main part is orientated to description of model with CRC code used for messages assurance across noise communication channel. **Methodology.** For mathematical description of encoding, decoding, error detection and error correction is used algebra of polynomials. **Findings.** The determination of the intensity of dangerous failure caused by the electromagnetic interference was calculated. **Originality.** To obtain information on the probability of undetected error in transmission code and safety code and on the intensity of dangerous failure from the motel it was created program with graphical interface. To calculate the probability of undetected error for any block code (n, k) was created a supporting program that displays the probability of undetected error for selected interval of error bit rate. **Practical value.** From the measured and calculated values obtained by the simulation one can see that with increasing error bit rate is increasing also intensity of dangerous failures. Transmission code did not detect all corrupted messages therefore it is necessary to use safety code independent on transmission code in safety-related applications. CRC is not able to detect errors if all bits are logical 0.

Keywords: safety integrity level; railway applications; safety-related communications; safety code; CRC; Matlab; modeling

Introduction

If the safety-related electronic system transfers information between different entities then the communication system is also part of a safety-related system and must be demonstrated that the transfer between end terminals is safe and in compliance with standard EN 50159 [5]. Safety-related communication system performs and fulfils safety functions with defined level of safety. Such a system includes a safety-related communication layer which contains all necessary mechanisms to ensure safety-related transfer of data [8]. Selection and use of a safety code and other recommended tech-

niques depends on whether is the possible unauthorized access to the system or not. This fact is very significant because in case of possible unauthorized access (malicious attacks) it is necessary to use cryptographic techniques with secret key. If there is no possibility of unauthorized access to the transmission system it is used non-cryptographic safety code (type A0). If the unauthorized access is possible we can achieve the safety by the transmission functions related with safety with the use of cryptographic mechanisms (type A1). Further is for this case used term cryptographic safety code. In case of possible unauthorized access can be used separate access protection layer (type B0 or B1).

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Corruption of the message during transmission can be caused by the network user, by the failure of transmission medium, by the interference of messages or by electromagnetic noise. Errors of this type are categorized as unintentional attacks. They can be detected by the CRC (Cyclic Redundancy Check) or by the CS (Check Sum). Evidence of safety with respect to the safety integrity level and the nature of the safety-related process must demonstrate appropriateness of: probability of the detection of random error types and ability to detect all types of expected message corruption systematic types.

Safety code must be independent of the transmission code what can be achieved in two ways. One is to use different encryption algorithms and the second is to use different configuration parameters of the same algorithm. To meet the required safety integrity level must be the probability of undetected errors below specified limit. Safety code must be able to detect transmission faults (e.g. impact of EMI) and systematic faults in untrusted transmission system caused by hardware failures. Safety code must also be able to detect typical faults of transmission system.

In the paper we work with the message type A0 because we do not expect unauthorized access to the transmission system. Each message will be secured with non-cryptographic safety code CRC-r.

Characteristic of safety code

Cyclic code is the most used code that can detect several multiple burst of errors. This code is one of the linear codes (n, k) , for which is applicable the linearity property and also property that cyclic shift of code word creates again code word belonging to the code [6]. This feature is used in the construction of encoders, mainly by the use of linear shift register with feedback. From the group of cyclic codes in most communication protocols are used block systematic CRC codes marked CRC-r (where r is the number of redundant bits in the code word with length of n bits). For mathematical description of encoding, decoding, error detection and error correction is used algebra of polynomials [7].

If is used the safety code in transmission system it is necessary to demonstrate probability of undetected error during transmission below the

limit defined by particular application or standard to ensure the required safety level. Therefore it is necessary to calculate the maximum value of probability of undetected error of code word in the transmission system for every safety code. In case of syndrome detecting techniques we look for event when syndrome is zero (error was not detected) but during the transmission of the code word occurred error. This case is mathematically expressed by probability of code word error p_{ned} depending on the error bit rate p_b of used channel. In the calculation are used statistical values of error bit rate of particular transmission speeds or if it is possible for particular application the channel is tested.

When calculating the probability of undetected errors are considered only errors arising due to interactions that cause the interchange of symbols. Errors to the improper synchronization are resolved by other safety means. The probability of undetected error for codes with unknown weight function can be calculated by following equation [4]:

$$P_{ned} \cong \frac{1}{2^{n-k}} \cdot \sum_{i=d_{\min}}^n \binom{n}{i} p_b^i \cdot (1-p_b)^{n-i} \quad (1)$$

If the conjunction of n and p_b is much smaller than one ($np_b \ll 1$) the sum can be approximated by the first number of the sum. The equation 1 can be adjusted to following:

$$P_{ned} = \frac{1}{2^{n-k}} \cdot \binom{n}{d_{\min}} p_b^{d_{\min}} \cdot (1-p_b)^{n-d_{\min}}, \quad (2)$$

where: n – total number of code bits, k – number of information part bits, d_{\min} – minimum Hamming distance, p_b – error bit rate of the communication channel.

The minimum Hamming distance d_{\min} and the length of code word n are the basis for the construction of block codes. The systematic block code (n, k) has the upper limit of achievable minimal Hamming distance given by Varshamov-Gilbert inequality. For odd values of d_{\min} applies equation 3 and for even values of d_{\min} applies equation 4. Codes where these two equations are equal are called perfect codes [3].

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$2^k \sum_{i=0}^{(d_{\min}-1)/2} \binom{n}{i} \leq 2^n, \quad (3)$$

$$2^k \sum_{i=0}^{(d_{\min}-2)/2} \binom{n-1}{i} \leq 2^{n-1}. \quad (4)$$

Error probability calculated according to the equation 2 limits to the value $2^{-(n-k)} = 2^{-r}$, what is the highest residual error rate of the code (equation 5). This value is stated as maximum value of undetected error for CRC-r codes [5]. The probability of undetected error can be then calculated by the following equation:

$$p_{\text{undet}} = 2^{-r}, \quad (5)$$

where r – number of redundant bits.

If the error is not detected by transmission code nor safety code while the data integrity was corrupted by EMI during the transmission of the message the intensity of dangerous failure caused by EMI λ_{EMI} is calculated according to equation 6 [6]:

$$\lambda_{EMI} = p_{SC} \cdot p_{TC} \cdot f_{cor}, \quad (6)$$

where: p_{SC} is the probability of undetected failure of safety code, p_{TC} is the probability of undetected failure of transmission code, $p_{TC} = 1$ if the transmission system does not include a channel encoder

and channel decoder of transmission code, f_{cor} is the frequency of occurrence of corrupted messages. In case of cyclic transmission of messages can be easily determined. In case of non-cyclic transmission of messages is this value estimated or set to the worst case scenario – all messages generated from the source are corrupted.

Description of realized model

Realized model of safety-related communication system with transmission code and safety code is shown in Fig. 1. In the figure is the scheme composed of seven blocks. Communication system consists of transmission system and two terminal equipment's TE_1 and TE_2 . Transmission system is composed of a communication channel CCH, encoder of transmission code E_{TC} , decoder of transmission code D_{TC} , encoder of safety code E_{SC} and decoder of safety code D_{SC} . The transmission system is untrusted if it contains only a communication channel and transmission code. The safety integrity level can be in this case defined as SIL 0. To achieve higher level of safety integrity SIL 1 to SIL 4 we have to add safety code for elimination of communication errors which are not detected via transmission code. The SIL level depends on the selected safety code.

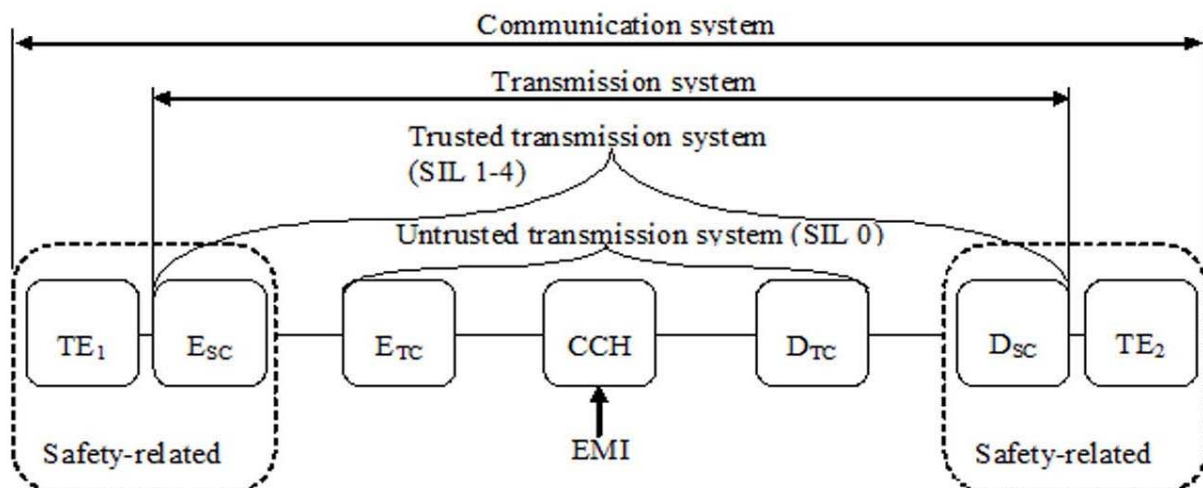


Fig. 1. Safety-related communication system for two-point connection

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

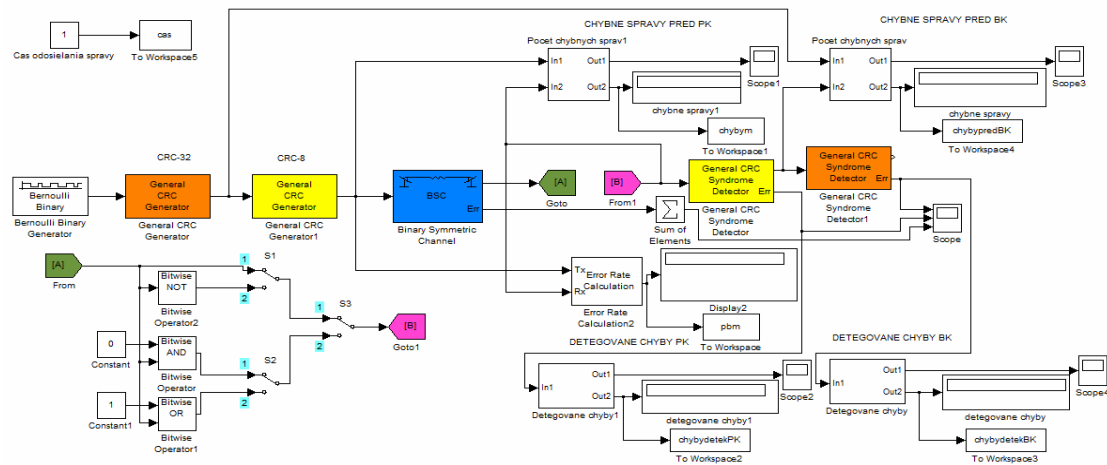


Fig. 2. Model with a safety code and transmission code realized in Matlab [2]

In Fig. 2 is shown the model simulating the transfer of n messages secured with safety code and transmission code which was constructed in software tool Matlab, version 7.10.0 (R2010a) and Communications System Toolbox library [2].

The model is constructed to simulate the transmission of messages through safety-related communication system secured by transmission code and safety code for two-point connection. From the point of view of ensuring the transmission we are using the safety code and transmission code based on CRC- r . Length of information part of the message was set to 64 bits. In order to ensure the independence of both types of codes was the generating polynomial of transmission code selected from standardized polynomials. For safety analysis we used generating polynomial of 8th degree type $G(x) = x^8 + x^2 + x + 1$, which is used for example in ATM link protocol. Safety code generating polynomial was also selected from standardized polynomials for safety-related applications. There was selected polynomial of 32nd grade

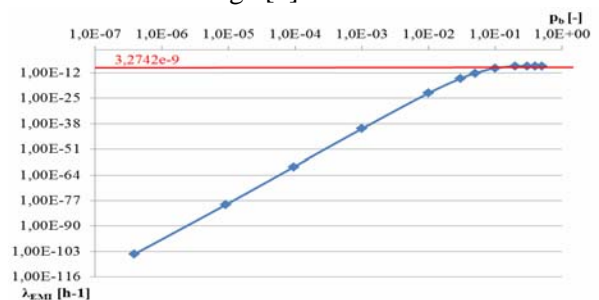
$$G(x) = x^{32} + x^{30} + x^{27} + x^{25} + x^{22} + x^{20} + x^{13} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + 1,$$

which is used for example by the European Train Control System ETCS and if used separately it provides integrity level SIL 2. Model is designed so that we can simulate different error pattern. To trigger them we use three switches (S1, S2, S3). If we want to simulate transmission where the messages are affected only by functional block of binary symmetric channel (which generates random errors) S1 must be in position 1, on the position of S2 does not matter and S3 must be in position 1. If we want to simulate transmission where the mes-

sages are affected by functional block of binary symmetric channel and subsequently negated the position of switches is as follows: S1 – position 2, S2 – does not matter, S3 – position 1. If we want to simulate transmission where all bits are set to logical 0 the position of switches is as follows: S1 – does not matter, S2 – position 1, S3 – position 2. If we want to simulate transmission where all bits are set to logical 1 the position of switches is as follows: S1 – does not matter, S2 – position 2, S3 – position 2.

Results and comments

During the time simulations of safety-related messages we were changing the bit error rate (BER) of the binary symmetric channel (BSC) by changing of BER in the range $1 \cdot 10^{-8}$ to 0,5 (values less than 10^{-8} have shown very low error rate). Time of the simulation was set to 100000 s for every error bit rate of binary symmetric channel to simulate transfer of 100000 messages with length 104 bits (64 bits of information part, safety code 32 bits and transmission code 8 bits). Each second was sent one message [2].

Fig. 4. Dependence of λ_{EMI} on p_b [4]

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

In the Fig. 2 is shown intensity of dangerous failures caused by EMI in closed transmission system which is assured by transmission and safety codes depending on the real BER of the communication channel. The value ($3,2742e-9$) is the worst intensity of dangerous failure. This is calculated as conjunction of the value of worst probability of transmission code (2^{-8}), value of worst probability of safety code and (2^{-32}) and the frequency of corrupted messages, when all messages are considered as corrupted (3600). This implies that such transmission system complies with requirements for the safety intensity level SIL 4 classified for all system with high demand ($10^{-9} \leq \text{THR} \leq 10^{-8}$).

Conclusions

The number of applications with higher SIL (Safety Integrity Level) for which is necessary to provide evidence of safety not only for hardware parts and software parts but also for the communication system is growing. The authors are in this papers dealing with the issue of safety-related communication and types of failures that may occur during transmission of safety-related messages. We focused on the requirements for the safety code according to standard EN 50159 with special attention to the cyclic code on the CRC principle. According to requirements of the standard it is necessary to demonstrate that transmission via real communication channel with safety code meets the required safety integrity level.

The main part of the article was orientated to model realization that simulates transmission of safety-related messages via communication system with closed transmission system at the level of two-point connection. We simulated transfer of messages for various settings of bit error rate of communication channel (model BSC). We also simulated transfer of messages in extreme fault condition as inversion of the message, all bits in logical 0 and all bits in logical 1. We applied limited binary error channel to test the integrity of the transfer with CRC-r safety code and transmission code for various lengths of simulated burst of errors. To obtain information on the probability of undetected error in transmission code and safety code and on the intensity of dangerous failure from the model we created program with graphical interface. To calculate the probability of undetected error for any block code (n, k) was created a supporting program that displays the probability of

undetected error for selected interval of error bit rate. We can see from the measured and calculated values obtained by the simulation that with increasing error bit rate is increasing also intensity of dangerous failures. Transmission code did not detect all corrupted messages therefore it is necessary to use safety code independent on transmission code in safety-related applications. CRC is not able to detect errors if all bits are logical 0.

Acknowledgements

This work has been supported by the Educational Grant Agency of the Slovak Republic (KEGA) Number: 008ŽU-4/2015: Innovation of HW and SW tools and methods of laboratory education focused on safety aspects of ICT within safety critical applications of processes control.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Białoń, A. Bezpieczeństwo i ryzyko na przykładzie urządzeń sterowania ruchem kolejowym / A. Białoń, M. Pawlik // Problemy kolejnictwa. – 2014. – Z. 163. – P. 25–41.
2. Cauner, R. Models of transmission systems with cyclic code generation via SW tool Matlab for safety-related applications ; Slovak Diploma work / R. Cauner ; University of Žilina. – Žilina, 2015.
3. Clark, G. C. Error-Correction Codes for Digital Communications / G. C. Clark, Jr. and J. Bibb Cain. – New York : Plenum Press, 1988. – 422 p. doi: 10.1007/978-1-4899-2174-1.
4. Communication security of industrial networks: in Slovak Komunikačná bezpečnosť priemyselných sietí / M. Franeková, F. Kállay, P. Peniak, P. Vestenický. – Žilina : EDIS ŽU, 2007.
5. EN 50159. Railway applications. Communication, signalling and processing systems. Safety-related communication in transmission systems. – 2010.
6. Franeková, M. Modelovanie prenosu dát v prostredí Matlab, Simulink a Communications System Toolbox / M. Franeková, R. Pirník, L. Pekár. – Žilina : Žilinská univerzita, 2014. – 218 p.
7. Muzikářová, E. Teória informácie a signálov / E. Muzikářová, M. Franeková. – Žilina : Žilinská univerzita, 2009. – 217 p.
8. Popov, G. Methods of increasing reliability of Semi-Ergatic Systems in extreme situation / G. Popov, M. Hristova, H. Hristov // Latest Trend in Applied Informatics and Computing : Proc. the 3rd Intern. Conf. on Applied Informatics and Computing Theory (17.10–19.10.2012). – Barcelona, Spain, 2012. – P. 225–231.

М. ФРАНЕКОВА^{1*}, П. ЛЮЛЕЙ²^{1*}Каф. «Електротехніка», Жилінський університет, вул. Університетська, 8215/1, Жиліна, Словацька Республіка, 01026, тел. +421 (041) 513 33 46, ел. пошта maria.franekova@fel.uniza.sk^{2*}Каф. «Електротехніка», Жилінський університет, вул. Університетська, 8215/1, Жиліна, Словацька Республіка, 01026, тел. +421 (041) 513 33 46, ел. пошта peter.luley@fel.uniza.sk

МОДЕЛЮВАННЯ ПРИСТРОЇВ ЗВ'ЯЗКУ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ БЕЗПЕКУ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ

Мета. Відповідно до вимог стандартів до безпечного зв'язку в системах централізації (EN 50159) авторами проаналізовано ситуацію невиявлених повідомлень про помилку, яка передається через канал двійкової синхронної передачі. Основна частина статті описує модель із кодом циклічної перевірки, яка використовується для забезпечення достовірності повідомлень, переданих через канал зв'язку шумових перешкод.

Методика. Для математичного опису кодування, декодування, виявлення і корекції помилок використовується алгебра многочленів. **Результати.** Для отримання інформації про ймовірність невиявлення помилки в коді передачі та коді безпеки, а також інформації про інтенсивність небезпечних відмов, була створена програма з графічним інтерфейсом. Для того, щоб обчислити вірогідність невиявлення помилки для будь-якого блочного коду (n, k) була створена допоміжна програма, яка відображає ймовірність невиявлення помилки для обраного інтервалу швидкості передачі бітів помилки. **Наукова новизна.** У статті розраховується визначення інтенсивності небезпечних відмов, викликаних електромагнітними перешкодами. **Практична значимість.** На основі вимірних та розрахункових значень, отриманих за допомогою моделювання, можна зробити висновок, що зі збільшенням частоти появи бітів помилки зростає також інтенсивність небезпечних відмов. Код передачі не може виявити всі пошкоджені повідомлення, тому необхідно використовувати код безпеки незалежно від коду передачі в додатках, пов'язаних із безпекою. Код циклічної перевірки не може виявити помилки, якщо всі біти логічні 0.

Ключові слова: рівень повноти безпеки; залізничні додатки; пристрої зв'язків безпеки; код безпеки; CRC; Matlab; моделювання

М. ФРАНЕКОВА^{1*}, П. ЛЮЛЕЙ²^{1*}Каф. «Электротехника», Жилинский университет, ул. Университетская, 8215/1, Жилина, Словацкая Республика, 01026, тел. +421 (041) 513 33 46, эл. почта maria.franekova@fel.uniza.sk^{2*}Каф. «Электротехника», Жилинский университет, ул. Университетская, 8215/1, Жилина, Словацкая Республика, 01026, тел. +421 (041) 513 33 46, эл. почта peter.luley@fel.uniza.sk

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СВЯЗИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ БЕЗОПАСНОСТЬ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

Цель. В соответствии с требованиями стандартов для безопасной связи в системах централизации (EN 50159) авторами проанализирована ситуация необнаруженных сообщений об ошибке, которая передается через канал двоичной синхронной передачи. Основная часть статьи описывает модель с кодом циклической проверки, используемую для обеспечения достоверности сообщений, передаваемых через канал связи шумовых помех. **Методика.** Для математического описания кодирования, декодирования, обнаружения и коррекции ошибок используется алгебра многочленов. **Результаты.** Для получения информации о вероятности необнаружения ошибки в коде передачи и коде безопасности, а также информации об интенсивности опасных отказов, была создана программа с графическим интерфейсом. Для того, чтобы вычислить вероятность необнаружения ошибки для любого блочного кода (n, k) была создана вспомогательная программа, которая отображает вероятность необнаружения ошибки для выбранного интервала скорости передачи битов ошибки. **Научная новизна.** В статье рассчитывается определение интенсивности опасных отказов, вызванных электромагнитными помехами. **Практическая значимость.** На основе измеренных и расчетных значений, полученных с помощью моделирования, можно сделать вывод, что с увеличением частоты появления битов ошибки растет также интенсивность опасных отказов. Код передачи не обнаруживает все поврежденные сообщения, поэтому необходимо использовать код безопасности независимо от кода передачи в приложении

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

ях, связанных с безопасностью. Код циклической проверки не может обнаружить ошибки, если все биты логичны 0.

Ключевые слова: уровень полноты безопасности; железнодорожные приложения; устройства связи безопасности; код безопасности; CRC; Matlab; моделирование

REFERENCES

1. Białoń A., Pawlik M. Bezpieczeństwo i ryzyko na przykładzie urządzeń sterowania ruchem kolejowym. *Problemy kolejnictwa*, 2014, z. 163, pp. 25-41.
2. Cauner R. Models of transmission systems with cyclic code generation via SW tool Matlab for safety-related applications. In: Slovak. Diploma work, University of Žilina, 2015.
3. Clark G.C., Jr. and J. Bibb Cain. Error–Correction Codes for Digital Communications. New York, Plenum Press, 1988. 422 p. doi: 10.1007/978-1-4899-2174-1.
4. Franeková M., Kállay F., Peniak P., Vestenický P. Communication security of industrial networks: in Slovak, Komunikačná bezpečnosť priemyselných sietí. Žilina, EDIS ŽU Publ., 2007.
5. EN 50159: Railway applications. Communication, signalling and processing systems. Safety-related communication in transmission systems. 2010.
6. Franeková M., Pirník R., Pekár L. Modelovanie prenosu dát v prostredí Matlab, Simulink a Communications Sytem Toolbox. Žilina, Žilinská univerzita Publ., 2014. 218 p.
7. Muzikářová L., Franeková M. Teória informácie a signálov. Žilina, Žilinská univerzita Publ., 2009. 217 p.
8. Popov G., Hristova M., Hristov H. Methods of increasing reliability of Semi-Ergatic Systems in extreme situation. Latest Trend in Applied Informatics and Computing: Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Applied Informatics and Computing Theory (17.10-19.10.2012) (AICT 2012). Barcelona, Spain. WSEAS Press, 2012, pp. 225-231.

Prof. V. H. Sychenko, D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: 19 May, 2016

Received: 15 Sept., 2016

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК [502.3:504.5:656.225.073.43-492]-047.58

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, М. О. ОЛАДИПО^{2*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, 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, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта Oladipo.toye@outlook.com, ORCID 0000-0001-7945-6657

МОДЕЛИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ

Цель. Научная работа направлена на разработку 3D, 2D численных моделей для прогноза загрязнения атмосферы при транспортировке сыпучих грузов в железнодорожном вагоне. **Методика.** Для решения поставленной задачи разработаны численные модели, основанные на применении уравнений движения невязкой несжимаемой жидкости и массопереноса, для определения поля скорости ветрового потока вблизи вагонов и рассеивания пыли в атмосфере. Для численного интегрирования уравнения переноса загрязнителя использовалась неявная разностная схема. При построении разностной схемы осуществляется расщепление уравнения переноса, что позволяет построить эффективный алгоритм решения дифференциальной задачи. Неизвестное значение концентрации загрязнителя на каждом шаге расщепления определяется по явной схеме – методу бегущего счета, что обеспечивает простую численную реализацию уравнений расщепления. Для численного интегрирования 3D уравнения для потенциала скорости применяется метод Рундсона. Для численного интегрирования 2D уравнения для потенциала скорости применяется метод суммарной аппроксимации. Разработанные численные модели составляют основу созданного пакета прикладных программ. На основе построенных численных моделей проведен вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения атмосферы при сносе угольной пыли из полувагона. **Результаты.** Разработаны 3D, 2D численные модели, которые относятся к классу «diagnostic models». Данные модели учитывают основные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания пылевых загрязнений в атмосфере при транспортировке сыпучих грузов. Предложенные численные модели требуют небольших затрат компьютерного времени при практической реализации на компьютерах малой и средней мощности. Эти модели используются для серийных расчетов разнообразных сценариях ситуаций, связанных с вопросами охраны окружающей среды и диагностики интенсивности загрязнения при различных метеоусловиях. Выполнены расчеты по определению концентрации загрязнителя и формирования зоны загрязнения вблизи вагона с сыпучим грузом в масштабе «microscale». **Научная новизна.** Созданы 3D, 2D численные модели, позволяющие учесть существенные факторы, влияющие на процесс рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере, и формирование зоны загрязнения при перевозке сыпучих грузов железнодорожным транспортом. **Практическая значимость.** Рассмотрены эффективные численные модели «diagnostic models» для экспресс-расчета уровня загрязнения атмосферы при транспортировке сыпучих грузов железнодорожным транспортом. Модели могут быть применены для разработки мероприятий по охране окружающей среды при эксплуатации железнодорожного транспорта. Предложенные модели позволяют рассчитать 3D, 2D гидродинамику ветрового потока и процесс массопереноса вредных веществ в атмосфере.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы; железнодорожный транспорт; перевозка сыпучих грузов; численное моделирование

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Введение

Нигерия имеет хорошо развитую сеть железных дорог (рис. 1). Железнодорожный транспорт Нигерии перевозит большое количество сыпучих грузов как в порты, так и на предприятия страны. Транспортируется уголь, руда и т.п. Поскольку транспортировка сыпучих грузов происходит в полувагонах, то при такой транспортировке имеет место интенсивное загрязнение окружающей среды (рис. 2), вызванное сносом пылевых загрязнений из полувагонов.



Рис. 1. Железнодорожная сеть в Нигерии

Fig. 1. The railway network in Nigeria

Этот процесс сопровождается такими последствиями:

1. Загрязнение подстилающей поверхности примагистральной территории, что ведет к ухудшению качества грунта.
2. Загрязнение атмосферы.
3. Потере массы груза в полувагонах.
4. Ухудшению свойств груза, его внешнего вида и товарного сорта.

В этой связи возникают две важные задачи:

1. Оценка уровня загрязнения окружающей среды при транспортировке сыпучих грузов.
2. Разработка методов защиты окружающей среды от загрязнения при транспортировке сыпучих грузов [4].

В настоящей работе для решения первой задачи разработаны специализированные численные модели. Следует отметить, что в настоящее время для решения задачи по оценке уровня загрязнения окружающей среды используются эмпирические или аналитические

модели [5–7, 10, 12, 13]. Данные модели не учитывают ряд физических факторов, которые существенно влияют на формирование концентрационного поля пыли в атмосфере. Эти методики не учитывают профиль скорости ветра, влияние самого вагона на формирование локального аэродинамического режима, форму насыпи сыпучего груза в полувагоне и т.д. Аналитические модели разработаны для случая точечного постоянно действующего источника выброса. Кроме этого, если применяется модель Гаусса [6, 7, 13], то необходимо выполнить научное обоснование значений коэффициентов дисперсии, которые были получены для территории США или Великобритании. Для территории других стран такого обоснования нет. Другим подходом к прогнозу уровня загрязнения окружающей среды при эмиссии вредных веществ является применение численных моделей [2, 3, 9, 14, 15]. Но существует определенный дефицит численных моделей для решения задач рассматриваемого класса.



Рис. 2. Сдвиг пылевых загрязнений при транспортировке сыпучих грузов

Fig. 2. Blowing dust contamination during transportation of bulk cargo

Поэтому возникает важная задача по созданию современных численных моделей класса CFD (computational fluid dynamics), которые позволяли бы осуществлять оценку уровня загрязнения окружающей среды при перевозке сыпучих грузов железнодорожным транспортом.

Цель

Целью данной работы является разработка 3D, 2D численных моделей для прогноза уровня загрязнения атмосферы при эмиссии пылевых загрязнений из полувагонов. Ставится задача создания моделей, которые позволяли бы учитывать основные физические факторы рассеивания пыли в атмосфере и при этом требовали бы малых затрат компьютерного времени при практической реализации (это модели группы «diagnostic models»).

Методика

Прогноз уровня загрязнения атмосферы при сдуве пылевых загрязнений из полувагона проводится в два этапа. На первом этапе решается задача по определению поля скорости воздушного потока с учетом взаимодействия его с полувагоном. Для решения этой задачи применяется уравнение для потенциала скорости (модель течения невязкой жидкости) [14, 15]:

$$\partial^2 \varphi / \partial x^2 + \partial^2 \varphi / \partial y^2 + \partial^2 \varphi / \partial z^2 = 0, \quad (1)$$

где φ – потенциал скорости, ось Z направлена вертикально вверх (рис. 2).

Компоненты вектора скорости воздушного потока рассчитываются по зависимостям:

$$u = \partial \varphi / \partial x, \quad v = \partial \varphi / \partial y, \quad w = \partial \varphi / \partial z.$$

Постановка краевых условий для данного уравнения рассматривается в работах [3, 8, 14].

После определения поля скорости воздушного потока возле полувагона, на втором этапе, решается задача о переносе пылевых загрязнений из полувагона в атмосферу. Для построения наиболее общей математической модели будем использовать фундаментальное уравнение массопереноса [2, 3, 6, 14, 15]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i), \quad (2)$$

где C – концентрация загрязняющего вещества (пылевой загрязнитель); u, v, w – компоненты вектора скорости воздушного потока; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коэффициенты атмосферной

турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса загрязнителя от «насыпи» в полувагоне; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)$ – дельта-функция Дирака; x_i, y_i, z_i – координаты источника выброса; w_g – скорость гравитационного оседания пыли; t – время.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [3, 8].

В разработанной численной модели используются следующие зависимости для задания профиля ветра и вертикального коэффициента атмосферной диффузии [5, 6]:

$$u = u_1 (z/z_1)^p, \quad \mu_z = k_1 (z/z_1)^m, \quad \mu_x = \mu_y = k_0 u,$$

где u_1 – скорость ветра на высоте z_1 (принимается $z_1 \approx 10 \text{ м}$); $k_1 = 0,2$; $k_0 = 0,1$; $p = 0,16$; $m \approx 1$.

Численное интегрирование уравнений модели выполняется на прямоугольной разностной сетке. При формировании расчетной области используется метод маркирования [2, 3]. С помощью маркеров задается положение железнодорожного вагона, форма «насыпи» сыпучего груза в полувагоне.

Для решения моделирующих уравнений (1), (2) используется метод сеток. Уравнение для потенциала скорости численно интегрируется с помощью метода Рундсона [11]. Для этого исходное уравнение для потенциала скорости предварительно приводится к эволюционному виду:

$$\partial P / \partial t = \partial^2 P / \partial x^2 + \partial^2 P / \partial y^2 + \partial^2 P / \partial z^2,$$

где t – фиктивное время.

Далее осуществляется аппроксимация производных и получается следующее разностное уравнение:

$$P_{ijk}^{n+1} = P_{ijk}^n + \frac{P_{i+1,j,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k+1}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} = 0.$$

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

На основе данной зависимости осуществляется расчет значения потенциала скорости в ячейках, соответствующих области воздушного потока.

В результате применения такой аппроксимации получается разностное уравнение, которое легко решить по явной формуле.

Для численного интегрирования уравнения массопереноса (2) применяется неявная разностная схема расщепления [2, 14, 15]. На каждом шаге расщепления неизвестное значение концентрации пыли находится по методу бегущего счета. Это позволяет получить простой алгоритм для расчета концентрационного поля пыли вблизи полувагона.

Для экспресс решения задачи аэродинамики (профильная задача) предлагается использовать двухмерное уравнение для потенциала скорости [14, 15]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (3)$$

где φ – потенциал скорости, ось Y направлена вертикально вверх.

Компоненты вектора скорости воздушного потока в этом случае рассчитываются по зависимостям:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}.$$

После определения двухмерного поля скорости осуществляется расчет формирования зоны пылевого загрязнения путем решения следующего уравнения массопереноса:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i), \quad (4)$$

где C – концентрация загрязняющего вещества (пылевой загрязнитель); w – скорость гравитационного оседания примеси (пыль); t – время.

Уравнение для потенциала скорости (3) численно интегрируется с помощью метода суммарной аппроксимации [11]. В результате применения этого метода осуществляется расщепление в разностном виде исходного уравнения на два уравнения. Определение неизвестного значения потенциала скорости из этих

двух уравнений происходит по явной схеме бегущего счета.

Для численного интегрирования уравнения массопереноса (4) применяется неявная разностная схема расщепления [14, 15].

На основе построенных численных моделей создан пакет прикладных программ («generic model»). Для проведения расчетов на базе этого пакета программ необходимо задать:

1. Класс устойчивости атмосферы.
2. Профиль скорости ветра.
3. Форму насыпи сыпучего груза в полувагоне.
4. Интенсивность выделения пыли от насыпи в полувагоне.

Отметим, что время расчета 3D аэродинамической задачи и задачи массопереноса составляет порядка 10 сек, а задачи в 2D постановке – 5 сек.

Результаты

Разработанные численные модели относятся к классу «diagnostic models». Данные модели могут быть использованы для быстрого серийного расчета загрязнения воздушной среды для разнообразных сценариев транспортировки сыпучих грузов в полувагонах при различных метеоситуациях. Построенные модели позволяют оперативно получить картину зон загрязнения, которые формируются возле вагона при сдуве пылевых загрязнений.

Пример практического использования разработанной 2D численной модели показан ниже. Рассматривался процесс сдува пылевого загрязнения из полувагона, транспортирующего уголь (рис. 3). Целью расчета являлась оценка размеров, формы и интенсивности формирующейся зоны загрязнения при транспортировке груза.

Как видно из рис. 3, зону загрязнения, которая сформировалась при сдуве пыли из полувагона, можно условно разбить на две подзоны: подзона 1 – это область с большим градиентом концентрации пыли, которая формируется непосредственно над насыпью груза в вагоне; подзона 2 – это шлейф пыли за полувагоном. Хорошо видно из рис. 3, что шлейф пыли за полувагоном имеет значительные размеры и происходит загрязнение не только воздушной среды, но и подстилающей поверхности. Картина зоны загряз-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

нення кардинально змінюється, якщо на борту по-лувагона встановить екран (рис. 4).

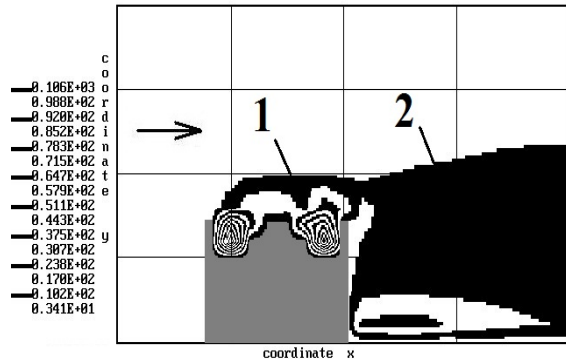


Рис. 3. Зона забруднення поруч з вагоном:

1 – зона забруднення, сформована над насипом в вагоні; 2 – зона забруднення за вагоном

Fig. 3. Pollution area near the car:

1 – pollution zone formed on the embankment in the car; 2 – pollution zone behind the car

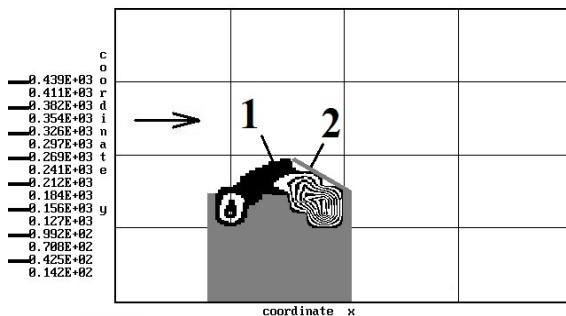


Рис. 4. Зона забруднення при використанні екрана, встановленого на борту вагона:

1 – зона забруднення, сформована над насипом в вагоні; 2 – екран

Fig. 4. Pollution zone when using the screen mounted on the car board:

1 – pollution zone formed on the embankment in the car; 2 – screen

Из рис.4 видно, что установка экрана привела к существенному уменьшению размеров зоны загрязнения атмосферного воздуха. Практически основная зона загрязнения формируется над насыпью груза. Экран препятствует интенсивному сносу пыли за вагоном.

Таким образом, применение разработанных численных моделей позволяет быстро осуществлять оценку экологической безопасности при транспортировке сыпучих грузов и определять эффективность применения экрана для минимизации уровня загрязнения атмосферного воздуха.

Научная новизна и практическая значимость

Созданы 3D, 2D численные модели, позволяющие рассчитывать формирование зон пылевых загрязнений возле железнодорожных вагонов при перевозке сыпучих грузов с учетом возможности установки защитного экрана на вагоне. Данные модели дают возможность учесть наиболее существенные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания пылевых загрязнений в атмосфере. Представленные 3D, 2D численные модели основаны на применении фундаментальных уравнений аэродинамики и массопереноса.

Особенностью разработанных моделей является использование стандартной исходной информации, быстрота в получении расчетных данных и удобство анализа получаемых результатов прогноза.

Выводы

Рассмотрены эффективные 3D, 2D численные модели «diagnostic models» для расчета уровня загрязнения атмосферы пылевыми выбросами при перевозке железнодорожным транспортом сыпучих грузов. Данные модели позволяют рассчитать 3D, 2D аэродинамику ветрового потока и процесс массопереноса пыли на прилегающие к железной дороге территории.

Дальнейшее совершенствование моделей следует проводить в направлении их развития для расчета аэродинамики на базе уравнений Навье-Стокса и уравнений массопереноса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белов, И. А. Взаимодействие неравномерных потоков с преградами / И. А. Белов. – Ленинград : Машиностроение, 1983. – 144 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. Моделирование процесса сноса угольного концентрата из полувагонов / Н. Н. Беляев, А. А. Карпо // Наук. вісн. буд-ва : зб. наук. пр. / Харк. нац. ун-т буд-ва та архі-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

- тектури. – Харків, 2016. – Вип. 1 (83). – С. 196–199.
4. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
 5. Берлянд, М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
 6. Бруацкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруацкий. – Киев : Ин-т 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.
 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 заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 27. – С. 138–142.
 10. Рудаков, Д. В. Модель рассеивания примеси в приземном слое атмосферы над поверхностью со сложным рельефом / Д. В. Рудаков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. Серія: Механіка. – Дніпропетровськ, 2004. – № 6. – Вип. 8, т. 1. – С. 89–97.
 11. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
 12. Светличная, С. Д. Оценка полученной токсодозы при распространении первичного облака токсического вещества / С. Д. Светличная // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. пр. / Нац. ун-т цив. захисту України. – Харків, 2011. – Вип. 13. – С. 127–132.
 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. – 2011. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, М. О. ОЛАДІПО^{2*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 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, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта Oladipo.toye@outlook.com, ORCID 0000-0001-7945-6657

МОДЕЛІ ОЦІНКИ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ СИПУЧИХ ВАНТАЖІВ

Мета. Наукова робота спрямована на розробку 3D, 2D чисельних моделей для прогнозу забруднення атмосфери при транспортуванні сипучих вантажів у залізничному вагоні. **Методика.** Для вирішення поставленої задачі розроблені чисельні моделі, засновані на застосуванні рівнянь руху нев'язкої нестисливої рідини і масопереносу, для визначення поля швидкості вітрового потоку поблизу вагонів та розсіювання пилу в атмосфері. Для чисельного інтегрування рівняння транспорту забруднювача використовувалася неявна різницева схема. При побудові різницевої схеми здійснюється розщеплення рівняння переносу, що дозволяє побудувати ефективний алгоритм розв'язання диференціальної задачі. Невідоме значення концентрації забруднювача на кожному кроці розщеплення визначається за явною схемою – методу біжучого рахунку, що забезпечує просту чисельну реалізацію рівнянь розщеплення. Для чисельного інтегрування 3D рівняння для потенціалу швидкості застосовується метод Річардсона. Для чисельного інтегрування 2D рівняння для потенціалу швидкості застосовується метод сумарної апроксимації. Розроблені чисельні моделі складають основу створеного пакета прикладних програм. На основі побудованих чисельних моделей проведений обчислювальний експеримент по оцінці рівня забруднення атмосфери при знесенні вугільного пилу з піввагона. **Результати.** Розроблено 3D, 2D чисельні моделі, які відносяться до класу «diagnostic models». Дані моделі враховують основні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання пилових забруднень в атмосфері

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

при транспортуванні сипучих вантажів. Запропоновані чисельні моделі вимагають невеликих затрат комп'ютерного часу при практичній реалізації на комп'ютерах малої та середньої потужності. Ці моделі використовуються для серійних розрахунків різноманітних сценаріїв ситуацій, пов'язаних із питаннями охорони навколишнього середовища і діагностики інтенсивності забруднення при різних метеоумовах. Виконано розрахунки по визначенню концентрації забруднювача і формування зони забруднення поблизу вагона з сипучим вантажем у масштабі «microscale». **Наукова новизна.** Створені 3D, 2D чисельні моделі, що дозволяють врахувати істотні фактори, впливаючі на процес розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері, і формування зони забруднення при перевезенні сипучих вантажів залізничним транспортом. **Практична значимість.** Розглянуто ефективні чисельні моделі «diagnostic models» для експрес-розрахунку рівня забруднення атмосфери при транспортуванні сипучих вантажів залізничним транспортом. Моделі можуть бути застосовані при розробці заходів із охорони навколишнього середовища при експлуатації залізничного транспорту. Запропоновані моделі дозволяють розрахувати 3D, 2D гідродинаміку вітрового потоку і процес масопереносу шкідливих речовин в атмосфері.

Ключові слова: забруднення атмосфери; залізничний транспорт; перевезення сипучих вантажів; чисельне моделювання

М. М. BILIAIEV^{1*}, М. О. OLADIPO^{2*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, 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, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail Oladipo.toye@outlook.com, ORCID 0000-0001-7945-6657

THE ASSESSMENT MODELS OF AIR POLLUTION DURING TRANSPORTATION OF BULK CARGO

Purpose. The scientific work is concentrated on development of 3D, 2D numerical models for the prediction of atmospheric pollution during transport of bulk cargo in the railway car. **Methodology.** To solve this problem numerical models were developed, based on the use of the motion equations of inviscid incompressible fluid and mass transfer, to determine the field of wind velocity near the cars and dispersion of dust in the atmosphere. For the numerical integration of the pollutant transport equation implicit alternating-triangular difference scheme was used. When constructing a difference scheme splitting of the transport equation is carried out that allows us to construct an efficient algorithm for solving a differential problem. Unknown value of the pollutant concentration at every step of splitting is determined by the explicit scheme – the method of point-to-point computation, which provides a simple numerical implementation of splitting equations. For numerical integration of the 3D equation for the velocity potential method of Richardson is applied. For numerical integration of the 2D equation for the velocity potential the method of total approximation is applied. The developed numerical models are the basis of established software package. On the basis of the constructed numerical models a computational experiment to assess the level of air pollution when demolition of coal dust from the gondola car was carried out. **Findings.** 3D, 2D numerical models that belong to the class «diagnostic models» were developed. These models take into account the main physical factors affecting the process of dust pollution dispersion in the atmosphere during transportation of bulk cargo, but require small costs of the computer time in the practice at the low and medium power machines. These models are used for serial calculations of various situations of scenarios related to issues of environmental protection and pollution intensity diagnostics for different weather conditions. Computational calculations to determine pollutant concentrations and formation of pollution zone near the cars with bulk cargo in «microscale» scale were submitted. **Originality.** 3D, 2D numerical models were created. They allow taking into account the relevant factors, influencing the process of pollutants dispersion in the atmosphere, and formation of the pollution zone during transport of bulk cargo by rail. **Practical value.** Efficient numerical models «diagnostic models» for rapid calculation of the atmosphere pollution level during transportation of bulk cargo by rail were considered. Models can be used in the development of environmental protection measures at the operation of rail transport. Proposed model allows calculating 3D, 2D hydrodynamics of wind flow and mass transfer process of pollutants in the atmosphere.

Keywords: air pollution; railway transport; bulk cargo transportation; numerical simulation

REFERENCES

1. Belov I.A. *Vzaimodeystviye neravnomernykh potokov s pregradami* [Interaction of nonuniform flows with baffles]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1983. 144 p.
2. Biliaiev M.M., 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 of emergencies]. Dnepropetrovsk, Aktsent PP Publ., 2013. 159 p.
3. Biliaiev M.M., Karpo A.A. Modelirovaniye protsessa snosa ugolnogo kontsentrata iz poluvagonov [Simulation of process of coal concentrate demolition from gondola cars]. *Zbirnyk naukovykh prats «Naukovyi visnyk budivnytstva»* [Proc. «Scientific Bulletin of Construction»], 2016, no. 1 (83), pp. 196-199.
4. Berlyand M.Ye. *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery* [Prediction and regulation of air pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 273 p.
5. Berlyand M.Ye. *Sovremennyye problemy atmosferynoy diffuzii i zagryazneniya atmosfery* [Contemporary problems of atmospheric diffusion and air pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 448 p.
6. Bruyatskiy Ye.V. *Teoriya atmosferynoy 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 vybrosov 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. Rudakov D.V. Model rasseivaniya primesi v prizemnom sloye atmosfery nad poverkhnostyu so slozhnym reliefom [Model of impurity dispersion in the atmospheric surface layer over a surface with complex relief]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Mekhanika* [Bulletin of Oles Honchar Dnipropetrovsk National University. Series: Mechanics], 2004, no. 6, issue 8, vol. 1, pp. 89-97.
11. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
12. Svetlichnaya S.D. Otsenka poluchennoy toksodozy pri rasprostraneni pervichnogo oblaka toksicheskogo veshchestva [Evaluation of the toxic dose received at the distribution of the primary cloud of toxic substances]. *Zbirnyk naukovykh prats «Problemy nadzvychaynykh sytuatsii»* [Proc. «Problems of emergency situations»], 2011, issue 13, pp. 127-132.
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., Biliaiev M.M. *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. Air Pollution Modeling and its Application XXI. Netherlands, Springer Publ., 2012. pp. 87-91.

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

Поступила в редколлегию: 01.06.2016

Принята к печати: 30.09.2016

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 656.212.5:625.1

И. А. ЕЛОВОЙ^{1*}, Е. Н. ПОТЫЛКИН^{2*}

^{1*}Каф. «Управление грузовой и коммерческой работой», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (529) 734 11 40, эл. почта ugkr@belsut.gomel.by, ORCID 0000-0001-9178-563X

^{2*}Каф. «Управление грузовой и коммерческой работой», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (529) 808 77 87, эл. почта gkrt@inbox.ru, ORCID 0000-0003-3872-8243

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ДЛЯ ВЫБОРА РЕЖИМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАНЦИЙ И ПУТЕЙ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Цель. Основной целью работы должно стать получение функциональных зависимостей для расчета оптимальных значений интервалов между подачами вагонов на фронты погрузки, выгрузки по критерию минимизации эксплуатационных затрат. Это позволит обосновывать выбор эффективных режимов взаимодействия железнодорожных станций и путей необщего пользования. **Методика.** Для достижения поставленной цели использованы методы научного анализа и синтеза, метод Брандона при аппроксимации функции, экспериментально-статистические методы составления математических зависимостей. **Результаты.** Получены формулы по определению: 1) оптимальных значений интервалов между подачами вагонов на места погрузки-выгрузки по критерию минимизации затрат при режиме взаимодействия железнодорожных станций с путями необщего пользования через расчетные интервалы времени; 2) групп вагонов среднего размера в составе одной подачи на путь необщего пользования; 3) продолжительности маневровой работы по расстановке вагонов у фронтов погрузки-выгрузки. **Научная новизна.** Усовершенствованы функциональные зависимости для определения оптимальных значений интервалов между подачами вагонов на фронты погрузки, выгрузки по критерию минимизации эксплуатационных затрат. Это стало возможным благодаря полученным формулам, которые учитывают влияние: 1) количества грузовых фронтов, задействованных в маневровых операциях с вагонами у мест погрузки-выгрузки; 2) групп вагонов среднего числа и размера, находящихся на пути необщего пользования; 3) подачи-уборки вагонов среднего размера; 4) наличия выставочных путей для перезарядки фронтов; 5) суммарной полной длины путей, задействованных в перезарядке фронтов погрузки-выгрузки. **Практическая значимость.** Полученные функциональные зависимости можно использовать при определении параметров цикла подачи-уборки вагонов на фронты погрузки-выгрузки, а также оптимальных значений интервалов между подачами при взаимодействии железнодорожной станции и путей необщего пользования. Использование полученных результатов позволит: 1) выявить слабые позиции при организации работы станции примыкания и путей необщего пользования; 2) уменьшить издержки владельцев железнодорожных путей необщего пользования и железной дороги в целом за счет минимизации экономических и временных потерь и, как следствие, повысить конкурентоспособность железнодорожного транспорта на рынке транспортных услуг.

Ключевые слова: путь необщего пользования; режим взаимодействия; подача-уборка вагонов; маневровые операции; интервал между подачами вагонов

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Введение

Пути необщего пользования являются важным элементом в логистической цепи движения ресурсов, поскольку они представляют собой связующие звенья в цепочке перевозочного процесса грузов от отправителя до получателя. На сети Белорусской железной дороги многие из них были построены в советское время, когда в стране функционировала плановая система экономики. В настоящее время в Республике Беларусь развивается рынок транспортных услуг, и современные тенденции его роста способствуют совершенствованию грузовой и коммерческой работы на железнодорожном транспорте, что связано с появлением операторов вагонных парков и конкурирующих перевозчиков, обеспечением погрузки и выгрузки грузов преимущественно на железнодорожных путях необщего пользования, возросшими требованиями клиентов к сокращению сроков доставки и согласования перевозок. Все это требует наличия современных технологических решений, направленных как на оптимизацию взаимодействия железной дороги с грузоотправителями и грузополучателями, так и на совершенствование внутренних технологических процессов, что будет способствовать повышению уровня конкурентоспособности железнодорожного транспорта на рынке транспортных услуг. Следовательно, проблемы взаимодействия железнодорожных станций и путей необщего пользования являются актуальными для Белорусской железной дороги, обуславливая важность данного научного исследования.

Цель

Технологические параметры взаимодействия путей необщего пользования с железнодорожными станциями играют важную роль при обосновании выбора эффективных режимов взаимодействия. Однако при их определении возникает ряд трудностей, связанных с достаточно большой трудоемкостью их определения. Поэтому целью представленной работы является установление аналитических зависимостей оптимальных значений интервалов между подачами вагонов на грузовые фронты по экономическому критерию, позволяющих минимизировать затраты в процессе взаимодействия же-

лезнодорожных станций с путями необщего пользования.

Методика

Для достижения поставленной цели при проведении данного исследования использованы методы научного анализа и синтеза, метод Брандона при аппроксимации функции, экспериментально-статистические методы составления математических зависимостей [8].

Результаты

Вопросами эксплуатации железнодорожных подъездных путей с середины 20-го века занимались Ферапонтов Г. В., Сотников И. Б. В их трудах рассмотрены проблемы взаимоотношения железных дорог и ветвладельцев, дано описание единых технологических процессов, обобщены опыт передачи железнодорожных подъездных путей в ведение железных дорог и практика организации работы на них, дан анализ использования подвижного состава на подъездных путях [13, 14]. Проблемы же организации процессов грузовой работы как на местах необщего пользования, так и на местах общего пользования занимались Смахов А. А. и Лазарев Х. М., Григорюк В. Ф. В их работах представлены решения оптимизации грузовой работы, сопутствующих и предшествующих элементов грузовой работы и др. [5, 10]. В 80-е годы исследованиями по применению математических методов и ЭВМ для расчетов оптимального использования грузоподъемности и вместимости вагонов, технического оснащения грузовых фронтов и управления ими, для оптимального планирования работы кранов на контейнерных пунктах и выбора их наиболее выгоднейших параметров, для автоматизации коммерческих операций занимались Правдин Н. В., Дыканюк М. Л., Негрей В. Я. [11].

В настоящее время в области взаимодействия железнодорожных станций с путями необщего пользования также ведутся исследования. Серазетдиновой А. Д. разработана методика управления вагонопотоками на путях необщего пользования в условиях изменения их структуры и интенсивности, учитывающая оперативную загруженность станций. [12]. Теоретическими исследованиями и разработкой научно обоснованных подходов к моделированию

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

взаимоотношений корпорации «Российские железные дороги» с регионами и хозяйствующими субъектами для повышения эффективности взаимодействия занималась Афанасьева Н. А. Она разработала: показатель оценки эффективности сотрудничества корпорации «Российские железные дороги» с регионами страны; методику обоснования совместной программы развития транспортной инфраструктуры в регионе с учетом интересов корпорации и региона; показатель оценки развития региона вследствие реализации совместных программ [1]. Кроме того, среди современных ученых, занимающихся исследованием взаимодействия железнодорожных станций с путями необщего пользования, следует выделить Гарлицкого Е. И., Вернигору Р. В., Козаченко Д. Н. [3, 4, 7], а также иностранных Gert-

Joost Peek, Jyh-Cherng Jong, Lorenzo Mussone [15, 16, 17].

Анализ трудов ученых показал, что традиционно применяются три основных режима их взаимодействия: через равные интервалы времени, по расписанию, по уведомлению.

Каждый из представленных режимов характеризуется циклом подачи-уборки вагонов на путь необщего пользования или маневровый район, который включает в себя ряд последовательно выполняемых операций: ожидание подачи вагонов, подача, ожидание и выполнение маневровых операций по расстановке групп вагонов у мест погрузки, выгрузки, ожидание уборки вагонов, уборка. Формулы, с помощью которых принято определять численные значения этих элементов, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Формулы для определения составляющих цикла подачи-уборки вагонов

Table 1

Formulas for determining the components of cycle of cars delivery-removal

Наименование операции (величины) (параметра)	Формула	Примечания
Продолжительность полурейса	$t_{п/р} = \frac{(\alpha_{рт} + \beta_{рт} m) \cdot \frac{v}{2} + 3,6 \cdot \frac{l_{п/р}}{v}}{60}$	$\alpha_{рт}$, $\beta_{рт}$ – коэффициенты, учитывающие время необходимое для изменения скорости движения локомотива и каждого вагона на 1 км/ч при разгоне соответственно, и время, необходимое для изменения скорости движения на 1 км/ч при торможении;
Технологическое время на сборку вагонов	$t_{сб} = 1,8 \cdot p_{сб} + 0,3 \cdot n_{сб}$	m – количество вагонов в составе, вагонов; v – допустимая скорость движения при маневрах, км/ч;
Технологическое время на сортировку вагонов	$t_c = A \cdot g_\phi + B \cdot n_c$	$l_{п/р}$ – длина полурейса, м; $p_{сб}$ – количество путей, с которых переставляются вагоны; $n_{сб}$ – количество вагонов, переставляемых на путь сборки;
Продолжительность ожидания выполнения операции	$t_{ож} = \frac{\rho^2 (v_{вх}^2 + v_{обсл}^2)}{2\lambda(1-\rho)}$	g_ϕ – количество групп формирования на пути накопления; A, B – нормативные коэффициенты, мин; n_c – среднее количество сортируемых вагонов [9]; $v_{вх}$, $v_{обсл}$ – коэффициенты вариации входящего потока требований и продолжительности обслуживания соответственно; ρ – загрузка обслуживающего устройства; λ – интенсивность поступления требований, требований/ч [2]

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Взаимодействие железнодорожной станции и пути необщего пользования предусматривает подачу вагонов на фронты погрузки выгрузки в среднем через интервал времени I_n . При этом, как правило, накопление вагонов на состав подачи происходит на пути станции при-мыкания (рис. 1).

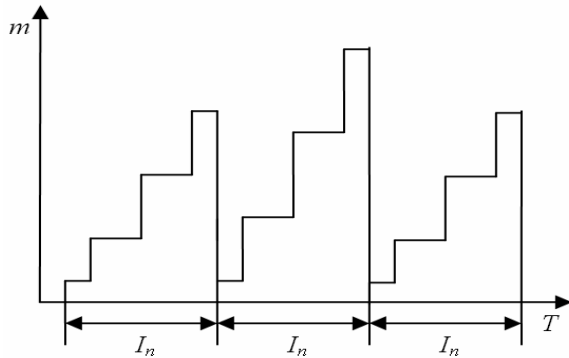


Рис. 1. Накопление вагонов на состав подачи на пути станции примыкания

Fig.1. Accumulation of cars for the train of supply to the tracks of connecting station

Вагоно-часы накопления вагонов для подачи на грузовые фронты i -го маневрового района составляют

$$B_i = \frac{I_n \cdot m_i^{ny}}{2}, \quad (1)$$

где I_n – продолжительность накопления вагонов на состав подачи, ч/подачу; m_i^{ny} – размер подачи (уборки) на i -й маневровый район, вагонов.

Приняв, что продолжительность накопления вагонов на состав подачи одинакова и равна I_n (рис. 1), размер подачи (уборки) на i -й маневровый район (путь необщего пользования) рассчитывается по формуле

$$m_i^{ny} = \alpha_i \cdot I_n \cdot k_n, \quad (2)$$

где α_i – интенсивность накопления (поступления) вагонов на пути для подачи на фронты погрузки, выгрузки i -го маневрового района (пути необщего пользования); k_n – коэффициент неравномерности.

Приняв во внимание то, что для подачи на фронты погрузки, выгрузки i -го маневрового района (пути необщего пользования) на путь

накопления поступает вагонов в количестве $m_{cp}^{сут}$, интенсивность накопления можно представить в следующем виде:

$$\lambda_i = \frac{m_{cp}^{сут}}{24}, \quad (3)$$

где $m_{cp}^{сут}$ – среднесуточное количество вагонов, поступающих на маневровый район (путь необщего пользования).

Затраты на накопление вагонов рассчитываются по формуле

$$Z_{накi} = \frac{I_n \cdot m_i^{ny}}{2} \cdot C_{6-ч}, \quad (4)$$

где $C_{6-ч}$ – стоимость одного вагоно-часа, ден.ед./вагоно-час.

Приняв, что подачу вагонов, накопленных на состав подачи, на i -й маневровый район выполняет один локомотив, затраты на выполнение маневровой работы определяются по формуле

$$Z_{м.р.i} = C_{л-ч} \cdot T_{м.р.i}, \quad (5)$$

где $C_{л-ч}$ – стоимость одного локомотиво-часа, ден.ед./локомотиво-час; $T_{м.р.i}$ – продолжительность выполнения маневровой работы на i -ом маневровом районе (пути необщего пользования) одним локомотивом, ч,

$$T_{м.р.i} = T_{подi} + T_{перезi} + T_{убi}, \quad (6)$$

где $T_{подi}$ – продолжительность подачи вагонов на i -й маневровый район, ч; $T_{перезi}$ – продолжительность маневровых операций с вагонами у мест погрузки, выгрузки на i -ом маневровом районе, ч; $T_{убi}$ – продолжительность уборки вагонов с i -ого маневрового района, ч.

Особое внимание следует уделить маневровым операциям с вагонами у мест погрузки-выгрузки, которые представляют собой совокупность последовательных полурейсов с учетом смены направления движения локомотива, укладки тормозных башмаков, перекрытия концевых кранов, разъединения тормозных рукавов, расцепки и т.п. В настоящее время продолжительность выполнения указанных манев-

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ровых операций принято определять суммированием продолжительностей полурейсов и смен направления движения. Однако данный способ является громоздким, но в то же время достаточно точным. В то же время маневровые операции с вагонами у мест погрузки, выгрузки можно представить в виде набора операций по сборке и сортировке групп вагонов, при этом нужно учесть путевое развитие маневрового района, где расположены фронты погрузки, выгрузки. Анализ схем путевого развития путей необщего пользования на сети Белорусской железной дороги позволил выделить среди них два основных типа: 1) схемы, на которых есть выставочный путь; 2) схемы, на которых нет выставочного пути. Продолжительность маневровых операций с вагонами у мест погрузки, выгрузки будет различной для представленных схем. На рис. 2 приведена технология их выполнения на путях необщего пользования, где есть выставочный путь.

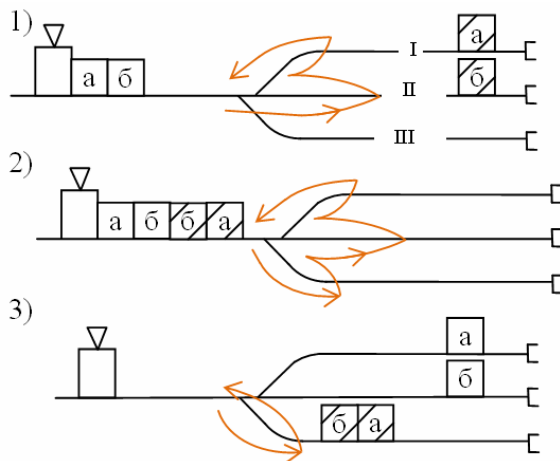


Рис. 2. Последовательность маневровых операций по расстановке вагонов у мест погрузки, выгрузки при наличии выставочного пути: *I, II* – погрузочно-выгрузочные пути; *III* – выставочный путь

Fig. 2. The sequence of shunting operations for car spotting at the places of loading, unloading in the presence of goods siding:

I, II – loading and unloading tracks; *III* – goods siding

В таком случае маневровая работа с вагонами включает в себя две сборки и одну сортировку вагонов (рис. 2), а ее продолжительность составляет

$$T_{\text{перез}} = t_{c1} + t_{c\bar{0}1} + t_{c2}.$$

Подставляя в формулу вместо t_c , $t_{c\bar{0}}$, равенства из табл. 1, после упрощения и введения средних значений переменных, получается:

$$T_{\text{перез}} = 1,8 \cdot (p + 1) + A \cdot (g_{cp} + 1) + m_{cp}^{ny} \times \\ \times (0,3 + B) + m_{cp}^{sp} \cdot (0,6 + B),$$

где g_{cp} – среднее число групп вагонов, находящихся на пути необщего пользования (маневровом районе), которые задействованы в перезарядке, групп; m_{cp}^{ny} – средний размер подачи (уборки) вагонов; m_{cp}^{sp} – средний размер группы вагонов; p – число путей, на которые поступают вагоны в процессе выполнения маневровых операций с вагонами у мест погрузки-выгрузки.

Технология выполнения маневровых операций у пунктов погрузки, выгрузки на путях необщего пользования в случае отсутствия выставочного пути приведена на рис. 3.

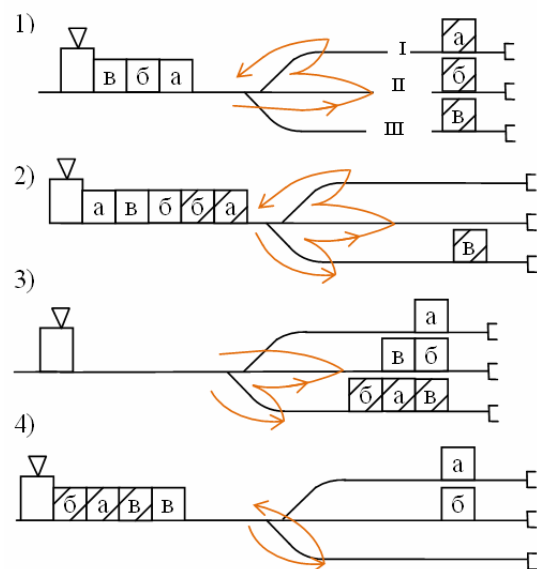


Рис.3. Последовательность операций по расстановке вагонов у мест погрузки, выгрузки при отсутствии выставочного пути: *I, II, III* – погрузочно-выгрузочные пути

Fig. 3. The sequence of shunting operations for car spotting at the places of loading, unloading in the absence of goods siding:

I, II, III – loading and unloading tracks

Продолжительность выполнения маневровых операций с вагонами у мест погрузки, вы-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

грузки по технологии, представленной на рис. 3, рассчитывается по формуле

$$T_{\text{перез}} = A \cdot (p + 1) + 1,8 \cdot (g_{cp} + 1) + 2 \cdot m_{cp}^{my} \times \\ \times (0,3 + B) + m_{cp}^{zp} \cdot (g_{cp} \cdot (0,3 + B) + B).$$

Значения продолжительностей маневровой работы, полученные по представленным формулам, значительно отличаются от эмпирических данных. Представленный способ расчета по формулам сортировки, сборки является простым, однако недостаточно точным. Неточность этого способа обоснована тем, что формулы, приведенные в табл. 1, приспособлены для определения продолжительности маневровой работы на железнодорожных станциях, которые в отличие от путей необщего пользования характеризуются территориальной сосредоточенностью путей, компактностью стрелочных зон и др. Поэтому для повышения точности расчета данным способом необходимо ввести дополнительные переменные. На основании анализа собранных статистических данных установлено, что продолжительность выполнения маневровых операций с вагонами у мест погрузки, выгрузки зависит от: суммарной полной длины путей, задействованных в маневровых операциях, среднего размера группы вагонов, количества вагонов в составе подачи, количества путей, на которые поступают вагоны в процессе выполнения маневровой работы с вагонами у мест погрузки, выгрузки, наличия выставочных путей, среднего числа групп вагонов, находящихся на пути необщего пользования (маневровом районе), количества фронтов погрузки, выгрузки. В общем виде искомая функция будет зависеть от следующих параметров

$$F = f(g_{cp}, m_{cp}^{my}, m_{cp}^{zp}, p, \sum l^{\text{пол}}, N_{\phi}), \quad (7)$$

где $\sum l^{\text{пол}}$ – сумма полных длин путей, задействованных при выполнении маневровых операций с вагонами у мест погрузки-выгрузки, м; N_{ϕ} – количество грузовых фронтов, задействованных при выполнении маневровых операций с вагонами у мест погрузки-выгрузки.

С помощью методов регрессионного анализа, которые относятся к экспериментально-статистическим методам составления матема-

тических моделей, установлены зависимости продолжительности маневровых операций с вагонами у мест погрузки-выгрузки. При наличии выставочного пути в маневровом районе (пути необщего пользования), используемого для расстановки вагонов, функция имеет следующий вид:

$$T_{\text{перез}} = 1,8 \cdot (p + 1) + A \cdot (g_{cp} + 1) + \\ + (m_{cp}^{my} \cdot (0,3 + B) + m_{cp}^{zp} \cdot g_{cp} \cdot (0,6 + B)) \times \\ \times (0,0131p + 0,0368)(0,0745 \cdot N_{\phi} + 0,7612) + \\ + 1,3 \frac{p}{N_{\phi}} (0,0552 \cdot \frac{\sum l^{\text{пол}}}{p} + 7,6169) \times \\ \times (0,3074 \cdot N_{\phi} + 0,0779).$$

При отсутствии выставочного пути

$$T_{\text{перез}} = 1,8 + A + A \cdot p + 1,8 \cdot g_{cp} + \\ + (2 \cdot m_{cp}^{my} \cdot (0,3 + B) + m_{cp}^{zp} \cdot (g_{cp} \cdot (0,3 + B) + B)) \times \\ \times (0,0289p - 0,1345)(1,4091 - 0,1713 \cdot N_{\phi}) + \\ + (0,087 \cdot \frac{\sum l^{\text{пол}}}{p} + 10,215) \times (0,1609 \cdot N_{\phi} + 0,4369).$$

Среди достоинств полученных зависимостей следует выделить соблюдение технологии: формула (7) основана на том, что в процессе выполнения маневровых операций с вагонами у мест погрузки, выгрузки выполняются последовательно сборка, сортировка, сборка вагонов; формула (4) – сборка, сортировка, сборка, сортировка. Это предоставляет возможность для дальнейшего установления целесообразности осуществления маневровой работы у мест погрузки-выгрузки на путях необщего пользования крупных промышленных предприятий по технологии: сборка на фронтах, уборка вагонов на пути накопления, подача вагонов на фронты погрузки, выгрузки. К недостаткам можно отнести отсутствие зависимости функции F от длины стрелочной зоны. Однако анализ путей необщего пользования на сети Белорусской железной дороги показал, что большинство из них имеют путевое развитие с длиной стрелочной зоны до 100 м, что учтено коэффициентами A и B .

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Однако при использовании полученных формул могут возникнуть проблемы, связанные с определением среднего размера группы вагонов. Весомый вклад в исследование средней величины группы вагонов внес Сотников Е. А. Однако следует отметить, что в полученной им зависимости среднее число назначений, на которые прибывают вагоны в одном поезде, находится в интервале, зависящем от общего количество назначений. В связи с этим возникают трудности при использовании этой формулы при выполнении расчетов. Поэтому на основании статистических данных с помощью уравнения множественной регрессии методом Брандона получена аналитическая зависимость среднего размера группы вагонов в составе одной подачи-уборки от зависящих параметров. Особенность метода заключается в том, что порядок расположения выбранных факторов не безразличен для точности обработки результатов наблюдений: чем больше влияние на исследуемую величину оказывает выбранный параметр, тем меньше должен быть его порядковый номер. Основываясь на значениях коэффициентов детерминированности, определена последовательность использования переменных и получена формула для определения средней величины группы вагонов в составе подачи (уборки)

$$m_{cp}^{гр} = \frac{2,28}{N_{\phi}} \cdot (0,15 \cdot m_{cp}^{сут} - 0,0017 \cdot (m_{cp}^{сут})^2) \times \\ \times (0,16 \cdot m_{cp}^{ny} - 0,0006 \cdot (m_{cp}^{ny})^2).$$

На основании формул (1) и (2) можно определить суммарные затраты на выполнение маневровой работы и накопление, приходящиеся на один вагон

$$F_{п} = \frac{I_{п} \cdot C_{\phi-q} + C_{л-ч} \cdot T_{м.р.и}}{2} + \frac{C_{л-ч} \cdot T_{м.р.и}}{\alpha_i \cdot I_{п} \cdot k_{н}}.$$

Функция $F_{п}$ непрерывна и дифференцируема по $I_{п}$. Поэтому оптимальное значение $I_{п}$ можно определить из уравнения

$$dF_{п}(I_{п})/dI_{п} = 0. \quad (8)$$

В ходе решения данного уравнения введены следующих обозначения:

$$Z = 30 \cdot C_{\phi-q} - \frac{0,001368}{N_{\phi}} \cdot (0,6 + B) \cdot C_{л-ч} \cdot g \cdot c_{р} \times \\ \times (0,0745 \cdot N_{\phi} + 0,7612) \times \\ \times (0,0131 \cdot p + 0,0368) \cdot \lambda \cdot k_{н} \times \\ \cdot (0,15 \cdot m_{cp}^{сут} - 0,0017 \cdot (m_{cp}^{сут})^2),$$

$$R = \frac{p}{N_{\phi}} \cdot (0,0552 \cdot \frac{\Sigma I^{пол}}{p} + 7,6169) \times \\ \times (0,3074 \cdot N_{\phi} + 0,0779),$$

$$W_{п} = \lambda_{рп} \cdot \frac{v_{под}}{120} + 0,06 \cdot \frac{l_{п/р}}{v_{под}},$$

$$W_{y} = \lambda_{рп} \cdot \frac{v_{уб}}{120} + 0,06 \cdot \frac{l_{п/р}}{v_{уб}},$$

$$D = \frac{24 \cdot C_{л-ч}}{m_{cp}^{сут} \cdot k_{н}},$$

$$h_1 = 1 + \frac{\rho_{лок} \cdot (v_{вх1}^2 + v_{обсл1}^2)}{2 \cdot (1 - \rho_{лок})},$$

$$h_2 = (1 + \frac{\rho_{лок} \cdot (v_{вх2}^2 + v_{обсл2}^2)}{2 \cdot (1 - \rho_{лок})}),$$

$$h_{т} = \frac{60 \cdot Q_{п} \cdot (1 - \gamma) \cdot t_a \cdot (v_{вха}^2 + v_{обсла}^2)}{2 \cdot (y \cdot T \cdot q_{п} - Q_{п}) \cdot Z},$$

где $v_{вх1}$, $v_{вх2}$, $v_{вха}$ – коэффициенты вариации входящего потока, подач, уборок вагонов, автомобилей соответственно; $v_{обсл1}$, $v_{обсл2}$, $v_{обсла}$ – коэффициенты вариации продолжительности обслуживания, подач, уборок вагонов, автомобилей соответственно; $\rho_{лок}$ – загрузка локомотива; $Q_{п}$ – объем грузопереработки, тонно-операций в сутки; $q_{п}$ – эксплуатационная норма выработки механизма, отнесенная к 1 ч его работы, т/ч; y – количество погрузочно-разгрузочных механизмов на грузовом фронте; γ – доля от общей загрузки механизмов при обслуживании входящего потока вагонов; T – продолжительность работы грузового фронта в течении суток, ч; t_a – продолжительность обслуживания одного автомобиля, ч [10].

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Решив уравнение (8), относительно $I_{п}$ в случае наличия выставочного пути в маневровом районе (пути необщего пользования) получено

$$I_{п1} = \sqrt{\frac{W_{п1} + W_{y1} + 1,8(p+1) + R + A(g_{cp} + 1)}{Z}} \cdot D.$$

При недетерминированном потоке подач вагонов в продолжительности маневровой работы на маневровом районе (пути необщего пользования) необходимо учесть возможные ожидания [10]. В результате получена формула по определению оптимального интервала между подачами вагонов на фронты погрузки, выгрузки по критерию минимизации эксплуатационных затрат в случае наличия выставочного пути в маневровом районе:

$$I_{п2} = \sqrt{\frac{W_{п2} \cdot h_1 + W_{y2} \cdot h_2 + 1,8 \cdot (p+1) + A \cdot (g_{cp} + 1) + R + h_r}{Z}} \cdot D. \quad (9)$$

Следует отметить, что представленные формулы работают в условиях, когда производится расстановка вагонов у фронтов погрузки-выгрузки в пределах одного маневрового района. В случае, если за одну подачу-уборку обслуживаются несколько районов, то следует выполнить суммирование $T_{перез}$, с введением коэффициента двойных операций при перестановке вагонов из одного маневрового района в другой.

На основании полученных зависимостей построен график, представленный на рис. 4, отражающий зависимость оптимального по критерию минимизации затрат интервала между подачами вагонов от интенсивности их накопления и числа путей.

Как видно из рис. 4 значения интервалов между подачами, полученные по формуле (9), заключены в пределах от 3 до 9 часов. На основании чего можно сделать вывод об адекватности разработанной модели, отражающей реальную действительность.

Стоит учесть, что главная цель оптимизационных расчетов заключается в определении наиболее чувствительных элементов, влияющих на интервал между подачами вагонов на пути необщего пользования. В связи с этим

проведено исследование степени влияния исходных параметров на относительные изменения целевой функции по упрощенной схеме, в которой действие каждого параметра оценивается в отдельности, в то время как остальные величины принимаются постоянными. Рассмотренные параметры имеют неодинаковую физическую сущность и размерность. Поэтому для их сравнения между собой по степени влияния на целевую функцию $F_{п}$ все они приводятся к безразмерному виду, т. е. находится процент отклонения определенного параметра от его расчетного или оптимального значения [6]. Относительные приращения исследуемого параметра и целевой функции рассчитываются по формулам:

$$\Delta_p^i = \left| \frac{\Delta pr_i}{pr_i} \right|,$$

$$\Delta_F^i = \frac{F_{п}(pr_i + \Delta pr_i) - F_{п}(pr_i)}{F_{п}(pr_i)},$$

где pr_i – исследуемый параметр; Δpr_i – погрешность параметра.

В результате исследования построен график зависимости $\Delta_F^i = f(\Delta_p^i)$, представленный на рис. 5.

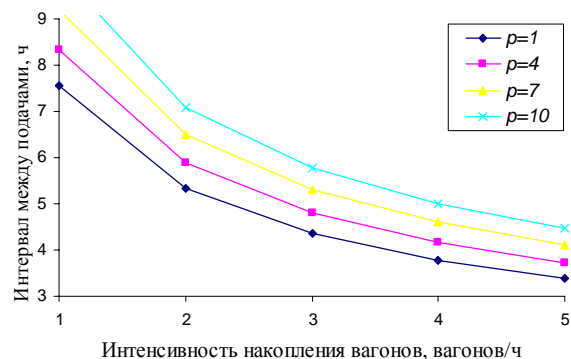


Рис. 4. График зависимости оптимального по критерию минимизации затрат интервала между подачами от интенсивности накопления вагонов при различном числе путей

Fig. 4. A dependence graph of the optimal interval between car deliveries according to the criterion of minimizing the costs on the intensity of cars accumulation at the different number of tracks

На основании анализа рис. 5 и полученных результатов можно сделать вывод о том, что по

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

степени впливання кожного из параметров на целевую функцию их следует располагать в следующей последовательности:

- 1) среднесуточное количество вагонов, поступающих на путь необщего пользования ($M_{\text{сут}}$);
- 2) суммарная полная длина путей, задействованных при маневрах ($\sum L$);
- 3) число таких путей (p);
- 4) среднее число групп вагонов, находящихся на пути необщего пользования (маневровом районе) (g);
- 5) количество грузовых фронтов, задействованных в маневровых операциях с вагонами у мест погрузки-выгрузки (N_{ϕ}).

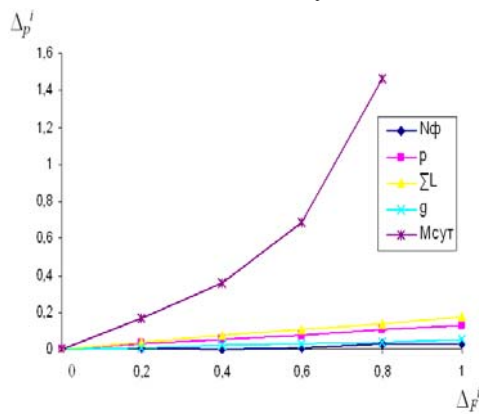


Рис. 5. График зависимости относительных изменений целевой функции от относительных приращений параметров

Fig. 5. A dependence graph of the relative changes in the objective function on the relative increments of the parameters

Полученные зависимости предоставляют возможности для дальнейших исследований взаимодействия железнодорожной станции примыкания и станции, формирующей в ее адрес передаточные поезда, а также взаимодействия путей необщего пользования и станции примыкания в условиях функционирования вагонов грузоотправителей, грузополучателей.

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

- усовершенствованы функциональные зависимости для определения оптимальных зна-

чений интервалов между подачами вагонов на грузовые фронты при детерминированном и недетерминированном потоках подач вагонов на пути необщего пользования;

– предложены формулы по определению продолжительности выполнения маневровых операций с вагонами у мест погрузки-выгрузки, зависящие от следующих параметров: суммарной полной длины путей, задействованных при маневрах; среднего размера группы вагонов; среднего размера подачи-уборки вагонов; количества путей, на которые поступают вагоны в процессе выполнения маневровой работы; наличия выставочных путей для перезарядки у грузовых фронтов; среднего числа групп вагонов, находящихся на пути необщего пользования (маневровом районе); количества грузовых фронтов, задействованных в маневровых операциях с вагонами у мест погрузки-выгрузки. При этом способ расчета продолжительности расстановки вагонов является простым в отличие от существующего, основанного на суммировании продолжительностей выполнения полурейсов и смен направления движения, который является достаточно трудоемким.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных зависимостей при определении параметров цикла подачи-уборки вагонов на грузовые фронты, оптимальных значений интервалов между подачами при взаимодействии железнодорожной станции и пути необщего пользования. Применение результатов исследования позволит: снизить издержки владельца пути необщего пользования, железной дороги, повысить конкурентоспособность железнодорожного транспорта на рынке транспортных услуг.

Выводы

Выявленные функциональные зависимости для определения интервалов между подачами вагонов, продолжительности выполнения маневровых операций с вагонами у мест погрузки-выгрузки целесообразно использовать в расчетах при обосновании выбора оптимальных режимов взаимодействия железнодорожных станций с путями необщего пользования. Наличие интервала позволяет применить теорию взаимодействия и брать ее за основу при иссле-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

дованих режимів взаємодії системи, включаючої в себе станцію формування передач, залізничну станцію примикання, путі необщого користування, фронти погрузки-выгрузки вагонів. Дане взаємодія можна розглядати з позиції вантажодельця. Це пов'язано з виявленням слабких позицій при організації роботи станції примикання і путі необщого користування, усунення яких напряму впливає на підвищення конкурентоспособності залізничного транспорту на ринку транспортних послуг.

Обобщаючи вище наведений матеріал, можна зробити наступні висновки:

1) в даний час у транспортної комплексу Республіки Білорусь існує гостра необхідність у розвитку інфраструктури путі необщого користування, а також удосконаленні технологій їх взаємодії з залізничними станціями примикання з метою задоволення всіх вимог клієнтів Білоруської залізничної дороги ввиду збільшення кількості вагонів вантажополучателів;

2) удосконалення технологій роботи технічних станцій Білоруської залізничної дороги неможливо без глибокого наукового дослідження режимів їх взаємодії з шляхами необщого користування;

3) отримані в результаті роботи висновки створюють передумови для подальшого дослідження режимів взаємодії залізничних станцій і путі необщого користування в умовах наявності основної частини вагонів вантажополучателів, вантажодельців, а також організації очікування таких вагонів при сезонній і інших видах нерівномірності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІСТОЧНИКІВ

- Афанасьєва, Н. А. Організація взаємодії ОАО «РЖД» з суб'єктами Російської Федерації : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.22 / Афанасьєва Наталія Александрівна ; Урал. гос. ун-т путі сообщ. – Екатеринбург, 2010. – 23 с.
- Вентцель, Е. С. Дослідження операцій. Задачі, принципи, методологія : учеб. посібник для вузів / Е. С. Вентцель. – 3-е изд., стереотип. – Москва : Дрофа, 2004. – 208 с.
- Вернигора, Р. В. Проблеми функціонування залізничних під'їзних шляхів України в сучасних умовах / Р. В. Вернигора // Восточно-Европ. журн. передов. технологій. – 2012. – Т. 4, № 3 (58). – С. 64–68.
- Гарлицкий, Е. И. Удосконалення технології обслуговування залізничних путі необщого користування : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Гарлицкий Евгений Игоревич ; Моск. гос. ун-т путі сообщ. – Москва, 2014. – 149 с.
- Григорюк, В. Ф. Оптимізація взаємодії пунктів погрузки і выгрузки вагонів / В. Ф. Григорюк. – Москва : Транспорт, 1986. – 79 с.
- Еловой, И. А. Інтегровані логістичні системи доставки ресурсів: теорія, методологія, організація / И. А. Еловой, И. А. Лебедева ; под науч. ред. В. Ф. Медведєва ; Беларус. гос. ун-т трансп. – Минск : Право і економіка, 2011. – 461 с. – (Серія «Мірова економіка»).
- Козаченко, Д. Н. Комплексний аналіз залізничної інфраструктури металургічного комбінату на основі графоаналітичного моделювання / Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, Н. И. Березовый // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 4. – С. 55–60.
- Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
- Местная работа на железных дорогах / О. С. Кирьянова, Г. А. Мухаммедов, А. С. Перминов, Д. М. Чернюгов. – Москва : Транспорт, 1975. – 184 с.
- Оптимізація процесів вантажної роботи / А. А. Смехов, Х. М. Лазарев, А. Т. Дерibas и [др.]. – Москва : Транспорт, 1993. – 264 с.
- Правдин, Н. В. Прогнозування вантажних потоків / Н. В. Правдин, М. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – Москва : Транспорт, 1987. – 249 с.
- Серязетдинова, А. Д. Методика управління вагонопотоками на шляхах необщого користування, улічююча оперативну завантаженість станцій : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Серязетдинова Альфия Данисовна ; Урал. гос. ун-т путі сообщ. – Екатеринбург, 2010. – 19 с.
- Сотников, И. Б. Взаємодія станцій і ділянок залізничних шляхів. (Дослідження операцій на станціях) / И. Б. Сотников. – Москва : Транспорт, 1976. – 268 с.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

14. Ферапонтов, Г. В. Эксплуатация железнодорожных подъездных путей / Г. В. Ферапонтов. – Москва : Транспорт, 1972. – 296 с.
15. Jong, J.-C. Support System to Optimize Railway Stopping Patterns / J.-C. Jong, C.-S. Suen, S. Chang // Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board. – 2012. – Vol. 2289. – P. 24–33. doi: 10.3141/2289-04.
16. Mussone, L. R. An analytical approach to calculate the capacity of a railway system / L. R. Mussone, R. W. Calvo // European J. of Operational Research. – 2013. – Vol. 228. – Iss. 1. – P. 11–23. doi: 10.1016/j.ejor.2012.12.027.
17. Peek, G.-J. Creating Synergy In and Around Stations: Three Strategies for Adding Value / G.-J. Peek, M. van Hagen // Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board. – 2002. – Vol. 1793. – P. 1–6. doi: 10.3141/1793-01.

І. О. ЄЛОВИЙ^{1*}, Є. М. ПОТИЛКІН^{2*}

^{1*}Каф. «Управління вантажною та комерційною роботою», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 734 11 40, ел пошта ugkr@belsut.gomel.by, ORCID 0000-0001-9178-563X

^{2*}Каф. «Управління вантажною та комерційною роботою», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 808 77 87, ел пошта gkr@inbox.ru, ORCID 0000-0003-3872-8243

РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ІНТЕРВАЛІВ ДЛЯ ВИБОРУ РЕЖИМІВ ВЗАЄМОДІЇ СТАНЦІЙ ТА КОЛІЙ НЕЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

Мета. Основною метою роботи повинно стати отримання аналітичних залежностей для розрахунку оптимальних значень інтервалів між подачами вагонів на fronti навантаження, вивантаження за критерієм мінімізації експлуатаційних витрат. Це дозволить обґрунтовувати вибір ефективних режимів взаємодії залізничних станцій та колій незагального користування. **Методика.** Для досягнення поставленої мети використано методи наукового аналізу та синтезу, метод Брандона при апроксимації функції, експериментально-статистичні методи складання математичних залежностей. **Результати.** Отримані формули по визначенню: 1) оптимальних значень інтервалів між подачами вагонів на місця навантаження-розвантаження за критерієм мінімізації витрат при режимі взаємодії залізничних станцій з коліями незагального користування через розрахункові інтервали часу; 2) групи вагонів середнього розміру в складі однієї подачі на колію незагального користування; 3) тривалості маневрової роботи щодо розстановки вагонів у фронтах навантаження-вивантаження. **Наукова новизна.** Удосконалено функціональні залежності для визначення оптимальних значень інтервалів між подачами вагонів на fronti навантаження, вивантаження за критерієм мінімізації експлуатаційних витрат. Це стало можливим завдяки отриманим формулам, які враховують вплив: 1) кількості вантажних фронтів, задіяних у маневрових операціях із вагонами у місцях навантаження-вивантаження; 2) груп вагонів середнього числа і розміру, які перебувають на колії незагального користування; 3) подачі-прибирання вагонів середнього розміру; 4) наявності виставкових колій для перезарядки фронтів; 5) сумарної повної довжини колій, задіяних у перезарядці фронтів навантаження-вивантаження. **Практична значимість.** Отримані функціональні залежності можна використовувати при визначенні параметрів циклу подачі-прибирання вагонів на fronti навантаження-вивантаження, а також оптимальних значень інтервалів між подачами при взаємодії залізничної станції та колій незагального користування. Використання отриманих результатів дозволить: 1) виявити слабкі позиції при організації роботи станції примикання та колій незагального користування; 2) зменшити витрати власників залізничних колій незагального користування і залізниці в цілому за рахунок мінімізації економічних та тимчасових втрат і, як наслідок, підвищити конкурентоспроможність залізничного транспорту на ринку транспортних послуг.

Ключові слова: колія незагального користування; режим взаємодії; подача-прибирання вагонів; маневрові операції; інтервал між подачами вагонів

I. A. YELOVOY^{1*}, YE. N. POTYLKIN^{2*}

^{1*}Dep. «Freight and Commercial Work Management», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653, tel. + 37 (529) 734 11 40, e-mail ugkr@belsut.gomel.by, ORCID 0000-0001-9178-563X

^{2*}Dep. «Freight and Commercial Work Management», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653, tel. +37 (529) 808 77 87, e-mail. gkrt@inbox.ru, ORCID 0000-0003-3872-8243

CALCULATION OF OPTIMAL INTERVALS TO CHOOSE THE MODES OF INTERACTION BETWEEN STATIONS AND NON-PUBLIC TRACKS

Purpose. The article is aimed to obtain the operational dependences for calculating the optimal intervals between car supply on loading and unloading fronts, unloading according to the criterion of minimizing operating costs. This will allow substantiating the choice of effective modes of interaction between railway stations and non-public tracks. **Methodology.** Methods of scientific analysis and synthesis, the method of Brandon at the approximation of the function, experimental and statistical methods of compiling the mathematical dependences were used in order to achieve the purpose. **Findings.** There were obtained the formulas for determination of: 1) optimal values of intervals between the car supplies to the places of loading and unloading according to the criterion of cost minimization in conditions of interaction between railway stations and non-public tracks through determined time periods; 2) medium-sized car groups in one supply on the non-public track, 3) the duration of the shunting work on car spotting in loading and unloading fronts. **Originality.** Operational dependences were improved for the determination of optimal values of intervals between the car supplies to the fronts of loading, unloading according to the criterion of minimizing the operational costs. Since the obtained formulas take into account the influence of: 1) the number of freight fronts involved in shunting operations with the cars near the points of loading and unloading; 2) the average number and size of the car groups, which are on the non-public tracks; 3) average size of the car supply-removal; 4) the presence of the goods siding for the fronts recharging; 5) total length of the tracks involved in recharging of the loading and unloading fronts. **Practical value.** The obtained operational dependences can be used in determining the parameters of supply-removal cycle to the loading and unloading fronts, the optimal values of the intervals between supplies in the interaction between the railway station and non-public tracks. Obtained results will allow: 1) identifying weak positions in the organization of connecting station operation and non-public tracks; 2) reducing the costs of the owners of non-public tracks and the general railway by minimizing the economic and time losses and, as a consequence, increasing the competitiveness of railway transport in the transport market.

Keywords: non-public track; mode of interaction; car supply-removal; shunting operations; interval between cars supplies

REFERENCES

1. Afanasyeva N.A. *Organizatsiya vzaimodeystviya OAO «RZhD» s subyektami Rossiyskoy Federatsii*. Avtoreferat Diss. [Organization of JSC «Russian Railways» interaction with the subjects of the Russian Federation. Author's abstract]. Ekaterinburg, 2010. 23 p.
2. Venttsel Ye.S. *Issledovaniye operatsiy. Zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research. Objectives, principles, methodology]. Moscow, Drofa Publ., 2004. 208 p.
3. Vernigora R.V. Problemy funktsionirovaniya zheleznodorozhnykh podyezdnykh putey Ukrainy v sovremennykh usloviyakh [Problems of functioning of railway sidings of Ukraine in modern conditions]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy – Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 2012, vol. 4, no. 3 (58), pp. 64-68.
4. Garlitskiy Ye.I. *Sovershenstvovaniye tekhnologii obsluzhivaniya zheleznodorozhnykh putey neobshchego polzovaniya*. Kand. Diss. [Improvement of the technology of service of railway tracks of uncommon use. Cand. Diss.]. Moscow, 2014. 149 p.
5. Grigoryuk V.F. *Optimizatsiya vzaimodeystviya punktov pogruzki i vygruzki vagonov* [Optimization of interaction of loading and unloading points of cars]. Moscow, Transport Publ., 1986. 79 p.
6. Yelovoy I.A., Lebedeva I.A. *Integrirovannyye logisticheskiye sistemy dostavki resursov: teoriya, metodologiya, organizatsiya* [Integrated logistics systems of resources delivery: the theory, methodology, organization]. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2011. 461 p.
7. Kozachenko D.N., Vernigora R.V., Berezovyy N.I. Kompleksnyy analiz zheleznodorozhnoy infrastruktury metallurgicheskogo kombinata na osnove grafoanali-ticheskogo modelirovaniya [Comprehensive analysis of

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- the railway infrastructure of metallurgical plant on the basis of graphical-analytic simulation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznichnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 4, pp. 55-60.
8. Krasovskiy G.I., Filaretov G.F. *Planirovaniye eksperimenta* [Planning of experiment]. Minsk, BGU Publ., 1982. 302 p.
 9. Kiryanova O.S., Mukhammedov G.A., Perminov A.S., Chernyugov D.M. *Mestnaya rabota na zheleznyh dorogakh* [Local work on railways]. Moscow, Transport Publ., 1975. 184 p.
 10. Smekhov A.A., Lazarev Kh.M., Deribas A.T. *Optimizatsiya protsessov gruzovoy raboty* [Optimization of freight operations]. Moscow, Transport Publ., 1993. 264 p.
 11. Pravdin N.V., Dykanyuk M.L., Negrey V.Ya. *Prognozirovaniye gruzovykh potokov* [Prediction of cargo flows]. Moscow, Transport Publ., 1987. 249 p.
 12. Serazetdinova A.D. *Metodika upravleniya vagonopotokami na putyakh neobshhego pol-zovaniya, uchityvayushhaya operativnuyu zagruzhennost stantsiy*. Avtoreferat Diss. [Methodology of the car traffic volumes control on the tracks of uncommon use taking into account the operational workload of the stations. Author's abstract]. Ekaterinburg, 2010. 19 p.
 13. Sotnikov I.B. *Vzaimodeystviye stantsiy i uchastkov zheleznykh dorog* [Interaction of stations and railroad sections]. Moscow, Transport Publ., 1976. 268 p.
 14. Ferapontov G.V. *Ekspluatatsiya zheleznodorozhnykh podyezdnykh putey* [Operation of railway sidings]. Moscow, Transport Publ., 1972. 296 p.
 15. Jong J.C., Suen C.S., Chang S. Support System to Optimize Railway Stopping Patterns. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2012, vol. 2289, pp. 24-33. doi: 10.3141/2289-04.
 16. Mussone L., Calvo R.W. An analytical approach to calculate the capacity of a railway system. *European Journal of Operational Research*, 2013, vol. 228, issue 1, pp. 11-23. doi: 10.1016/j.ejor.2012.12.027.
 17. Peek G.J., Hagen M. Creating Synergy In and Around Stations: Three Strategies for Adding Value. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2002, vol. 1793, pp. 1-6. doi: 10.3141/1793-01.

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. А. К. Головничем (Республіка Білорусь); д.т.н., проф. Д. Н. Козаченко (Україна)

Поступила в редколлегию: 11.05.2016

Принята к печати: 23.09.2016

UDC 629.424.1-82:004.318

I. V. ZHUKOVYTSKYI^{1*}, I. A. KLIUSHNYK^{2*}

^{1*}Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail ivzhuk@mail.ru, ORCID 0000-0002-3491-5976

^{2*}Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail klugran@i.ua, ORCID 0000-0001-9939-0755

USE OF MICROCONTROLLER FOR MEASURING SHAFT SPEED OF DIESEL LOCOMOTIVE HYDRAULIC TRANSMISSION

Purpose. The article considers the process of development and improvement of tachometer data collectors for the data-measuring diesel locomotive hydraulic transmission test system, which will give the possibility of obtaining the source data to conduct further studies of the technical condition of diesel locomotive hydraulic transmission. It is supposed to provide a solution to the problem of development and improvement of tachometer data measuring tools of the previously created data-measuring diesel locomotive hydraulic transmission test system, starting out from the possibility of modification of the existing locomotive hydraulic transmission test-bench at the Dnepropetrovsk Diesel Locomotive Repair Plant «Promteplovoz». **Methodology.** The researchers proposed in the work a method of modifying the existing tachometer sensor of the automated microprocessor system for the locomotive hydraulic transmission test-bench in the conditions of a diesel locomotive repair plant. It is applicable by substantiating the choice of the required tachometer sensor measuring method, as well as by using the necessary hardware and software to accomplish the goal with the ability to integrate into the data-measuring system for diesel locomotive hydraulic transmission testing. **Findings.** The available equipment of the locomotive hydraulic transmission test-bench allowed for design of the optical type speed sensor based on the existing sensor D-2MMU-2. The factory testing with the use of a sensor prototype resulted in determination of the required and sufficient sampling time for sensor operating microcontroller. **Originality.** The available equipment of the locomotive hydraulic transmission test-bench allowed for design of the optical type speed sensor based on the existing sensor D-2MMU-2. We developed the operation algorithms for the microcontroller that processes the signals from this sensor. The sensor was factory-tested. According to the data sample obtained during the tests, we showed the possibility of reducing the sensor information retrieval frequency. **Practical value.** The designed sensor significantly reduces the cost of development of the diesel locomotive hydraulic transmission test-bench, besides it can be used when developing similar hydraulic transmission test-benches of other wheeled vehicles and the like. The designed sensor has a greater accuracy than that of D-2-2MMU and considerably lower production cost in comparison with current tachometer sensors. The measurement results are input data to perform further studies in order to determine the technical condition of UGP750-1200 hydraulic transmission during the factory post-repair testing.

Keywords: tachometer sensor; D-2MMU-2; hydraulic transmission; hydraulic transmission test; test-bench; data-measuring system

Introduction

Today in Ukraine, the hydraulic transmission is tested using the outdated test-benches designed in Soviet times, in particular at the repair plants of diesel locomotives and military equipment with hydraulic transmission. Also, there is no standardization of the production of these test-benches.

As part of the work for improvement and modernization of the existing hydraulic transmission test-bench at DZRT «Promteplovoz» plant it was revealed that the installed thereon analogue control devices are out-of-date. In the first stage of devel-

opment in accordance with the plant test program the most necessary and critical 13 process parameters were selected. Information about which received from the sensors is processed by the microcontroller and PC [13].

Information about the rotation frequency of the drive motor, the generator, the turbine shaft is measured using D-2MMU-2 tachometer sensors [8], which transmit the pre-processed analogue signal to a special converter and then to ATMEL microcontroller for its further processing and transmission by USB 2.0 interface to the computer [13].

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

D-2MMU-2 sensor is nothing but an alternator, which has a critical flaw – at relatively low speeds (established experimentally at about 80 min^{-1}) the voltage amplitude produced by the alternator is not sufficient for the normal error-free measurements (at speeds of about 60 min^{-1} , the amplitude is about 1V, and at 2000 min^{-1} – 40 V). It is clear that at very low speeds the amplitude will be several tens of millivolts. To measure such a low voltage in the plant conditions is practically impossible, since, firstly, long communication lines from the test-bench to the measuring equipment may have low voltage blanking and, secondly, at the plant there is a large number of different sources of electromagnetic interference, which may be laid on communication lines and erroneously recorded as the beginning of rotary motion on the test-bench.

It was proposed to use an incremental encoder [2, 4, 5, 10, 12] XCC 1506PS [11] with excess precision – 2500 PPR) instead of tachometer generators. The tests showed its high accuracy and reliability in the measuring range of both fairly low speeds (0 to 80 min^{-1}) and high ones (up to 2000 min^{-1}). But the major drawback of this device is the difficulty of its mounting on the test-bench and the price that is high enough.

Purpose

As an alternative solution, it was proposed to make an in-house optical type sensor based on D-2-2MMU sensor housing. This solution has three important priorities: low price, ability to measure low speeds (0 to 80 min^{-1}), and possibility of installation inside the D-2MMU-2 sensor housing (or other tachometer-generators of the series) that does not require mechanical upgrading of the test-bench (which was required for using XCC 1506PS encoder). It is also essential that the developed device may apply a minor modification of the microcontroller control program, set up to process the signals from D-2MMU-2 sensor transmitter.

At the initial stage of development, the sensor consisted of a shaft, on which there was a hand-made plastic disc with teeth, and infrared optical coupler EE-SX1041 [9]. The tests have shown that hand-made teeth did not allow high accuracy measurements. Therefore, to ensure greater accuracy a 10-tooth acrylic disc was manufactured on industrial equipment by laser technique. The drawing of the disk is shown in Fig. 1.

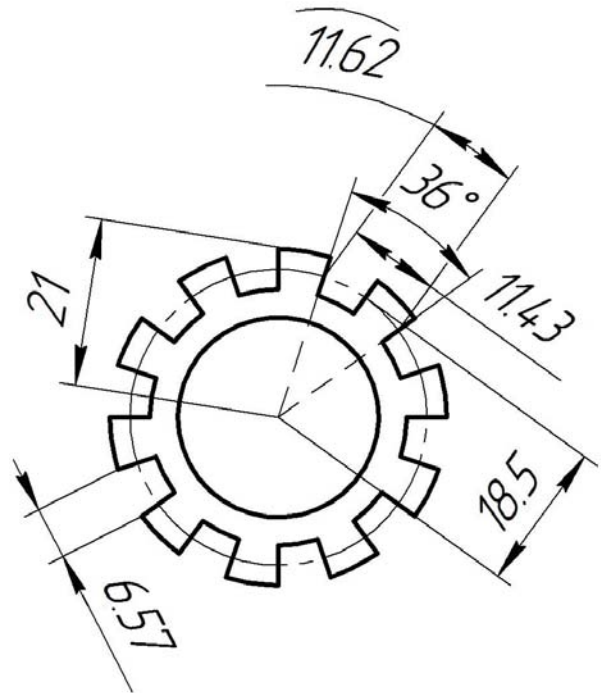


Fig. 1. Disc drawing

Connection circuit of the sensor optical coupler allows virtually eliminating the effect of the pulse rise and decay time (a few microseconds). Therefore, their effect on the measurement system performance can be omitted during theoretical calculation of the measured values of rotation speed.

The first thing to bear in mind is that the measuring disk production technique is not perfect and variations in tooth size are inevitable. Thereafter, you need to perform calculations for dependence of the instrumental error (arc length, as shown in Fig. 1) on the rotation speed. The first version of the rotation speed measurement algorithm, embedded in the microcontroller, fixes the appearance of the rising edge of each new impulse signal and as a result performs the measurement of the signal cycle time. Simplified diagram of the microcontroller operation algorithm is shown in Fig. 2. The algorithm begins with timer/ counter setting, reset of the flags required for operation and zeroing of variables, UART setting (necessary for data transmission to a computer) and interrupt enabling setting. The following step is an endless loop in which the end of the measurement is checked. For occurrence of the measurement end event the following two events must occur, as shown in Fig. 3.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

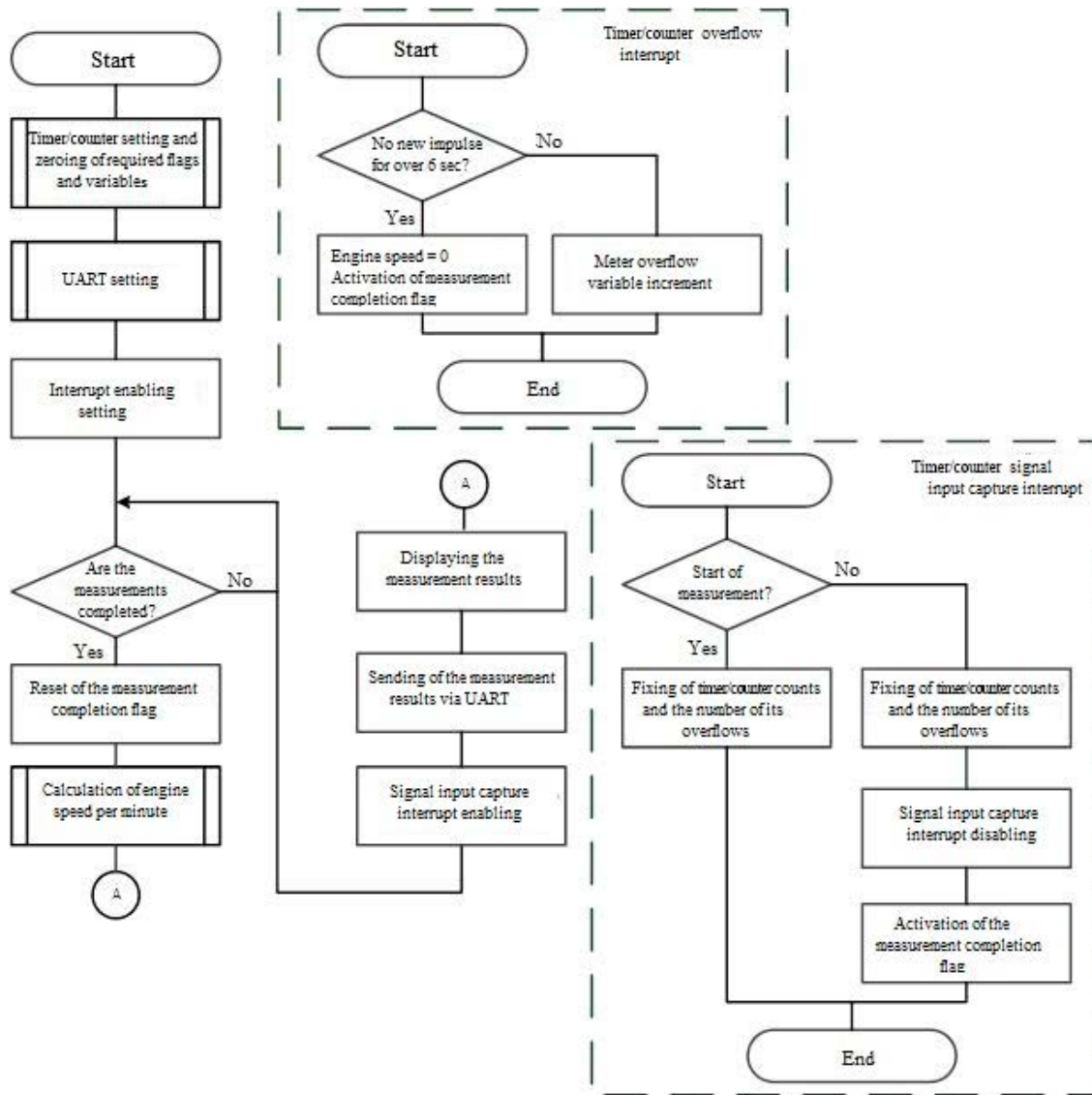


Fig. 2 Simplified diagram of the microcontroller operation algorithm

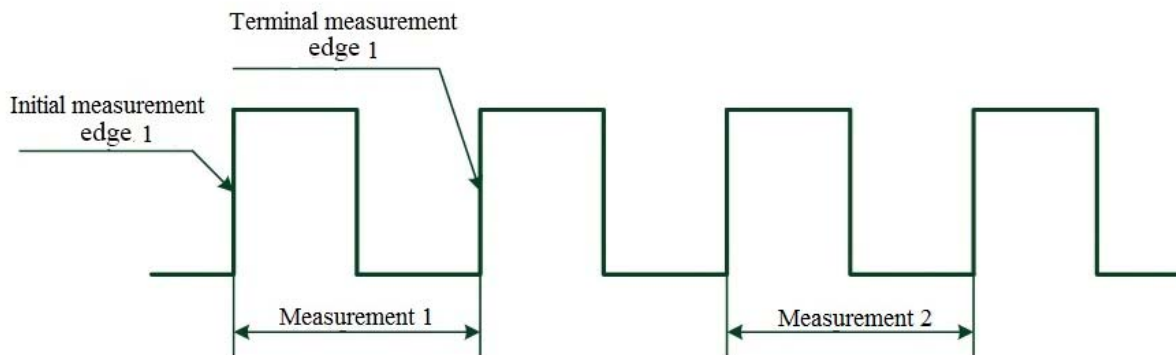


Fig. 3 Principle sensor signal processing

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Upon receiving the initial edge of the microcontroller input capture signal, the timer/counter of signal input capture interrupts, as shown in Fig. 4.

The clock interrupt handler fixes the counts of the timer/ counter and the number of its overflow interrupts in special variables. In case of interrupt of the measurement final edge capture, the system also fixes the counts of the timer/ counter and the number of its overflow interrupts in special variables, and thereafter the signal input capture interrupts are disabled, the measurement completion flag is set.

The activated measurement completion flag notifies the main microcontroller program about the end of the measurement. Thereafter the following is performed: reset of the measurement completion flag, subroutine of engine speed calculation per min^{-1} , displaying the measurement results and sending them via UART. At the end the system allows for signal input capture interrupts and therefore for a new measurement, as well as puts the microcontroller on standby at the end of the measurement.

The timer/counter overflow interrupt program serves to count the number of timer/counter overflows in the special variable, and to initiate the end of the measurement with zero result in the absence

of a signal at the signal capture input for more than 6 sec.

The engine speed is calculated by the following formula:

$$\omega = \frac{1}{\left(\frac{f_{cpu}}{k}\right)^{-1} \left((65535 f_e + T_e) - (65535 f_b + T_b) \right)} \times 60 \text{ [min}^{-1}\text{]},$$

where ω – rotation speed [min^{-1}]; f_{cpu} – clock generator frequency [Hz]; k – timer/counter frequency divider; f_e, f_b – the number of timer/counter overflows at the end and the beginning of the measurements, respectively; T_e, T_b – timer/counter counts at the end and the beginning of the measurements, respectively.

We performed the calculation of the delay effects, coupled in by the algorithm when performing the measurements. It was determined that the execution of all assembler commands involved in the measurements makes ~ 6.75 microseconds. This error ε_{Δ} can be neglected, since, at a rotation speed of 1500 min^{-1} the cycle of the measured signal is 40 ms.

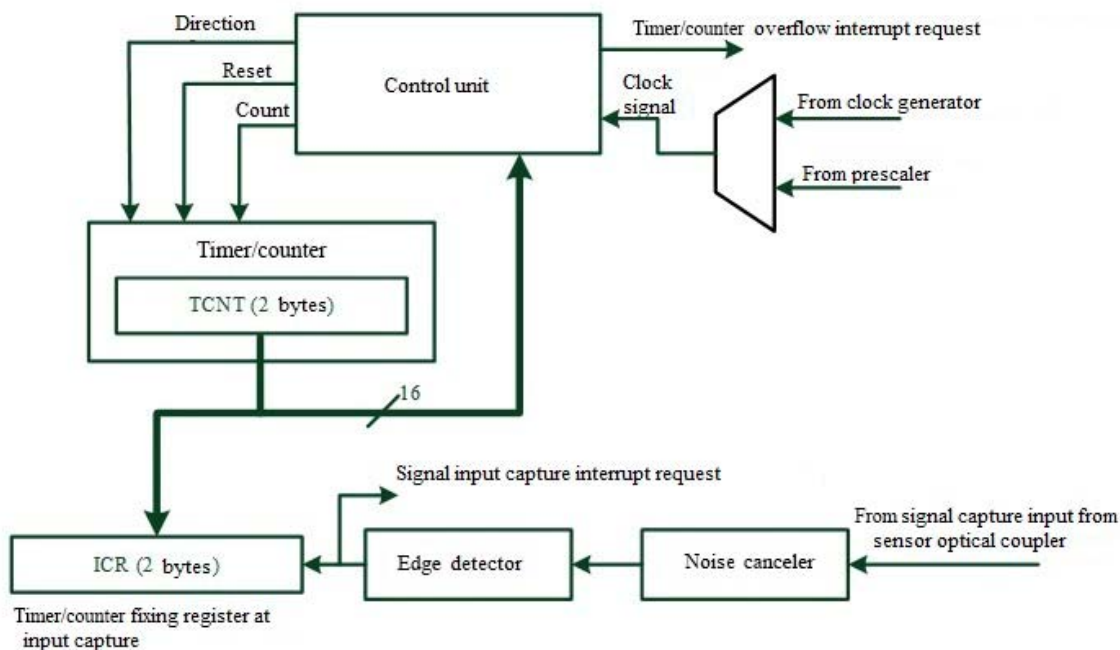


Fig. 4. Simplified block diagram of timer/counter

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

To simplify the calculations it was taken to neglect the backlash of the shaft where the disk is mounted.

Methodology

Rotation speed is calculated by the following formula:

$$\omega = \frac{1}{T} \cdot 60 \text{ [min}^{-1}\text{]},$$

where ω – rotation speed [min^{-1}]; T – rotation period [sec].

Since the disk is divided into 10 sectors with arc length L , the rotation speed calculation will be as follows:

$$\omega_{\text{theor}} = \frac{L}{2\pi R\tau} \cdot 60 \text{ [min}^{-1}\text{]}, \quad (1)$$

where ω_{theor} – theoretical rotation speed [min^{-1}]; L – arc length [mm]; R – distance from the disc center to the tooth height middle [mm]; τ – passage time of optical coupler infrared beam of the arc L (signal cycle) [sec].

The only variable which will affect the calculation of the theoretical speed will be the arc length, which may differ from the theoretical one, due to a manufacturing error of the toothed disc.

Let us assume that the actual length of the arc is equal to L^* , then substituting L^* in (1) we obtain

the actual rotation speed:

$$\omega_{\text{act}} = \frac{L^*}{2\pi R\tau} \cdot 60 \text{ [min}^{-1}\text{]}, \quad (2)$$

Absolute error will be as follows:

$$\Delta = \omega_{\text{theor}} - \omega_{\text{act}} \text{ [min}^{-1}\text{]}, \quad (3)$$

Substituting (1) and (2) in (3) we obtain:

$$\Delta = \omega_{\text{act}} \frac{\Delta_L}{L + \Delta_L} \text{ [min}^{-1}\text{]}, \quad (4)$$

where Δ_L – difference between the actual and theoretical arc length L [mm]; Δ – absolute error [sex].

The relative error on the basis of (4) will have the following form:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_L}{L + \Delta_L} \approx \frac{\Delta_L}{L}.$$

We should perform the following calculation with such assumptions: error in the arc length is ± 2 mm with 0.1 mm spacing. Fig. 5 shows the graph of rotation speed relative error on the actual tooth size production error (the actual arc length L on tooth center).

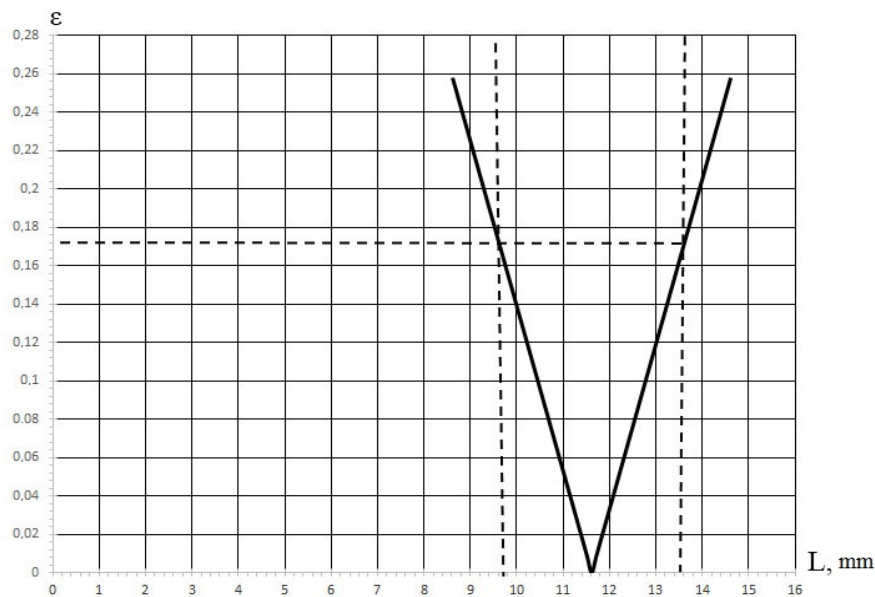


Fig. 5. Graph of rotation speed relative error on the actual tooth size production error

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

The graph in Fig. 5 shows that the deviation of L from the theoretical size by ± 2 mm the relative error will be no more than 17%. This is the variance between actual and theoretical length L that is provided with the disc production technique. Based on the obtained data we can state that the use of the measurement algorithm (see Fig. 2) at the maximum possible rotation speed of 1500 min^{-1} may result in the absolute error of $\sim \pm 255 \text{ min}^{-1}$.

To reduce the influence of the error discussed above, it was decided to modify the measurement algorithm by taking the mean of 10 measurements (i.e. to obtain an approximate value of rotation speed per one revolution of the disk, rather than per passage of the arc L).

Further modification of the algorithm is as follows: upon occurrence of the first impulse from the sensor the timer/counter should react to the capture input as previously. And upon occurrence of the next impulse edge it must not finish counting the signal cycle time period but continue counting as long as the required number of impulses is reached, and only then stop and perform the speed calculation.

It is clear that the optimal number of impulses at which the resulting speed sample is not distorted and does not lose representativeness is unknown.

To determine the necessary and sufficient number of impulses it is necessary to take into account that the uniform rotation will not give the required information. Therefore we used the uniform acceleration data obtained from actual factory tests during the algorithm with counting of the sum of ten signal cycles (although such data contain the additional error $\varepsilon_{\Delta t}$, it is not critical for the subsequent calculations).

For the particular case the uniform acceleration is represented by the following formula:

$$\bar{a} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \text{ [min}^{-1}\text{/sec}^2\text{]},$$

where \bar{a} – acceleration [$\text{min}^{-1}\text{/sec}^2$]; Δv – rotation speed gain over time Δt [sec].

The non-repeated sampling will be considered [1, 6, 7] (it is assumed that the uniform acceleration does not give the same results in the sample of rotation speeds, whose general population will be considered).

In this case, the variance is calculated by the formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i - \bar{\omega})^2}{n-1}},$$

where σ – variance; ω_i – i -dimension of rotation speed [min^{-1}]; $\bar{\omega}$ – arithmetic mean of n -dimension sample rotation speed [min^{-1}]; n – sample size of considered accelerations (general population).

The mean square error μ of the sample using non-repeated sampling is as follows [1]:

$$\mu = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n} \left(1 - \frac{n^*}{n}\right)}, \quad (5)$$

where n^* – size of the necessary and sufficient sample from the general population n .

In this case, the absolute error will be as follows:

$$\Delta\omega = \pm t \cdot \mu \text{ [min}^{-1}\text{]}, \quad (6)$$

where $\Delta\omega$ – absolute error; t – Student's coefficient.

Student's coefficient is in the table from [6] and for the confidence level $\alpha = 95\%$ is 1.98.

Substituting (5) into (6) and performing the necessary transformations we can get the formula for calculating the required sample size n^* of the population n :

$$n^* = \frac{t^2 \sigma^2 n}{\Delta\omega^2 n + t^2 \sigma^2},$$

For the general population equal to 1 657 samples the calculations results are presented in Fig. 6.

Calculation of absolute error of the general population is conducted without regard to the selection of the sample n^* by the formulas:

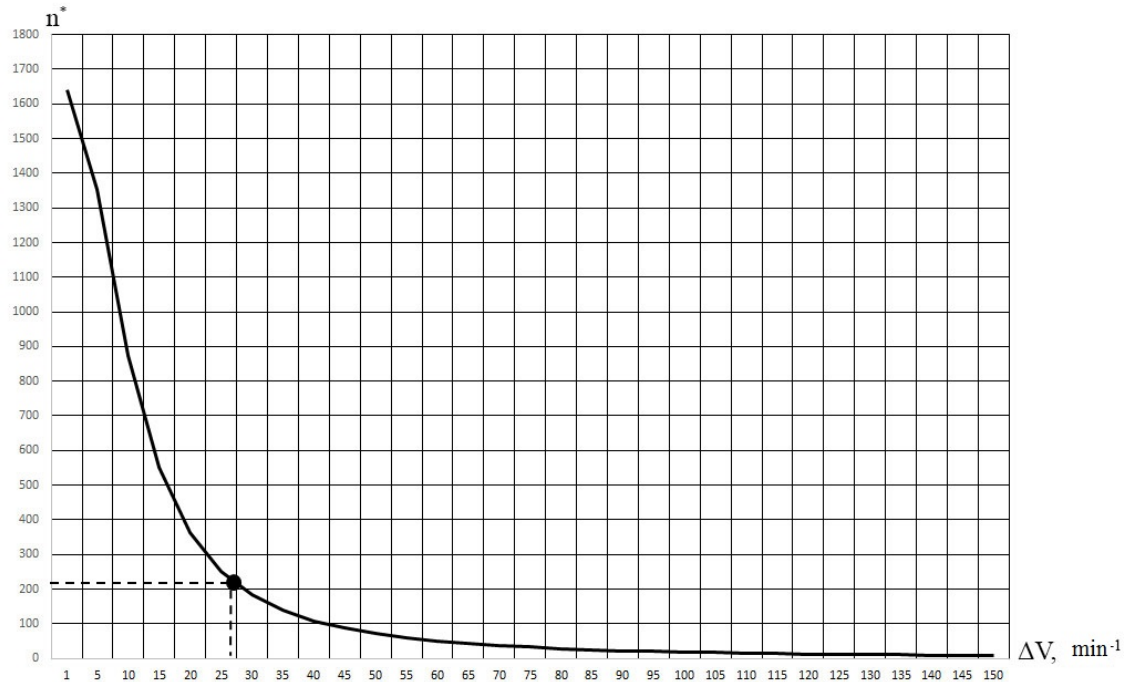
$$\mu^* = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\omega_i - \bar{\omega})^2},$$

where μ^* – mean square error.

$$\Delta\omega^* = \pm \mu^* \cdot t,$$

where $\Delta\omega^*$ – absolute error.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Fig. 6. Graph of rotation speed absolute error on the n^* sample size

Absolute error of the used general population (without regard to selection of sample n^*) equals to 27.94 min^{-1} . As seen in Figure 6 in this case $n^* \approx 208$. On this basis it can be affirmed that the sample n^* is representative and does not distort the general population n , when sampling only each 8th count from n ($1657/208 \approx 8$). Similar results were obtained when processing other samples.

Variations of instrumental and methodical errors, which may be due to missing counts, require further research.

Findings

The available equipment of the locomotive hydraulic transmission test-bench allowed for design of the optical type speed sensor based on the existing sensor D-2MMU-2. The factory testing with the use of a sensor prototype resulted in determination of the required and sufficient sampling time for sensor operating microcontroller, which allowed making changes to the measurement algorithm.

Originality and practical value

The available equipment of the locomotive hydraulic transmission test-bench allowed for design of the optical type speed sensor based on the exist-

ing sensor D-2MMU-2. The operation algorithms for the microcontroller that processes the signals from this sensor were developed. The sensor was factory-tested. According to the data sample obtained during the tests, we showed the possibility of reducing the sensor information retrieval frequency. The designed sensor significantly reduces the cost of development of the diesel locomotive hydraulic transmission test-bench, besides it can be used when developing similar hydraulic transmission test-benches of other wheeled vehicles and the like. The designed sensor has a greater accuracy than that of D-2-2MMU and considerably lower production cost in comparison with current tachometer sensors. The measurement results are input data to perform further studies in order to determine the technical condition of UGP750-1200 hydraulic transmission during the factory post-repair testing.

Conclusions

The available equipment of the locomotive hydraulic transmission test-bench allowed for design of the optical type speed sensor based on the existing sensor D-2MMU-2. The paper considered possible sources of measurement error of the new sensor. The instrumental error introduced by sensor

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

production techniques was calculated and it was found that the current sensor signal processing algorithm is not perfect and requires improvement. An improved algorithm was proposed. The factory tests of sensor allowed performing the necessary calculations of the required frequency for computer sampling of the sensor operating microcontroller for the purpose of correcting the rotation speed calculation algorithm.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Балинова, В. С. Статистика в вопросах и ответах : учеб. пособие. – Москва : ТК Велби : Изд-во Проспект, 2004. – 344 с.
2. Безгин, А. С. Применение инкрементального энкодера как датчика скорости в цифровых системах управления экскаваторного электропривода переменного тока / А. С. Безгин, Э. Л. Греков // Науч.-техн. вестн. Поволжья. – 2013. – № 3. – С. 72–76.
3. Жуковицкий, И. В. Использование микроконтроллеров в стенде испытания гидравлических передач тепловоза / И. В. Жуковицкий, И. А. Ключник // Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті : тези VII Міжнар. наук.-практ. конф. (16.02–19.02.2016), с. Розлуч / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 33.
4. Информационно-управляющая система активного аэростатического подшипника на базе фотоэлектрического преобразователя комбинированного типа [Electronic resource] / А. В. Кирьянов, В. В. Чуканов, В. П. Кирьянов, С. В. Перебийнос // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Вып. 1, т. 5. – 8 с. – Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/informatsionno-upravlyayuschaya-sistema-aktivnogo-aerostaticheskogo-podshipnika-na-baze-fotoelektricheskogo-preobrazovatelya>. – Title from the screen. – Accessed : 12.09.2016.
5. Ключник, И. А. Використання інформаційних технологій для вимірювання частоти обертання на стенді випробування гідравлічних передач тепловозів / И. А. Ключник // Інформ. технології в моделюванні : матер. всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених (24.03–25.03.2016) / Миколаїв. нац. ун-т ім. В. О. Суходлинського. – Миколаїв, 2016. – С. 82–83.
6. Руденко, В. М. Математична статистика : навч. посібник / В. М. Руденко. – Київ : Центр учбової літ-ри, 2012. – 303 с.
7. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник. – Москва : Машиностроение, 1985. – 232 с.
8. Тахометры магнитоиндукционные дистанционные ТМи [Electronic resource] // ООО «Саранские приборы». – 2016. – Available at: <http://sibspz.ru/pribory-dlya-izmereniya-parametrov-dvizheniya-takhometry/takhometry-magnitoinduksionnye-distantsionnye-tmi>. – Title from the screen. – Accessed : 2.07.2016.
9. EE-SX1041. Photomicrosensor (Transmissive) [Electronic resource] // OMRON Corporation. – 2016. – Available at: https://www.omron.com/ecb/products/photo/34/ee_sx1041.html. – Title from the screen. – Accessed : 2.07.2016.
10. Improved PSO algorithm for improving the subdivision accuracy of photoelectric rotary encoder / G. Xu, W. Qiuhua, Y. Shouwang [et al.] // Infrared and Laser Engineering. – 2013. – Т. 42, № 6. – С. 320–323.
11. Information-measuring Test System of Diesel Locomotive Hydraulic Transmissions / I. V. Zhukovtysky, I. A. Kliushnyk, O. B. Ochkasov, R. O. Korenyuk // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 53–65. doi: 10.15802/stp2015/53159.
12. Opto-electronic rotary encoders OsiSense XCC. Catalogue [Electronic resource] // Schneider Electric. – 2016. – Available at: http://katalog.schneiderelectric.cz/dsmapp/data/pdf/cz/-TL3/XCC_Rotary_OsiSense.pdf. – Title from the screen. – Accessed : 2.07.2016.
13. Zheng, D. A capacitive rotary encoder based on quadrature modulation and demodulation / D. Zheng, S. Zhang, S. Wang // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2015. – Vol. 64. – Iss. 1. – P. 143–153. doi: 10.1109/TIM.2014.2328456.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

І. В. ЖУКОВИЦЬКИЙ^{1*}, І. А. КЛЮШНИК^{2*}

^{1*}Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта ivzhuk@mail.ru, ORCID 0000-0002-3491-5976

^{2*}Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта klugran@i.ua, ORCID 0000-0001-9939-0755

ВИКОРИСТАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ВАЛА ГІДРАВЛІЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ ТЕПЛОВОЗА

Мета. Стаття передбачає розгляд процесу розробки та вдосконалення засобів збору тахометричних даних інформаційно-вимірювальної системи випробування гідравлічних передач тепловозів. Це дасть можливість отримання вихідних даних для проведення подальших досліджень із визначення технічного стану гідравлічних передач тепловозів. Передбачається знайти вирішення завдання розробки і удосконалення засобів вимірювання тахометричних даних раніше створеної інформаційно-вимірювальної системи випробувань гідравлічних передач тепловозів. При цьому відштовхуватись потрібно, в першу чергу, від можливості модифікації вже існуючого стенду випробувань гідравлічних передач тепловозів на Дніпропетровському заводі по ремонту тепловозів «Промтепловоз». **Методика.** У роботі дослідниками була запропонована методика модифікації існуючого тахометричного датчика мікропроцесорної автоматизованої системи стендових випробувань гідравлічних передач тепловозів в умовах тепловозоремонтного заводу. Вона діє шляхом обґрунтування вибору необхідного способу вимірювання тахометричного датчика, а також застосування необхідних апаратних та програмних засобів для реалізації поставленої мети з можливістю інтеграції в інформаційно-вимірювальну систему випробувань гідравлічних передач тепловозів. **Результати.** Авторами спроектований і виготовлений діючий прототип датчика частоти обертання оптичного типу на основі вже існуючого датчика Д-2ММУ-2. Після заводських випробувань із застосуванням прототипу датчика був встановлений необхідний і достатній час опитування керуючого мікроконтролера датчика. **Наукова новизна.** На наявному обладнанні стенду випробувань гідравлічних передач тепловозів був спроектований датчик частоти обертання оптичного типу на основі вже існуючого датчика Д-2ММУ-2. Були розроблені алгоритми роботи мікроконтролера, який займається обробкою сигналів від цього датчика. Проведені заводські випробування датчика. За вибіркою даних, отриманих при випробуваннях, показана можливість зменшення частоти знімання інформації з датчика. **Практична значимість.** Удосконалений датчик істотно здешевлює виготовлення стенда випробувань гідравлічних передач тепловозів, а також може застосовуватися при розробці аналогічних стендів випробувань гідравлічних передач іншої колісної техніки і т. п. механізмів. Розроблений датчик має більшу точність у порівнянні з Д-2ММУ-2 і значно меншу, в порівнянні з сучасними тахометричними датчиками, ціну виготовлення. Результати вимірювань є вихідними даними для виконання подальших досліджень із метою визначення технічного стану гідравлічної передачі УГП750-1200 під час заводських післяремонтних випробувань.

Ключові слова: тахометричний датчик; Д-2ММУ-2; гідравлічна передача; випробування гідропередач; випробувальний стенд; інформаційно-вимірювальна система

І. В. ЖУКОВИЦЬКИЙ^{1*}, І. А. КЛЮШНИК^{2*}

^{1*}Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта ivzhuk@mail.ru, ORCID 0000-0002-3491-5976

^{2*}Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта klugran@i.ua, ORCID 0000-0001-9939-0755

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОВОЗА

Цель. Статья предусматривает рассмотрение процесса разработки и усовершенствования средств сбора тахометрических данных информационно-измерительной системы испытания гидравлических передач тепловозов. Это даст возможность получения исходных данных для проведения дальнейших исследований по определению технического состояния гидравлических передач тепловозов. Предполагается найти решение задачи разработки и усовершенствования средств измерения тахометрических данных ранее созданной информационно-измерительной системы испытаний гидравлических передач тепловозов. При этом отталкиваться необходимо, в первую очередь, от возможности модификации уже существующего стенда испытаний гидравлических передач тепловозов на Днепропетровском заводе по ремонту тепловозов «Промтепловоз».

Методика. В работе исследователями была предложена методика модификации существующего тахометрического датчика микропроцессорной автоматизированной системы стендовых испытаний гидравлических передач тепловозов в условиях тепловозоремонтного завода. Она действует путем обоснования выбора необходимого способа измерения тахометрического датчика, а также применения необходимых аппаратных и программных средств для реализации поставленной цели с возможностью интеграции в информационно-измерительную систему испытаний гидравлических передач тепловозов.

Результаты. Авторами спроектирован и изготовлен действующий прототип датчика частоты вращения оптического типа на основе уже существующего датчика Д-2ММУ-2. После заводских испытаний с применением прототипа датчика было установлено необходимое и достаточное время опроса управляющего микроконтроллера датчика.

Научная новизна. На имеющемся оборудовании стенда испытаний гидравлических передач тепловозов был спроектирован датчик частоты вращения оптического типа на основе уже существующего датчика Д-2ММУ-2. Были разработаны алгоритмы работы микроконтроллера, обрабатывающего сигналы от этого датчика. Проведены заводские испытания датчика. По выборке данных, полученных при испытаниях, показана возможность уменьшения частоты съема информации с датчика.

Практическая значимость. Усовершенствованный датчик существенно удешевляет изготовление стенда испытаний гидравлических передач тепловозов, а также может применяться при разработке аналогичных стендов испытаний гидравлических передач другой колесной техники и т. п. механизмов. Разработанный датчик имеет большую точность по сравнению с Д-2ММУ-2 и значительно меньшую, в сравнении с современными тахометрическими датчиками, цену изготовления. Результаты измерений являются исходными данными для выполнения дальнейших исследований с целью определения технического состояния гидравлической передачи УПП750-1200 во время заводских послеремонтных испытаний.

Ключевые слова: тахометрический датчик; Д-2ММУ-2; гидравлическая передача; испытания гидропередачи; испытательный стенд; информационно-измерительная система

REFERENCES

1. Balinova B.C. *Statistika v voprosakh i otvetakh* [Statistics in questions and answers]. Moscow, TK Velbi, Prospekt Publ., 2004. 344 p.
2. Bezgin A.S., Grekov E.L. *Primeneniye inkrementalnogo enkodera kak datchika skorosti v tsifrovyykh sistemakh upravleniya ekskavatornogo elektroprivoda peremennogo toka* [Application of incremental encoder as a speed sensor in digital control systems of excavating AC drive]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya – Scientific and Technical Bulletin of Povolzhe*, 2013, no. 3, pp. 72-76.
3. Zhukovitskiy I.V., Kliushnyk I.A. *Ispolzovaniye mikrokontrollerov v stende ispytaniya gidravlicheskih peredach teplovoza* [Using of microcontrollers in the test stand of hydraulic transmission in a locomotive]. *Tezy VII Mizhnarodnoi naukovno-praktychnoi konferentsii «Bezpeka ta elektromahnitna sumisnist na zaliznychnomu transporti (16.02-19.02.2016)»* [Proc. of VII Intern. Sci. and Pract. Conference «Safety and electromagnetic compatibility at rail transport (16.02-19.02.2016)»]. Dnipropetrovsk, 2016, p. 33.
4. Kiryanov A.V., Chukanov V.V., Kiryanov V.P., Perebeynos S.V. *Informatsionno-upravlyayushchaya sistema aktivnogo aerostaticeskogo podshipnika na baze fotoelektricheskogo preobrazovatelya kombinirovannogo tipa* (Information and control system of active air bearings on the basis of the photoelectric converter of the combined type). *Interespo Geo-Sibir – Interespo Geo-Siberia*, 2013, issue 1, vol. 5. 8 p. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/informatsionno-upravlyayushchaya-sistema-aktivnogo-aerostaticeskogo-podshipnika-na-baze-fotoelektricheskogo-preobrazovatelya> (Accessed 12 September 2016).

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

5. Kliushnyk I.A. Vykorystannia informatsiinykh tekhnolohii dlia vymiriuvannia chastoty obertannia na stendi vyprobuvannia hidravlichnykh peredach teplovoziv [Information technology usage for measuring the rotary velocity at test stand of hydraulic transmissions in locomotives]. *Materialy vseukrainskoi naukovopraktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh: «Informatsiino-tekhnolohii v modeliuvanni (24.03-25.03.2016)»* [Proc. of All Ukrainian Sci. and Practical Conf. for students, PG students, young scientists «Information technologies in simulation (24.03-25.03.2016)»]. Mykolaiv, 2016, pp. 82-83.
6. Rudenko V.M. *Matematychna statystyka* [Mathematical Statistics]. Kyiv, Tsentr uchbovoi literatury Publ., 2012. 303 p.
7. Stepnov M.N. *Statisticheskiye metody obrabotki rezultatov mekhanicheskikh ispytaniy: spravochnik* [Statistical methods for processing the results of mechanical tests: handbook]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1985. 232 p.
8. *Takhometry magnitoinduksiionnyye distantsionnyye TMI. OOO «Saranskiye pribory»* (Tachometers of magnetic remote TMI. LLC «Saransk equipment»). 2016. Available at: <http://sibspz.ru/pribory-dlya-izmereniya-parametrov-dvizheniya-takhometry/takhometry-magnitoinduksiionnyye-distantsionnyye-tmi> (Accessed 2 July 2016).
9. EE-SX1041 Photomicrosensor (Transmissive). OMRON Corporation. 2016. Available at: https://www.omron.com/ecb/products/photo/34/ee_sx1041.html (Accessed 2 July 2016).
10. Xu G., Qiuhua W., Shouwang Y., Wei C., Changhai Z. Improved PSO algorithm for improving the subdivision accuracy of photoelectric rotary encoder. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, vol. 42, no. 6, pp. 320-323.
11. Zhukovytskyi I.V., Kliushnyk I.A., Ochkasov O.B., Korenyuk R.O. Information-measuring Test System of Diesel Locomotive Hydraulic Transmissions. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 5 (59), pp. 53-65. doi: 10.15802/stp2015/53159.
12. Opto-electronic rotary encoders OsiSense XCC. Catalogue. Schneider Electric. 2016. Available at: http://katalog.schneider-electric.cz/dsmapp/data/pdf/cz/TL3/XCC_Rotary_OsiSense.pdf (Accessed 2 July 2016).
13. Zheng D., Zhang S., Wang S., Zheng D. A capacitive rotary encoder based on quadrature modulation and demodulation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, vol. 64, issue 1, pp. 143-153. doi: 10.1109/TIM.2014.2328456.

Prof. V. V. Skalozub, D. Sc. (Tech.) (Ukraine); Prof. A. I. Mikhalev, D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: June 25, 2016

Received: Oct. 07, 2016

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

UDC 62-83

L. V. DUBYNETS¹, O. L. MARENYCH², O. YU. BALIICHUK³, A. S. KORTOHUS^{4*}

¹Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, ORCID 0000-0003-0319-4544

²Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, ORCID 0000-0003-3602-5851

³Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

^{4*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 256 19 65, e-mail andrykor63@gmail.com, ORCID 0000-0001-9316-3500

ENERGY SAVING DURING OPERATION OF EQUIPMENT WITH NON-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE IN LOCOMOTIVE DEPOT

Purpose. To conduct research of electric motors in order to obtain the results that will assess the degree of energy saving due to electric loss reduction in the equipment with non-controlled electric drive. **Methodology.** The paper proposes an engineering method for determination of active power losses in the motors of the equipment with non-controlled electric drive in locomotive depot during load changes on the motor shaft. It is necessary to analyse the reduction of active power losses in the motor and the power supply network when an under-loaded motor is replaced with a motor having less power. **Findings.** After the calculations performed by the authors, it was found that for electric motors, in case of reducing the load factor from 0,7...0,75 to 0,4...0,5 active loss reduction after the motor replacement for the less powerful one ranges from 0.58 kW to 2.865 kW. Also, the calculations were carried out on the example of electric motors with a lower synchronous speed, the effect of under-loaded motor replacement increases in terms of active power loss reduction. The greatest effect is achieved when the load factor is $k_l \leq 0.55$.

Originality. For the first time the paper outlines the issues of energy saving efficiency for the equipment with non-controlled electric drive in locomotive depot by replacing the under-loaded motors with the less powerful ones. As long as there is a significant amount of the considered electric drives, it may cause severe losses, taking into account the peculiarities of their operation. **Practical value.** The obtained research results allow us to solve the problem of replacement of under-loaded motors in locomotive depot equipment with the motors having less power as efficiently as possible in terms of reducing electric losses. For instance 90-kW motor of a washing machine can be replaced with 75-kW motor when the load factor is $k_l \leq 0.7$, this can significantly reduce the performance losses. This method can be applied not only in locomotive depot but also for all equipment with non-controlled electric drives that operates in under-load mode.

Keywords: electric drives; locomotive depot; energy savings; active power loss; motor load factor; AIR series motors

Introduction

Energy saving is the strategic line of development of the main branches of the economy. A significant share of electric power consumers falls to electric motors of various purposes, which consume more than half of the energy produced [3, 12]. There is where the largest energy saving reserves lie in. The repair of locomotives in a depot often involves the equipment whose electric drive motors operate in non-controlled mode. This usually includes squirrel-cage induction motors with power from tenth of kW to several tens of kW. For example, dolly, which is used for repair of locomotive bogies, has the electric motor with power of 0.8 kW; the electric motor of the assembly line for locomotive axle-box repair has power of 2.2 kW; electric motor power of the washing machine for washing the bearings is 29.7 kW, that of washing machine for washing the traction motors is 82 kW, etc. [1, 16, 18].

Purpose

To conduct research in order to obtain the results that will assess the degree of energy saving due to electric loss reduction in the equipment with non-controlled electric drive.

Methodology

Practice shows that in real operation conditions of this equipment, depending on the locomotive repair technology, the load factor of many electric drive motors is less than 50%. The drive operation in under-load mode results in huge losses. There are several ways to implement energy saving by means of an industrial electric drive [1, 16, 17, 18]. In our case, the most appropriate in terms of ease of implementation and losses is the replacement of the powerful electric drive with that having less power to reduce active power losses in the motor and in the electricity network [3, 4, 17, 18]. Let us consider the specific example, when for the purpose of equipment unification the traction motor washing machine is used for washing reduction gear housing, axle-box and other assemblies that are placed on the table of the handling dolly. Herewith the electric drive motor load factor may vary depending on the table load.

It is necessary to analyse the reduction of active power losses in the motor and the electrical net-

work when replacing the under-loaded motor mounted during the equipment manufacture with the less powerful motor when washing other (non-traction motors) units of the locomotive.

Initial data: electric drive mode is long-term. AIR series motor with the following parameters [4, 9]: $P_{nom1} = 90 \text{ kW}$, $U_{m\ nom} = 380 \text{ V}$, $\eta_{m\ nom1} = 0.93$, $\cos \varphi_{nom1} = 0.91$, $I_{nom1} = 160 \text{ A}$, $\cos \varphi_{xx1} = 0.15$. Motor type – 5AM250M2.

The analysis is performed in accordance with [13]. We propose the following method [6, 7, 14]. Losses of active power in no-load mode of 5AM250M2 motor:

$$\begin{aligned} \Delta P_{xx1} &= \sqrt{3} I_{xx1} U_{m\ nom} \cos \varphi_{xx1} \cdot 10^{-3} = \\ &= \sqrt{3} \cdot 48 \cdot 380 \cdot 0.15 \cdot 10^{-3} = 4.73 \text{ kW} \end{aligned} \quad (1)$$

No-load current:

$$I_{xx1} = 0.3 I_{nom1} = 0.3 \cdot 160 = 48 \text{ A}, \quad (2)$$

where 0.3 – coefficient according to [12].

Then the relative losses in no-load mode:

$$\begin{aligned} \Delta P_{xx1}^* &= \frac{\Delta P_{xx1}}{P_{nom1}} \cdot 100\% = \\ &= \frac{4.73}{90} \cdot 100\% = 5.25\% \end{aligned} \quad (3)$$

The motor load factor:

$$k_{l1} = \frac{P_r}{P_{nom}} \quad (4)$$

where P_r – actual load of the mounted motor of the washing machine.

The feasibility of reducing the installed motor power must be justified with calculations, if:

$$(0.4...0.5) \leq k_{l1} < (0.7...0.75) \quad (5)$$

We accept: $k_{l1} = 0.7$. Then: $P_r = k_{l1} P_{nom1} = 0.7 \cdot 90 = 63 \text{ kW}$. The closest to $P_r = 63 \text{ kW}$ and more powerful is the motor of 5AM250S4 type [3]. Specifications of 5AM250S4 type motor: $P_{nom2} = 75 \text{ kW}$, $U_{m\ nom} = 380 \text{ V}$, $\eta_{m\ nom2} = 0.93$, $\cos \varphi_{nom2} = 0.91$, $I_{nom2} = 134.6 \text{ A}$, $\cos \varphi_{xx2} = 0.15$.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Then for 5AM250S4 type motor:

$$\Delta P_{xx2} = \sqrt{3} I_{xx2} U_{m\text{ nom}} \cos \varphi_{xx2} \cdot 10^{-3} = \\ = \sqrt{3} \cdot 40.38 \cdot 380 \cdot 0.15 \cdot 10^{-3} = 3.98 \text{ kW} \quad (6)$$

No-load current:

$$I_{xx2} = 0.3 I_{\text{nom}2} = 0.3 \cdot 134.6 = 40.38 \text{ A}, \quad (7)$$

$$\Delta P_{xx2}^* = \frac{\Delta P_{xx2}}{P_{\text{nom}2}} \cdot 100\% = \frac{3.98}{75} \cdot 100\% = 5.3\% \quad (8)$$

The total active power losses $\Delta P_{\Sigma 1}$ for 5AM250M2 type motor:

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (Q_{xx1} (1 - k_{l1}^2) + k_{l1}^2 Q_{\text{nom}}) k_e + \\ + \Delta P_{xx1} + k_{l1}^2 \Delta P_{\text{in}1}, \quad (9)$$

where

$$Q_{xx1} = \sqrt{3} U_{m\text{ nom}} I_{xx1} \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

– reactive power consumed from the network in no-load mode;

$$Q_{xx1} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 48 \cdot 10^{-3} = 31.55 \text{ kVAr}.$$

$$Q_{\text{nom}1} = \left(P_{\text{nom}1} \cdot \frac{\text{tg } \varphi_{\text{nom}1}}{\eta_{m\text{ nom}1}} \right) \quad (11)$$

– reactive motor power in rated load mode;

$$Q_{\text{nom}1} = \left(90 \cdot \frac{0.456}{0.93} \right) = 44.13 \text{ kVAr}$$

$$\text{tg } \varphi_{\text{nom}1} = \text{tg}(\arccos \varphi_{\text{nom}1}),$$

where $\cos \varphi_{\text{nom}1}$ – nominal motor power factor; k_e – increased loss coefficient or economic equivalent, which determines the active power losses for transmission of one kVAr of reactive power into these power supply systems, $k_e = 0.125 \text{ kW/kVAr}$ for low voltage consumers [4]; $\Delta P_{\text{in}1}$ – increased active power losses in the electric motor for 100% load;

$$\Delta P_{\text{in}1} = P_{\text{nom}1} \frac{1 - \eta_{m\text{ nom}1}}{\eta_{m\text{ nom}1}} \cdot \frac{1}{1 + \gamma_1}, \quad (12)$$

where $\gamma_1 = \frac{\Delta P_{xx1}}{\Delta P_{\text{in}1}}$ – design coefficient depending on the electric motor design and calculated by the formula:

$$\gamma_1 = \frac{\Delta P_{xx1}^*}{100(1 - \eta_{m\text{ nom}1}) - \Delta P_{xx1}^*} \quad (13)$$

$$\gamma_1 = \frac{5.25}{100(1 - 0.93) - 5.25} = 3$$

$$\Delta P_{\text{in}1} = 90 \frac{1 - 0.93}{0.93} \cdot \frac{1}{1 + 3} = 1.7 \text{ kW}$$

Then,

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31.55(1 - 0.7^2) + 0.7^2 \cdot 44.13) \cdot 0.125 + \\ + 4.73 + 0.7^2 \cdot 1.7 = 10.27 \text{ kW}_T$$

Similarly, the total active power losses for less powerful motor of 5AM250S4 type:

$$Q_{xx2} = \sqrt{3} U_{m\text{ nom}} I_{xx2} = \\ = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 40.38 \cdot 10^{-3} = 26.55 \text{ kVAr} \quad (14)$$

$$Q_{\text{nom}2} = \left(P_{\text{nom}2} \cdot \frac{\text{tg } \varphi_{\text{nom}2}}{\eta_{m\text{ nom}2}} \right) = \\ = \left(75 \cdot \frac{0.456}{0.93} \right) = 36.77 \text{ kVAr} \quad (15)$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta P_{xx2}^*}{100(1 - \eta_{m\text{ nom}2}) - \Delta P_{xx2}^*} = \\ = \frac{5.3}{100(1 - 0.93) - 5.3} = 1.7 \quad (16)$$

$$\Delta P_{\text{in}2} = P_{\text{nom}2} \frac{1 - \eta_{m\text{ nom}2}}{\eta_{m\text{ nom}2}} \cdot \frac{1}{1 + \gamma_2} = \\ = 75 \frac{1 - 0.93}{0.93} \cdot \frac{1}{1 + 1.7} = 2.09 \text{ kW} \quad (17)$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (Q_{xx2} (1 - k_{l2}^2) + k_{l2}^2 Q_{\text{nom}}) k_e + \\ + \Delta P_{xx2} + k_{l2}^2 \Delta P_{\text{in}2} \quad (18)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$k_{l2} = \frac{P_r}{P_{\text{nom2}}} = \frac{63}{75} = 0.84 \quad (19)$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (26.55(1 - 0.84^2) + 0.84^2 \cdot 36.77) \cdot 0.125 + 3.98 + 0.84^2 \cdot 2.09 = 9.69 \text{ kW}$$

Thus, after replacing the under-loaded motor 5AM250M2 at $k_{l1} = 0.7$ with the less powerful motor 5AM250S4 in the washing machine, we obtained the reduction of active power losses in the motor and the electricity network:

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 10.27 - 9.69 = 0.58 \text{ kW} \quad (20)$$

Similarly, we conducted the calculations and the analysis of active power loss reduction in the motor and the electricity network, if

$$k_{l1} = 0.65; 0.6; 0.55; 0.5$$

at $n = 3000$ r.p.m.; 1500 r.p.m.; 1000 r.p.m.; 750 r.p.m.

When choosing [3] the motor type which is the closest to the more powerful one relative to the real load P_r , it is necessary to provide:

$$k_{l2} = \frac{P_r}{P_{\text{nom2}}} \leq 0.9 \quad (21)$$

We obtained the following results for the motors at 3000 r.p.m.

When $k_{l1} = 0.65$: $P_r = 58.5$ kW. The closest more powerful, than $P_r = 58.5$ kW, is 5AM250S4 type motor (as when $k_{l1} = 0.7$).

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31.55(1 - 0.65^2) + 0.65^2 \cdot 44.13) \cdot 0.125 + 4.73 + 0.65^2 \cdot 1.7 = 10.07 \text{ kW}$$

$$k_{l2} = 0.78$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (26.55(1 - 0.78^2) + 0.78^2 \cdot 36.77) \cdot 0.125 + 3.98 + 0.78^2 \cdot 2.09 = 8.69 \text{ kW}$$

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 10.07 - 8.69 = 1.38 \text{ kW}$$

When $k_{l1} = 0.6$: $P_r = 54$ kW.

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31.55(1 - 0.6^2) + 0.6^2 \cdot 44.13) \cdot 0.125 + 4.73 + 0.6^2 \cdot 1.7 = 9.85 \text{ kW}$$

$$k_{l2} = 0.72$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (26.55(1 - 0.72^2) + 0.72^2 \cdot 36.77) \cdot 0.125 + 3.98 + 0.72^2 \cdot 2.09 = 8.37 \text{ kW}$$

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 9.85 - 8.37 = 1.48 \text{ kW}$$

When $k_{l1} = 0.55$: $P_r = 49.5$ kW. The closest more powerful motor is 5A225M2 type (55 kW, 3000 r.p.m.). Here it is ensured $k_{l2} = \frac{49.5}{55} = 0.9$.

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31.55(1 - 0.55^2) + 0.55^2 \cdot 44.13) \cdot 0.125 + 4.73 + 0.55^2 \cdot 1.7 = 9.67 \text{ kW}$$

$\frac{I_{xx2}}{I_{\text{nom2}}} = 0.25$ (according to [7] we take this ratio as 0.25, which is the average value of this ratio for the power range 22.5 ... 110 kW and corresponds to the average power – 55 kW).

$$I_{xx2} = 24.8 \text{ A}; \Delta P_{xx2} = 2.45 \text{ kW}; \Delta P_{xx2}^* = 4.45 \%$$

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31.55(1 - 0.55^2) + 0.55^2 \cdot 44.13) \times 0.125 + 4.73 + 0.55^2 \cdot 1.7 = 9.67 \text{ kW}$$

$$Q_{xx2} = 16.3 \text{ kVAr}; Q_{\text{nom2}} = 27.11 \text{ kVAr}; \gamma_2 = 1.46$$

$$\Delta P_{\text{in2}} = 1.83 \text{ kW}$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (16.3(1 - 0.9^2) + 0.9^2 \cdot 27.11) \times 0.125 + 2.45 + 0.9^2 \cdot 1.83 = 7.06 \text{ kW}$$

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 9.67 - 7.06 = 2.61 \text{ kW}$$

When $k_{l1} = 0.5$: $P_r = 45$ kW. The closest more powerful motor is 5A225M2 type. $k_{l2} = 0.82$.

$$\Delta P_{\Sigma 1} = (31.55(1 - 0.5^2) + 0.5^2 \cdot 44.13) \times 0.125 + 4.73 + 0.5^2 \cdot 1.7 = 9.495 \text{ kW}$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$\Delta P_{\Sigma 2} = (16.3(1 - 0.82^2) + 0.82^2 \cdot 27.11) \times \\ \times 0.125 + 2.45 + 0.82^2 \cdot 1.83 = 6.63 \text{ kW} \\ \Delta P = \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 9.495 - 6.63 = 2.865 \text{ kW} .$$

Similarly, the following values of ΔP are obtained for AIR series motors at 1500 r.p.m.

For AIR series motors at 1000 r.p.m. we obtained the following.

For AIR series motors at 750 r.p.m. we obtained the following.

For illustration purposes we will show $\Delta P = f(k_{r1})$ in the form of Table 1.

The parameters listed in Table 1 are obtained for the types of electric motors shown in Table 2.

When $k_{r1} = 0.7$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10.59 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9.23 \text{ kW}$	$\Delta P = 1.36 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.65$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10.48 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9.09 \text{ kW}$	$\Delta P = 1.39 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.6$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10.34 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 8.92 \text{ kW}$	$\Delta P = 1.42 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.55$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10.25 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 7.415 \text{ kW}$	$\Delta P = 2.835 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.5$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 10.128 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 7.17 \text{ kW}$	$\Delta P = 2.96 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.7$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11.43 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9.73 \text{ kW}$	$\Delta P = 1.7 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.65$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11.37 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9.64 \text{ kW}$	$\Delta P = 1.73 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.6$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11.3 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9.55 \text{ kW}$	$\Delta P = 1.75 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.55$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11.23 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 8.49 \text{ kW}$	$\Delta P = 2.74 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.5$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 11.17 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 8.37 \text{ kW}$	$\Delta P = 2.8 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.7$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 13.04 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 10.9 \text{ kW}$	$\Delta P = 2.14 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.65$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 13.02 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 10.825 \text{ kW}$	$\Delta P = 2.195 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.6$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 12.98 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 9.16 \text{ kW}$	$\Delta P = 3.82 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.55$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 12.86 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 7.84 \text{ kW}$	$\Delta P = 5.02 \text{ kW}$
When $k_{r1} = 0.5$:	$\Delta P_{\Sigma 1} = 12.87 \text{ kW}$	$\Delta P_{\Sigma 2} = 7.73 \text{ kW}$	$\Delta P = 5.09 \text{ kW}$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Table 1

Dependence $\Delta P = f(k_{11})$					
3000 r.p.m.					
ΔP , kW	0.58	1.38	1.48	2.61	2.865
k_{11}	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
1500 r.p.m.					
ΔP , kW	1.36	1.39	1.42	2.835	2.96
k_{11}	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
1000 r.p.m.					
ΔP , kW	1.7	1.73	1.75	2.74	2.8
k_{11}	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
750 r.p.m.					
ΔP , kW	2.14	2.195	3.82	5.02	5.09
k_{11}	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5

Table 2

Types of motors, used during the research						
3000 r.p.m.						
Electric motor type	5AM250M2	5AM250S4	5AM250S4	5AM250S4	5A225M2	5A225M2
k_{11}	>0.7	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
1500 r.p.m.						
Electric motor type	5AM250M4	5AM250S4	5AM250S4	5AM250S4	5A225M4	5A225M4
k_{11}	>0.7	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
1000 r.p.m.						
Electric motor type	AIR280M6	AIR280S6	AIR280S6	AIR280S6	AIR250M6	AIR250M6
k_{11}	>0.7	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
750 r.p.m.						
Electric motor type	AIR315S8	AIR280M2	AIR280M2	AIR280M2	AIR280S8	AIR280S8
k_{11}	>0.7	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5

Findings

After the performed calculations it was found that for AIR series electric motors, in case of reducing the load factor within the range $(0.4...0.5) \leq k_l \leq (0.7...0.75)$, active power loss reduction in the motor and the network after replacement of the under-loaded motor with the less powerful one ranges from 0.58 kW to 2.865 kW at initial motor power of 90 kW. The obtained numerical values of reduction of these losses can be used as source information when considering the feasibility of replacement of the motors within the specified range of the load values. When using the motors with the lower synchronous speed, the effect of under-loaded motor replacement increases in terms of active power loss reduction. The greatest effect is achieved when the load factor is $k_l \leq 0.55$.

Originality and practical value

For the first time the paper outlines the issues of energy saving efficiency for the equipment with non-controlled electric drive by replacing the under-loaded motors with the less powerful ones, taking into account the peculiarities of their operation in a locomotive depot.

The obtained research results allow us to solve the problem of replacement of under-loaded motors in locomotive depot equipment with the motors having less power as efficiently as possible in terms of reducing the electric losses and increasing the electric motors operation period.

Conclusions

1. The proposed method for determining the reduction of active power losses in the electric motor and the power supply network after replacing an under-loaded motor with a less powerful motor can be used during continuous mode operation of various machines at the railway rolling stock repair enterprises.

2. The obtained numerical values of reduction of these losses can be used as source information when considering the feasibility of replacement of the motors within the load factor range $0.5 < k_l < 0.7$.

3. When using the motors with the lower synchronous speed, the effect of under-loaded motor

replacement increases in terms of active power loss reduction. The greatest effect is achieved when the load factor is $k_l \leq 0.55$.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Вишневский, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С. Н. Вишневский. – Ленинград : Энергия, 1977. – 432 с.
2. ДСТУ 3886-99. Енергозбереження. Системи електроприводу. Метод аналізу та вибору. – Надано чинності 2000-07-01. – Київ : Держстандарт України, 2000. – 54 с.
3. Закладний, О. М. Енергозбереження засобами промислового електропривода / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей. – Київ : Кондор, 2005. – 408 с.
4. Ильинский, Н. Ф. Энергосбережение в электроприводе / Н. Ф. Ильинский. – Москва : Высш. шк., 1989. – 127 с.
5. Кацман, М. М. Справочник по электрическим машинам / М. М. Кацман. – Москва : Академия, 2005. – 480 с.
6. Ковалко, М. П. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / М. П. Ковалко, С. П. Денисюк ; відпов. ред. А. К. Шидловський. – Київ : УЕЗ, 1998. – 506 с.
7. К теории энергосбережения средствами промышленного электропривода // Электротехника. – 1999. – № 5. – С. 62–67.
8. Кужеков, С. Л. Практическое пособие по электрическим сетям и электрооборудованию / С. Л. Кужеков, С. В. Гончаров. – 5-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2010. – 492 с.
9. Мамолапа, В. М. Энергосбережение в системах электропривода / В. М. Мамолапа. – Київ : Энергетический центр ЕС в Киеве, 1995. – 86 с.
10. Маренич, О. Л. Підвищення коефіцієнта потужності електродвигунів пристроїв на підприємствах з ремонту залізничної техніки / О. Л. Маренич, О. О. Маренич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 21. – С. 72–73.
11. Поточные линии ремонта локомотивов в депо / Н. И. Фильков, Е. Л. Дубинский, М. М. Майдель, И. Б. Стерлин. – Москва : Транспорт, 1983. – 302 с.
12. Предельно допустимые значения тока холостого хода для трехфазных асинхронных двигателей [Electronic resource]. – Available at: <http://granat-es.ru/2.-dopustimye-znacheniya-toka-holosol>. – Title from the screen. – Accessed : 09.09.2016.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

13. Родионов, В. Г. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего / В. Г. Родионов. – Москва : ЭНАС, 2010. – 352 с.
14. Сибикин, Ю. Д. Технология энергосбережения / М. Ю. Сибикин, Ю. Д. Сибикин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Форум, 2012. – 352 с.
15. Улучшение энергетических показателей предприятий по ремонту подвижного состава / Л. В. Дубинец, О. Л. Маренич, О. А. Карзова [и др.] // Гірнична електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. / ДВНЗ «НГУ». – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 90. – С. 144–150.
16. Электродвигатели АИР – технические характеристики [Electronic resource]. – Available at: electronpo.ru/production. – Title from the screen. – Accessed : 09.09.2016.
17. Hillmansen, S. Electric railway traction systems and techniques for energy saving / S. Hillmansen, R. Tllis // Proc. of IET 13th Professional Development Course on Electric Traction Systems. – 2014. – P. 6. doi: 10.1049/cp.2014.1432.
18. Zeraoulia, M. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study / M. Zeraoulia, M. El H. Benbouzid, D. Diallo // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2006. – Vol. 55. – Iss. 6. – P. 1756–1764. doi: 10.1109/TVT.2006.878719.

Л. В. ДУБИНЕЦЬ¹, О. Л. МАРЕНИЧ², О. Ю. БАЛІЙЧУК³, А. С. КОРТОГУЗ^{4*}

¹Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ORCID 0000-0003-0319-4544

²Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ORCID 0000-0003-3602-5851

³Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

^{4*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 256 19 65, ел. пошта andrykor63@gmail.com, ORCID 0000-0001-9316-3500

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В ЛОКОМОТИВНИХ ДЕПО ПРИСТРОЇВ ІЗ НЕРЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Мета. У роботі необхідно провести дослідження електричних двигунів для отримання результатів, які дозволять оцінити ступінь енергозбереження за рахунок зменшення електричних витрат у пристроях із нерегульованим електроприводом. **Методика.** Запропоновано інженерний метод із визначення втрат активної потужності у двигуні пристроїв із нерегульованим електроприводом локомотивних депо при зміні навантаження на валу цих двигунів. Також потрібно провести аналіз зниження втрат активної потужності у двигуні та мережі електропостачання при заміні неповністю навантаженого двигуна двигуном меншої потужності. **Результати.** Після проведених авторами розрахунків було встановлено, що для електричних двигунів у випадках зменшення коефіцієнта завантаження від 0,7...0,75 до 0,4...0,5 зменшення активних втрат після заміни двигуна на менш потужний складає від 0,58 кВт до 2,865 кВт. Також були проведені розрахунки на прикладі електричного двигуна із меншою синхронною частотою обертання: ефект від заміни недовантажених двигунів збільшується з точки зору зниження втрат активної потужності. Найбільший ефект досягається при коефіцієнті завантаження $k_3 \leq 0,55$. **Наукова новизна.** Вперше висвітлено питання ефективності енергозбереження для пристроїв із нерегульованим електроприводом у локомотивних депо шляхом заміни недовантажених двигунів менш потужними. Оскільки розглянутих електроприводів значна кількість, то можливі великі збитки з урахуванням особливостей їх експлуатації. **Практична значимість.** Отримані в ході досліджень результати дозволяють вирішувати задачу по заміні недовантажених двигунів у пристроях локомотивних депо на двигуни меншої потужності з найбільшим ефектом з точки зору зменшення електричних витрат. Так, двигун мийної машини потужністю 90 кВт може бути замінений на двигун потужністю 75 кВт при коефіцієнті завантаження $k_3 \leq 0,7$, що може суттєво зменшити експлуатаційні зби-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

тки. Дану методику можна застосувати не тільки в локомотивних депо, а й взагалі для усіх пристроїв із нерегульованим електричним двигуном, які працюють у недовантаженому режимі.

Ключові слова: електропривод; локомотивне депо; енергозбереження; втрати активної потужності; коефіцієнт завантаження двигуна; двигуни серії АІР

Л. В. ДУБИНЕЦ¹, О. Л. МАРЕНИЧ², А. Ю. БАЛИЙЧУК³, А. С. КОРТОГУЗ^{4*}

¹Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ORCID 0000-0003-0319-4544

²Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ORCID 0000-0003-3602-5851

³Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

^{4*}Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 256 19 65, ел. пошта andrykor63@gmail.com, ORCID 0000-0001-9316-3500

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЛОКОМОТИВНОМ ДЕПО УСТРОЙСТВ С НЕРЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Цель. В работе необходимо провести исследования электродвигателей для получения результатов, которые позволят оценить степень энергосбережения за счет уменьшения электрических потерь в устройствах с нерегулируемым электроприводом. **Методика.** Предложен инженерный метод по определению потерь активной мощности в устройствах с нерегулируемым электроприводом локомотивных депо при изменении нагрузки на валу этих двигателей. Также нужно провести анализ снижения потерь активной мощности в двигателе и сети электроснабжения при замене не полностью нагруженного двигателя двигателем меньшей мощности. **Результаты.** После проведенных авторами расчетов было установлено, что для электродвигателей в случае уменьшения коэффициента загрузки от 0,7...0,75 до 0,4...0,5 уменьшение активных потерь после замены двигателя на менее мощный составляет от 0,58 кВт до 2,865 кВт. Также были проведены расчеты на примере электродвигателей с меньшей синхронной частотой вращения: эффект от замены нагруженных двигателей увеличивается с точки зрения снижения потерь активной мощности. Наибольший эффект достигается при коэффициенте загрузки $k_z \leq 0,55$. **Научная новизна.** Впервые освещены вопросы эффективности энергосбережения для устройств с нерегулируемым электроприводом в локомотивных депо путем замены недогруженных двигателей менее мощными. Поскольку рассмотренных электроприводов значительное количество, то возможны большие убытки с учетом особенностей их эксплуатации. **Практическая значимость.** Полученные в ходе исследований результаты позволяют решать задачу по замене недогруженных двигателей в устройствах локомотивных депо на двигатели меньшей мощности с максимальным эффектом с точки зрения уменьшения электрических потерь. Так, двигатель моечной машины мощностью 90 кВт может быть заменен на двигатель мощностью 75 кВт при коэффициенте загрузки $k_z \leq 0,7$, что может существенно уменьшить эксплуатационные убытки. Данную методику можно применять не только в локомотивных депо, а и в общем для всех устройств с нерегулируемым электродвигателем, работающих в недогруженном режиме.

Ключевые слова: электропривод; локомотивное депо; энергосбережение; потери активной мощности; коэффициент загрузки двигателя; двигатели серии АІР

REFERENCES

1. Vishnevskiy S.N. *Kharakteristiki dvigateley v elektroprivode* [Characteristics of engines in the electric driver]. Leningrad, Energiya Publ., 1977. 432 p.
2. *Derzhavnyi standart Ukrainy DSTU 3886-99. Enerhozberezhennia. Systemy elektropyvodu. Metod analizu ta vyboru* [State Standard 3886-99. Energy saving. Electric systems. The method of analysis and selection]. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy Publ., 2000. 54 p.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

3. Zakladnyi O.M., Prakhovnyk A.V., Solovei O.I. *Enerhozberezhennia zasobamy promyslovoho elektroprivoda* [Energy saving by industrial electric drivers]. Kyiv, Kondor Publ., 2005. 408 p.
4. Ilinskiy N.F. *Energoberezheniye v elektroprivode* [Energy Saving in the motor driver]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 127 p.
5. Katsman M.M. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Handbook of electrical machines]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 480 p.
6. Kovalko M.P., Denysiuk S.P., Shydlovskiy A.K. *Enerhozberezhennia – priorytetnyi napriamok derzhavnoi polityky Ukrainy* [Energy conservation is a priority direction of Ukraine’s state policy]. Kyiv, UEZ Publ., 1998. 506 p.
7. K teorii energoberezheniya sredstvami promyshlennogo elektroprivoda [To the theory of energy saving by means of industrial drive]. *Elektrotehnika – Electrotechnics*, 1999, no. 5, pp. 62-67.
8. Kuzhekov S.L., Goncharov S.V. *Prakticheskoye posobiye po elektricheskim setyam i elektrooborudovaniyu* [Handbook on electrical networks and equipment]. Rostov na Donu, Feniks Publ., 2011. 492 p.
9. Mamolapa V.M. *Energoberezheniye v sistemakh elektroprivoda* [Energy Saving in the motor driver systems]. Kiyev, Energeticheskyy tsentr YES v Kiyeye Publ., 1995. 86 p.
10. Marenych O.L., Marenych O.O. Pidvyschennia koefitsienta potuzhnosti elektrodvyhuniv prystoiv na pidpriemstvakh z remontu zaliznychnoi tekhniki [The power factor improving of the motors in enterprises with repair of railway equipment]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 21, pp. 72-73.
11. Filkov N.I., Dubinskiy Ye.L., Maydel M.M., Sterlin I.B. *Potochnyye linii remonta lokomotivov v depo* [In-line systems of locomotive repair in the motive-power depot]. Moscow, Transport Publ., 1983. 302 p.
12. *Predelno dopustimyye znacheniya toka kholostogo khoda dlya trekhfaznykh asinkhronnykh dvigateley* (The limit values of nitrogen-load current for three-phase asynchronous motors). Available at: <http://granat-es.ru/2.-dopustimyye-znacheniya-toka-holos> (Accessed 09 September 2016).
13. Rodionov V.G. *Energetika: problemy nastoyashchego i vozmozhnosti budushchego* [Energy: Present questions and opportunities of the future]. Moscow, ENAS Publ., 2010. 352 p.
14. Sibikin Yu.D., Sibikin M.Yu. *Tekhnologiya energoberezheniya* [Energy saving technology]. Moscow, Forum Publ., 2012. 352 p.
15. Dubinets L.V., Marenich O.L., Karzova O.A., Krasnov R.V., Melnik A.A. Uluchsheniye energeticheskikh pokazateley predpriyatiy po remontu podvizhnogo sostava [Improving the energy performance of enterprises on rolling stock repair]. *Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk: «Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka»* [Scientific and research collection: «Mining electrical engineering and automation»]. Dnipropetrovsk, 2013, issue 90, pp. 144-150.
16. *Elektrodvigateli AIR – tekhnicheskiye kharakteristiki* (AIR electric motors–specifications). Available at: electronpo.ru/production (Accessed 09 September 2016).
17. Hillmansen S., Tllis R. Electric railway traction systems and techniques for energy saving. Proc. of IET 13th Professional Development Course on Electric Traction Systems, 2014. 6 p. doi: 10.1049/cp.2014.1432.
18. Zeraoulia M., Benbouzid M.El H., Diallo D. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, vol. 55, issue 6, pp. 1756-1764. doi: 10.1109/T.VT.2006.878719.

Prof. F. P. Shkrabets, D. Sc. (Tech.) (Ukraine); Prof. M. O. Kostin, D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: May 27, 2016

Received: Sep. 15, 2016

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 625.032.432

М. А. АРБУЗОВ¹, О. М. ПАТЛАСОВ², С. О. ТОКАРЄВ^{3*}

¹Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, ел. пошта 10max@ukr.net

²Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, ел. пошта am_patlasov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2081-5648

^{3*}Колієвипробувальна галузева науково-дослідна лабораторія, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 793 38 45, ел. пошта tokarevsergeyaleks@yandex.ua, ORCID 0000-0002-2607-3123

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОЛІЇ ТА РУХОМОГО СКЛАДУ В МЕЖАХ З'ЇЗДУ

Мета. Останнім часом у мережі залізниць України все більшу увагу приділяють випадкам порушення в утриманні стрілочних з'їздів, які можуть призвести до погіршення умов безпеки руху поїздів. Такі порушення, зазвичай, з'являються в результаті неточності під час розбивки та укладання з'їзду, а також бувають наслідком дії рухомого складу і температурних сил. Поява геометричних нерівностей також може бути спровокована порушенням епюри розкладки залізобетонних брусів у захрестовинній частині з'їзду при міжколії менше 5,3 м. Тому в роботі потрібно проаналізувати вплив наявності відхилень від епюри розкладки брусів та геометричних нерівностей на умови взаємодії колії та рухомого складу, враховуючи результати експериментальних досліджень. Також треба встановити зв'язок між напружено-деформованим станом колії в зонах укладання вкорочених брусів. **Методика.** Дослідження впливу відхилень від епюри розкладки брусів та геометричних нерівностей на умови взаємодії колії та рухомого складу проводились шляхом проведення теоретичних розрахунків та експериментальних випробувань. Для проведення експериментальних досліджень була обрана дослідна ділянка на коліях незагального користування ТОВ з П «Трансінвестсервіс», яка відповідає необхідним умовам в рамках науково-дослідної роботи. **Результати.** Отримано розподіл напружень та сил, що діють на колію в залежності від швидкості руху дослідного рухомого складу. Також отримано дані стосовно впливу геометричних параметрів бруса на його напружено-деформований стан. **Наукова новизна.** Авторами вперше було проведено оцінку впливу рухомого складу (при наявності геометричних нерівностей та несиметрично вкорочених брусів у межах з'єднувальної частини стрілочного з'їзду) на напружено-деформований стан верхньої будови колії (ВБК) у вказаній зоні. Також було проведено порівняння результатів для ділянки зі звичайними брусами та вкороченими. **Практична значимість.** На основі отриманих експериментальних даних було встановлено, що при швидкостях руху рухомого складу до 40 км/год напружено-деформований стан ВБК в захрестовинній частині стрілочного з'їзду відповідає умовам міцності та стійкості. Отримані результати можна застосувати для апробації математичних моделей та теоретичних досліджень щодо розробки нормативів утримання стрілочного з'їзду. Рівень отриманих вертикальних, бокових сил та напружень практично не залежить від наявності вкороченої частини брусів, що укладені в з'їзд.

Ключові слова: стрілочний з'їзд; несиметричні бруси; експериментальні дослідження; напруження; вертикальні та бічні сили

Вступ

Для збільшення транзиту вантажів територією України через міжнародні транспортні коридори відповідно до [11] необхідно виконати аналіз бар'єрних місць інфраструктури, що можуть стати стримувальним фактором для транспортування транзитних вантажів. До таких місць, в першу чергу, можна віднести ділянки, які не відповідають нормативам утримання та експлуатації або конструктивно не дозволяють реалізувати великі швидкості руху, наприклад, стрілочні переводи та з'їзди, які вони утворюють.

Під час реконструкції з'їздів для підвищення швидкостей та безпеки руху, відразу з'явиться проблема, пов'язана з тим, що при улаштуванні нормального з'їзду з міжколійною відстанню до 5,3 м вкласти два захрестовинні блоки стрілочних переводів без порушень схеми розкладки стандартних брусів, що входять в комплект, неможливо. Останні бруси захрестовинних блоків суміжних стрілочних переводів заважають один одному.

Як один з варіантів вирішення цієї проблеми, пропонується замінити необхідні бруси на симетрично вкорочені. Оскільки відсутні будь-які дані стосовно роботи несиметрично вкорочених брусів, було вирішено виконати експериментальні дослідження щодо визначення роботи таких брусів і в подальшому на основі отриманих даних запроєктувати симетрично вкорочені.

Мета

Метою цієї роботи є отримання експериментальним та теоретичним шляхом показників напружено-деформованого стану для елементів верхньої будови колії в межах з'єднувальної частини стрілочного з'їзду при наявності геометричних нерівностей та вкорочених несиметричних брусів і порівняння отриманих значень з рекомендованими та допустимими значеннями.

Методика

Під час вибору дослідного з'їзду для виконання випробувань враховувалось таке:

– проекти стрілочних переводів, які утворюють з'їзд (проект 1740);

– тип верхньої будови з'єднувальної колії (рейки Р65, шпали і бруси залізобетонні, щебеневий баласт, типове проміжне скріплення КБ);

– відсутність понаднормативного зносу рейок в з'єднувальній частині з'їзду і низька забрудненість баласту;

– міжколійна відстань до 5,3 м;

– встановлені швидкості руху вантажних поїздів на боковий напрямок стрілочного переводу $V_6 = 40$ км/год без обмеження;

– можливість надання «вікон» і їх тривалість;

– можливість підключення вимірювальної апаратури до мережі енергопостачання.

Експериментальні дослідження виконувались в межах колій незагального користування ТОВ з П «Трансінвестсервіс».

Як дослідний був обраний з'їзд в парній горловині парку А між паралельними коліями, що утворений стрілочними переводами № 12–14 (рис. 1) типу Р65 марки 1/11; підрейкова основа – залізобетонні бруси; баласт щебеневий, товщина 25–30 см; міжколійна відстань в межах з'їзду – 5,3 м. При цьому враховувалось, що в межах обраної ділянки знаходиться необхідний набір і розташування стандартних вкорочених залізобетонних брусів.

Для встановлення фактичного стану з'єднувальної частини стрілочного з'їзду були виконані натурні вимірювання відповідно до [6] та з врахування пропозицій [1, 16]. Розмітка точок для вимірювання ординат виконувалась через кожні 2,5 м, починаючи від переднього вильоту хрестовини для обох рейкових ниток (точки 1–13 – для правої нитки, точки 14–26 – для лівої нитки). Графіки зміни вимірних ординат графічно наведені на рис. 2–3. Як бачимо з графіків, в з'єднувальній частині з'їзду має місце горизонтальна нерівність між точками 6–9 по правій та відповідно 21–16 по лівій рейковій нитці.

В межах дослідної ділянки були також виконані вимірювання ширини колії та положення однієї нитки відносно іншої за рівнем. Середнє значення ширини колії складає $\bar{S} = 1520$ мм. В перерізах, де були виконані виміри, ширина колії та положення за рівнем знаходились в межах допусків. Вплив укладених типових вкорочених залізобетонних брусів на ширину колії в їх зоні не спостерігається.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

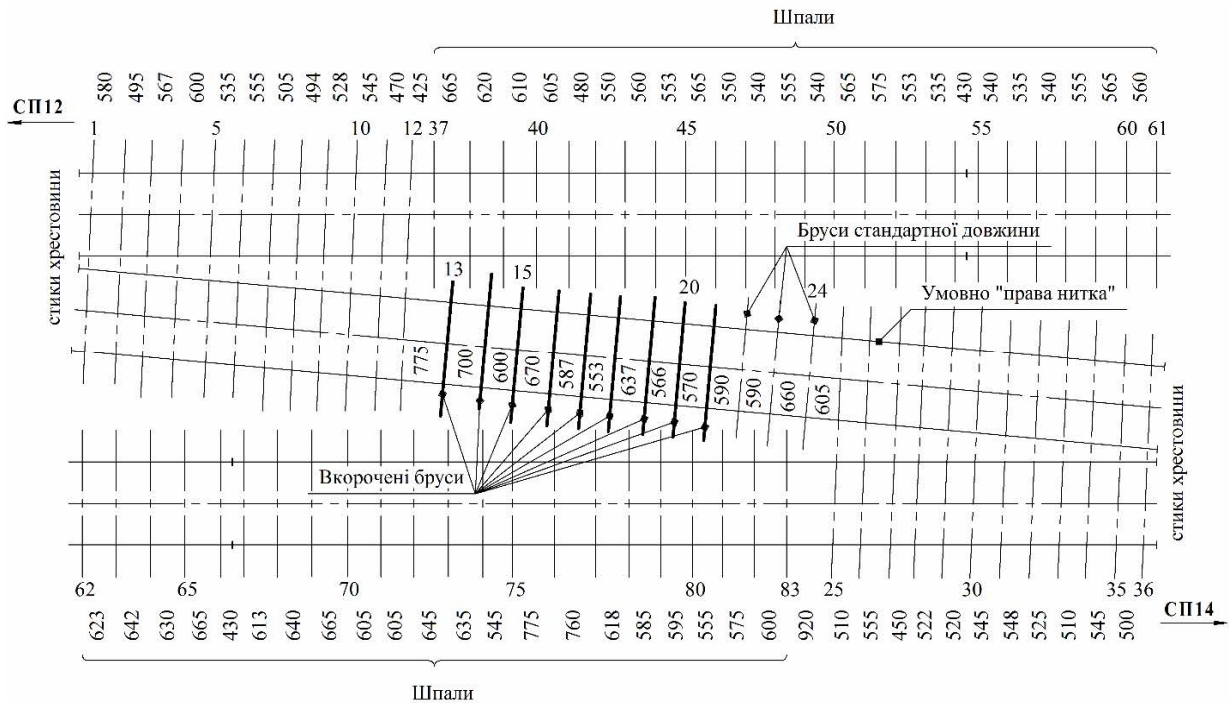


Рис. 1. Схема дослідного з'їзду

Fig. 1. The experimental crossover scheme

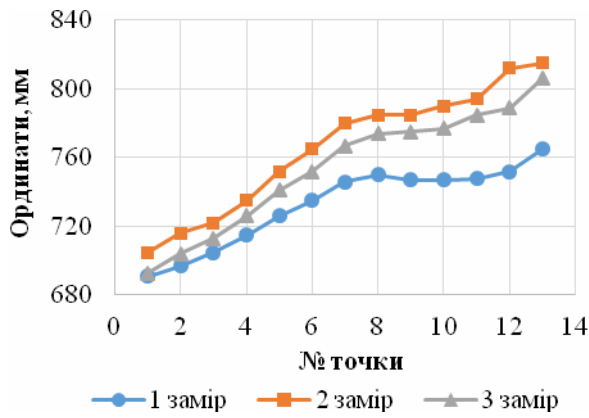


Рис. 2. Графік вимірних ординат в межах дослідного з'їзду для правої нитки

Fig. 2. The schedule of the measured coordinates within experimental crossovers for the right rail

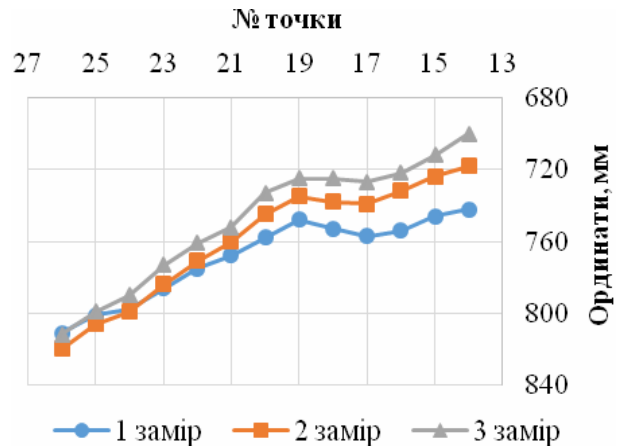


Рис. 3. Графік вимірних ординат в межах дослідного з'їзду для лівої нитки

Fig. 3. The schedule of the measured coordinates within experimental crossovers for the left rail

Під час оцінки стану з'їзду паралельно були виконані вимірювання основних геометричних параметрів стрілочних переводів. Доцільність виконання таких вимірювань пояснюється

необхідністю врахування впливу стану стрілочних переводів на умови взаємодії. Місця контрольних вимірів наведені на рис. 4.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

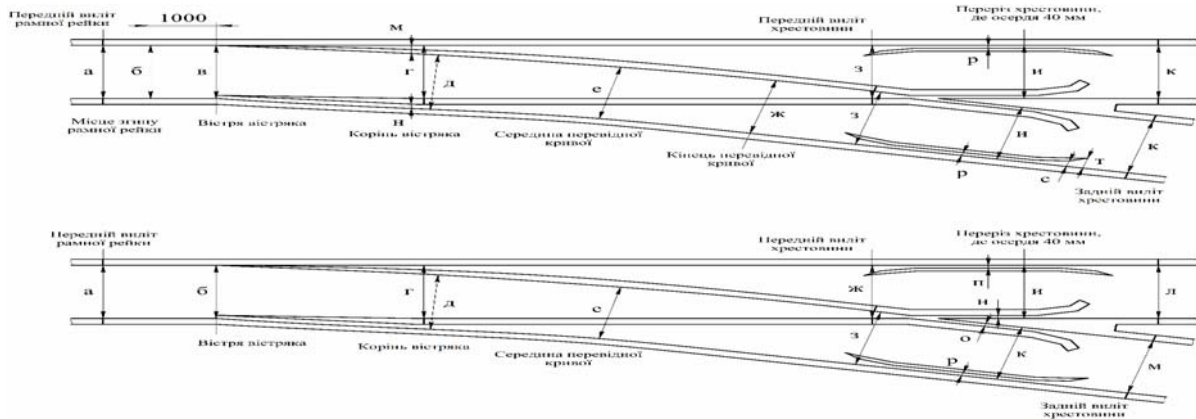


Рис. 4. Місця контрольних вимірів ширини колії та жолобів на стрілочних переводах, які входять до складу з'їзду

Fig. 4. The places of the gauge control measurements and chutes on turnouts that are a part of crossovers

Результати вимірювання фактичного стану стрілочних переводів № 12 та 14 наведені в табл. 1 та 2. Параметри, що були отримані під час вимірювань, знаходяться в межах норм та допусків відповідно до [4]. Аналіз результатів свідчить про задовільний стан стрілочних переводів і, відповідно, про відсутність суттєвого впливу на умови проходження дослідного поїзда вздовж з'єднувальної частини стрілочного з'їзду.

Для досліджень взаємодії колії та рухомого складу на дослідній ділянці були встановлені прилади (рис. 5), які фіксують різні фізичні процеси. Прилади встановлені по обох рейкових нитках, що дозволяють одночасно вимірювати як горизонтальний, так і вертикальний вплив рухомого складу на рейки та бруси.

Таблиця 1

Результати вимірювання ширини колії та положення за рівнем стрілочних переводів

Table 1

The measurement results of the gauge and level position of the turnouts

Місце вимірювання		Позначення на схемі	Шаблон, мм		Рівень, мм		
			СП №12	СП №14	СП №12	СП №14	
Передній виліт рамної рейки		а	1 533	1 529	+7	-1	
Вістря вістряка		б	1 535	1 532	-4	+6	
Корінь вістряка	По прямому	г	1 526	1 527	+4	+6	
	По боковому	д	1 526	1 532	+3	+3	
Середина перевідної кривої		е	1 533	1 534	+5	+1	
Хрестовина	Передній виліт	По прямому	ж	1 520	1 548	-1	+2
		По боковому	з	1 525	1 526	+2	0
	Переріз 40 мм	По прямому	и	1 519	1 519	+11	+2
		По боковому	к	1 516	1 517	-2	-5
	Задній виліт	По прямому	л	1 523	1 522	+4	0
		По боковому	м	1 520	1 520	+3	-5

Таблиця 2

Результати вимірювання жолобів на стрілочних переводах

Table 2

The measurement results of the gutters on the turnouts

Місце вимірювання			Позначення на схемі	Жолоб, мм	
				СП №12	СП №14
Хрестовина	Переріз 40 мм	По прямому	н	45,2	45,5
		По боковому	о	47,0	46,5
Контррейка	В прямій частині	По прямому	п	45,4	44,5
		По боковому	р	44,8	45,2

В межах дослідної ділянки вкладені несиметрично вкорочені бруси в різні сторони відносно осі колії (див. рис. 1). Є група з трьох брусів довжиною 2,5 м, у яких вкорочена частина знаходиться по одній стороні. Цим пояснюється знаходження більшої кількості вимірювальних приладів саме в цій зоні на дослідній ділянці.

Напруження в кромках підшви рейок є одним з основних показників оцінки впливу на колію рухомого складу, як головний критерій міцності колії, а отже, і безпеки руху по колії з різною конструкцією верхньої будови. Нормована величина цих напружень (240 МПа) визначає допустимі швидкості руху [3, 8].

Перерізи, в яких вимірювались напруження в кромках підшви рейок, наведені на схемі встановлення вимірювальних приладів (див. рис. 5).

Місця наклеювання тензорезисторів вибирались таким чином, щоб напруження в підшві рейки були виміряні по обидві сторони стандартного вкороченого бруса, адже площа спірання кожного кінця різна, відповідно, і напруження повинні відрізнитися.

Вимірювання вертикальних сил, що передаються від коліс рухомого складу на рейки, виконувалось в перерізах, які наведено на рис. 5. Значення були отримані за допомогою тензOMETричних датчиків базою 20 мм і опором 200 Ом, що наклеювались вертикально в зоні нейтральної осі по обидві сторони шийки рейки і паралельно включалися в спільну роботу.

Тарування приладів для вимірювання вертикальних сил виконувалось на основі стан-

дартної методики шляхом пропускання дослідного поїзда зі швидкості 5 км/год.

Для визначення бокових сил, що діють на колію від рухомого складу, прилади розташовувались групами. Значення напружень у зовнішніх і внутрішніх кромках підшви рейки здійснюються за допомогою тензOMETричних датчиків, аналогічних при вимірюванні вертикальних сил. Датчики розміщуються практично біля самої кромки підшви по її нижній поверхні [8]. У тих поперечних перерізах рейок, де розміщувались датчики для вимірювання кромкових напружень, розташовувались аналогічні по зовнішній грані головки рейок (рис. 6).

Пружні деформації брусів під час експериментальних досліджень на дослідній ділянці вимірювались за допомогою електропрогиномірів системи ЦНИИ МПС шляхом визначення вертикальних прогинів в підрейковій зоні і осям несиметрично вкорочених брусів від впливу всіх осей дослідного поїзда. Місця, в яких вимірювались вертикальні деформації брусів, наведені на схемі встановлення вимірювальних приладів (рис. 7).

Для виконання затвердженої програми та методики експериментальних досліджень впливу рухомого складу на колію з вкороченими залізобетонними брусами в межах стрілочного з'їзду, був сформований спеціальний дослідний поїзд.

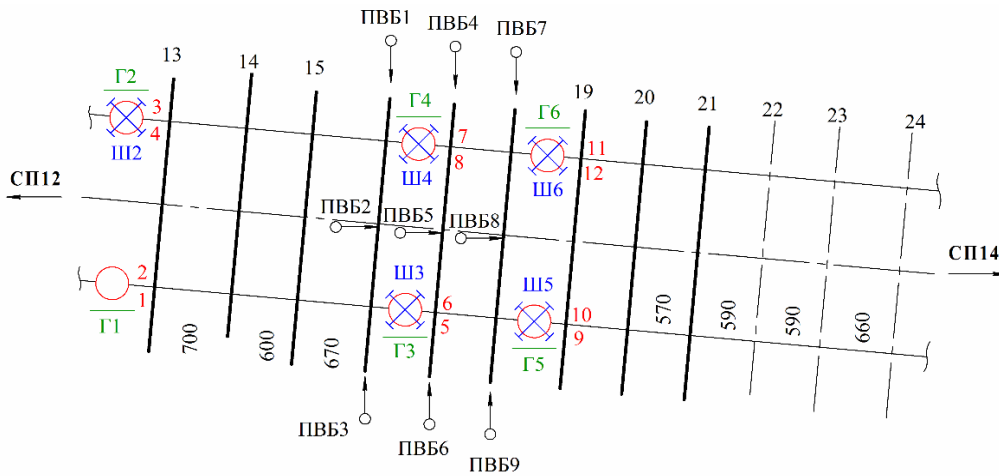


Рис. 5. Розміщення вимірювальних приладів на ділянці
 Fig. 5. Placement of the measurement devices on the research site

Умовні позначення

- — прилади для вимірювання вертикальних переміщень брусків;
- ⊗ — прилади для вимірювання вертикальних сил;
- — прилади для вимірювання напружень в кромках головки рейки;
- ◡ — прилади для вимірювання напружень в кромках підшви рейки

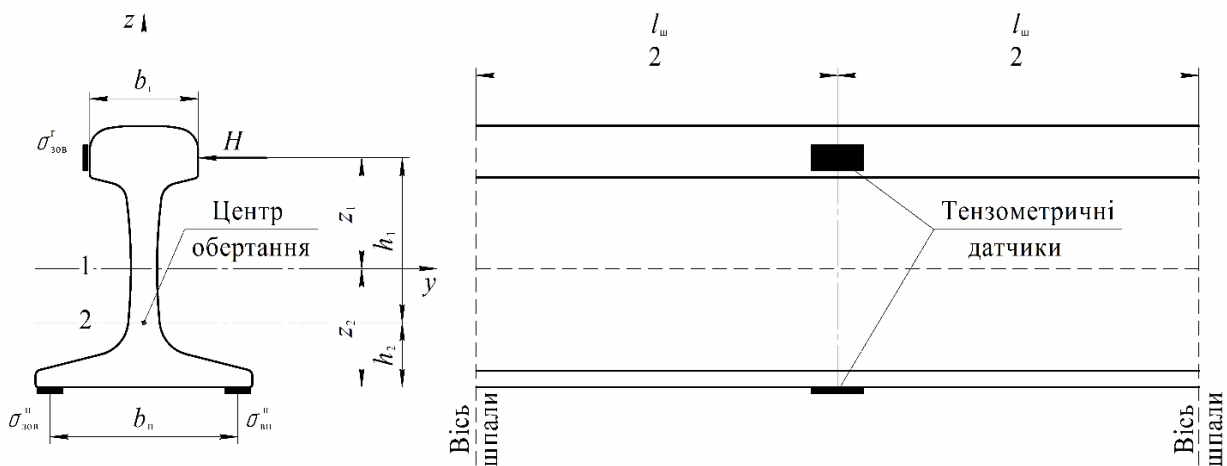


Рис. 6. Схема вимірювання напружень в кромках підшви і зовнішній кромці головки рейки:
 1 – нейтральна вісь; 2 – горизонтальна вісь, що проходить через центр обертання

Fig. 6. The measuring stresses scheme in the edges of the sole and the outer edge of the railhead:
 1 – the neutral axis; 2 – the horizontal axis passing through the center of rotation

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

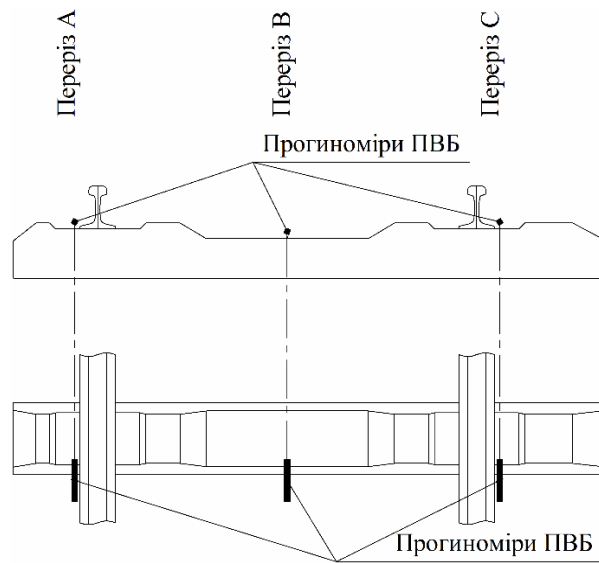


Рис. 7. Схема встановлення прогиномірів вздовж несиметрично вкороченого залізобетонного бруса

Fig. 7. The installation scheme of deflectometer along the asymmetric shortened concrete beam

Схема дослідного поїзда наведена на рис. 8. Поїзд було сформовано з маневрового тепловоза ТГМ6А та двох навантажених чотиривісних напіввагонів на візках 18-100. Заїзди виконувались під час «вікна» у маневровій роботі човником (туди і назад) зі швидкостями до 40 км/год.

Перед початком випробувань рівномірно

навантажені щебенем напіввагони були попередньо зважені і складений відповідний протокол. Вага першого напіввагона склала 898 кН, другого напіввагона – 902 кН.

Кількість заїздів дослідного поїзда, які були реалізовані під час експериментальних досліджень, наведені в табл. 3.

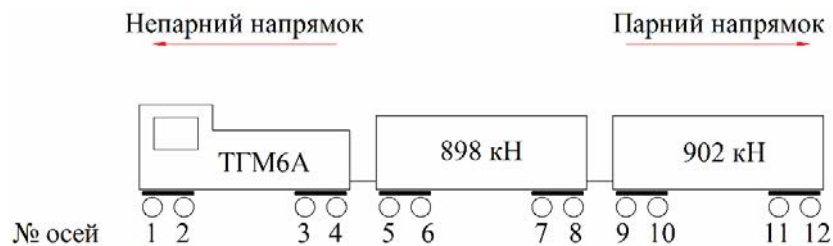


Рис. 8. Дослідний поїзд

Fig. 8. The experimental train

Таблица 3

Кількість заїздів дослідного поїзда по ділянці

Table 3

The number of arrivals of the experimental train on the site

Швидкість, км/год	Кількість заїздів
5	5
15	15
25	16
40	15

Результати

В результаті статистичної обробки експериментальних даних були отримані середні ($\bar{\sigma}$), максимально ймовірні ($\sigma_{\max}^{\text{ймов}}$) і максимально спостережені в досліді ($\sigma_{\max}^{\text{спос}}$) значення напружень в кромках підшви рейки. Результати наведені в табл. 4.

Систематизація і групування дослідних даних під час статистичної обробки щодо визначення напружень в кромках підшви рейки виконувались окремо по осях, які набігають на рейки (1+3 вісь для маневрового локомотива ТГМ6А, 5+7+9+11 вісь для вантажних вагонів), і задніх осях (2+4 вісь та 6+8+10+12 вісь відповідно) при непарному русі і відповідною зміною нумерації при парному русі.

Показання вимірювальних приладів по кожній кромці підшви рейки вздовж колії об'єднувались в окремі групи і розглядались під час обробки.

Напруження в кромках підшви рейки від впливу коліс дослідного поїзда визначались для лівої і правої рейкової нитки окремо в кожному конкретному випадку.

Також під час попереднього аналізу результатів розглядались експериментальні дані окремо для кожної осі маневрового локомотива ТГМ6А і навантажених напіввагонів при об'єднанні датчиків по одній стороні рейки. Але істотної зміни у перерозподілі напружень в кромках підшви рейок при такому групуванні даних не спостерігалось. Тому було вирішено в подальшому залишити групування даних саме по осях, які набігають, і задніх осях.

Найбільші значення максимально спостережених напружень в кромках підшви рейок склали:

- по правій рейковій нитці – 148,78 МПа;
- по лівій рейковій нитці – 135,92 МПа.

Аналіз даних табл. 4 засвідчив, що, як і слід було очікувати, найбільші значення напружень по зовнішніх кромках підшви рейок мали місце від впливу коліс, що набігають на рейку.

Як показав аналіз, з вкороченої сторони бруса (права рейкова нитка) напруження несуттєво більші ніж аналогічні для невикороченої частини. У всіх випадках напруження в кромках підшви рейок суттєво менше ніж допустимі 240 МПа.

Статистична обробка експериментальних даних також дала змогу отримати середні (\bar{P}), максимально ймовірні ($P_{\max}^{\text{ймов}}$) та максимально спостережені ($P_{\max}^{\text{спос}}$) значення вертикальних сил, що передаються на рейки від коліс екіпажів під час руху з різними швидкостями (табл. 5).

При реалізації швидкостей руху дослідного поїзда до 40 км/год середні значення вертикальних динамічних сил становили:

- по правій рейковій нитці – 117,14 кН;
- по лівій рейковій нитці – 117,76 кН.

Найбільші значення максимально спостережених вертикальних сил склали:

- по правій рейковій нитці – 152,80 кН;
- по лівій рейковій нитці – 157,73 кН.

При цьому максимально ймовірні значення відповідно склали:

- по правій рейковій нитці – 153,93 кН;
- по лівій рейковій нитці – 167,03 кН.

Аналогічний характер зміни вертикальних сил спостерігається як і при визначенні напружень: в переважній більшості випадків найбільші значення спостерігаються під осями, що набігають на рейки.

У всіх випадках динамічні вертикальні сили не перевищували допустимі 210 кН [8].

Для визначення величин горизонтальних поперечних (бокових) сил використовувався триточковий метод, який був розроблений О. П. Єршковим. Цей метод широко застосовується під час випробувань рухомого складу щодо визначення його впливу на колію та стрілочні переводи [7, 9]. На сьогодні існують і інші методи визначення бокових сил [15], але в межах держав СНД широко застосовується саме метод Шлюмпфа [2, 5, 12]. Як показали дослідження, наведені в [13], розходження між вимірюваннями бокових сил на суцільнокатаному диску колеса і цими двома методами не перевищує 10 кН, що забезпечує достатню збіжність результатів (від 1 до 20 % для методу трьох точок, та від 3 до 18 % для методу Шлюмпфа). В цій роботі для зменшення матеріальних витрат на обладнання дослідної ділянки застосовується метод Єршкова.

Найбільші значення максимально спостережених бокових сил склали:

- по правій рейковій нитці – 68,02 кН;
- по лівій рейковій нитці – 73,45 кН.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Більш докладно результати визначення бокових сил наведені в табл. 6.

У всіх випадках бокові сили не перевищували допустимі 120 кН [8].

Під час обробки експериментальних даних було вирішено визначити вплив горизонтальної нерівності, яка знаходиться між 15 та 21 бруса-

ми (див. рис. 5) на величину бокових сил вздовж дослідної ділянки. Для цього отримані значення бокових сил групувались окремо для кожного перерізу колії (переріз 1, 2, 3), а об'єднання осей залишилось без змін (осі, що набігають, та задні).

Таблиця 4

Середні ($\bar{\sigma}$), максимально ймовірні ($\sigma_{\max}^{\text{ймов}}$) і максимально спостережені ($\sigma_{\max}^{\text{спос}}$) значення напружень в кромках підшви рейки, МПа

Table 4

Medium ($\bar{\sigma}$), probable maximum ($\sigma_{\max}^{\text{prob}}$) and the maximum observed ($\sigma_{\max}^{\text{obs}}$) stresses in the edges of the rail flange, MPa

Рухомий склад		ТГМ6А				Напіввагон				
Рейкова нитка		Ліва		Права		Ліва		Права		
Вісь		1	2	1	2	1	2	1	2	
Швидкість руху, км/год	5	$\bar{\sigma}$	82,41	76,89	87,6	68,61	76,2	68,38	70,76	59,09
		$\sigma_{\max}^{\text{ймов}}$	129,54	140,86	163,6	93,05	137,45	123,59	112,71	78,1
		$\sigma_{\max}^{\text{спос}}$	109,63	124,39	148,78	96,24	123,02	104,91	124,95	74,71
	15	$\bar{\sigma}$	76,18	70,89	83,28	67,42	71,84	61,27	67,57	56,35
		$\sigma_{\max}^{\text{ймов}}$	128,14	135,42	154,36	96,67	136,29	118,86	111,21	73,86
		$\sigma_{\max}^{\text{спос}}$	128,33	127,25	138,31	99,61	127,15	117,31	125,95	76,46
	25	$\bar{\sigma}$	71,71	68,88	78,61	68,16	67,49	56,98	67,73	55,14
		$\sigma_{\max}^{\text{ймов}}$	120,19	135,58	147,66	113,74	124,67	110,73	115,77	77,73
		$\sigma_{\max}^{\text{спос}}$	112,09	127,54	143,6	146,49	119,87	115,24	125,15	79,68
	40	$\bar{\sigma}$	77,15	65,83	80,22	69,47	69,18	58,94	66,76	60,18
		$\sigma_{\max}^{\text{ймов}}$	137,75	129,09	141,93	112,77	121,61	111,23	111,3	86,85
		$\sigma_{\max}^{\text{спос}}$	132,07	128,73	135,92	108,8	113,86	113,18	118,17	95,43

Примітка: цифрою 1 позначені осі, які набігають на рейку, цифрою 2 – задні осі

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Таблиця 5

Середні (\bar{P}), максимально ймовірні ($P_{\max}^{\text{ймов}}$) і максимально спостережені ($P_{\max}^{\text{спос}}$) значення
вертикальних сил, кН

Table 5

Medium (\bar{P}), probable maximum (P_{\max}^{prob}) and the maximum observed (P_{\max}^{obs}) value of the vertical forces, kN

Рухомий склад		ТГМ6А				Напіввагон				
Рейкова нитка		Ліва		Права		Ліва		Права		
Вісь		1	2	1	2	1	2	1	2	
Швидкість руху, км/год	5	\bar{P}	107,54	110,27	117,14	109,48	116,91	117,76	109,03	105,9
		$P_{\max}^{\text{ймов}}$	141,15	132,49	153,93	128,26	167,03	167,22	124,73	120,15
		$P_{\max}^{\text{спос}}$	131,11	124,55	150,16	120,47	131,37	130,49	122,06	116,69
	15	\bar{P}	105,38	104,3	111,63	107,97	116,3	114,5	105,03	100,34
		$P_{\max}^{\text{ймов}}$	137,28	128,99	145,34	129,67	138,77	132,39	122,77	118,94
		$P_{\max}^{\text{спос}}$	129,86	127,28	143,6	152,8	134,27	128,01	121,03	121,13
	25	\bar{P}	103,28	106,07	109,47	105,94	116,25	112,04	104,85	99,73
		$P_{\max}^{\text{ймов}}$	138,17	132,7	143,79	134,27	136,82	128,2	128,44	117,13
		$P_{\max}^{\text{спос}}$	135,32	129,55	137,76	147,42	138,79	128,41	127,94	119,86
	40	\bar{P}	105,19	99,72	110,16	110,8	115,82	111,21	103,51	105,56
		$P_{\max}^{\text{ймов}}$	132,47	116,87	141,97	152,8	152,62	135,94	124,01	129,37
		$P_{\max}^{\text{спос}}$	127,53	112,94	143,09	133,9	157,73	138,01	125,08	131,93

Таблиця 6

Середні (\bar{H}), максимально ймовірні ($H_{\max}^{\text{ймов}}$) і максимально спостережені ($H_{\max}^{\text{спос}}$) значення
бокових сил від осей, які набігають на рейки, кН

Table 6

Medium (\bar{H}), probable maximum (H_{\max}^{prob}) and the maximum observed (H_{\max}^{obs}) value
of the lateral forces from axes that impinging to the rail, kN

Рухомий склад		ТГМ6А		Напіввагон		
Рейкова нитка		Ліва	Права	Ліва	Права	
Швидкість руху, км/год	5	\bar{H}	40,07	44,63	41,54	38,16
		$H_{\max}^{\text{ймов}}$	74,1	72,71	73,57	50,45
		$H_{\max}^{\text{спос}}$	61,37	68,02	66,03	48,37

Рухомий склад		ТГМ6А		Напіввагон		
Рейкова нитка		Ліва	Права	Ліва	Права	
Швидкість руху, км/год	15	\bar{H}	38,38	43,62	39,83	37,93
		$H_{\max}^{\text{ймов}}$	72,75	66,36	73,29	51,11
		$H_{\max}^{\text{спос}}$	67,88	63,39	73,45	49,61
	25	\bar{H}	37,72	42,96	38,88	38,5
		$H_{\max}^{\text{ймов}}$	70,31	63,13	69,85	53,19
		$H_{\max}^{\text{спос}}$	65,79	62,53	64,61	50,56
	40	\bar{H}	35,64	40,32	38,63	38,25
		$H_{\max}^{\text{ймов}}$	73,32	53,23	67,84	51,78
		$H_{\max}^{\text{спос}}$	58,15	56,96	63,91	49,35

Характер зміни бокових сил по лівій рейковій нитці наведено на рис. 9.

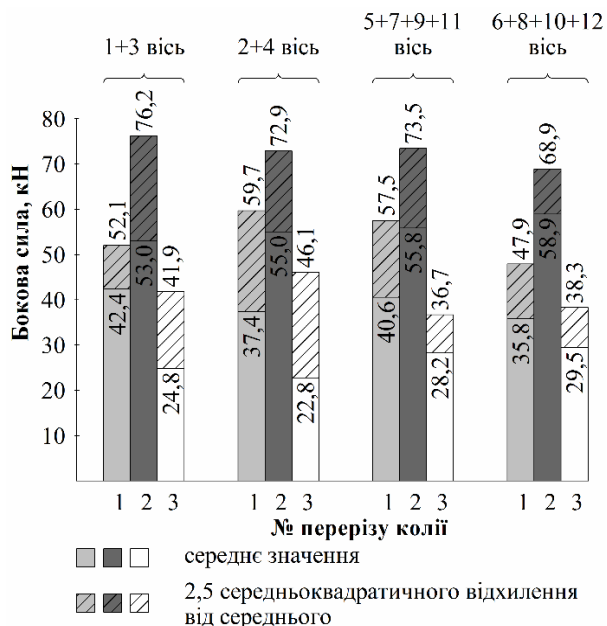


Рис. 9. Значення бокових сил вздовж ділянки для лівій рейкової нитки

Fig. 9. The value of lateral forces along a section of railway track for the left rail

Якісний аналіз бокових сил свідчить про розділення ділянки умовно на три зони:

- зростання бокових сил;
- досягнення максимального значення;
- зменшення бокових сил.

В перерізі 1 значення бокових сил більші ніж переріз 3, але менші ніж переріз 2. Це пояснюється наявністю в місці встановлення приладів найбільшої відстані між осями брусів (775 мм, див. рис. 1).

В перерізі 2 величини бокових сил найбільші, тому що прилади встановлені в зоні горизонтальної нерівності.

В перерізі 3 бокові сили (як середні, так і максимально ймовірні) мають найменші значення. В цьому випадку це можна пояснити зменшенням відстані між осями брусів на відміну від аналогічних брусів в перерізі 1.

Наукова новизна та практична значимість

Вперше були виконані експериментальні дослідження в межах з'єднувальної частини стрілочного з'їзду при використанні несиметрично вкорочених залізобетонних брусів. Отримані результати можна використовувати для проектування симетрично вкорочених брусів, що дозволять, не порушуючи епюру розкладки, вкладати переводи у з'їзд з міжколійям до 5,3 м. Також на основі експериментальних зна-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

чень різних показників напружено-деформованого стану можна апробувати математичні моделі взаємодії даної ділянки колії та рухомого складу, на основі яких в подальшому удосконалювати вкрай застарілі і досить вичерпні нормативи утримання з'їздів.

Висновки

1. Максимально ймовірні й максимально спостережні значення напружень, що виникають в кромках підшви рейок під час виконання досліджень, не перевищували 163 МПа для локомотива і 137 МПа для вагонів, що суттєво менше ніж допустимі 240 МПа.

2. Середні значення вертикальних сил, які виникають від дії коліс локомотива і вагонів, становить 117 та 118 кН відповідно, максимально ймовірні – 153 та 167 кН, максимально спостережні – 150 та 158 кН. При цьому у всіх випадках отримані значення динамічних вертикальних сил менші ніж допустимі 210 кН.

3. Середні значення бокових сил під осями, які набігають на рейку, зі збільшенням швидкості майже не змінюються і знаходяться в межах 35–40 кН для локомотива та 38–41 кН для вагонів. Максимально ймовірні та максимально спостережні значення бокових сил не перевищують 74 кН та 73 кН відповідно при допустимих 120 кН.

4. Якісно і кількісно проаналізовано вплив горизонтальної нерівності на величину бокових сил в межах дослідної ділянки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Арбузов, М. А. Оценка состояния стрелочных съездов в плане / М. А. Арбузов, А. М. Патласов, С. А. Токарев // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. / М-во трансп. Рос. Федерации, Федер. агентство ж.-д. трансп., Дальневост. гос. ун-т путей сообщ. – Хабаровск, 2015. – Вып. 3. – С. 23–33.
- Бехер, С. А. Использование быстродействующей тензометрии для контроля поверхности катания колес грузовых вагонов в движении / С. А. Бехер, Л. Н. Степанова, А. О. Коломеец // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : тез. докл. VIII междунар. науч.-техн. конф. (3.07–7.07.2013) / Петербург. гос. ун-т путей сообщ. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 25–26.
- Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Транспорт України, 2005. – 119 с.
- Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України : ЦП-0269 / Е. І. Даніленко, А. М. Орловський, М. Б. Курган [та ін.]. – Київ : Поліграфсервіс, 2012. – 465 с.
- Кочетков, А. С. Разработка методики контроля дефектов поверхности катания железнодорожных колес в движении по показателям динамики их взаимодействия с рельсами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Кочетков Антон Сергеевич ; Сиб. гос. ун-т путей сообщ. – Томск, 2011. – 23 с.
- Методика контролю положення стрілочного з'їзду у плані : СТП 06-001:2015 / В. В. Рибкін, М. А. Арбузов, П. В. Панченко, С. О. Токарев. – Київ : Держ. адмін. заліз. трансп. України, 2015. – 10 с.
- Рибкін, В. В. Проведення випробувань з впливу на колію та стрілочні переводи рухомого складу нового покоління з осьовим навантаженням 25 т на вісь / В. В. Рибкін, В. Є. Савлук // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – Харків, 2012. – Вип. 130. – С. 127–131.
- Рухомий склад залізниць. Норми допустимого впливу на залізничну колію 1520 мм : ДСТУ 7571:2014. – [Чинний від 2014–02–12]. – Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. – 33 с. – (Національний стандарт України).
- Савлук, В. Е. Комплексные динамические и по воздействию на путь и стрелочные переводы испытания тепловоза ЗТЭ116У-001 / В. Е. Савлук, Е. А. Торопина // Проблемы та перспективи розвитку заліз. трансп. : тези доп. 74 міжнар. наук.-практ. конф. (15.05–16.05.2014) / М-во освіти та науки України, Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 274–275.
- Сакало, В. И. Контактные задачи железнодорожного транспорта / В. И. Сакало, В. С. Косов. – Москва : Машиностроение, 2004. – 496 с.
- Стратегічний план розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року [Електронний ресурс] : затв. наказом М-ва інфраструктури України від 21 груд. 2015 р. № 547. – Режим доступу: <http://mtu.gov.ua/files/Стратегія%20Наказ%20547.pdf>. – Назва з екрана. – Перевірено : 30.08.2016.
- Установление условий обращения вагонов с увеличенной осевой нагрузкой / Ю. С. Ромен, А. М. Орлова, М. С. Тихов, А. В. Завергалюк // Трансп. Рос. Федерации. – 2013. – № 3 (46). – С. 25–35.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

13. Шафрановский, А. К. Непрерывная регистрация вертикальных и боковых сил взаимодействия колеса и рельса / А. К. Шафрановский // Тр. ВНИИЖТа. – Москва, 1965. – Вып. 308. – С. 1–95.
14. Abdullayev, S. The determination of admissible speed of locomotives on the railway tracks of the republic of Kazakhstan / S. Abdullayev, N. Tokmurzina, G. Bakyt // Transport problems. – 2016. – № 1 (11). – P. 61–68. doi: 10.20858/tp.2-016.11.1.6.
15. Reducing rail side wear on heavy-haul railway curves based on wheel-rail dynamic interaction / W. Zhai, J. Gao, P. Liu, K. Wang // Vehicle System Dynamics: Intern. J. of Vehicle Mechanics and Mobility. – 2014. – Vol. 52. – Iss. suppl. – P. 440–454. doi: 10.1080/00423114.2014.906633.
16. Patlasov, O. M. The measurement methodology improvement of the horizontal irregularities in plan / O. M. Patlasov, S. O. Tokariiev // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – С. 121–131. doi: 10.15802/stp2015/49219.

М. А. АРБУЗОВ¹, А. М. ПАТЛАСОВ², С. А. ТОКАРЕВ^{3*}

¹Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, эл. почта 10max@ukr.net

²Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, эл. почта am_patlasov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2081-5648

^{3*}Путеиспытательная отраслевая научно-исследовательская лаборатория, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 793 38 45, эл. почта tokarevsergeyaleks@yandex.ua, ORCID 0000-0002-2607-3123

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУТИ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ПРЕДЕЛАХ СЪЕЗДА

Цель. В последнее время в сети железных дорог Украины все больше уделяют внимания случаям нарушения в содержании стрелочных съездов, которые могут привести к ухудшению условий безопасности движения поездов. Такие нарушения, как правило, появляются в результате неточностей при разбивке и укладке съезда, а также являются следствием действия подвижного состава и температурных сил. Появление геометрических неровностей может быть спровоцировано нарушением эпоры раскладки железобетонных брусьев в закрестовинной части съезда при междупутье менее 5,3 м. Поэтому в работе необходимо проанализировать влияние наличия отклонений от эпоры раскладки брусьев и геометрических неровностей на условия взаимодействия пути и подвижного состава, учитывая результаты экспериментальных исследований. Также нужно установить связь между напряженно-деформированным состоянием пути и наличием укороченных брусьев. **Методика.** Исследование влияния отклонений в эпоре раскладки брусьев и геометрических неровностей на условия взаимодействия пути и подвижного состава проводилось путем проведения теоретических расчетов и испытаний. Для проведения экспериментальных исследований был выбран испытательный участок на путях необщего пользования ООО с ИИ «Трансинвестсервис», который отвечал необходимым условиям в рамках научно-исследовательской работы. **Результаты.** Получено распределение напряжений и сил, действующих на путь в зависимости от скорости движения опытного подвижного состава. Также получены данные о влиянии геометрических параметров бруса на его напряженно-деформированное состояние. **Научная новизна.** Авторами впервые была проведена оценка влияния подвижного состава (при наличии геометрических неровностей и несимметрично укороченных брусьев в пределах соединительной части стрелочного съезда) на напряженно-деформированное состояние верхнего строения пути (ВСП) в указанной зоне. Также было проведено сравнение результатов для участка с обычными брусьями и укороченными. **Практическая значимость.** На основе полученных экспериментальных данных было установлено, что при скоростях движения подвижного состава до 40 км/ч напряженно-деформированное состояние ВСП в закрестовинной части стрелочного съезда соответствует условиям прочности и устойчивости. Полученные результаты в дальнейшем можно применить для апробации математических моделей и теоретических исследований по разработке нормативов содержания стрелочного съезда. Уровень полученных вертикальных, боковых сил и напряжений практически не зависит от наличия укороченной части брусьев, которые уложены в съезд.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Ключевые слова: стрелочный съезд; несимметричные брусья; экспериментальные исследования; напряжение; вертикальные и боковые силы

М. А. ARBUZOV¹, О. М. PATLASOV², С. О. TOKARIEV^{3*}

¹Dep. «Railway Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail 10max@ukr.net

²Dep. «Railway Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail am_patlasov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2081-5648

^{3*}Track-test Branch Research Laboratory, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 793 38 45, e-mail tokarevsgergeyaleks@yandex.ua, ORCID 0000-0002-2607-3123

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF INTERACTION OF TRACK AND ROLLING STOCK ON CROSSOVERS

Purpose. Recently on the Ukrainian railways network more attention is paid to the cases of violations in the maintenance of crossovers, which may lead to deterioration of the train traffic safety conditions. As a rule, such violations occur as a result of inaccuracies during crossover pegging and laying, as well as are the consequence of impact of rolling stock and thermal forces. The appearance of geometrical irregularities can also be triggered by violation of the scheme of layout of concrete sleepers in the crossover turnout curve with intertrack spaces of less than 5.3 m. Therefore, we have decided to analyze the impact of the presence of deviations from the layout scheme of the sleepers and geometric irregularities on the conditions of track and rolling stock interaction based on the results of experimental investigations. It was also decided to establish a connection between the stress-strain states of the track and the presence of short sleepers. **Methodology.** The effect of deviations from the layout scheme of the sleepers and geometric irregularities on the interaction conditions of track and rolling stock was studied by means of theoretical calculations and experimental research. The experimental research covered the area on the non-public railway tracks that meets the required conditions for scientific and research work on the territory of «Transinvestservice» company. **Findings.** The distribution of stresses and forces acting on a railway track depending on speed movement of experienced rolling stock was obtained. In addition we obtained the data on the influence of the sleeper geometric parameters on its stress-strain state. **Originality.** For the first time the paper assessed the impact of rolling stock in the presence of geometrical irregularities and asymmetrically truncated sleepers within the crossover connection part on the stress-strain state of track in this zone. In addition, we compared the results for the area with common and shortened sleepers. **Practical value.** The obtained experimental data allowed determining that the stress-strain state of the track structure in the crossover turnout curve at rolling stock speeds of up to 40 km/h fulfills the conditions of strength and stability. These results can be used to test mathematical models and theoretical studies on the development of standards for the maintenance of crossovers. The level of the obtained vertical, lateral forces and stresses practically does not depend on the presence of the truncated part of the sleepers, which are stacked in crossovers.

Keywords: crossovers; unsymmetrical sleepers; experimental investigations; stresses; vertical and lateral forces

REFERENCES

1. Arbuzov M.A., Patlasov A.M., Tokariev S.O. Otsenka sostoyaniya strelochnykh sezдов v plane (The evaluation of crossovers in the plan). *Sbornik nauchnykh trudov «Proyektirovaniye razvitiya regionalnoy seti zheleznykh dorog»* [Proc. «Designing of the regional railway network development»], 2015, issue 3, pp. 23-33.
2. Bekher S.A., Stepanova L.N., Kolomeets A.O. Ispolzovaniye bystrodeystvuyushchey tenzometrii dlya kontrolya poverkhnosti kataniya koles gruzovykh vagonov v dvizhenii [Using of the fast-acting tensometry for the rolling wheels surface control of freight cars in motion]. *Tezisy dokladov VIII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty (3.07-7.07.2013)»* [Abstracts of the 8th Int. Sci. and Technical Conf. «XXII Century Rolling Stock: Ideas, Requirements, Projects»]. Saint Petersburg, 2013, p. 25-26.
3. Danilenko E.I., Rybkin V. V. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist: TsP-0117* [Settlement rules of railway track for strength and stability]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2005. 119 p.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

4. Danilenko E.I., Orlovskiy A.M., Kurhan M.B., Yakovliev V.O. *Instruktsiia z ulashtuvannia ta utrymannia kolii zaliznyts Ukrainy: TsP-0269* [Instruction of the structure and maintenance of the railway track on Ukrainian railways]. Kyiv, Polihrafservis Publ., 2012. 465 p.
5. Kochetkov A.S. Razrabotka metodiki kontrolya defektov poverkhnosti kataniya zheleznodorozhnykh koles v dvizhenii po pokazatelyam dinamiki ikh vzaimodeystviya s relsami. Avtoreferat Diss. [The control method development of the rolling surface defects of railway wheel by assessment of their interaction dynamics with rails in the motion. Author's abstract]. Tomsk, 2011. 23 p.
6. Rybkin V.V., Arbuzov M.A., Panchenko P.V., Tokariiev S.O. *Metodyka kontroliu polozhennia strilochnoho zizdu u plani: STP 06-001:2015* [The method of the position control of crossovers in plan]. Kyiv, Derzhavna administratsiia zaliznychnoho transportu Ukrainy Publ., 2015. 10 p.
7. Rybkin V.V., Savluk V.Ye. Provedennia vyprobuvan z vplyvu na koliiu ta strilochni perevody rukhomoho skladu novoho pokolinnia z osovym navantazhenniam 25 t na vis [Conducting tests on the effect on the railway track and turnouts new generation of rolling stock with an axial load of 25 t per axle]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transport* [Proc. of Ukrainian State University of Railway Transport], 2012, issue 130, pp. 127-131.
8. *Rukhomyi sklad zaliznyts. Normy dopustymoho vplyvu na zaliznychnu koliiu 1520 mm: DSTU 7571:2014* [Railway rolling stock. Permissible impact norms on the railway track of 1520 mm]. Kyiv, Minekonomrozyvnytku Ukrainy Publ., 2014. 33 p.
9. Savluk V.Ye., Toropina Ye.A. Kompleksnyye dinamicheskiye i po vozdeystviyu na put i strelochnyye perevody ispytaniya teplovoza 3TE116U-001 [Complex dynamic tests and effect on railway track and turnouts of the diesel locomotive 3TE116U-001]. *Tezy dopovidei 74 mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu (15.05-16.05.2014)»* [Abstracts of the 74th Int. Sci. and Practical Conf. «The problems and prospects of railway transport development»]. Dnipropetrovsk, 2014, pp. 274-275.
10. Sakalo V.I., Kossov V.S. *Kontaktnyye zadachi zheleznodorozhnogo transporta* [Contact tasks of railway transport]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2004. 496 p.
11. *Stratehichnyi plan rozvytku zaliznychnoho transportu na period do 2020 roku: № 547* (Strategic plan for the development of railway transport for the period till 2020 year. No. 547). Available at: <http://mtu.gov.ua/files/Стратегія%20Наказ%20547.pdf> (Accessed 30 August 2016).
12. Romen Yu.S., Orlova A.M., Tikhov M.S., Zavertalyuk A.V. Ustanovleniye usloviy obrashcheniya vagonov s uvelichennoy osevoy nagruzkoy [The establishment of condition for passing cars with increased axle load]. *Transport Rossiyskoy Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2013, issue 3, pp. 25-35.
13. Shafranovskiy A.K. Nepreryvnaya registratsiya vertikalnykh i bokovykh sil vzaimodeystviya koleasa i relsa [Continuous registration of vertical and lateral forces between wheel-rail interaction]. *Trudy Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Proc. of All-Russian Research Institute of Railway Transport], 1965, issue 308, pp. 1-95.
14. Abdullayev S., Tokmurzina N., Bakyt G. The determination of admissible speed of locomotives on the railway tracks of the republic of Kazakhstan. *Transport Problems*, 2016, vol. 11, issue 1, pp. 61-68. doi: 10.20858/tp.2016.11.1.6.
15. Zhai W., Gao J., Liu P., Wang K. Reducing rail side wear on heavy-haul railway curves based on wheel-rail dynamic interaction. *Vehicle System Dynamics: Intern. Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 2014, vol. 52, issue suppl, pp. 440-454. doi: 10.1080/00423114.2014.906633.
16. Patlasov O.M., Tokariiev S.O. The measurement methodology improvement of the horizontal irregularities in plan. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, issue 4, pp. 121-131, doi: 10.15802/stp2015/49219.

Стаття рекомендована до публікації, д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна); д.т.н., проф. О. М. Даренським (Україна)

Надійшла до редколегії: 30.06.2016

Прийнята до друку: 20.09.2016

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 625.143.033.3-026.564.2

Э. И. ДАНИЛЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Железнодорожный путь и путевое хозяйство», Государственный экономико-технологический университет транспорта, ул. М. Лукашевича, 19, Киев, Украина, 03049, тел. +38 (044) 591 51 47, эл. почта danilenko2010@mail.ru, ORCID 0000-0002-8518-5272

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕСТКОСТИ И УПРУГОСТИ РЕЛЬСОВОЙ НИТИ ПРИ КРУЧЕНИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СИЛ

Цель. Имеющиеся в литературе сведения о характеристиках жесткости и упругости рельсовых нитей при кручении противоречивы. Это является следствием отсутствия точного аналитического решения задачи и сложности экспериментального изучения указанных характеристик при совместном действии на рельс вертикальных и горизонтальных сил. В статье представлен новый метод решения задачи по определению жесткости и модуля упругости рельсовой нити при кручении под совместным действием вертикальной и горизонтальной сил. **Методика.** В работе использован комплексный метод решения задачи, включающий теоретическую часть и результаты эксперимента. С помощью эксперимента были измерены характеристики горизонтальной поперечной жесткости рельсовых нитей по головке и подошве при разных конструкциях современных рельсовых скреплений. Последующая задача по определению реальных значений модуля упругости и жесткости рельсовой нити при кручении $U_{\varphi}^{(T)}$ и $\beta_{\varphi}^{(T)}$ решена теоретическими методами.

Результаты. Получены новые значения характеристик жесткости и модуля упругости рельсовой нити при кручении для современных конструкций рельсов Р65, UIC60, P50 и рельсовых скреплений типов КПП, КБ, ДО при совместном действии на рельс вертикальной и горизонтальной сил и кручения. **Научная новизна.** Впервые в отечественных исследованиях выполнено экспериментально-теоретическое решение задачи по определению реальных значений жесткости и модуля упругости рельсовой нити при кручении под совместным действием на рельс вертикальных и горизонтальных колесных нагрузок. Решение представлено в функциональной зависимости от соотношения совместно действующих на рельс вертикальной и горизонтальной сил $\beta_{\varphi}^{(T)} = f\left(\frac{P}{H}\right)$; $U_{\varphi}^{(T)} = f\left(\frac{P}{H}\right)$. Решение выполнено для современных конструкций рельсов отечественного стандарта Р65, P50, P43 и международного стандарта UIC60. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют с большей точностью, в сравнении с действующей методикой, выполнять расчеты реальных напряжений и деформаций в рельсах разных типов. Это происходит при совместном действии на рельс вертикальных и горизонтальных сил (для пути на железобетонных и деревянных шпалах) и при разных конструкциях жестких и упругих рельсовых скреплений: КБ, КПП, ДО.

Ключевые слова: рельсовая нить; жесткость; упругость; кручение; силы вертикальные; силы горизонтальные

Введение

В справочной технической литературе приведен весьма разнообразный спектр характеристик пространственной жесткости и упругости рельсовых нитей, как правило, не учитывающий реальное соотношение действующих на рельс вертикальной и горизонтальной сил. Притом приведенные результаты в основном относятся к анализу застарелых конструкций пути, применявшихся на железных дорогах 40-50 лет назад. Поэтому изучение указанных характеристик работы рельсовых нитей для современных конструкций пути при совместном

действию на рельс вертикальных и горизонтальных сил является весьма актуальной задачей.

Цель

Целью статьи является представление результатов новейших исследований по определению экспериментально-теоретическими методами характеристик пространственной упругости рельсовых нитей при кручении для современных конструкций железнодорожного пути при совместном действии на рельс вертикальных и горизонтальных сил.

Методика

Действующая методика инженерных расчетов пути на прочность [3], как известно, позволяет получать только результаты с точностью, достаточной лишь для практических целей. При этом влияние на работу рельса горизонтальных динамических сил и крутящего момента непосредственно не учитывается, а учитывается только опосредованно через применение так называемых коэффициентов влияния, взятых из экспериментальных исследований, и во многих случаях не имеющих точного подтверждения для конкретных расчетов.

Однако при полной постановке аналитического решения задачи по расчетам железнодорожного пути на прочность необходимо с достаточной точностью учитывать воздействие на рельсовую нить всех внешних сил и при этом совместно рассматривать возникающие в рельсовой нити деформации: вертикальный и горизонтальный изгиб рельсовой нити и ее кручение. Деформации и напряжения рельсовых нитей при аналитических расчетах с достаточной точностью можно определить только при условии знания характеристик пространственной упругости рельсовых нитей, в том числе расчетных характеристик на кручение.

При этом, особенно важным для проведения точных аналитических расчетов является нахождение правильных функциональных зависимостей между действующими на рельсовую нить внешними силами от колес подвижного состава и переменными значениями характеристик пространственной упругости рельсовой нити. Необходимо также учитывать особенности конструктивного устройства рельсов и скреплений.

Обзор предыдущих исследований и публикаций. Основы теории расчетов рельсовой нити на совместное действие вертикальных и горизонтальных сил с учетом характеристик пространственной упругости были разработаны еще в нач. XX в. проф. С. П. Тимошенко [10, 11], но в его решениях не учитывались силы трения между рельсом и подрельсовым основанием и конструктивные особенности закрепления рельсов на опорах, которые существенно влияют на результаты решения.

Исправление этого недостатка было предложено проф. О. П. Ершковым в 1960-х гг. в ВНИИЖТ (Россия). Но результаты теоретиче-

ских решений О. П. Ершкова [7, 8] не были доведены до практического внедрения и не были внесены в теорию расчетов на прочность железнодорожного пути.

Наши нынешние исследования 2012–2015 гг. [4, 5] показали, что результаты расчетов проф. О. П. Ершкова требуют существенной корректировки, в том числе с учетом особенностей характеристик пространственной упругости рельсовых нитей с современными конструкциями рельсовых скреплений.

В работе использован комплексный метод решения задачи, включающий теоретическую часть и результаты эксперимента. С помощью эксперимента были измерены характеристики горизонтальной поперечной жесткости рельсовых нитей по головке и подошве при разных конструкциях современных рельсовых скреплений. Последующая задача по определению реальных значений модуля упругости и жесткости рельсовой нити при кручении $U_{\phi}^{(T)}$ и $\beta_{\phi}^{(T)}$ решена теоретическими методами.

Результаты

Расчетная схема и порядок решения задачи принимаются аналогичными разработанным проф. О. П. Ершковым (Россия) в 1960-х гг. [7, 8]. Однако при решении данной задачи нами сделаны необходимые корректировки, учитывающие неточности в решениях [7, 8], а также приняты новые характеристики современных рельсов и рельсовых скреплений.

Для решения задачи в целом необходимо на первом этапе решить задачу об определении расчетно-аналитическим путем одной из важнейших расчетных характеристик: модуля упругости пути при кручении рельсовой нити от совместного действия внецентренно приложенных горизонтальной и вертикальной сил H и P , и с учетом сил трения, возникающих по подошве рельса.

В соответствии с расчетной схемой (рис. 1) уравнение равновесия рельса при его кручении относительно продольной оси x имеет вид:

$$\sum m_x - \sum q_y \cdot h_2 - T_y \cdot h_2 = M_{кр}, \quad (1)$$

где $\sum m_x$ – первая составляющая суммарного реактивного отпора кручению рельса по всей

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

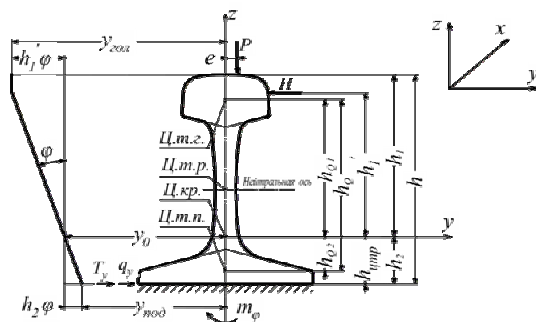
длине деформации кручения, вызванная реактивными моментами m_x ; m_x – реактивный отпор кручению рельса в сечении, где приложен внешний крутящий момент:

$$m_x = U_\varphi \cdot \varphi, \quad (2)$$

где φ – угол закручивания рельса; U_φ – модуль упругости подрельсового основания при кручении рельсовой нити; q_y – реактивный отпор подошвы рельса боковому перемещению от действия крутящего момента в сечении, где приложен этот крутящий момент:

$$q_y = U_y \cdot (y - \varphi \cdot h_2), \quad (3)$$

где $\sum q_y \cdot h_2$ – вторая составляющая суммарного реактивного отпора кручению рельса по всей длине деформации кручения, вызванная реактивными силами $\sum q_y$.



Цтг – центр тяжести головки

Цтп – центр тяжести подошвы

Цтр – центр тяжести рельса

Цкр – центр кручения рельса

Рис. 1. Расчетная схема действия сил на элементарный участок рельсовой нити при горизонтальном изгибе и кручении

Fig. 1. Diagram of the forces on the elementary section of the rail thread at horizontal bending and torsion

Здесь y – горизонтальное перемещение центра изгиба рельса (совпадает с центром кручения) от действия боковой силы H ; h_2 – расстояние от центра кручения рельса до низа подошвы.

$\sum T_y \cdot h_2$ – третья составляющая суммарного реактивного отпора кручению рельса по всей

длине деформации кручения, вызванная реактивными силами $\sum T_y$; где T_y – реактивная составляющая сил трения по подошве рельса в сечении приложения внешнего крутящего момента:

$$T_y = U_z \cdot z \cdot f, \quad (4)$$

где z – вертикальное перемещение центра изгиба рельса от действия вертикальной силы; f – коэффициент трения по подошве рельса (зависит от типа крепления и подрельсовых прокладок); $M_{кр}$ – внешний крутящий момент при совместном действии на рельс сил H и P .

$$M_{кр} = H \cdot h'_1 - P \cdot e, \quad (5)$$

где h'_1 – расстояние от центра кручения до места приложения силы H ; e – эксцентриситет приложения силы P относительно оси симметрии рельса.

Для обобщения действия всех сил на длине деформации закручивания рельса следует переписать уравнение (1) в интегральной форме, подставив все составляющие слагаемые из выражений (2)–(5). Тогда получим следующее уравнение:

$$\int_{-x_\varphi}^{+x_\varphi} U_\varphi \cdot \varphi \cdot dx - h_2 \left[\int_{-x_y}^{+x_y} U_y \cdot (y - \varphi \cdot h_2) dx \right] + \left[\int_{-x_T}^{+x_T} U_z \cdot z \cdot f \cdot dx \right] = H \cdot h'_1 - P \cdot e. \quad (6)$$

Выражение в квадратных скобках уравнения (6) в соответствии с замечаниями в нашей предыдущей работе [5] о существовании второго интеграла в квадратных скобках только в пределах от $-x_T$ до $+x_T$, можно заменить силой H . Тогда уравнение (6) переписывается в более простом виде:

$$\int_{-x_\varphi}^{+x_\varphi} U_\varphi \cdot \varphi \cdot dx - h_2 \cdot H = H \cdot h'_1 - P \cdot e. \quad (7)$$

Согласно экспериментальным исследованиям проф. О. П. Ершкова [8] интеграл $\int_{-x_\varphi}^{+x_\varphi} \varphi \cdot dx$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

представляет собой площадь эпюры углов закручивания ω_ϕ в пределах длины волны закручивания рельса (которая практически соответствует длине бокового изгиба рельса).

То есть:

$$\int_{-x_\phi}^{+x_\phi} \phi \cdot dx = \omega_\phi. \quad (8)$$

О. П. Ершковым в [8] найдено, что:

$$\omega_\phi = \frac{(\delta - 1) \cdot \omega_y^{(n)}}{h''}, \quad (9)$$

$$\omega_y^{(n)} = \frac{\omega_y^{(z)}}{\delta}, \quad (10)$$

где $\omega_y^{(n)}$ и $\omega_y^{(z)}$ – площади эпюр поперечных перемещений (n) – подошвы и (z) – головки рельса при совместном действии на рельс горизонтальной и вертикальной сил; h'' – расстояние между точками замеров поперечных перемещений головки и подошвы рельса; δ – отношение площадей эпюр перемещений головки и подошвы рельса, определяется по формуле:

$$\delta = \frac{\omega_y^{(n)}}{\omega_y^{(z)}}. \quad (11)$$

(Для практических целей, с достаточной степенью точности, можно принимать коэффициент δ равным отношению поперечных жесткостей рельсовой нити по подошве и по головке).

$$\delta = \frac{\beta_y^{(n)}}{\beta_y^{(z)}}. \quad (11-2)$$

Таким образом, уравнение (7) после подстановки в него выражения (8) и решения его относительно U_ϕ , будет иметь вид:

$$U_\phi = \frac{H(h'_1 + h_2) - P \cdot e}{\omega_\phi}. \quad (12)$$

Далее подставив в уравнение (12) значение ω_ϕ по формуле (9) будем иметь следующее выражение для определения модуля упругости подрельсового основания при кручении рель-

совой нити U_ϕ :

$$U_\phi = \frac{H(h'_1 + h_2) \cdot h''}{(\delta - 1) \cdot \omega_y^{(n)}} - \frac{P \cdot e \cdot h''}{(\delta - 1) \cdot \omega_y^{(n)}}. \quad (13)$$

Заметим, что формула (13), полученная нами, отличается от аналогичной формулы О. П. Ершкова, полученной им в работе [8], где допущена ошибка при выводе данной формулы, а именно – в ней отсутствует множитель (h'') в числителе второго слагаемого правой части уравнения. (Как показали наши расчеты, при вычислениях это может приводить к ошибке в определении модуля упругости пути на кручение на 20% и более в зависимости от соотношения сил P/H).

Если принять во внимание, что в реальных условиях взаимодействия подвижного состава и пути площадь эпюры поперечных перемещений $\omega_y^{(n)}$ определяется при наличии вертикальной силы P и сил трения по подошве рельса, то отношение $H/\omega_y^{(n)}$ следует идентифицировать как реальное значение бокового модуля упругости подрельсового основания $U_y^{(T)}$, который вычисляется с учетом сил трения по подошве рельса [5]:

$$\frac{H}{\omega_y^{(n)}} = U_y^{(T)}. \quad (14)$$

Тогда, подставив (14) в уравнение (13), получим в окончательном виде формулу для определения реального значения модуля упругости рельсовой нити при кручении $U_\phi^{(T)}$ для случая совместного действия вертикальных и горизонтальных сил (H и P) и с учетом сил трения по подошве рельса:

$$U_\phi^{(T)} = \frac{(h'_1 + h_2) \cdot h''}{\delta - 1} \cdot U_y^{(T)} - \frac{P \cdot e \cdot h''}{(\delta - 1) \cdot H} \cdot U_y^{(T)}. \quad (15)$$

Если при измерениях перемещения головки рельса определяются напротив точки приложения горизонтальной силы H , а перемещения подошвы рельса – близко к нижней плоскости подошвы, (что, как правило, имеет место в экспериментах), то можно принимать $h'' = h'_1 + h_2$ и тогда формула (15) примет более простой вид:

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

$$U_{\phi}^{(T)} = \frac{(h'')^2}{\delta - 1} \cdot U_y^{(T)} - \frac{P \cdot e \cdot h''}{(\delta - 1) \cdot H} \cdot U_y^{(T)}. \quad (16)$$

Знак « \rightarrow » перед вторым слагаемым в правой части уравнения (15) и (16) соответствует схеме загрузки рельса, показанной на рис. 1, когда крутящий момент определяется по формуле (5). Для случая приложения вертикальной нагрузки слева от оси симметрии рельса в уравнениях (15) и (16) следует ставить знак « $+$ » перед вторым слагаемым.

В случае, когда вертикальная нагрузка P приложена по оси симметрии рельса, эксцентриситет $e=0$ и формула (16) значительно упрощается:

$$U_{\phi}^{(T)} = \frac{(h'')^2}{\delta - 1} \cdot U_y^{(T)}. \quad (17)$$

Второй этап решения задачи. На следующем этапе решения задачи перейдем к определению другой важнейшей характеристики, определяющей работу рельсовой нити при кручении – к определению жесткости рельсовой нити при кручении (β_{ϕ}).

Из классической теории кручения стержней [12] известна формула для определения угла закручивания стержня, которая имеет вид:

$$\phi = \frac{M_{кр}}{\beta_{\phi}}, \quad (18)$$

где β_{ϕ} – жесткость стержня при кручении.

При рассмотрении горизонтального изгиба и кручения рельсовой нити, *не прикрепленной к опорам*, на воздействие боковой поперечной силы H и крутящего момента $M_{кр}$, вызванного действием боковой силы и внецентренно приложенной вертикальной нагрузки P , О. П. Ершковым в работе [8] получена следующая зависимость между углом закручивания рельса и крутящим моментом, приложенным к рельсу (для расчетного сечения в месте приложения крутящего момента):

$$\phi = \frac{M_{кр}}{2D \cdot h_Q^2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot (r_1 + r_2)}, \quad (19)$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент внешних сил (оп-

ределяется по формуле (5)); h_Q – расстояние между центрами тяжести головки и подошвы; D – приведенная жесткость головки и подошвы рельса при горизонтальном изгибе, определяемая по формуле С.П. Тимошенко [10, 11]

$$D = E \frac{I_e \cdot I_n}{I_e + I_n}. \quad (20)$$

Как видно из сопоставления формул (18) и (19), знаменатель в выражении (19)

$$\beta_{\phi} = 2D \cdot h_Q^2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot (r_1 + r_2) \quad (21)$$

представляет собой жесткость рельсовой нити при кручении β_{ϕ} , свободно лежащей и не закрепленной на рельсовых опорах, при воздействии на нее горизонтальной боковой силы H и крутящего момента от этой силы, а также внецентренно приложенной вертикальной силы P . При этом не учитывается действие вертикального изгиба и трения по подошве рельса между рельсом и подрельсовыми опорами.

В выражениях (19) и (21), кроме уже указанных характеристик D и h_Q , присутствуют весьма важные коэффициенты r_1 и r_2 , определенные в исследованиях О.П. Ершкова [7, 8] как r_1 – коэффициент, характеризующий изгибно-крутильную жесткость рельса, который определяется по формуле:

$$r_1 = \sqrt{\frac{C_{кр}}{Dh_Q^2}}. \quad (22)$$

r_2 – коэффициент относительной жесткости рельсового основания и рельса при кручении, определяется по формуле:

$$r_2 = \sqrt{\frac{U_{\phi}}{C_{кр}}}. \quad (23)$$

На основании результатов исследований [7, 8] О. П. Ершковым было получено для типовой конструкции пути на деревянных шпалах с рельсами типов Р43 и Р50 соотношение $r_2/r_1 \approx 0,15$. Поэтому после некоторых преобразований и подстановки в выражение (19) значения $r_2=0,15$ r_1 формула для угла закручивания рельсовой нити ϕ в работе [8] приведена к виду:

$$\varphi = \frac{M_{кр}}{2,30D \cdot h_Q^2 \cdot r_1^2 \cdot r_2}. \quad (24)$$

А после подстановки в формулу (24) выражений (22) и (23) для r_1 и r_2 получено:

$$\varphi = \frac{M_{кр}}{2,30 \cdot C_{кр} \sqrt{\frac{U_\varphi}{C_{кр}}}}. \quad (25)$$

То есть, выражение для жесткости рельсовой нити β_φ в окончательной редакции О. П. Ерко-ва [8] приведено к виду:

$$\beta_\varphi = 2,30 \cdot C_{кр} \cdot \sqrt{\frac{U_\varphi}{C_{кр}}}. \quad (26)$$

Из выражения (26) в результате выведена заключительная формула, выражающая зависимость между модулем упругости подрельсового основания при кручении U_φ и жесткостью рельсовой нити при кручении β_φ в следующем виде:

$$U_\varphi = \frac{1}{5,30 \cdot C_{кр}} \beta_\varphi^2. \quad (27)$$

Формула (27) была предложена проф. О. П. Ершковым как универсальная для определения взаимосвязи между модулем упругости подрельсового основания при кручении U_φ и жесткостью рельсовой нити при кручении β_φ для всех типов рельсов, уложенных на деревянных шпалах, безотносительно конструкции рельсовых скреплений. При этом жесткость рельсовой нити предложено определять по формуле (21).

Формула (27) после опубликования исследований в работах [7, 8] в 1960 г. получила широкую известность и стала применяться при расчетах рельсов на прочность с учетом кручения. В том числе данная методика легла в основу расчетов справочных данных по крутильным характеристикам рельсов для «Справочника инженера-путейца» 1972 г. [1] и была использована в других широко опубликованных изданиях [3, 13].

Однако, наши современные исследования (2012–2015 г.г.) [5, 6] показали, что использо-

вание выше изложенной методики требует существенной корректировки для обеспечения правильности конечных результатов применительно к современным конструкциям верхнего строения пути.

1. Прежде всего необходимо заметить, что принятое О. П. Ершковым в [7, 8] постоянное соотношение коэффициентов $r_2/r_1 \cong 0,15$ некорректно использовать для разных типов рельсов, для разных эпюр укладки шпал и, тем более, для разных конструкций пути.

Результаты наших исследований показали, что величину соотношения $r_2/r_1 \cong 0,15$ можно принимать только для конструкции пути на деревянных шпалах с рельсами типов Р43 и Р50 (с которыми проф. О. П. Ершков как раз и проводил экспериментальные исследования). Например, для такой же конструкции пути на деревянных шпалах с эпюрой шпал 1 840 шп/км для рельсов UIC60 следует принимать соотношение $r_2/r_1 = 0,16$, а для рельсов Р65 следует принимать $r_2/r_1 = 0,17$. При изменении эпюры шпал соотношение r_2/r_1 также должно изменяться, пропорционально изменению коэффициента r_2 . Результаты наших расчетов показали, что даже незначительные неточности в выборе исходного соотношения r_2/r_1 приводят в конечном итоге к существенным погрешностям при определении искомых характеристик на кручение β_φ и U_φ ; $U_\varphi^{(T)}$ и $\beta_\varphi^{(T)}$.

Нетрудно показать, что исходная формула (21), представляющая собой жесткость рельсовой нити при кручении β_φ и после преобразований приведенная к заключительному виду (26), будет иметь другой заключительный вид, если подставить другие соотношения коэффициентов, не равные $r_2/r_1 \neq 0,15$. Для пояснения рассмотрим внутренние преобразования формулы (21)

$$\begin{aligned} 2Dh_Q^2 r_1 r_2 (r_1 + r_2) &= \\ &= 2D \cdot h_Q^2 \cdot r_1 \cdot r_2 (1 + r_2/r_1) \end{aligned} \quad (21-1)$$

После подстановки $r_2/r_1 = 0,15$ получим:

$$2D \cdot h_Q^2 \cdot r_1 \cdot r_2 (r_1 + r_2) = 2,30D \cdot h_Q^2 \cdot r_1^2 \cdot r_2 \quad (21-2)$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

А после подстановки значений r_1 и r_2 по формулам (22) и (23) исходная формула (21) приводится к виду:

$$\beta_{\varphi} = 2,30D \cdot h_Q^2 \cdot r_1^2 \cdot r_2 = 2,30 \cdot C_{кр} \cdot \sqrt{\frac{U_{\varphi}}{C_{кр}}} \quad (26)$$

Как уже отмечено, формула (26) выведена применительно к рельсам типов Р43 и Р50 на деревянных шпалах. Однако, для рельсов типа Р65 вычисления дают другое соотношение $r_2/r_1 = 0,17$, и поэтому заключительная формула для определения β_{φ} примет вид, отличающийся от (26), а именно:

$$\begin{aligned} \beta_{\varphi} &= 2Dh_Q^2 r_1 r_2 (r_1 + r_2) = \\ &= 2,34 \cdot C_{кр} \cdot \sqrt{\frac{U_{\varphi}}{C_{кр}}} \quad (26-2) \end{aligned}$$

А для рельсов типа UIC60 при $r_2/r_1 = 0,16$ будет иметь место другое выражение:

$$\begin{aligned} \beta_{\varphi} &= 2Dh_Q^2 r_1 r_2 (r_1 + r_2) = \\ &= 2,32 \cdot C_{кр} \cdot \sqrt{\frac{U_{\varphi}}{C_{кр}}} \quad (26-3) \end{aligned}$$

Таким образом, заключительная формула (27), выражающая взаимосвязь между величинами U_{φ} и β_{φ} для рельсов типа Р65 будет иметь вид:

$$U_{\varphi} = \frac{\beta_{\varphi}^2}{5,475 \cdot C_{кр}}, \quad (27-2)$$

а для рельсов типа UIC60 будет иметь вид:

$$U_{\varphi} = \frac{\beta_{\varphi}^2}{5,382 \cdot C_{кр}} \quad (27-3)$$

Приведенные коррективы в формулах (27-2), (27-3), (26-2) и (26-3) с учетом большого порядка величин характеристик $C_{кр}$ и D существенно изменяют значения характеристик U_{φ} и β_{φ} для рельсов типа Р65 и UIC60 по сравнению с известной формулой (27), приведенной в трудах О. П. Ершкова, которая может применяться только к рельсам Р43 и Р50.

2. Также требует уточнения физический смысл характеристик β_{φ} и U_{φ} в связи с установленными между ними зависимостями.

Как уже указано, методика проф. О. П. Ершкова легла в основу расчетов и опубликования справочных данных по крутильным характеристикам рельсов в отечественной печати [1, 2, 9, 13]. При этом было принято обозначать через U_{φ} – модуль упругости подрельсового основания при кручении, а через β_{φ} – жесткость рельсовой нити при кручении.

Дело в том, что характеристика жесткости рельсовой нити β_{φ} , определяемая по формуле (21), получена из рассмотрения только работы рельса на горизонтальный изгиб под воздействием горизонтальной силы H и на одновременно происходящее кручение рельса под действием крутящего момента $M_{кр}$ от внецентренно приложенных горизонтальной силы H и вертикальной силы P , при этом вертикальный изгиб рельса в данной задаче не учитывался и, соответственно, не учитывались силы трения по подошве между рельсом и рельсовым основанием от действия вертикальной силы. Таким образом, характеристика β_{φ} , вычисляемая по формуле (21), характеризует жесткость рельсовой нити, не связанной скреплениями с основанием и зависящую только от формы рельса и жесткости элементов его сечения. Именно поэтому характеристика U_{φ} в формулах (27), (27-2), (27-3) – не может называться модулем упругости реального подрельсового основания, так как получена она из решения задачи, где влияние основания не учитывалось. Правильно называть эту характеристику U_{φ} – модулем упругости при кручении фиктивного рельсового основания. Исследования показали, что значения характеристик U_{φ} , определяемых по формуле (27) для рельсов Р43 и Р50 (или по формулам (27-2) и (27-3) для рельсов Р65 и UIC60), могут быть корректно применимы только для случаев отсутствия вертикальной нагрузки (при $P=0$), что практически не имеет места в реальных условиях взаимодействия подвижного состава и пути.

Реальное значение жесткости рельсовой нити при кручении, с учетом ее связей с подрель-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

совым основанием $\beta_{\phi}^{(T)}$, следует определять из формул вида (27-1), (27-2), (27-3) после подстановки в них вместо фиктивного модуля упругости при кручении рельсового основания U_{ϕ} , значений реальных модулей упругости рельсового основания при кручении рельсовой нити $U_{\phi}^{(T)}$, определяемых по формуле (15) и, соответственно, различающихся для разных типов рельсов, а именно:

– для рельсов типа Р50 и Р43 по формуле:

$$\beta_{\phi}^{(T)} = \sqrt{5,30 \cdot C_{кр} \cdot U_{\phi}^{(T)}}; \quad (28-1)$$

– для рельсов типа Р65 по формуле:

$$\beta_{\phi}^{(T)} = \sqrt{5,475 \cdot C_{кр} \cdot U_{\phi}^{(T)}}; \quad (28-2)$$

– для рельсов типа UIC60 по формуле:

$$\beta_{\phi}^{(T)} = \sqrt{5,382 \cdot C_{кр} \cdot U_{\phi}^{(T)}}. \quad (28-3)$$

Результаты поверочных расчетов [4, 5] показали, что реальные значения модуля упругости при кручении $U_{\phi}^{(T)}$ существенно больше

значений модуля упругости фиктивного основания U_{ϕ} и отличаются порядка в 3,5–5,0 раза для реальных эксплуатационных соотношений вертикальных и горизонтальных сил P/H . А реальные значения жесткости рельсовой нити при кручении $\beta_{\phi}^{(T)}$ (с учетом связей ее с под-рельсовым основанием) отличаются в сторону увеличения от фиктивного значения жесткости β_{ϕ} порядка в 1,5–2,5 раза для реальных эксплуатационных соотношений вертикальных и горизонтальных сил P/H .

В табл. 1 приведены результаты вычислений по изложенной методике значений значений U_{ϕ} и $U_{\phi}^{(T)}$ для рельсов типов Р50, Р65, UIC60 для случая воздействия на путь грузового вагона при $P/H = 2,336 \div 2,55$ при железобетонных и деревянных шпалах соответственно. На рис. 2 приведен общий вид зависимости $U_{\phi}^{(T)} = f(P/H)$ для всего спектра P/H от 0 до max.

Таблица 1

Значение модулей упругости пути при кручении рельсовой нити U_{ϕ} и $U_{\phi}^{(T)}$ для разных конструкций пути

Table 1

The values of track elasticity modulator at rail thread torsion U_{ϕ} , $U_{\phi}^{(T)}$ for different designs of a railway track

Тип скрепления	Тип рельса	Эшюра, шп/км	Модуль упругости пути при кручении рельсовой нити U_{ϕ} ; $U_{\phi}^{(T)*}$, кг/рад	
			U_{ϕ} (при $P=0$, $H \neq 0$)	$U_{\phi}^{(T)*}$ (при $P \neq 0$, $H \neq 0$)
КБ	Р65	1 680	34 834,906	166 335,323
		1 840	38 152,517	182 188,737
КБ	UIC60	1 680	25 989,831	149 732,617
		1 840	28 465,053	164 003,760
КБ	Р50	1 680	25 054,575	93 150,919
		1 840	27 440,725	102 029,718
КПП-5	Р65	1 680	34 834,906	162 536,382
		1 840	38 152,517	178 106,519

Тип скрепления	Тип рельса	Эпюра, шп/км	Модуль упругости пути при кручении рельсовой нити U_ϕ ; $U_\phi^{(T)*}$, кг/рад	
			U_ϕ (при $P=0, H \neq 0$)	$U_\phi^{(T)*}$ (при $P \neq 0, H \neq 0$)
КПП-5	UIC60	1 680	25 989,831	151 732,437
		1 840	28 465,053	166 282,583
КПП-1	P65	1 680	34 834,906	126 415,101
		1 840	38 152,517	138 520,024
Д0	P65	1 840	38 152,517	80 080,311
		2 000	41 470,127	87 051,831
Д0	P50	1 840	27 440,725	53 453,482
		2 000	29 826,875	58 104,937
Д0	P43	1 840	22 991,733	43 461,505
		2 000	24 991,014	47 245,834

(*) – значение вертикальной и горизонтальной сил принято равным наиболее вероятным значением: на железобетонных шпалах $P_{дин} = 16\,350$ кг, $H_{дин} = 7\,000$ кг; на деревянных шпалах $P_{дин} = 17\,850$ кг, $H_{дин} = 7\,000$ кг, имеющих место в динамике при взаимодействии грузового 4-осного вагона с рельсовым путем в кривой $R \approx 800$ м при движении со скоростью $V = 90$ км/год.

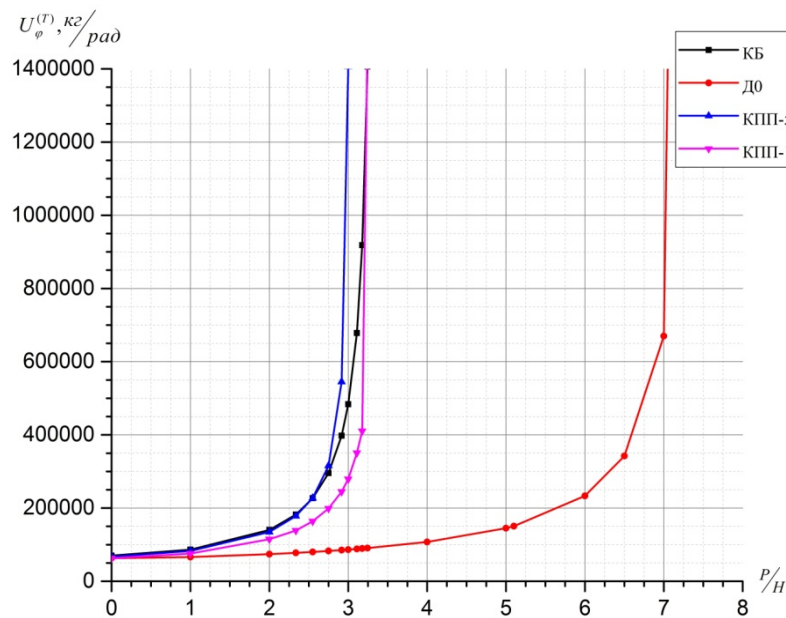


Рис. 2. График функциональной зависимости $U_\phi^{(T)} = f(P/H)$

Fig. 2. Graf of the functional dependence $U_\phi^{(T)} = f(P/H)$

Научная новизна и практическая значимость

Впервые в отечественных исследованиях выполнено экспериментально-теоретическое решение задачи по определению реальных значений жесткости и модуля упругости рельсовой нити при кручении при совместном действии на рельс вертикальных и горизонтальных колесных нагрузок. Решение представлено в функциональной зависимости от соотношения совместно действующих на рельс вертикальной и горизонтальной сил $\beta_{\phi}^{(T)} = f(P/H)$; $U_{\phi}^{(T)} = f(P/H)$. Решение выполнено для современных конструкций рельсов отечественного стандарта Р65, Р50, Р43 и международного стандарта UIC60.

Следует отметить, что результаты (табл. 1 и рис. 2) новейших исследований модуля упругости рельсовой нити на кручение (в функции от соотношения действующих сил и с учетом трения рельсов по подошве и работы скреплений) даются впервые в отечественной технической литературе. Таких данных нет также в зарубежной технической литературе [14, 15].

Полученные результаты позволяют с большей точностью в сравнении с действующей методикой выполнять расчеты реальных действующих напряжений и деформаций в рельсах разных типов, при совместном действии на рельс вертикальных и горизонтальных сил для пути на железобетонных и деревянных шпалах при разных конструкциях жестких и упругих рельсовых скреплений: КБ, КПП, ДО.

Выводы

Приведено решение задачи по определению жесткости и модуля упругости рельсовой нити при кручении от совместного действия вертикальной и горизонтальной сил и крутящего момента для разных типов подрельсового основания с учетом сопротивляемости скреплений и сил трения по подошве рельса.

В результате выполненных исследований получены новые результаты по характеристикам пространственной упругости рельсовой нити для современных конструкций железнодорожного пути на железобетонных и деревянных шпалах со скреплениями типов КБ, КПП-5,

КПП-1, ДО при их работе под совместным воздействием вертикальной и горизонтальной сил.

Впервые получены аналитические и графоаналитические зависимости между реальными характеристиками жесткости и упругости рельсовой нити при кручении $\beta_{\phi}^{(T)}$, $U_{\phi}^{(T)}$ и соотношением действующих сил P и H .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Басилов, В. В. Справочник инженера-путейца / В. В. Басилов, М. А. Чернышев. – Москва : Транспорт, 1972. – 2 т.
2. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – Москва : Транспорт, 1986. – 559 с.
3. Вериго, М. Ф. Общие положения для корректировки «Правил расчетов железнодорожного пути на прочность» / М. Ф. Вериго, С. С. Крепкогорский. – Тр. ВНИИЖТа. – Москва, 1972. – Вып. 466. – С. 4–50.
4. Даниленко, Е. І. Експериментальні дослідження характеристик горизонтальної поперечної жорсткості і модуля пружності залізничної колії при різних конструкціях рейкових скріплень / Е. І. Даниленко, В. П. Велинець // Залізнич. трансп. України. – 2015. – № 4. – С. 3–11.
5. Даниленко, Е. І. Новітні дослідження бічної пружності рейкових ниток при спільній дії вертикальних і горизонтальних сил // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 65–77. doi: 10.15802/stp2015/57021.
6. Даниленко, Э. И. Теоретическое решение задачи по определению реального бокового модуля упругости пути, при совместном действии на рельсовую нить горизонтальных и вертикальных сил / Э. И. Даниленко, В. П. Велинец // 36. науч. пр. Держ. економ.-техн. ун-ту трансп. Серія: Трансп. системи і технології. – Київ, 2014. – Вип. 24. – С. 106–122.
7. Ершков, О. П. Расчет рельса на действие боковых сил в кривых / О. П. Ершков // Тр. ВНИИЖТа. – Москва, 1960. – Вып. 192. – С. 5–59.
8. Ершков, О. П. Характеристики пространственной упругости рельсовой нити / О. П. Ершков // Тр. ВНИИЖТа. – Москва, 1960. – Вып. 192. – С. 59–101.
9. Татуревич, А. П. Результаты определения фактических значений жесткости пути для исследований взаимодействия пути и подвижного состава / А. П. Татуревич // Вісн. Дніпропетр.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 2. – С. 95–100.
10. Тимошенко, С. П. Метод исследований статических и динамических напряжений в рельсе / С. П. Тимошенко // Статич. и динам. проблемы теории упругости. – Киев, 1975. – С. 209–220.
 11. Тимошенко, С. П. Напряжения в железнодорожном рельсе / С. П. Тимошенко // Статич. и динам. проблемы теории упругости. – Киев, 1975. – С. 318–355.
 12. Феодосьев, В. И. Соппротивление материалов / В. И. Феодосьев. – Москва : Наука, 1970. – 544 с.
 13. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянц. – Москва : Транспорт, 1969. – 536 с.
 14. Experimental study on the transverse stiffness of WJ-8 rail fastening / C. Liu, Z. Ping Zeng, B. Wu [et al.] // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 596. – P. 3–6. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.596.3.
 15. Tests on lateral resistance in railway tracks during the operation of a tamping machine / W. Koc, A. Wilk, P. Chrostowski, S. Grulkowski // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. – 2011. – Vol. 225. – Iss. 3. – P. 325–334. doi: 10.1243/09544097-jrrt324.

Е. І. ДАНИЛЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Залізнична колія та колійне господарство», Державний економіко-технологічний університет транспорту, вул. М. Лукашевича, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (044) 591 51 47, ел. пошта danilenko2010@mail.ru, ORCID 0000-0002-8518-5272

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ЖОРСТКОСТІ ТА ПРУЖНОСТІ РЕЙКОВОЇ НИТКИ ПРИ КРУЧЕННІ ПІД ДІЄЮ ВЕРТИКАЛЬНИХ І ГОРИЗОНТАЛЬНИХ СИЛ

Мета. Наявні в літературі відомості про характеристики жорсткості та пружності рейкових ниток при крученні є суперечливими. Це є наслідком відсутності точного аналітичного рішення задачі та складності експериментального вивчення зазначених характеристик при спільній дії на рейку вертикальних і горизонтальних сил. У статті представлений новий метод вирішення задачі по визначенню жорсткості й модуля пружності рейкової нитки при крученні під спільною дією вертикальної і горизонтальної сил. **Методика.** У роботі використано комплексний метод вирішення задачі, що включає теоретичну частину і результати експерименту. За допомогою експерименту були виміряні характеристики горизонтальної поперечної жорсткості рейкових ниток по голівці та підшві при різних конструкціях сучасних рейкових скріплень. Подальша задача по визначенню реальних значень модуля пружності й жорсткості рейкової нитки при крученні $U_{\phi}^{(T)}$ і $\beta_{\phi}^{(T)}$ вирішена теоретичними методами. **Результати.** Отримано нові значення характеристик жорсткості та модуля пружності рейкової нитки при крученні для сучасних конструкцій рейок Р65, UIC60, Р50 і рейкових скріплень типів КПП, КБ, ДО при спільній дії на рейку вертикальної та горизонтальної сил і кручення. **Наукова новизна.** Вперше у вітчизняних дослідженнях виконано експериментально-теоретичні рішення задачі по визначенню реальних значень жорсткості та модуля пружності рейкової нитки при крученні під спільною дією на рейку вертикальних і горизонтальних колісних навантажень. Рішення представлено у функціональній залежності від співвідношення спільно діючих на рейку вертикальної і горизонтальної сил $\beta_{\phi}^{(T)} = f(P/H)$; $U_{\phi}^{(T)} = f(P/H)$. Рішення виконано для сучасних конструкцій рейок вітчизняного стандарту Р65, Р50, Р43 і міжнародного стандарту UIC60. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють із більшою точністю, в порівнянні з діючою методикою, виконувати розрахунки реальних напруг і деформацій у рейках різних типів. Це виникає при спільній дії на рейку вертикальних і горизонтальних сил (для колії на залізобетонних і дерев'яних шпалах) при різних конструкціях жорстких і пружних рейкових скріплень: КБ, КПП, ДО.

Ключові слова: рейкова нитка; жорсткість; пружність; кручення; сили вертикальні; сили горизонтальні

E. I. DANILENKO^{1*}

^{1*}Dep. «Railway Track and Track Facilities», State Economic and Technological University of Transport, Lukashevich St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (044) 591 51 47, e-mail danilenko2010@mail.ru, ORCID 0000-0002-8518-5272

CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF STIFFNESS AND ELASTICITY OF RAIL THREADS WHEN TORSION UNDER COMBINED ACTION OF VERTICAL AND HORIZONTAL FORCES

Purpose. Reference data in technical literature about such characteristics as stiffness and elasticity of rail threads at torsion are rather contradictory. This is due to the absence of correct analytical solution of this task and because of complexity of experimental studies of this problem under combined action of vertical and horizontal lateral forces. The article presents the new method of solving the task of calculation the real values of stiffness and elasticity modules of rail thread when torsion under combined action of vertical and horizontal lateral forces. **Methodology.** The complex method of solving the problem was used in the paper. It includes the theoretical part and the results of the experiment. Using the experiment the characteristics of horizontal lateral stiffness of the rail threads of the head and bottom at different constructions of the modern rail fastenings was measured. The second task of determination of the real values of elasticity $U_{\varphi}^{(T)}$ and stiffness $\beta_{\varphi}^{(T)}$ modulus of the rail thread when torsion was solved by the theoretical methods. **Findings.** New values of stiffness characteristics and elasticity module of rail thread when torsion for the modern rail constrictions P65, UIC60, P50 and the rail fastenings of the types КПП, КБ, Д0, under combined action of vertical and horizontal forces and torsion were obtained. **Originality.** For the first time in domestic research it was carried out the experimental and theoretical solution of the task for determination of the real values of the stiffness and elasticity modulus of rail thread when torsion under combined action of vertical and horizontal forces of the wheel loadings. The solution is represented in the functional dependence on the correlation of vertical and horizontal forces $U_{\varphi}^{(T)} = f(P/H)$; $\beta_{\varphi}^{(T)} = f(P/H)$ acting together. The solution is carried out for the modern designs of the rails of domestic standard P65, P50, P43 and international standard UIC60. **Practical value.** The obtained results make it possible to carry out calculations of the real acting strains and deformations in the rails of different types under the joint action of vertical and horizontal forces for railway track on concrete and wooden sleepers with different designs of rigid and elastic rail fastenings КБ, КПП, Д0 with higher accuracy as compared to the current calculation methodology.

Keywords: rail thread; rail stiffness; elasticity; torsion; vertical forces; horizontal forces

REFERENCES

1. Basilov V.V., Chernyshev M.A. *Spravochnik inzhenera-puteytsa. 2 Toma* [Reference of a railway engineer]. Moscow, Transport Publ., 1972. 2 volumes.
2. Verigo M.F., Kogan A.Ya. *Vzaimodeystviye puti i podvizhnogo sostava* [Track and rolling stock interaction]. Moscow, Transport Publ., 1986. 559 p.
3. Verigo M.F., Krepkogorskiy S.S. Obshchiye polozheniya dlya korrektyrovki «Pravil raschetov zheleznodorozhnogo puti na prochnost» [General provisions for adjusting the «Rules of calculation of railway track for strength»]. *Trudy Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Proc. of All-Russian Research Institute of Railway Transport], 1972, issue 466, pp. 4-50.
4. Danilenko E.I., Velinets V.P. Eksperymentalni doslidzhennia kharakterystyk horyzontalnoi poperechnoi zhorstkosti i modulua pruzhnosti zaliznychnoi kolii pry riznykh konstruktsiiah reikovykh skriplen [Experimental studies of characteristics of horizontal and lateral stiffness and elasticity modulus of railway track in various designs of rail fasteners]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2015, no. 4, pp. 3-11.
5. Danilenko E.I. Novitni doslidzhennia bichnoi pruzhnosti reikovykh nytok pry spilnii dii vertykalnykh i horyzontalnykh syl [Recent researches of the lateral flexibility of the rail threads under combined action of vertical and horizontal forces]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 6 (60), pp. 65-77. doi: 10.15802/stp2015/57021.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

6. Danilenko E.I., Velinets V.P. Teoreticheskoye resheniye zadachi po opredeleniyu realnogo bokovogo modulya uprugosti puti, pri sovmestnom deystvii na relsovyuyu nit gorizontalnykh i vertikalnykh sil [The theoretical solution of the problem to determine the real lateral modulus of the track elasticity under the joint action of the horizontal and vertical forces]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomichno-tekhnichnoho universytetu transportu* [Proc. of State Economic and Technical University of Transport], 2014, issue 24, pp. 106-122.
7. Yershkov O.P. Raschet relsa na deystviye bokovykh sil v krivykh [Rail calculation for the action of the lateral forces in the curves]. *Trudy Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Proc. of All-Russian Research Institute of Railway Transport], 1960, issue 192, pp. 5-59.
8. Yershkov O.P. Kharakteristiki prostranstvennoy uprugosti relsovoy niti [Characteristics of the spatial elasticity of rail thread]. *Trudy Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Proc. of All-Russian Research Institute of Railway Transport], 1960, issue 192, pp. 59-101.
9. Taturevich A.P. Rezultaty opredeleniya fakticheskikh znacheniy zhestkosti puti dlya issledovaniy vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava [The results of determining the actual values of track stiffness to study the interaction of track and rolling stock]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2003, issue 2, pp. 95-100.
10. Timoshenko S.P. Metod issledovaniy statisticheskikh i dinamicheskikh napryazheniy v relse [Method of research of statistical and dynamic stresses in the rail]. *Statisticheskkiye i dinamicheskkiye problemy teorii uprugosti* [Statistical and dynamic problems of the elasticity theory]. Kyiv, 1975, pp. 209-220.
11. Timoshenko S.P. Napryazheniya v zheleznodorozhnom relse [Stresses in the rail]. *Statisticheskkiye i dinamicheskkiye problemy teorii uprugosti* [Statistical and dynamic problems of the elasticity theory]. Kyiv, 1975, pp. 318-355.
12. Feodosyev V.I. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 544 p.
13. Shakhunyants G.M. *Zheleznodorozhnyy put* [Railway track]. Moscow, Transport Publ., 1969. 536 p.
14. Liu C., Ping Zeng Z., Wu B., Yuan J. Yu, He X.F. Experimental study on the transverse stiffness of WJ-8 rail fastening. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 596, pp. 3-6. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.596.3.
15. Koc W., Wilk A., Chrostowski P., Grulkowski S. Tests on lateral resistance in railway tracks during the operation of a tamping machine. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2011, vol. 225, issue 3, pp. 325-334. doi: 10.1243/09544097jrrt324.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Н. Б. Курганом (Украина); научн. комитетом XIV Междунар. конф. «Проблемы механики железнодорожного транспорта. Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение»

Поступила в редколлегию: 12.05.2016

Принята к печати: 14.09.2016

УДК 629.4.016.56: 533.68С. Т. ДЖАББАРОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство», Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, ул. Адылходжаева, 1, Ташкент, Узбекистан, 100167, тел. +99 (890) 185 29 34, эл. почта _saidhon_@inbox.ru, ORCID 0000-0002-3798-407X

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОЕЗДА

Цель. В научной работе необходимо провести исследование аэродинамического давления и распределения поля скоростей воздушных потоков вдоль движущегося высокоскоростного поезда. **Методика.** Исследование распределения поля скоростей вокруг движущегося высокоскоростного поезда произведено методом имитирования его движения как осесимметричного тела с формой головной и хвостовой частей в виде оживало в сжимаемой (акустической) среде. **Результаты.** Определены значения абсолютной скорости (теоретической) воздушного потока, образуемого движением тела (в случае, когда тело движется с постоянной скоростью (200, 250, 350, 400 км/час) на некоторой высоте от поверхности земли), для точек, находящихся на различном расстоянии от оси движущегося тела (скоростного поезда). По результатам расчетов построены графики изменения скорости воздушного потока в акустической среде вдоль движущегося тела на различном расстоянии от него. Используя закон Бернулли (зависимости изменения давления от скорости потока), определены значения избыточного давления, создаваемого воздушным потоком от движущегося тела. **Научная новизна.** Впервые теоретические исследования аэродинамики высокоскоростного поезда проведено на примере осесимметричного тела с формой головной и хвостовой части в виде оживало в сжимаемой (акустической) среде, движущегося с установленной скоростью. Результаты исследований позволяют установить распределение избыточного давления воздушного потока, образуемого вдоль движущегося высокоскоростного поезда. **Практическая значимость.** Полученные автором результаты позволяют установить: 1) требования к физико-механическим и прочностным характеристикам отдельных элементов объектов инфраструктуры железных дорог на участках обращения высокоскоростных поездов, подверженных аэродинамическому давлению; 2) безопасное минимальное расстояние нахождения людей от колес при прохождении высокоскоростного поезда.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; движение высокоскоростных поездов; аэродинамика; воздушный поток; поля скоростей; аэродинамическое давление; зона безопасности

Введение

В связи со значительным увеличением скоростей движения поездов более актуальными стали вопросы обеспечения комфорта; высокой безопасности движения поездов и пассажиров; исключения травматизма людей, ожидающих на платформах, а также работников железной дороги, находящихся в непосредственной близости от проходящего высокоскоростного поезда.

Обеспечение безопасности требует исследования аэродинамических особенностей, связанных с воздушным потоком, возникающим при движении скоростного и высокоскоростного поезда.

Аэродинамическое воздействие на человека зависит не только от максимальной скорости воздушного потока, но и от его продолжительности. При этом большое значение имеет где,

на какой высоте и на каком расстоянии стоит человек относительно движущегося высокоскоростного поезда.

Экспериментальные исследования аэродинамического воздействия на людей в 80-е годы XX века проводились в Японии, Франции, Германии, США, России и других странах. В ходе натурных исследований были установлены скорости воздушных потоков, значение аэродинамического давления вокруг скоростного поезда и его воздействие на людей, находящихся на пассажирской платформе и конструкционные элементы пассажирских зданий.

Результаты исследований аэродинамического сопротивления движению поезда с использованием аэродинамической трубы и модели поездов позволили установить зависимости величины аэродинамического сопротивления от

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

скорости, формы головного вагона и хвостовой части поезда, условий движений (в тоннеле или открытой местности), типа поезда (для поездов TGV, ICE) [2–5, 20].

Аэродинамические особенности движения скоростного поезда в тоннеле позволили определить величину давления сжатого воздуха на стенки вагонов (оконные и дверные застекления, в том числе двухэтажных вагонов), усовершенствовать конструкцию вагонов, предотвратить их разрушение [16, 20].

Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия движущегося скоростного поезда с объектами находящимися вдоль железной дороги и поездами (скоростными или грузовыми), движущимися по параллельному пути (навстречу или в одном направлении), позволили установить (рекомендовать) безопасное расстояния нахождения пассажиров на низких или высоких станционных платформах, предотвратить опрокидывания грузовых контейнеров [6, 9, 10, 13, 17, 19, 21, 22]. Было установлено, что импульс давления, вызванный поездами, проходящими навстречу друг другу в открытой местности, может привести к конструктивным проблемам в самих поездах непосредственно и структурах полосы отчуждения.

Результаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований К.Бейкера позволили установить и понять физику образования аэродинамических потоков во всех частях движущегося скоростного поезда; обеспечить безопасность и комфортабельность пассажирам; разработать мероприятия по уменьшению аэродинамического сопротивления движению поезда [11, 12, 14, 15, 18, 23].

При многообразии научно-исследовательских работ количественное влияние на человека, конструкционные элементы пассажирских зданий устойчивой скорости и длительности воздушных потоков изучены недостаточно. Самое главное, что аэродинамическое воздействие на людей, как критерий безопасности при высокоскоростном движении пассажирских поездов, не учитывается.

Цель

Значительное увеличение скорости движения пассажирских поездов привело к изменению физики воздушных потоков вокруг скоро-

стных поездов. Движение высокоскоростных поездов имеет свойственные ему особенности, которые не позволяют использовать аэродинамические законы летательных аппаратов. При движении высокоскоростного поезда в открытой местности, происходит изменение аэродинамического поля вблизи движущегося поезда. Сила и направленность давлений зависят от таких факторов, как скорость и геометрия поезда, присутствия и близости окружающих объектов.

Так как аэродинамическое давление является производным аэродинамических потоков, теоретически исследуем распределение поля скоростей вдоль движущегося высокоскоростного поезда.

Методика

Исследование распределения поля скоростей вокруг движущегося высокоскоростного поезда произведено имитированием его движения как осесимметричного тела с формой головной и хвостовой части в виде оживало в сжимаемой (акустической) среде (рис.1, а) [1].

Положение тел в пространстве в произвольном сечении z представлено на рис. 1, б. Осесимметричное тело длиной L движется в сжимаемой (акустической) среде с постоянной скоростью v_0 и находится на высоте h от границы полупространства (рис. 1), наибольшее удаление границы тела от продольной оси равно R . При этом полагаем, что $R/L \ll 1$. Для решения задачи введены осесимметричные координаты $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ и z_1 . Время движения обозначено как t . Начало координат установлено в среднем сечении тела, ось Oz_1 направлено по оси тела, а ось Or перпендикулярная к ней.

Составляющие скоростей частиц воздушной среды по осям координат Oz и Or можно определить через потенциал скорости $\varphi_1(r, z_1, t)$ соответственно по формулам

$$v_z = \partial\varphi_1/\partial z, \quad (1)$$

$$v_r = \partial\varphi_1/\partial r.$$

Распространения акустической волны в воздушной среде можно представить в виде сле-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

дующого уравнения

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z_1^2} \right),$$

где a – акустическая скорость звука.

Так как движение тела происходит вдоль оси Oz_1 , вводится подвижная система координат $z = z_1 - v_0 t$.

Уравнение (1) можно привести в виде

$$\alpha^2 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

где $\alpha = \sqrt{1 - M^2}$, $M = v_0 / a$ – число Маха.

Движение тела в акустической среде считается дозвуковым, то есть предполагается, что $M < 1$. Тогда уравнение (2) интегрируется при следующих граничных условиях:

1. Безотрывности скольжения частиц воздушной среды по поверхности тела при $r = f_1(z)$:

$$v_r = \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} = v_0 \operatorname{tg} \gamma, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg} \gamma$ – уравнение поверхности тела.

Уравнение поверхности тела выражено через тангенс угла наклона касательной к поверхности движущегося тела (рис. 1), которая может быть определена по формуле $\operatorname{tg} \gamma = f_1'(z)$, $f_1(z) = f_1(-z)$.

2. Равенства нулю составляющей по оси Oz скорости частиц среды на границе полупро-

странства, то есть при $y = -h - f_1(z)$:

$$\partial \varphi_1 / \partial y = 0.$$

3. Симметрии относительно оси Oz , то есть при $z = 0$:

$$\varphi_1 = 0.$$

Для поиска решения уравнения (2) использован метод источников [7]. Рассматривая функцию $\varphi(r, z)$, удовлетворяющую уравнению (2) и граничному условию (3), решение можно представить в виде

$$\varphi = -\frac{1}{4\pi} \int_{-L}^L \frac{q(\xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - z)^2 + \alpha^2 r^2}}, \quad (4)$$

где $q(z)$ – мощность источника, распределенного по поверхности движущегося тела в пределах $0 < r < f_1(z)$, $-L < z < L$.

Для тонкого осесимметричного тела из формулы (4) по [8] можно утверждать, что:

- при $r \rightarrow 0$ $\frac{\partial \varphi}{\partial r} \rightarrow \frac{q(z)}{2\pi r}$;
- при $0 < z < L$ $q(z) = 2\pi v_0 f_1'(z) f_1(z)$;
- при $-L < z < 0$ $q(z) = -2\pi v_0 f_1'(-z) f_1(-z)$.

Тогда функция $\varphi(r, z)$ приобретает вид

$$\varphi = -\frac{v_0}{2} \left(\int_{-L}^0 \frac{f_1'(-\xi) f_1(-\xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - z)^2 + \alpha^2 r^2}} + \int_0^L \frac{f_1'(\xi) f_1(\xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - z)^2 + \alpha^2 r^2}} \right) \quad (5)$$

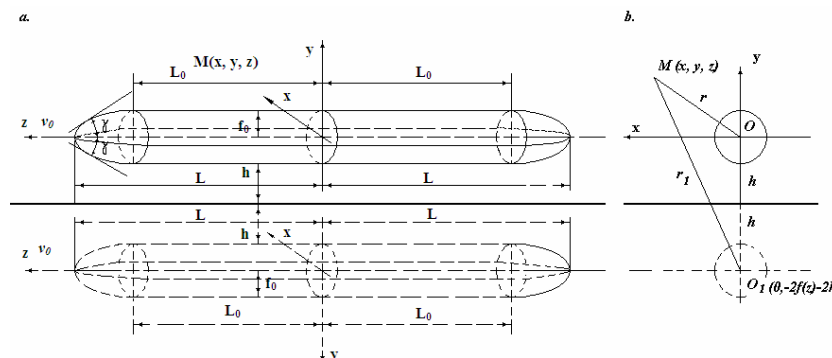


Рис. 1. Схема движения осесимметричного тела в полупространстве (а) и расположения сечений основного и фиктивного тел в плоскости (б)

Fig. 1. Scheme of the axisymmetric body movement in a half-space (a) and the location of sections of the dummy and main bodies in the plane (b)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Учитывая, что $f_1(-\xi) = f_1(\xi)$, $f_1'(-\xi) = -f_1'(\xi)$, уравнение (5) можно представить в следующем виде

$$\varphi = -\frac{v_0}{2} \left(\int_0^L \frac{f_1'(\xi)f_1(\xi)d\xi}{\sqrt{(\xi+z)^2 + \alpha^2 r^2}} - \int_0^L \frac{f_1'(\xi)f_1(\xi)d\xi}{\sqrt{(\xi-z)^2 + \alpha^2 r^2}} \right)$$

При этом функцию $\varphi_1(r, z)$ можно представить в следующем виде

$$\varphi_1 = [\varphi(z, r) + \varphi(z, r_1)]/2, \quad (6)$$

где $r_1 = \sqrt{x^2 + [2f_1(z) + 2h + y]^2}$.

Можно показать, что представленная формулой (6) функция $\varphi_1(r, z)$ удовлетворяет всем условиям рассматриваемой задачи.

Результаты

В качестве примера рассмотрено тело вращения, начальные и конечные участки которого являются оживало (рис. 1). При этом принятые размеры тела равны следующим значениям:

- расстояние от середины движущегося тела до его крайних точек по оси $Oz - L$;
- расстояние от середины движущегося тела до начальной точки изменения формы (очертания) головных частей движущегося тела – L_0 ;

– поперечное сечение движущегося тела рассмотрено в качестве круга радиусом 2 м, которое по площади соответствует поперечному сечению поезда шириной 3,0 м и высотой 4,0 м, т.е. 12 м².

При форме головной и хвостовой части вида оживало функции $f_1(z)$ и $f_1'(z)$ представляются в следующем виде:

– при

$$-L \leq z \leq -L_0,$$

$$f_1 = R[1 - (z + L_0)^2 / (L - L_0)^2],$$

$$f_1' = -2R(z + L_0) / (L - L_0)^2;$$

– при

$$-L_0 \leq z \leq L_0, \quad f_1 = R, \quad f_1' = 0;$$

– при

$$L_0 \leq z \leq L,$$

$$f_1 = R[1 - (z - L_0)^2 / (L - L_0)^2],$$

$$f_1' = -2R(z - L_0) / (L - L_0)^2.$$

Расчеты абсолютной скорости (теоретической) воздушного потока, образуемого движением тела, проводились для случая, когда тело движется с постоянной скоростью (200, 250, 350, 400 км/час) на высоте 2 м от поверхности земли, для точек находящихся на расстоянии 3,55; 6,00; 8,0 и 10 м от оси движущегося тела (скоростного поезда). По результатам расчетов построены графики изменения скорости воздушного потока в акустической среде вдоль движущегося тела на различном расстоянии от него. В качестве примера приведены графики изменения скорости воздушного потока вдоль тела, движущегося со скоростью 200 км/ч, на различных расстояниях от его оси (рис. 2).

Используя закон Бернулли зависимости изменения давления от скорости потока, определены значения избыточного давления, создаваемого воздушным потоком от движущегося тела. Построены зависимости избыточного давления от скорости и расстояния до оси движущегося тела (рис. 3).

Анализ построенных графиков показывает, что распределение давления вдоль движущегося тела, при движении тела со скоростями 160, 200, 250, 350, 400 км/час имеет общую закономерность. Для тела с формой головной и хвостовой части оживало избыточное давление повышается (I зона) и понижается (V зона) с наибольшим скачком (рис. 2). Это объясняется тем, что в головной и хвостовой части тела в виде оживало имеются некоторые зоны, где возникают как избыточные, так и отрицательные давления.

С приближением движущегося тела к точке М с координатами (x, y, z) происходит незначительное повышение избыточного давления (зона I, рис. 2). Максимум избыточного давления в точке М достигается, когда начало движущегося тела находится на этой точке М (зона II, рис. 2). При нахождении середины поезда напротив точки М происходит резкое понижение, а затем повышение избыточного давления. При этом следует отметить, что в точках, расположенных в сечении А-А, вектор скорости меня-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ється и начинает появляться отрицательное давление (зона III, рис. 2). Максимум отрицательного давления достигается, когда конец движущегося тела находится напротив точки М (зона IV, рис. 2). После прохождения поездом точки М происходит постепенное восстановление нормального давления (зона V, рис. 2). Как видно из графика распределения избыточного

давления, максимальное давление имеет взрывной характер, действует на протяжении доли секунд и изменяется в отрицательное давление в течение не более секунды. Таким образом, в течение секунды на человека воздействует избыточное и отрицательное давление с максимальными значениями.

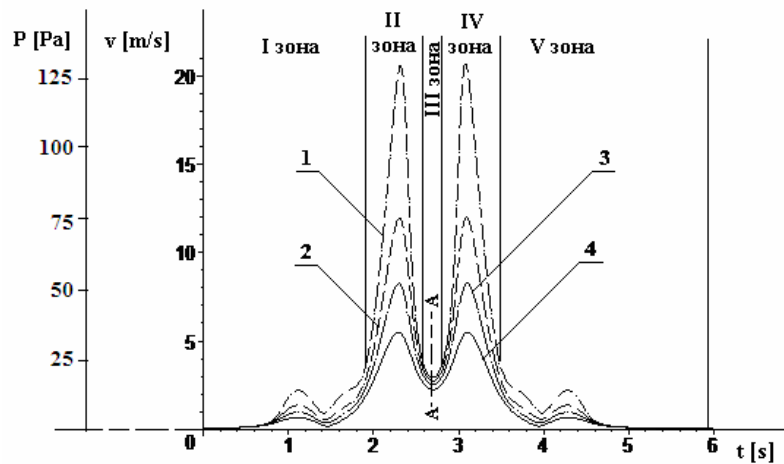


Рис. 2. Графики изменения скорости воздушного потока и избыточного давления вдоль движущегося тела на различных расстояниях:
1 – 3,55 м.; 2 – 6,0 м.; 3 – 8,0 м.; 4 – 10,0 м.

Fig. 2. Charts of the air flow rate and overpressure along the moving body at different distances:
1 – to 3.55 m ; 2 – 6.0 m ; 3 – 8.0 m ; 4 – 10.0 m.

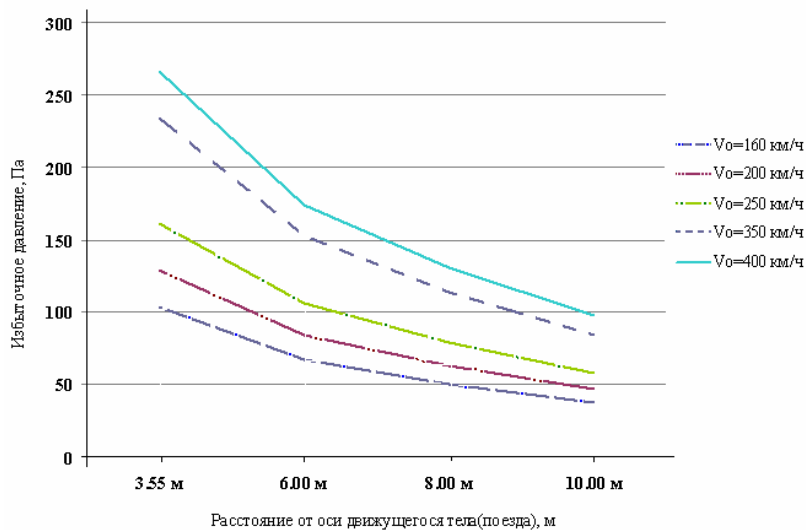


Рис. 3. Изменение избыточного давления в зависимости от скорости и расстояния до оси движущегося тела

Fig. 3. Overpressure changing depending on the velocity and distance to axis of the moving body

Научная новизна и практическая значимость

Впервые теоретические исследования аэродинамики высокоскоростного поезда проведено в качестве осесимметричного тела, с формой головной и хвостовой части в виде оживало в сжимаемой (акустической) среде, движущегося с установившейся скоростью.

Результаты исследований позволяют установить распределение избыточного давления воздушного потока, образуемого вдоль движущегося высокоскоростного поезда.

Выводы

Полученные результаты позволяют установить:

– требования к физико-механическим и прочностным характеристикам отдельных элементов объектов инфраструктуры железных дорог на участках обращения высокоскоростных поездов, подверженных аэродинамическому давлению;

– безопасное минимальное расстояние нахождения людей пути при прохождении высокоскоростного поезда.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Джаббаров, С. Т. Движение тонкого осесимметричного тела в полупространстве, занятом сжимаемым газом / С. Т. Джаббаров // Проблемы механики. – 2016. – Вып. 1. – С. 12–17.
2. Кравец, В. В. Аэродинамика высокоскоростных поездов. Ч. 1 / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Заліз. трансп. України. – 2005. – № 2. – С. 52–57.
3. Кравец, В. В. Аэродинамика высокоскоростных поездов. Ч. 2 / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Заліз. трансп. України. – 2005. – № 3. – С. 16–20.
4. Кравец, В. В. Аэродинамика частично перекрытого межвагонного пространства скоростного поезда / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. імені акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2005. – Вып. 8. – С. 61–69.
5. Кравец, Е. В. Влияние типа обтекателя на аэродинамическое сопротивление межвагонного пространства скоростного поезда / Е. В. Кравец // Сб. науч. тр. Серия: «Механика» / Днепропетр. нац. ун-т. – Днепропетровск, 2006. – Вып. 10, т. 1, № 2/1. – С. 113–119.
6. Лазаренко, Ю. М. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении / Ю. М. Лазаренко, А. Н. Капускин // Вестн. ВНИИЖТа. – 2012. – № 4. – С. 11–14.
7. Ламб, Г. Гидродинамика / Г. Ламб. – Москва : ОГИЗ, 1947. – 929 с.
8. Сагомоян, А. Я. Проникание / А. Я. Сагомоян. – Москва : МГУ, 1974. – 299 с.
9. Сюзюмова, Е. М. Исследование воздушных потоков на пассажирской платформе при прохождении поезда / Е. М. Сюзюмова // Вестн. ВНИИЖТа. – 1973. – № 4. – С. 50–52.
10. A Study of the Slipstreams of High-Speed Passenger Trains and Freight Trains / M. Sterling, C. J. Baker, S. C. Jordon, T. Johnson // Proc. of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. – 2008. – Vol. 222. – Iss. 1. – P. 177–193. doi: 10.1243/0954409-7jrrt133.
11. Baker, C. J. Keynote lecture – The flow around high speed trains / C. J. Baker // Proc. of the BVAA VI conference. – Milano, Italy, 2008. – P. 34.
12. Baker, C. The flow around high speed trains / C. Baker // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2010. – Vol. 98. – Iss. 6–7. – P. 277–298. doi: 10.1016/j.jweia.2009.11.002.
13. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform / A. Khayrullina, B. Blocken, W. Janssen, J. Straathof // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2015. – Vol. 139. – P. 100–110. doi: 10.1016/j.jweia.2015.01.019.
14. Diedrichs, B. Studies of Two Aerodynamic Effects on High-Speed Trains: Crosswind Stability and Discomforting Car Body Vibrations Inside Tunnels : Doctoral Thesis, comprehensive summary / Diedrichs Ben ; KTH, School of Engineering Sciences (SCI), Aeronautical and Vehicle Engineering, Railway Technology. – Stockholm : KTH, 2006. – 74 p.
15. Harvey, S. Lee. The Aerodynamic Effects of Passing Trains to Surrounding Objects and People. Final Report / S. Lee Harvey // April 2009. DOT-VNTSC-FRA-04-05. U.S. Department of Transportation Research and Special Programs Administration John A. Volpe National Transportation Systems Center. – Washington, DC, 2009. – P. 257.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

16. Holmes, S. Aerodynamic Effects of High-Speed Passenger Trains on Other Trains. Final Report / S. Holmes, M. Schroeder // DOT-VNTSC-FRA-01-05. U.S. Department of Transportation Research and Special Programs Administration John A. Volpe National Transportation Systems Center (September 2000–March 2001). – Washington, DC, 2001. – P. 72.
17. Jordon, S. C. Modelling the response of a standing person to the Slipstream generated by a passenger train / S. C. Jordon, M. Sterling, C. J. Baker // Proc. of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. – 2010. – Vol. 223. – Iss. 6. – P. 567–579. doi: 10.1243/0954-4097jrrt281.
18. Kaplunov, S. The calculation of vortex shedding flowpast of fixed and oscillating bodies / S. Kaplunov, N. Valies, A. Samolysov // Parallel and Distributed Computing Systems : Intern. Conf. PDCS (13.03–14.03.2013). – Kharkiv, Ukraine, 2013. – P. 146–151.
19. MacNeill, R. A. Measurement of the aerodynamic pressures produced by passing trains / R. A. MacNeill, S. Holmes, S. Lee Harvey // Proc. of the ASME/IEEE 2002 Joint Rail Conference (23.04–25.04.2002). – Washington, DC, USA, 2002. – P. 57–64. doi: 10.1115/rtd2002-1643.
20. Raghunathan, R. S. Aerodynamics of high-speed railway train / R. S. Raghunathan, H.-D. Kim, T. Setoguchi // Progress in Aerospace Sciences. – 2002. – Vol. 38. – Iss. 6–7. – P. 469–514. doi: 10.1016/s0376-0421(02)00029-5.
21. Tarada, F. Aerodynamic loading of trains passing through tunnels / F. Tarada, Anton F. W. van Himbergen, I. Stieltjes // Railway Engineering Conference (20.06–21.06.2007). – London, UK, 2007. – P. 1–9.
22. The slipstream and wake of a high speed train / C. J. Baker, S. J. Dalley, T. Johnson [et al.] // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. – 2001. – Vol. 215. – Iss. 2. – P. 83–99. doi: 10.1243/0954409011531422.

С. Т. ДЖАББАРОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Будівництво залізниць, колія та колійне господарство», Ташкентський інститут інженерів залізничного транспорту, вул. Адилходжаєва, 1, Ташкент, Узбекистан, 100167, тел. +99 (890) 185 29 34, ел. пошта _saidhon_@inbox.ru, ORCID 0000-0002-3798-407X

ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ТИСКУ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ПОЇЗДА

Мета. У науковій роботі необхідно провести дослідження аеродинамічного тиску та розподілу поля швидкостей повітряних потоків уздовж рухомого високошвидкісного поїзда. **Методика.** Дослідження розподілу поля швидкостей навколо рухомого високошвидкісного поїзда зроблено методом імітації його руху як осесиметричного тіла з формою головної та хвостової частин у вигляді оживало в стискуваному (акустичному) середовищі. **Результати.** Визначено значення абсолютної швидкості (теоретичної) повітряного потоку, утвореного рухом тіла (у випадку, коли тіло рухається з постійною швидкістю (200, 250, 350, 400 км/год) на деякій висоті від поверхні землі), для точок, які знаходяться на різній відстані від осі рухомого тіла (швидкісного поїзда). За результатами розрахунків побудовані графіки зміни швидкості повітряного потоку в акустичному середовищі уздовж тіла, що рухається на різній відстані від нього. Використовуючи закон Бернуллі (залежності зміни тиску від швидкості потоку), визначені значення надлишкового тиску, що утворюється повітряним потоком від рухомого тіла. **Наукова новизна.** Вперше теоретичні дослідження аеродинаміки високошвидкісного поїзда проведено на прикладі осесиметричного тіла з формою головної та хвостової частин у вигляді оживало в стискуваному (акустичному) середовищі, що рухається зі сталою швидкістю. Результати досліджень дозволяють встановити розподіл надлишкового тиску повітряного потоку, утвореного уздовж рухомого високошвидкісного поїзда. **Практична значимість.** Отримані автором результати дозволяють встановити: 1) вимоги до фізико-механічних та міцнісних характеристик окремих елементів об'єктів інфраструктури залізниць на дільницях обертання високошвидкісних поїздів, схильних до аеродинамічному тиску; 2) безпечну мінімальну відстань знаходження людей від колій при проходженні високошвидкісного поїзда.

Ключові слова: залізничний транспорт; рух високошвидкісних поїздів; аеродинаміка; повітряний потік; поля швидкостей; аеродинамічний тиск; зона безпеки

S. T. DJABBAROV^{1*}

^{1*}Dep. «Construction of Railways, Track and Track Facilities», Tashkent Institute of Railway Transport Engineers, Adylkhodzhayev St., 1, Tashkent, Uzbekistan, 100167, tel. +99 (890) 185 29 34, e-mail _saidhon_@inbox.ru, ORCID 0000-0002-3798-407X

INVESTIGATION OF AERODYNAMIC PRESSURE DURING THE HIGH-SPEED TRAIN PASSAGE

Purpose. The scientific paper highlights research of aerodynamic pressure and distribution of airflow velocity field along the moving high-speed train. **Methodology.** The study of velocity field distribution around the moving high-speed train is produced by simulating its movement as axially symmetric body with the ogive-shaped head and tail parts in compressible (acoustic) environment. **Findings.** The values of the absolute velocity (theoretical) of air flow generated by the body movement is determined (for the case when the body moves at a constant speed (200, 250, 350, 400 km / h) at a certain height from the ground), for the points located at different distances from the axis of the moving body (high-speed train). The calculations results allowed building the graphs of the air flow velocity in the acoustic environment along the moving body at different distances from it. Using the Bernoulli law (pressure change dependences on the flow velocity), the values of the overpressure generated by the air stream from the moving body were determined. **Originality.** This is the first theoretical study of the aerodynamics of the high-speed train as axially symmetric body with the ogive-shaped head and tail parts in compressible (acoustic) environment, moving with steady speed. The research results allow us to establish the distribution of the excess air flow pressure generated along the moving high-speed train. **Practical value.** The obtained results allows determining of the following parameters: 1) requirements for physical-mechanical and strength characteristics of the individual elements of the railway infrastructure in the areas of high-speed train movement, subject to aerodynamic pressure; 2) minimum distance from the track safe for people location during high-speed train passage.

Keywords: railway transport; movement of high-speed trains; aerodynamics; air flow; velocity field; aerodynamic pressure; safety zone

REFERENCES

1. Dzhabbarov S.T. Dvizheniye tonkogo osesimmetricheskogo tela v poluprostranstve, zanyatom szhimayemym gazom [Movement of thin axially symmetric body in the half-space occupied by compressible gas]. *Problemy mekhaniki – Problems of Mechanics*, 2016, issue 1, pp. 12-17.
2. Kravets V.V., Kravets Ye.V. Aerodinamika vysokoskorostnykh poyezdov. Chast 1 [The aerodynamics of high-speed trains. Part 1]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2005, no. 2, pp. 52-57.
3. Kravets V.V., Kravets Ye.V. Aerodinamika vysokoskorostnykh poyezdov. Chast 2 [The aerodynamics of high-speed trains. Part 2]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2005, no. 3, pp. 16-20.
4. Kravets V.V., Kravets Ye.V. Aerodinamika chastichno perekrytogo mezhvagonnogo prostranstva skorostnogo poyezda [Aerodynamics of partially overlapped intercarload space in high-speed trains]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2005, issue 8, pp.61-69.
5. Kravets Ye.V. Vliyaniye tipa obtekatelya na aerodinamicheskoye soprotivleniye mezhvagonnogo prostranstva skorostnogo poezda [Influence of the fairing type on the aerodynamic drag of inter-car space in the high-speed train]. *Sbornik nauchnykh trudov Seriya: «Mekhanika»* [Proc. Series: «Mechanics»]. Dnepropetrovsk, 2006, issue 10, vol. 1, no. 2/1, pp. 113-119.
6. Lazarenko Yu.M., Kapuskin A.N. Aerodinamicheskoye vozdeystviye vysokoskorostnogo elektropoyezda «Sapsan» na passazhirov na platformakh i na vstrechnyye poyezda pri skreshchenii [Aerodynamic effects of the high-speed electric train «Sapsan» on the passengers at platforms and oncoming trains at crossing]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of All-Russian Research Institute of Railway Transport*, 2012, issue 4, pp.11-14.
7. Lamb G. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. Moscow, OGIZ Publ., 1947. 929 p.
8. Sagomonyan A.Ya. *Pronikaniye* [Penetration]. Moscow, MSU Publ., 1974. 299 p.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

9. Syuzumova Ye.M. Issledovaniye vozdushnykh potokov na passazhirskey platforme pri prokhozhenii poyezda [The study of air flows on the passenger platform when the train passes]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of All-Russian Research Institute of Railway Transport*, 1973, no. 4, pp. 50-52.
10. Sterling M., Baker C.J., Jordon S.C., Johnson T. A Study of the Slipstreams of High-Speed Passenger Trains and Freight Trains. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2008, vol. 222, issue 1, pp. 177-193. doi: 10.1243/09544097jrtr133.
11. Baker C.J. Keynote lecture – The flow around high speed trains. Proc. of the BBAA VI conference. Milano, Italy, 2008. p. 34.
12. Baker C. The flow around high speed trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, vol. 98, issue 6-7, pp. 277-298. doi: 10.1016/j.jweia.2009.11.002.
13. Khayrullina A., Blocken B., Janssen W., Straathof J. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, vol. 139, pp. 100-110. doi: 10.1016/j.jweia.2015.01.019.
14. Diedrichs B. Studies of Two Aerodynamic Effects on High-Speed Trains: Crosswind Stability and Discomforting Car Body Vibrations inside Tunnels: Doctoral Thesis, comprehensive summary. KTH, School of Engineering Sciences (SCI), Aeronautical and Vehicle Engineering, Railway Technology. Stockholm, KTH Publ., 2006. 74 p.
15. Harvey S. Lee. The Aerodynamic Effects of Passing Trains to Surrounding Objects and People. Final Report. April 2009. DOT-VNTSC-FRA-04-05. U.S. Department of Transportation Research and Special Programs Administration John A. Volpe National Transportation Systems Center. Washington, DC, 2009. p. 257.
16. Holmes S., Schroeder M. Aerodynamic Effects of High-Speed Passenger Trains on Other Trains. Final Report. DOT-VNTSC-FRA-01-05. U.S. Department of Transportation Research and Special Programs Administration John A. Volpe National Transportation Systems Center (September 2000–March 2001). Washington, DC, 2001. p. 72.
17. Jordon S.C., Sterling M., Baker C.J. Modelling the response of a standing person to the Slipstream generated by a passenger train. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2010, vol. 223, issue 6, pp. 567-579. doi: 10.1243/09544097jrtr281.
18. Kaplunov S., Valies N., Samolysov A. The calculation of vortex shedding flowpast of fixed and oscillating bodies. Parallel and Distributed Computing Systems: Intern. Conf. PDCS (13.03–14.03.2013). Kharkiv, Ukraine, 2013, pp. 146-151.
19. MacNeill R.A., Holmes S., Harvey S. Lee. Measurement of the aerodynamic pressures produced by passing trains. Proc. of the ASME/IEEE 2002 Joint Rail Conference (23.04–25.04.2002). Washington, DC, USA, 2002, pp. 57-64. doi: 10.1115/rtd2002-1643.
20. Raghunathan R.S., Kim H.-D., Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace Sciences*, 2002, vol. 38, issue 6-7, pp. 469-514. doi: 10.1016/s0376-0421(02)00029-5.
21. Tarada F., Anton van Himbergen F. W., Stieltjes I. Aerodynamic loading of trains passing through tunnels. Railway Engineering Conference (20.06–21.06.2007). London, UK, 2007, pp. 1-9.
22. Baker C.J., Dalley S.J., Johnson T., Quinn A., Wright N.G. The slipstream and wake of a high speed train. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2001, vol. 215, issue 2, pp. 83-99. doi: 10.1243/0954409011531422.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Н. Б. Курганом (Украина); д.т.н., проф. Ш. С. Файзибаевым (Узбекистан)

Поступила в редколлегию: 23.05.2016

Принята к печати: 15.09.2016

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК [625.14-047.58]:629.4.016.5

Д. М. КУРГАН^{1*}

^{1*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ ХВИЛЬОВОЇ МОДЕЛІ ПОШИРЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У ЗАЛІЗНИЧНІЙ КОЛІЇ

Мета. В сучасних наукових дослідженнях неодноразово наводились практичні приклади виникнення динамічних ефектів роботи залізничної колії, які виходять за межі статичних розрахункових схем. Особливої актуальності такі питання набувають на ділянках, де швидкість руху поїздів наближається до швидкостей розповсюдження хвиль у шарах підрейкової основи. Адекватним інструментом для вивчення таких питань може бути застосування хвильової теорії поширення напружень. Метою цієї роботи є створення математичного опису основних принципів хвильової моделі поширення напружень у залізничній колії, які можуть бути використані як основа для практичних розробок відповідних розрахункових систем. **Методика.** Модель напружено-деформованого стану залізничної колії на основі хвильової теорії поширення напружень полягає в поєднанні рівнянь геометрії обрису частини простору системи, що залучена до взаємодії на дану мить часу, і рівнянь динамічної рівноваги її деформації. Розв'язання задачі базується на використанні законів теорії пружності. Фронт хвилі описується рівняннями еліпсоїда. При визначенні зміни в часі положення поверхні еліпсоїда застосовується векторний підхід. **Результати.** Рівняння геометрії руху хвилі визначають обсяги речовини шарів підрейкової основи, які беруть участь у взаємодії на дану мить. Визначення динамічної рівноваги деформованого стану простору, обмеженого фронтом хвилі, дає змогу розрахувати як самі напруження й деформації, так і їх зміну за час сприйняття навантаження. Таким чином, у роботі отримані математичні описи процесів, що мають місце при сприйнятті навантаження елементами залізничної колії при високих швидкостях руху. **Наукова новизна.** Набули подальший розвиток задачі моделювання взаємодії колії та рухомого складу, зокрема, з урахуванням динамічного прогину підрейкової основи. Вперше подані основи математичного опису хвильової моделі поширення напружень у залізничній колії, які можуть бути використані для виконання практичних розрахунків. **Практична значимість.** Отримані автором дані можуть бути використані для обґрунтування конструкції колії або встановлення відповідних значень допустимих швидкостей для впровадження руху поїздів із високими швидкостями.

Ключові слова: залізнична колія; взаємодія колії та рухомого складу; хвильова модель; високошвидкісний рух; теорія пружності

Вступ

Збільшення значень швидкості руху поїздів є одним із напрямків розвитку залізничного транспорту України [7, 9, 10]. Вирішення таких завдань вимагає не тільки відповідних технічних засобів, а й методично-розрахункових. Багато моделей та методик, що використовуються для аналізу напружено-деформованого стану залізничної колії, базуються на допущеннях і гіпотезах, адекватних тільки для певних рівнів швидкості руху. Так межі застосування має припущення щодо тотожності статичного і динамічного прогину колії (гіпотеза Н. П. Петрова), припущення щодо миттєвого залучення до

взаємодії всіх шарів підрейкової основи тощо. При достатньо високих значеннях швидкості руху виникають ефекти, для опису яких потрібно враховувати динаміку прогину рейкової колії.

В сучасних наукових дослідженнях неодноразово наводились практичні приклади виникнення динамічних ефектів роботи залізничної колії, які виходять за межі статичних розрахункових схем. Особливо актуальними такі питання є на ділянках, де швидкість руху поїздів наближається до значення швидкості поширення хвиль в шарах підрейкової основи.

Так, на ділянці залізниці, що проходить по набережній Стілтон у Великобританії, фіксувалась різка зміна прогинів колії на швидкості

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

180 км/год. Пояснення знайшли у наявності під баластом м'яких ґрунтів, а саме торфу та мулистої глини [21].

У Голландії на ділянці між Амстердамом і Утрехтом виконувались тести з вимірювання значень швидкості поширення хвиль в ґрунті для можливості проходження французького поїзда TGV зі швидкостями більше ніж 160 км/год на ділянках з насипами, що склалися із слабких ґрунтів [21].

На південному заході Швеції на ділянці Гетеборг–Мальме швидкість швидкісного поїзда X2000 була обмежена до 160 км/год через хвильові явища в ґрунті [18].

Питання щодо появи запізнювання прогину рейки при високих значеннях швидкості руху порушувалися в роботі австрійських авторів [1], де, крім теоретичних міркувань, наведені результати експериментальних підтверджень відповідних ефектів на дослідних ділянках біля Відня при значеннях швидкості руху більше ніж 230 км/год.

Ті чи інші засоби врахування динаміки прогину залізничної колії зустрічаються під час вирішення різноманітних задач. Як правило, вони носять характер корегування вже існуючих методів розрахунку. Наприклад, в роботі [15] наводиться розгорнутий аналіз поширення напружень в баласті з урахуванням динамічних явищ через коефіцієнти, також роботу баласту досліджено в роботі [13]. В роботах [12, 16] розглянуто використання георешіток для збільшення модуля пружності підрейкової основи і зменшення вібрацій. В роботі [20] запропоновано моделювання поширення хвиль в ґрунті залізничної колії в комп'ютерній системі PLAXIS (finite element method). В роботах [17, 19] розглянуто вібрації в ґрунті та стійкість насипу залежно від профілю земляного полотна. В роботі [11] обґрунтовано розрахункову методику визначення критичних значень хвиль Релея для залізничної колії.

Аналіз вказаних вище та інших досліджень показав, що важливим фактором при вирішенні поставлених питань є динамічна рівновага системи саме для відокремленого простору підрейкової основи, який вступив у взаємодію на дану мить часу. Адекватним інструментом для цього може бути застосування хвильової теорії поширення напружень.

Мета

Метою цієї роботи є створення математичного опису основних принципів хвильової моделі поширення напружень в залізничній колії, який може бути використаний як основа для практичних розробок відповідних розрахункових систем.

Методика

Модель напружено-деформованого стану залізничної колії на основі хвильової теорії поширення напружень полягає в поєднанні рівнянь геометрії обрисову частини простору системи, що залучена до взаємодії на дану мить часу, і рівнянь динамічної рівноваги її деформації.

Для отримання первинних загальних положень рівнянь поширення напружень в товщі матеріалу приймемо низку положень: розглядається тривимірний простір у декартовій системі координат; сила до об'єкта прикладається в точці, яка співпадає з початком координат; напрямок дії сили співпадає з віссю «у», а поверхня об'єкта, на якій розташована точка прикладання сили, лежить в площині «xz»; простору, який вступив у взаємодію з силою на мить t , відповідає множина точок, обмежена поверхнею – фронт хвилі, яку можна описати рівняннями еліпсоїда, рис. 1.

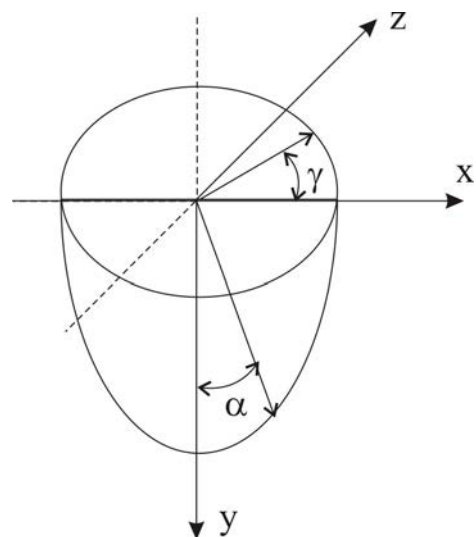


Рис. 1. Поверхня фронту хвилі у прийнятій системі координат

Fig. 1. The surface of the wave front in the adopted coordinate system

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Тоді положення точок, які належать поверхні еліпсоїда, будуть підпорядковані рівнянню

$$\begin{cases} \frac{y^2}{C_t^2 t^2} + \frac{x^2}{C_l^2 t^2} = 1; \\ \frac{x^2 + z^2}{C_t^2 t^2} = 1, \end{cases} \quad (1)$$

де C_t , C_l – поперечна та поздовжня швидкість поширення хвилі відповідно.

Значення швидкості поширення хвиль в речовині є параметрами, які залежать від її фізичних характеристик і можуть бути визначені за формулами

$$\left. \begin{aligned} C_l &= \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}; \\ C_t &= \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де E – модуль пружності Юнга; μ – коефіцієнт Пуассона; ρ – щільність речовини.

Геометричне положення точок еліпсоїда будемо знаходити у векторному вигляді, рис. 2. Довжина вектора за напрямком α з формули (1) буде визначатися як

$$v = tC_\alpha, \quad (3)$$

де C_α – швидкість поширення хвилі за напрямком α

$$C_\alpha = \frac{C_l C_t}{\sqrt{C_t^2 - C_t^2 \sin^2 \alpha + C_l^2 \sin^2 \alpha}}. \quad (4)$$

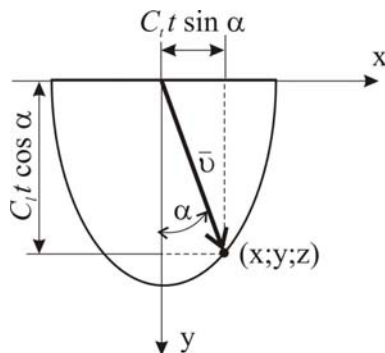


Рис. 2. Вектор для визначення геометричного місця точки на поверхні еліпса

Fig. 2. The vector for determining the point locus on the surface of the ellipse

Векторний підхід можна застосовувати при визначенні положення поверхні еліпсоїда для моменту часу t_2 відносно попереднього кроку розрахунку для часу t_1 , рис. 3.

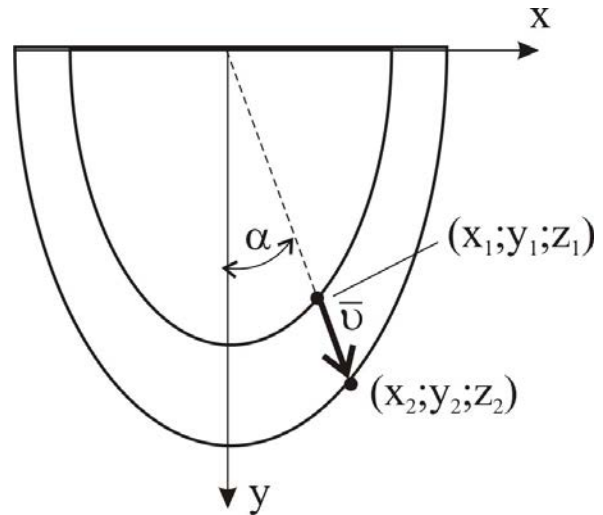


Рис. 3. Вектор розширення еліпсоїда на кроці Δt

Fig. 3. Vector of ellipsoid expansion on step Δt

Тоді вектор буде визначати розширення еліпсоїда у заданому напрямку $(\alpha; \gamma)$: $\vec{v} = (x_2; y_2; z_2) - (x_1; y_1; z_1)$, а координати кінця вектора будуть підпорядковані виразу

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_1 + \Delta x; y_2 = y_1 + \Delta y; z_2 = z_1 + \Delta z; \\ \Delta x &= r \cos \gamma; \Delta z = r \sin \gamma; \\ \Delta y &= v \cos \alpha; r = \sqrt{v^2 - \Delta y^2}; \\ v &= \Delta t C_\alpha; \\ \Delta t &= t_2 - t_1; \\ \alpha &\in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]; \gamma \in [0; 2\pi]. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для загального випадку, коли точка прикладання і напрямок дії сили може бути вільним, для кожної точки виконується перетворення координат з урахуванням зміщення та повороту системи виміру.

Приклад еліпсоїдної поверхні, побудованої за викладеною методикою, для одного кроку розрахунку наведено на рис. 4 (для візуального сприйняття задано великі значення часового та кутових кроків розрахунку).

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

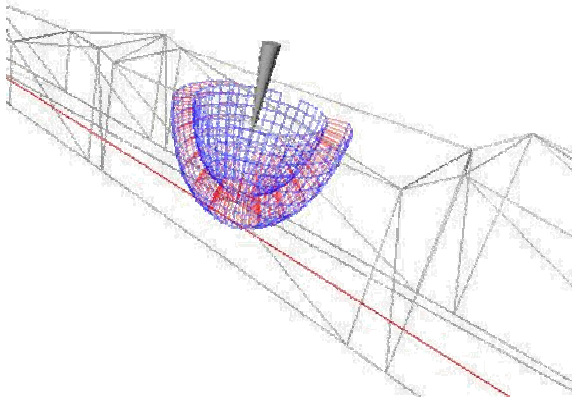


Рис. 4. Приклад побудови поверхні еліпсоїда

Fig. 4. Example of the ellipsoid surface construction

Визначимо рівняння динамічної рівноваги напруженого стану об'єкта. Для спрощення викладок розглянемо розрахунок напружень в одномірній системі координат – в стержні, як в об'єкті найпростішої форми. Крім того, така форма дає змогу розглядати тільки позадвжне поширення пружної хвилі, вважаючи, що у тонкому стержні поперечною складовою можна нехтувати. За основу взята методика, описана Г. Кольським [5].

По довжині стержня визначимо елемент елементарної довжини δx , рис. 5.

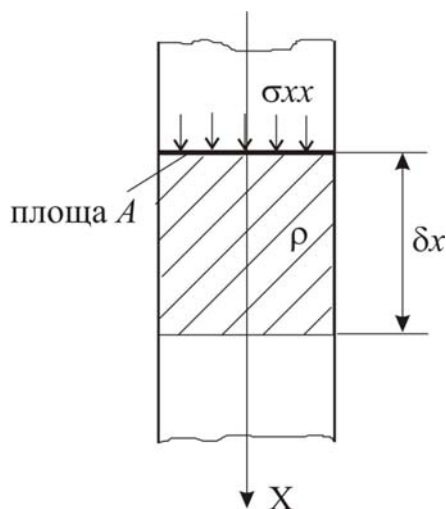


Рис. 5. Розрахунковий елемент по довжині стержня

Fig. 5. Calculable element at grip length

Розв'язання задачі базується на використанні законів теорії пружності [8]. На стінку елемента діють рівномірно розподілені напружен-

ня σ_{xx} . Стінка має площу A . Тоді напруження, які виникнуть на протилежній стінці елемента при проходженні по ньому пружної хвилі

$$\delta_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \delta x, \quad (6)$$

де $\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}$ – зміна напружень по довжині елемента.

Відповідно до другого закону Ньютона, виразивши масу через об'єм і щільність, можна записати рівняння

$$\rho A \delta x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = A \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \delta x, \quad (7)$$

де u – абсолютна деформація елемента.

Після вилучення із сторін рівняння однакових величин формула (7) набуде вигляду

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}. \quad (8)$$

Напруження можна виразити через модуль пружності E

$$\sigma_{xx} = E \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (9)$$

де $\frac{\partial u}{\partial x}$ – відносна деформація елемента.

Підставивши формулу (9) до формули (8), отримаємо рівняння поширення хвиль по вздовж стержня

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (10)$$

Таким чином, формули (1–5) дають геометрію поширення хвилі напружень, яка відокремлює простір, що бере участь у взаємодії з прикладеною силою, а формули (6–10) встановлюють динамічну рівновагу цього процесу.

Результати

Для розрахунків напружень в тілі вільного об'єкта розглянемо рух хвилі з кроком Δt . На кожному кроці будемо мати еліпсоїдну поверхню – фронт хвилі відповідно до значень позадвжної і поперечної швидкості руху з урахуванням геометричної форми об'єкта

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

$$(x; y; z) \in \Omega, \quad (11)$$

де Ω – множина точок, які належать даному об'єкту.

Порушення умови (11) при розв'язанні рівнянь (5) буде показувати перехід хвилі до наступного об'єкта (або вихід у повітря), що потребуватиме зміни характеристик розповсюдження відповідно до фізичних властивостей нового об'єкта.

Будемо поділяти об'єкт на сегменти, обмежені еліпсоїдними поверхнями суміжних кроків руху хвилі. Перехід від однієї еліпсоїдної поверхні до наступної відбувається через множини векторів.

Розглянемо i -й сегмент, обмежений двома сферичними поверхнями, рис. 6. Введемо низку позначень: σ_{i-1} , σ_i – напруження, що діють на попередню і наступну стінку сегмента; S_{i-1} і S_i – площа попередньої і наступної стінки сегмента відповідно; u_i – амплітуда коливань часток речовини об'єкта в межах сегмента; m_i – маса сегмента, визначається виходячи з об'єму, обмеженого сферами, і щільності речовини; Δy – відстань між стінками сегмента по осі дії сили.

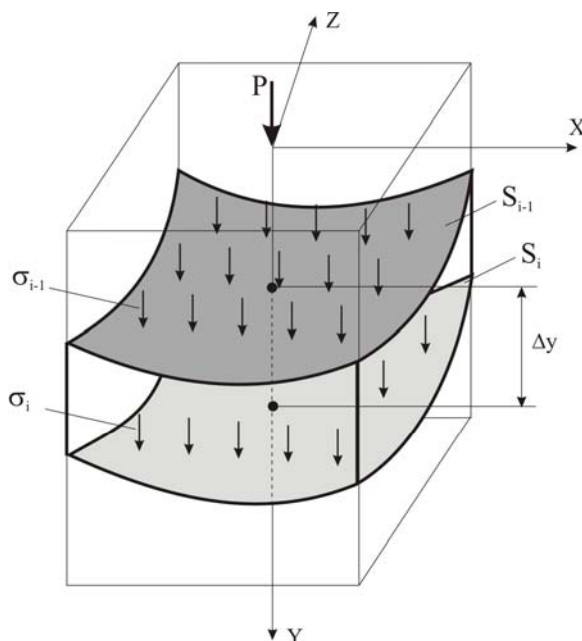


Рис. 6. Поділення об'єкта на сегменти, як простори між суміжними обрисами фронтів хвилі

Fig. 6. Object segmenting as the spaces between adjacent outlines of the wave fronts

Такі показники, як маса, площі, відстані визначаються виходячи з геометрії поширення хвиль, тому будемо вважати їх відомими. Тоді аналогічно до формули (7)

$$m_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} = \sigma_{i-1} S_{i-1} - \sigma_i S_i. \quad (12)$$

Ця формула показує, що різниця потенціалів напружень на суміжних стінках сегмента урівноважується коливаннями маси часток речовини з прискоренням.

Напруження, що входять у формулу (12), не є постійними по всій площі стінки (на відміну від стержня на рис. 5), а тому потрібно визначити закон розподілу напружень по поверхні еліпсоїда. В різних секторах еліпсоїда будуть виникати різні напруження. Під напруженнями σ_α будемо мати на увазі такі, що діють за напрямком α по горизонтальній площадці, рис. 7. Поодиноким випадком є напруження σ_0 , напрямком яких співпадає з напрямком дії прикладеного навантаження.

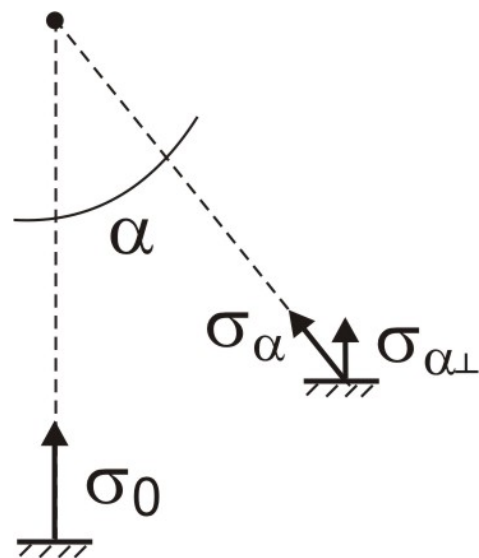


Рис. 7. Напруження, які діють за напрямком α по горизонтальній площадці

Fig. 7. Stresses acting in the direction α on the horizontal platform

Для подальших дій потрібно мати функцію приведення напружень для будь-якого місця сегмента до напружень, які співпадають з напрямком дії сили (σ_0), рис. 8.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

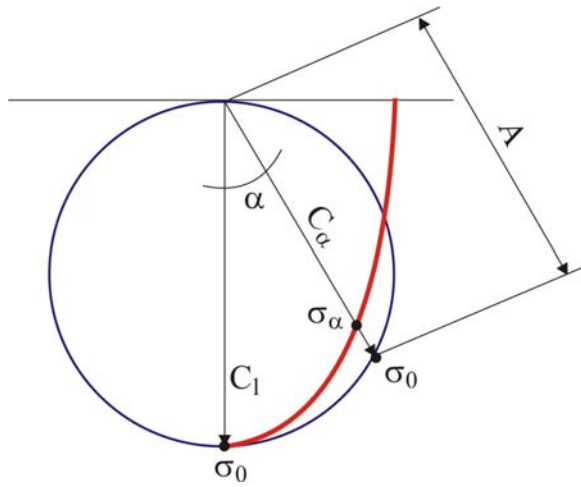


Рис. 8. Визначення функції розподілу напружень по обрису еліпсоїда

Fig. 8. Determination of the stress distribution function on the ellipsoid outlines

Виходячи з положень розв'язання задачі Буссинеску [8] відповідно до рис. 8 можна записати

$$\left. \begin{aligned} \sigma_0 &= \frac{k}{A^2}; \\ A &= C_1 t \cos \alpha; \\ \sigma_\alpha &= \frac{k}{C_\alpha^2 t^2} \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

де k – допоміжний коефіцієнт пропорційності.

Посадивши вирази (13), можна отримати залежність

$$\sigma_\alpha = \sigma_0 \frac{C_1^2 \cos^2 \alpha}{C_\alpha^2}, \quad (14)$$

яка (при постійних значеннях швидкості розповсюдження) не залежить від параметра часу.

Виразимо швидкість за одним напрямком через іншу

$$C_t = \varphi C_l. \quad (15)$$

Тоді, виходячи з (2)

$$\varphi = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}}. \quad (16)$$

В остаточному вигляді формулу (14) можна записати у вигляді

$$\sigma_\alpha = \sigma_0 \xi \cos^2 \alpha, \quad (17)$$

де

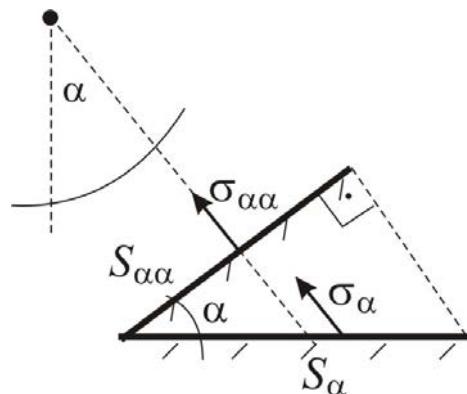
$$\xi = \frac{\varphi^2 - \varphi^2 \sin^2 \alpha + \sin^2 \alpha}{\varphi^2}. \quad (18)$$

Таким чином, функцію розподілу напружень по поверхні еліпса отримано у вигляді рівняння (17), а її числові значення залежать тільки від виду речовини (через коефіцієнт Пуассона).

Визначаючи напруження, крім їх значень, необхідно чітко вказувати напрямок дії і положення площадки (для напружень в точці – умовної), по якій вони діють. Для більшості задач напружено-деформованого стану залізничної колії, коли йде мова про напруження на якійсь глибині, маються на увазі нормальні напруження, що діють по горизонтальній площадці. Тому для подальших обчислень необхідно навести співвідношення між різними видами напружень.

При виконанні практичних розрахунків простір кожного сегмента буде поділено на окремі елементи відповідно до кутових кроків (див. вираз (5)). Кожен елемент буде визначатися як простір, обмежений чотирма суміжними векторами. За геометрією векторів визначаються такі параметри елемента, як кут нахилу, площа стінки, на яку діють напруження, об'єм тощо.

Розглянемо напруження, що діють в елементі сегмента на умовній площадці, перпендикулярній до напрямку α , рис. 9.

Рис. 9. Напруження, які діють за напрямком α по різних площадкахFig. 9. Stresses acting in the direction α on different platforms

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Виходячи із збереження потенціалу дії напружень

$$\sigma_{\alpha\alpha} S_{\alpha\alpha} = \sigma_{\alpha} S_{\alpha}, \quad (19)$$

де $\sigma_{\alpha\alpha}$, S_{α} , $S_{\alpha\alpha}$ – напруження і площини, наведені на рис. 9.

Тоді, враховуючи, що $S_{\alpha} = \frac{S_{\alpha\alpha}}{\cos \alpha}$, маємо

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\alpha\alpha} \cos \alpha. \quad (20)$$

Розташування елементів в сегменті відбувається по обрису двовісного еліпса, тому, на відміну від розташування по колу (див. рис. 8), площадка $S_{\alpha\alpha}$, розташована під кутом α до площадки S_{α} , не є перпендикулярною до напрямку α . Потрібна для розрахунків площадка, яка б була перпендикулярна до напрямку α , буде повернута відносно горизонтального положення на кут β , рис. 10.

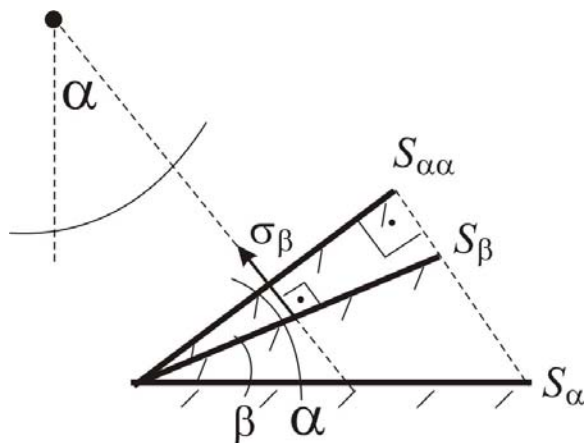


Рис. 10. Співвідношення потенціалів в елементі на площадках різного розташування

Fig. 10. Potential correlation in the element on the platforms of different locations

Співвідношення між площами площадок (з рис. 10)

$$\left. \begin{aligned} S_{\alpha\alpha} &= S_{\beta} \cos(\alpha - \beta); \\ S_{\alpha} &= S_{\beta} \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Використовуючи наведені співвідношення і формулу (17), можна записати

$$\sigma_{\beta} = \sigma_0 \xi \cos(\alpha - \beta) \cos \alpha, \quad (22)$$

де σ_{β} – повні напруження за напрямком α , які діють на стінку, повернуту на кут β відносно горизонтального положення. Саме потенціал цих напружень у вигляді проекції на вертикальну вісь можна розглядати як реакцію, що урівноважує дію прикладеної сили.

Тоді загальний потенціал по еліпсоїдній поверхні, що входить до формули (12), можна записати у вигляді

$$\sigma_i S_i = \sum_{\alpha} \sigma_0 S_{\beta} \xi \cos(\alpha - \beta) \cos^2 \alpha. \quad (23)$$

Динамічну рівновагу простору, який деформується між суміжними обрисами фронтів хвилі, описує рівняння (12). Потенціал по поверхні сегмента буде визначатися як сума потенціалів по кожному елементу, направлених на компенсацію дії прикладеної сили, рис. 11.

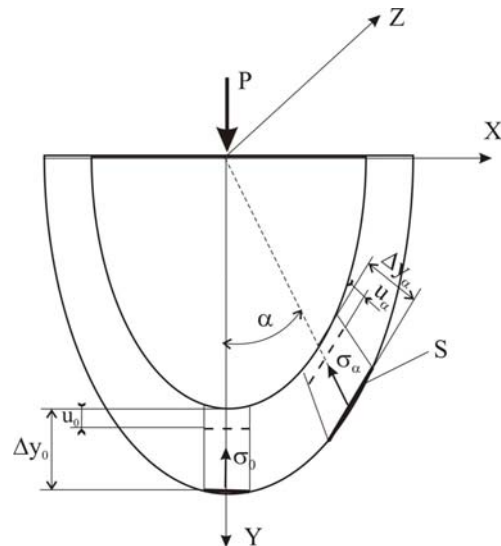


Рис. 11. Дія напружень на окремий сегмент сферичного елемента

Fig. 11. Effects of stress on separate segment of the spherical element

Тоді поєднання формул (12) і (23) дає основне рівняння динамічної рівноваги сегмента

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \sigma_{0i}}{dt^2} \sum_{\alpha} \frac{m_{\alpha} \xi_{\alpha} \Delta y_{\alpha} \cos^4 \alpha}{E_{\alpha}} &= \\ &= \sigma_{0(i-1)} \sum_{\alpha} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) - \\ &- \sigma_{0i} \sum_{\alpha} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) + D \frac{d \sigma_{0i}}{dt}, \quad (24) \end{aligned}$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

де D – врахування дисипації речовини, в цьому випадку цей параметр унеможливає виникнення швидких деформацій (течі речовини).

Для об'єкта в цілому складається система з рівнянь (24), кількість рівнянь буде відповідати кількості сегментів, на які поділяється об'єкт. З кожним кроком додається ще одна поверхня і одне рівняння.

Результатом розв'язання такої системи рівнянь будуть значення напружень σ_{0i} для кожного сегмента об'єкта (системи об'єктів) на розрахункову мить часу. Це дає можливість, використовуючи встановлені вище залежності, визначити необхідні характеристики напружено-деформованого стану.

Вертикальні (нормальні) напруження, що діють по горизонтальній площадці (див. рис. 7)

$$\sigma_{\alpha\perp} = \sigma_0 \xi \cos^3 \alpha. \quad (25)$$

Вертикальна абсолютна деформація

$$u_\alpha = \frac{\sigma_0 \xi \Delta y_\alpha \cos^4 \alpha}{E_\alpha}, \quad (26)$$

де Δy_α – висота сегмента за напрямком α (див. рис. 11).

Наведена методика описує коливання стиснення-розтягування і призначена для опису роботи об'єктів підрейкової основи (шпали, баласт, земляне полотно тощо). Рейка має незначні розміри поперечного перерізу порівняно з довжиною і опирається на основу, що має суттєво меншу жорсткість порівняно з її власною. Такий випадок більш адекватно будуть описувати повздовжні коливання вигину балки.

За основу візьмемо методику опису коливань балки при проходженні повздовжньої хвилі [5].

Розрахункова сема наведена на рис. 12 для елемента балки довжиною $\delta x \rightarrow 0$. Балка вигинається під дією згинаючого моменту M , який змінюється по її довжині. Згинаючий момент повинен урівноважуватися поперечною силою F , яка теж змінюється по довжині балки.

Рівняння руху балки по осі «у» буде мати вигляд

$$\rho A \delta x \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial F}{\partial x} \delta x, \quad (27)$$

де A – площа поперечного перерізу; y – переміщення.

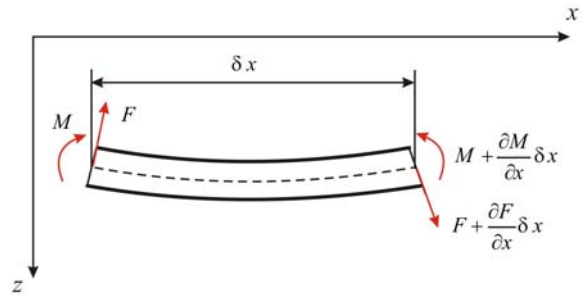


Рис. 12. Розрахункова схема вигину елемента балки

Fig. 12. Calculation scheme of beam element bending

Прийmemo умову, що

$$F = -\frac{\partial M}{\partial x} \delta x \rightarrow 0. \quad (28)$$

Тоді рівняння рівноваги моментів відносно середини елемента балки δx буде мати вигляд

$$M - \left(M + \frac{\partial M}{\partial x} \delta x \right) + F \frac{\delta x}{2} + \left(F + \frac{\partial F}{\partial x} \delta x \right) \frac{\delta x}{2} = 0, \quad (29)$$

після скорочень

$$\frac{\partial M}{\partial x} \delta x + \left(2F + \frac{\partial F}{\partial x} \delta x \right) \frac{\delta x}{2} = 0. \quad (30)$$

Прийmemo такі умови

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{EI}{R} \\ \frac{1}{R} &= \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_{\partial y} \rightarrow 0 \end{aligned} \right\}, \quad (31)$$

де R – радіус кривизни нейтральної осі (класично балка подана як сукупність паралельних волокон, вище за нейтральну вісь вони розтягуються, а нижче – стискаються); EI – жорсткість балки.

Перетворимо (28), використовуючи (31)

$$F = -\frac{\partial M}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{EI}{R} \right) = -\frac{\partial^3 y}{\partial x^3} EI. \quad (32)$$

Виходячи з (27) і (32),

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}. \quad (33)$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Якщо врахувати, що балка знаходиться у просторі, який має модуль пружності U (рейка спирається на пружну основу) [3], рівняння (32) набуде вигляду

$$\rho A \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = -EI \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} - Uz. \quad (34)$$

Розв'язання цього диференційного рівняння будемо шукати у вигляді

$$y = f_1(x) f_2(t). \quad (35)$$

Тоді функції $f_1(x)$ і $f_2(t)$ повинні задовольняти умовам

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^4 f_1}{\partial x^4} &= C_1 f_1(x); \\ \frac{\partial^2 f_2}{\partial t^2} &= -\frac{EIC_1 + U}{A} f_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Функція $f_1(x)$ відображає статичний прогин балки по довжині і її розв'язання для рейки відомо [2, 4]

$$f_1(x) = B e^{-kx} (\cos kx + \sin kx), \quad (37)$$

де k – коефіцієнт відносної жорсткості;

$$B = \frac{Pk}{2U}. \quad (38)$$

Тоді, виходячи з (36),

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= -4k^4; \\ f_2(t) &= C_2 \sin pt + C_3 \cos pt; \\ p &= \sqrt{\frac{2U}{\rho A}}. \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

Коефіцієнти C_2 і C_3 можуть бути визначені виходячи з граничних умов, які, у тому числі, повинні враховувати дисперсію коливань по довжині балки [5]. Для практичних розрахунків розв'язки рівняння (35) будемо шукати із умови взаємного прогину рейки (y_p), яка опирається на опори, і прогину підрейкової основи в місцях опор ($y_{оп}$) від сил, що передаються на ці опори від рейки ($Q_{оп}$)

$$\left. \begin{aligned} y_p(x, t) &= y_{оп}(x, t); \\ y_{оп} &= f(Q_{оп}, t); \\ Q_{оп} &\sim \frac{d^4 y_p}{dx^4}. \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Прогин підрейкової основи визначається як сума деформацій сегментів всіх шарів за відповідними координатами, знайденими за розв'язками системи рівнянь (24).

Отримані рівняння і залежності було покладено в основу при створенні комп'ютерної програми для розрахунків за хвильовою моделлю поширення напружень в залізничній колії, яка була використана для розв'язання низки задач [6, 14].

Наукова новизна та практична значимість

Набули подальший розвиток задачі моделювання взаємодії колії і рухомого складу, зокрема з урахуванням динамічного прогину підрейкової основи.

Вперше подано основи математичного опису хвильової моделі поширення напружень в залізничній колії, які можуть бути використані для виконання практичних розрахунків.

Запропоновано теоретичні обґрунтування процесів, що мають місце при сприйнятті навантаження елементами залізничної колії при високих значеннях швидкості руху.

Отримані дані можуть бути використані для обґрунтування конструкції колії або встановлення відповідних допустимих значень швидкості для впровадження високошвидкісного руху.

Висновки

При високих значеннях швидкості руху, які наближаються до значень швидкості поширення хвиль в шарах підрейкової основи, виникають динамічні ефекти, які не можуть бути описані існуючими розрахунковими методами, що базуються на ототожненні динамічного і статичного прогину.

Для моделювання динаміки роботи рейкової колії важливим фактором є врахування обсягів речовини шарів підрейкової основи, які беруть

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

участь у взаємодії на дану мить. Адекватним інструментом для розв'язання цієї задачі є подання процесу поширення напружень як рух хвиль.

Тоді поєднання рівнянь геометрії обрису частини простору системи, що залучена до взаємодії на дану мить часу, і рівнянь динамічної рівноваги її деформації дає змогу створення моделі напружено-деформованого стану залізничної колії на основі хвильової теорії поширення напружень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Брандль, Х. Взаимодействие оснований и сооружений высокоскоростных железных дорог / Х. Брандль, А. Паульмишл // Развитие городов и геотехн. стр-во. – 2007. – № 11. – С. 157–164.
- Даніленко, Е. І. Залізнична колія / Е. І. Даніленко : підруч. для ВНЗ. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 2. – 456 с.
- Даніленко, Е. І. Новітні дослідження бічної пружності рейкових ниток при спільній дії вертикальних і горизонтальних сил / Е. І. Даніленко // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 65–77. doi : 10.15802/stp2015/57021.
- 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.
- Кольский, Г. Волны напряжения в твердых телах / Г. Кольский. – Москва : Иностран. лит., 1955. – 192 с.
- Курган, Д. Моделирование взаимодействия пути и подвижного состава с учетом времени прогиба подрельсового основания / Д. Курган // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. / Дальневост. гос. ун-т путей сообщ. – Хабаровск, 2015. – Вып. 3. – С. 167–175.
- Курган, Н. Б. Предпосылки создания высокоскоростных магистралей в Украине / Н. Б. Курган // Укр. залізниця. – 2015. – № 5–6. – С. 16–21.
- Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва : Наука, 1987. – 248 с.
- Транспортна стратегія України на період до 2020 року [Електронний ресурс] : схвалено розпорядж. Кабінету Міністрів України від 20 жовт. 2010 р. № 2174-р. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-%D1%80>. – Назва з екрана. – Перевірено : 15.09.2016.
- 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 : 15.09.2016.
- Connolly, D. P. Use of Conventional Site Investigation Parameters to Calculate Critical Velocity of Trains from Rayleigh Waves / D. P. Connolly, M. C. Forde // Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board. – 2015. – Vol. 2476. – P. 32–36. doi: <http://dx.doi.org/10.3141/2476-05>.
- 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). – С. 97–106. doi:10.15802/stp20-15/53169.
- Fisher, Sz. A vasúti zúzottkövek aprózódásvizsgálata egyedi laboratóriumi módszerrel / Sz. Fisher // Sínek Világa. – 2015. – № 57 (3). – P. 12–19.
- Kurhan, D. M. Features of perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement / D. M. Kurhan // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 2 (56). – С. 136–145. doi: 10.15802/stp20-15/42172.
- Mosayebi, S. Some Aspects of Support Stiffness Effects on Dynamic Ballasted Railway Tracks / S. Mosayebi, J. Zakeri, M. Esmaeili // Periodica Polytechnica Civil Engineering. – 2016. – Vol. 3 (60). – P. 427–436. doi: 10.3311/PPci.7933.
- Oliver, T. Mechanical Stabilization of Unbound Layers to Increase Pavement Performance and Incorporation of Benefits into M-E analysis / T. Oliver, M. Wayne, J. Kwon // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 143. – P. 896–910. doi : 10.1016/j.proeng.2016-06.153.
- Petrenko, V. Simulation of subgrade embankment on weak base / V. Petrenko, I. Sviatko // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – С. 198–204. doi:10.15802/stp2015/49286.
- Rail movement and ground waves caused by high-speed trains approaching track-soil critical velocities / V. V. Krylov, A. R. Dawson, M. E. Heelis, A. C. Collop // Proc. of The Institution of Mechanical Eng. Part F: J. of Rail and Rapid Transit. – 2000. – Vol. 214. – Iss. 2. – P. 107–116. doi: 10.1243/095440-9001531379.
- Railway cuttings and embankments: Experimental and numerical studies of ground vibration / G. Kouroussis, D. P. Connolly, B. Olivier [et al.] // Science of the Total Environment. – 2016. – Vol.

- 557–558. – P. 110–122. [http://dx. doi: 10.1016/j.-scitotenv.2016.03.016](http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.016).
20. Study of ground vibrations induced by railway traffic in a 3D FEM model formulated in the time domain: experimental validation / J. F. Ruiz, P. A. Costa, R. Calçada [et al.] // Structure and Infrastructure Engineering. – 2016. – P. 1–13. doi: 10.1080/15732479.2016.11-72649.
21. Woldringh, R. F. Embankment design for high speed trains on soft soils / R. F. Woldringh, B. M. New // Proc. of the 12th Europ. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (7.06–10.06.1999). – Amsterdam, The Netherlands, 1999. – Vol. 3. – P. 1703–1712.

Д. Н. КУРГАН^{1*}

^{1*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, эл. почта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ВОЛНОВОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПУТИ

Цель. В современных научных исследованиях неоднократно приводились практические примеры проявления динамических эффектов работы железнодорожного пути, которые выходят за границы статических расчетных схем. Особенно актуальны такие вопросы для участков, где скорость движения поездов приближается к скоростям распространения волн в слоях подрельсового основания. Адекватным инструментом для изучения таких вопросов может быть использование волновой теории распространения напряжений. Цель данной работы – создание математического описания основных принципов волновой модели распространения напряжений в железнодорожном пути, которые могут быть использованы как основа для практических разработок соответствующих расчетных систем. **Методика.** Модель напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути на основе волновой теории распространения напряжений заключается в объединении уравнений геометрии очертания части пространства системы, задействованной во взаимодействии на данный момент времени, и уравнений динамического равновесия ее деформации. Решение задачи основывается на использовании законов теории упругости. Фронт волны описывается уравнениями эллипсоида. При определении изменения во времени положения поверхности эллипсоида используется векторный подход. **Результаты.** Уравнения геометрии движения волны определяют объемы материала слоев подрельсового основания, участвующих во взаимодействии на данный момент времени. Определение динамического равновесия деформированного состояния пространства, ограниченного фронтом волны, дает возможность рассчитать как сами напряжения и деформации, так и их изменения за время восприятия нагрузки. Таким образом, в работе получены математические описания процессов, которые возникают при восприятии нагрузки элементами железнодорожного пути при высоких скоростях движения. **Научная новизна.** Получили дальнейшее развитие задачи моделирования взаимодействия пути и подвижного состава, в частности, с учетом динамического прогиба подрельсового основания. Впервые представлены основы математического описания волновой модели распространения напряжений в железнодорожном пути, которые могут быть использованы для выполнения практических расчетов. **Практическая значимость.** Полученные автором данные могут быть использованы для обоснования конструкции пути или установления соответствующих значений допустимых скоростей для внедрения движения поездов с высокими скоростями.

Ключевые слова: железнодорожный путь; взаимодействие пути и подвижного состава; волновая модель; высокоскоростное движение; теория упругости

Д. М. KURHAN^{1*}

^{1*}Dep. «Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

THE BASIS OF MATHEMATICAL DESCRIPTION FOR WAVE MODEL OF STRESSES PROPAGATION IN RAILWAY TRACK

Purpose. Modern scientific research has repeatedly cited practical examples of the dynamic effects of railway track operation that go beyond the static calculation schemes. For the track sections where the train speed is approaching to the velocity of wave propagation in the slab track layers such issues are of particular relevance. An adequate tool for the study of such issues can be the use of the wave theory of stress propagation. The purpose of the article is the creation of a mathematical description of the basic principles of the stress propagation wave model in the railway track, which can be used as a basis for the practical development of the relevant calculation system. **Methodology.** The model of stress-strain states of the railway track on the basis of the stress wave propagation theory is to bring together the equations of the geometry of the outline of the space systems that is involved in the interaction at a given time, and the dynamic equilibrium equations of deformation. The solution is based on the use of the laws of the theory of elasticity. The wave front is described by an ellipsoid equation. When determining the variation in time of the surface position of the ellipsoid a vector approach is used. **Findings.** The geometry equations of the wave motion determine the volumes of material layers of the slab track involved in the interaction at a given time. The dynamic equilibrium determination of the deformed condition of the space bounded by the wave front makes it possible to calculate both the stresses and strains, and their changes during the time of the load perception. Thus, mathematical descriptions of the processes that occur in the perception of the load by the elements of railway track at high speeds were obtained. **Originality.** The simulation tasks of the track and rolling stock interaction, in particular taking into account the dynamic deflection of slab track were further developed. For the first time the article presents the basics of the mathematical description of the wave stress propagation model in the railroad track, which can be used to perform practical calculations. **Practical value.** The obtained data can be used to justify the track construction or establishing appropriate values of permissible speeds for the introduction of train motion with high speeds.

Keywords: railway track; track and rolling stock interaction; wave model; high-speed movement; theory of elasticity

REFERENCES

1. Brandl Kh., Paulmichl A. Vzaimodeystviye osnovaniy i sooruzheniy vysokoskorostnykh zheleznykh dorog. [The interaction of the grounds and structures of high-speed railways]. *Razvitiye gorodov i geotekhnicheskoye stroitelstvo – Urban Development and Geotechnical Construction*, 2007, no. 11, pp. 157164.
2. Danilenko E.I. *Zaliznychna koliia. Tom 2* [Railway track. Vol. 2.]. Kyiv, Inpres Publ., 2010. 456 p.
3. Danilenko E.I. Novitni doslidzhennia bichnoi pruzhnosti reikovykh nytok pry spilnii dii vertykalnykh i horyzontalnykh syl [Recent research of the lateral flexibility of rail threads under combined action of vertical and horizontal forces]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 6 (60), pp. 65-77. doi: 10.15802/stp2015/57021.
4. Danilenko E.I., Rybkin V.V. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist: TsP-0117* [The computation rules of the railway track for strength and stability: TsP-0117]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2004. 64 p.
5. Kolskiy G. *Volny napryazheniya v tverdykh telakh* [Stress waves in solids]. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1955. 192 p.
6. Kurhan D. Modelirovaniye vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava s uchetom vremeni progiba podrelsovogo osnovaniya [Modeling the interaction of railway track and rolling stock including the time for deflection of the slab track]. *Proyektirovaniye razvitiya regionalnoy seti zheleznykh dorog* [Design of development of the regional railway network], 2015, issue 3, pp. 167-175.
7. Kurhan N.B. Predposylki sozdaniya vysokoskorostnykh magistralei v Ukraine [Background of the high-speed railways in Ukraine]. *Ukrainski zaliznytsi – Ukrainian Railways*, 2015, no 5-6, pp. 16-21.
8. Landau L.D., Lifshits L.D. *Teoreticheskaya fizika. T. VII. Teoriya uprugosti* [Theoretical physics. Vol. VII. Elastic theory]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 248 p.
9. *Transportna stratehiia Ukrainy na period do 2020 roku* (The transport strategy of Ukraine for the period till 2020 year). Available at: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-%D1%80> (Accessed 15 September 2016).

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

10. *Uhoda pro asotsiatsiiu mizh Ukrainoiu, z odniiei storony, ta Yevropeiskym Soiuzom, yevropeiskym spivtovarystvom z atomnoi enerhii i yikhnyimi 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 15 September 2016).
11. Connolly D.P., Forde M.C. Use of Conventional Site Investigation Parameters to Calculate Critical Velocity of Trains from Rayleigh Waves. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2015, no. 2476, pp. 32-36. doi: 10.3141/2476-05.
12. Fisher Sz. 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.
13. Fisher Sz. A vasúti zúzottkövek aprózódásvizsgálata egyedi laboratóriumi módszerrel. *Sínek Világa*, 2015, no. 57 (3), pp. 12-19.
14. Kurhan D.M. Features of perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 2 (56), pp. 136-145. doi: 10.15802/stp2015/42172.
15. Mosayebi S., Zakeri J., Esmaeili M. Some Aspects of Support Stiffness Effects on Dynamic Ballasted Railway Tracks. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2016, vol. (60) 3, pp. 427-436. doi: 10.3311/PPci.7933.
16. Oliver T., Wayne M., Kwon J. Mechanical Stabilization of Unbound Layers to Increase Pavement Performance and Incorporation of Benefits into ME analysis. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 143, pp. 896-910. doi: 10.1016/j.proeng.2016.-06.153.
17. 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.
18. Krylov V.V., Dawson A.R., Heelis M.E., Collop A.C. Rail movement and ground waves caused by high-speed trains approaching track-soil critical velocities. *Proc. of The Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2000, vol. 214, no. 2, pp. 107-116. doi: 10.1243/0954409001531379.
19. Kouroussis G., Connolly D.P., Olivier B., Laghrouche O., Costa P.A. Railway cuttings and embankments: Experimental and numerical studies of ground vibration. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 557, pp. 110-122. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.016.
20. Ruiz J.F., Costa P.A., Calçada R., Rodríguez Luis E.M., Colaço A. Study of ground vibrations induced by railway traffic in a 3D FEM model formulated in the time domain: experimental validation. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, pp. 1-13. doi: 10.1080/15732479.2016.1172649.
21. Woldringh R.F., New B.M. Embankment design for high speed trains on soft soils. *Proc. of the 12th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (7.06-10.06.1999)*, 1999, vol. 3, pp. 1703-1712.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. В. Д. Петренком (Україна), д.т.н., проф. Е. І. Даніленком (Україна)

Надійшла до редколегії: 17.05.2016

Прийнята до друку: 14.09.2016

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

UDC 621.311.61

S. S. BELIMENKO^{1*}, V. O. ISHCENKO², V. O. GABRINETS³

^{1*}LLC «Teplotehnika», Yavornytskyi D. Ave., 102, Dnipro, Ukraine, 49000, tel./fax +38 (0562) 33 33 06, e-mail director@teplotehnika.dp.ua, ORCID 0000-0002-9935-4778

²Dep. «Heat Engineering», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 373 15 76, e-mail ivatire@mail.ru, ORCID 0000-0002-5948-9483

³Dep. «Heat Engineering», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail gabrin62@mail.ru, ORCID 0000-0002-6115-7162

MODELING OF TEMPERATURE FIELDS IN A SOLID HEAT ACCUMULATORS

Purpose. Currently, one of the priorities of energy conservation is a cost savings for heating in commercial and residential buildings by the stored thermal energy during the night and its return in the daytime. Economic effect is achieved due to the difference in tariffs for the cost of electricity in the daytime and at night. One of the most common types of devices that allow accumulating and giving the resulting heat are solid heat accumulators. The main purpose of the work: 1) software development for the calculation of the temperature field of a flat solid heat accumulator, working due to the heat energy accumulation in the volume of thermal storage material without phase transition; 2) determination the temperature distribution in its volumes at convective heat transfer. **Methodology.** To achieve the study objectives a heat transfer theory and Laplace integral transform were used. On its base the problems of determining the temperature fields in the channels of heat accumulators, having different cross-sectional shapes were solved. **Findings.** Authors have developed the method of calculation and obtained solutions for the determination of temperature fields in channels of the solid heat accumulator in conditions of convective heat transfer. Temperature fields over length and thickness of channels were investigated. Experimental studies on physical models and industrial equipment were conducted. **Originality.** For the first time the technique of calculating the temperature field in the channels of different cross-section for the solid heat accumulator in the charging and discharging modes was proposed. The calculation results are confirmed by experimental research. **Practical value.** The proposed technique is used in the design of solid heat accumulators of different power as well as full-scale production of them was organized.

Keywords: solid heat accumulator; thermal storage material

Introduction

Currently, one of the priority areas of energy-efficiency is to save costs on heating in industrial and residential buildings by the stored thermal energy at night time and its return in the daytime. As a result, savings are achieved due to the difference in tariffs for cost of electricity in the daytime and at night one. Change to «Night» tariff allows paying for electricity on an average three times cheap-

er in comparison with the normal mode of operation [1]. One of the most common types of devices that allow accumulating and giving the resulting heat obtained in different ways, are the heat accumulators (HA), heat pipes and thermosiphons [2-6]. Thermal storage devices may be used to implement such principal tasks as performing the distribution of a source and receiver of thermal energy in space and time, as well as smoothing the tem-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

perature field on the surface or in the volume of the object. Thermal storage devices are most widely used in the energy, engineering, transportation, chemical industry, agriculture. Consequently, research and development of methods for determining the operating modes and the weight and dimensional parameters of HA is an important task of energy conservation, actual in the contemporary conditions of energy deficit.

Purpose

To date a large number of works about HA were published. The functioning of the HA in the process of heat storage can be realized by two main mechanisms: the first is due to changes of the physical parameters in the thermal storage solid (TSS); the second – through the use of the binding energy between atoms and molecules of substances.

Capacitance-type batteries are the most common and simple. Heat capacity of substance, heating without its aggregative state change is used in them. Typical HA structural scheme is shown in Figure 1. It shows that HA always consists of insulated and thermal storage solid (TSS), heater, cooling systems, safety, regulation of heat supply and removal.

For the weight and dimension calculations one limits with mass determination [1]. In determining the HA modes, one considers the heat transfer processes using classical approaches of thermal fields analysis, as well as techniques based on mathematical modeling of heat transfer [7]. Mathematical models of HA functioning are focused on the description of the HA thermal field [8-10] and cannot be directly applied for calculations of temperature field distribution, for example, when con-

vective heat transfers on the HA charge and discharge mode. In order to determine temperature stresses one can use [9]. However, proposed before calculation methods [10-14] do not reflect the picture of heat transfer at active convective transfer occurring at HA charging / discharging.

The main objective of the work is to develop a method for calculating the temperature field TSS in the process of heat accumulation and removal at the design stage on the basis of mathematical modeling of the temperature field in condition of strong convective heat transfer.

Solid HA is a complex of multiple systems connected in a single structure constructively. Heating system is a mandatory element of the HA, in our case it is tubular heating elements (THEs). Heat generated by them is accumulated in the thermal storage solid of – HA charging is made. To use the stored heat, HA has a cooling system, in our case there are air channels. With the active circulation of the coolant – air, heat is removed from the TSS and supplied to the consumer. Heat-distribution system within the heating object space does not include in to HA complex.

The design concept of solid HA with convective heat transfer is shown in Figure 2. HA consists of a jar 1 which can be fixed on any rigid support, the front jar is closed with battery cap 2, on the jar thermal insulation 3, 4 is fixed, in which TSS 5 is placed. On the front surface of TSS finger baffles 6 are mounted for the cooling air flow direction, which is fed to the bottom of TA through incoming louvers 7, then, passing through the HA channels, enters to the mixer 8 and go through the outlet louvers 9 falls within the scope of the object of heat supply.

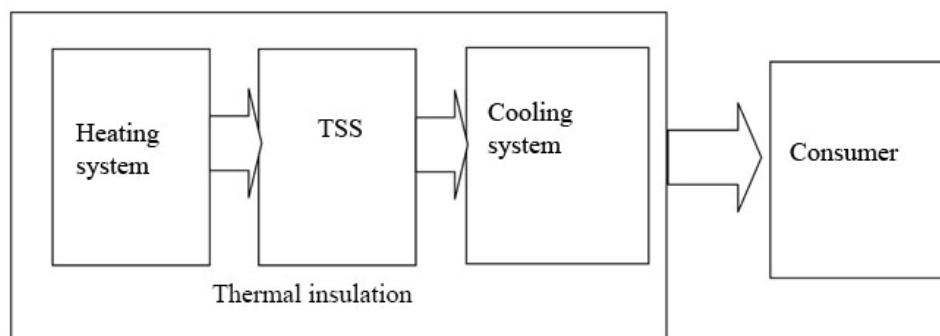


Fig. 1. Block diagram of HA

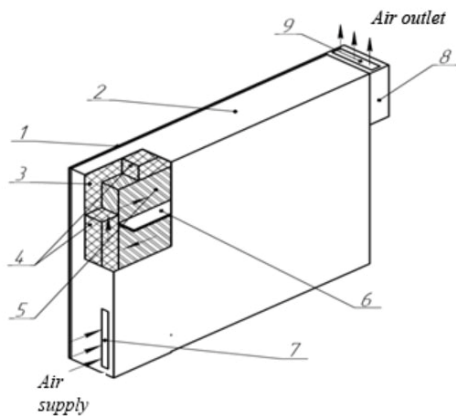


Fig. 2. HA structural scheme

Methodology

Design scheme for the analysis of the temperature field in the HA can be shown in Fig. 3, where the following notation is introduced:

Li – heat insulation layer; C – channel; La – layer of TSS, T_{cu} – the temperature of the upper boundary of the channel; T_{cl} – the temperature of the lower boundary of the channel T_{au} – the temperature of the upper boundary of TSS; T_{al} – the temperature of the lower boundary of TSS.

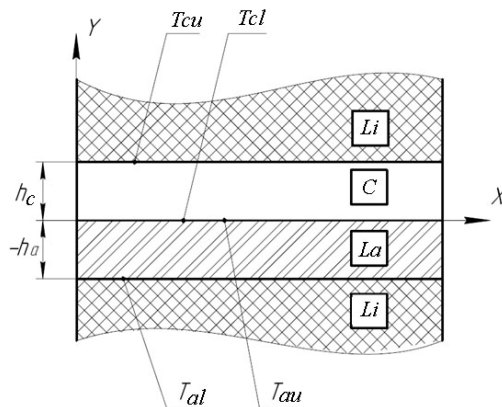


Fig. 3. Diagram of the temperature field analysis

If we neglect the change of heat fluxes along the coordinate x , which is directed perpendicular to the plan of TSS 5 (Fig. 2), the temperature field will depend on three independent variables, namely: spatial coordinates y and z , and time t . Using ratio $t = z/V_1$, where V_1 there is air movement velocity on the channel C , one can reduce constitutive equations to the form, where two independent

variables y и z will take place. Then we can write such heat transfer equations for the system shown in Fig. 3

$$\rho_1 \cdot C_{p1} \cdot 2 \cdot V_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_1 \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2}; \quad (1)$$

$$\rho_2 \cdot C_{p2} \cdot V_1 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial z} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2}, \quad (2)$$

where ρ , C_p , λ – thermal and physical characteristics of the material: density, heat capacity ratio and conductivity coefficient (subscripts 1 and 2 are used respectively for air and TSS); T – temperature.

Each of the two equations will have two boundary conditions on the coordinate y and on one initial condition on the coordinate z .

The presence of the thermal insulation on the upper boundary of the channel, and the lower boundary of the TSS let neglect with heat flow out the heat accumulator boundaries, in other words one can record

$$\frac{\partial T_1}{\partial y} = 0 \text{ at } y = h_1; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial y} = 0 \text{ at } y = -h_2. \quad (4)$$

Two other boundary conditions can be represented as

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial y} = q_{21} \text{ at } y = 0; \quad (5)$$

$$-\lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial y} = \alpha_{12} \cdot (T_{1b} - T_{2t}) \text{ at } y = 0, \quad (6)$$

where q_{21} – heat flow coming into the channel from the heated TSS; T_{1b} – coolant temperature at the bottom surface of the channel; T_{2t} – temperature at the top surface of TSS; α_{12} – heat transfer coefficients between the cooling coolant and the top surface of the heated TSS.

Initial conditions correspondingly for equations (1) and (2) will be

$$T_1 = f_1(y) \text{ at } z = 0; \quad (7)$$

$$T_2 = f_2(y) \text{ at } z = 0, \quad (8)$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

where $f_1(y)$, $f_2(y)$ – temperature functional dependences from the coordinate y .

In the first approximation temperature functional dependences can be taken as constants. Then instead of (7) and (8) there will be

$$T_1 = T_{1n} \text{ at } z = 0; \quad (9)$$

$$T_2 = T_{2n} \text{ at } z = 0. \quad (10)$$

To solve equations (1) and (2) we use the Laplace integral transformation [13, 14].

Using the theorem about the differentiation of the original, we obtain the operator analogs of equations (1) and (2) in such form

$$\frac{d^2 T_1^L}{dy^2} - \frac{s}{a_1} \cdot T_1^L = -\frac{T_{1n}}{a_1}; \quad (11)$$

$$\frac{d^2 T_2^L}{dy^2} - \frac{s}{a_2} \cdot T_2^L = -\frac{T_{2n}}{a_2}, \quad (12)$$

where T^L – temperature image T , including appropriate indexes; s – Laplace transformation variable;

$$a_1 = \lambda_1 / (2 \cdot \rho_1 \cdot C_{p1} \cdot V_1); \quad a_2 = \lambda_2 / (\rho_2 \cdot C_{p2} \cdot V_1).$$

Thus, using the Laplace integral transformation, the transition from partial differential equations (1) and (2) (in originals) to the differential equations in ordinary derivatives (in images), that are solved much easier.

Operator equations for the boundary conditions (3) – (6) will look like this

$$\frac{dT_1^L}{dy} = 0 \text{ at } y = h_1; \quad (13)$$

$$\frac{dT_2^L}{dy} = 0 \text{ at } y = -h_2; \quad (14)$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{dT_1^L}{dy} = \frac{q_{21}}{s} \text{ at } y = 0; \quad (15)$$

$$-\lambda_2 \cdot \frac{dT_2^L}{dy} = \alpha_{12} \cdot \left(\frac{T_{1b}}{s} - \frac{T_{2t}}{s} \right) \text{ at } y = 0. \quad (16)$$

Solutions of equations (11) and (12) have the form

$$T_1^L = \frac{T_{1n}}{s} + C_{11} \cdot \sinh \left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} \cdot y \right) + C_{12} \cdot \cosh \left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} \cdot y \right); \quad (17)$$

$$T_2^L = \frac{T_{2n}}{s} + C_{21} \cdot \sinh \left(\sqrt{\frac{s}{a_2}} \cdot y \right) + C_{22} \cdot \cosh \left(\sqrt{\frac{s}{a_2}} \cdot y \right). \quad (18)$$

For determining the integration constants C_{11} , C_{12} , C_{21} and C_{22} it is necessary to differentiate the last two equations on coordinate y and substitute boundary conditions (13) – (16).

Substituting boundary conditions (13) and (15) into equation (17), as well as – (14) and (16) into equation (18), we obtain (after determining the integration constants C_{11} , C_{12} , C_{21} and C_{22}) such equations in the images for determining the temperature fields

$$T_1^L = \frac{T_{1n}}{s} - \frac{q_{21} \cdot \sqrt{a_1}}{\lambda_1 \cdot s} \cdot \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \frac{\cosh \left[\sqrt{\frac{s}{a_1}} \cdot (h_1 - y) \right]}{\sinh \left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} \cdot h_1 \right)}; \quad (19)$$

$$T_2^L = \frac{T_{2n}}{s} - \frac{\alpha_{12} \cdot \sqrt{a_2} \cdot (T_{1b} - T_{2t})}{\lambda_2 \cdot s} \times \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \frac{\cosh \left[\sqrt{\frac{s}{a_2}} \cdot (h_2 + y) \right]}{\sinh \left(\sqrt{\frac{s}{a_2}} \cdot h_2 \right)}; \quad (20)$$

Taking into account an expression (16) and (20), one can write down such ratio at $y = 0$

$$q_{21} = -\alpha_{12} \cdot \left(\frac{T_{1b}}{s} - \frac{T_{2t}}{s} \right).$$

Then the equation (19) will rewrite in such manner

$$T_1^L = \frac{T_{1n}}{s} + \frac{\alpha_{12} \cdot \sqrt{a_1} \cdot (T_{1b} - T_{2t})}{\lambda_1 \cdot s} \times \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \cosh \left[\sqrt{\frac{s}{a_1}} \cdot (h_1 - y) \right] / \sinh \left(\sqrt{\frac{s}{a_1}} \cdot h_1 \right); \quad (21)$$

In order to go from the temperature image to the original, write the hyperbolic functions through exponential

$$\cosh(x) = (e^x + e^{-x})/2, \quad \sinh(x) = (e^x - e^{-x})/2.$$

After appropriate changes expression (21) can be presented as follow

$$T_1^L = \frac{T_{1n}}{s} + \frac{\alpha_{12} \cdot \sqrt{a_1} \cdot (T_{1b} - T_{2t})}{\lambda_1 \cdot s} \times \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp(-d1_k \cdot \sqrt{s}) + \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp(-d2_k \cdot \sqrt{s}), \quad (22)$$

where

$$d1_k = \sqrt{\frac{1}{a_1}} \cdot [y + 2 \cdot h_1 \cdot k];$$

$$d2_k = \sqrt{\frac{1}{a_1}} \cdot [-y + 2 \cdot h_1 \cdot (k + 1)].$$

By analogy with the expression (22) one can convert the equation (20), namely

$$T_2^L = \frac{T_{2n}}{s} - \frac{\alpha_{12} \cdot \sqrt{a_2} \cdot (T_{1b} - T_{2t})}{\lambda_2 \cdot s} \times \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp(-d3_k \cdot \sqrt{s}) + \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \exp(-d4_k \cdot \sqrt{s}) \quad (23)$$

where

$$d3_k = \sqrt{\frac{1}{a_2}} \cdot [-y + 2 \cdot h_2 \cdot k];$$

$$d4_k = \sqrt{\frac{1}{a_2}} \cdot [y + 2 \cdot h_2 \cdot (k + 1)].$$

Using the general formula of transition from the image to the original [2]

$$\frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \exp(-C \cdot \sqrt{s}) \leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot z}} \cdot \exp\left(-\frac{C^2}{4 \cdot z}\right) \quad (24)$$

and multiplication theory (Borel theorem) one can obtain from the expression (22) such original for temperature distribution in the solid plug along the y-axis

$$T_1(y, z) = T_{1n} + \frac{\alpha_{12} \cdot \sqrt{a_1} \cdot (T_{1b} - T_{2t})}{\lambda_1} \times [E1X_1(y, z) + E1X_2(y, z)] \quad (25)$$

where

$$E1X_1(y, z) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[2 \cdot \sqrt{\frac{z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{d1_k^2}{4 \cdot z}\right) - d1_k \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{d1_k}{2 \cdot \sqrt{z}}\right) \right],$$

$$E1X_2(y, z) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[2 \cdot \sqrt{\frac{z}{\pi}} \times \exp\left(-\frac{d2_k^2}{4 \cdot z}\right) - d2_k \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{d2_k}{2 \cdot \sqrt{z}}\right) \right]$$

Using the same technique as in the obtaining of expression (25), we find from (23) the original for temperature field distribution in the TSS

$$T_2(y, z) = T_{2n} - \frac{\alpha_{12} \cdot \sqrt{a_2} \cdot (T_{1b} - T_{2t})}{\lambda_2} \times [E2X_1(y, z) + E2X_2(y, z)], \quad (26)$$

where

$$E2X_1(y, z) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[2 \cdot \sqrt{\frac{z}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{d3_k^2}{4 \cdot z}\right) - d3_k \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{d3_k}{2 \cdot \sqrt{z}}\right) \right],$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$E2X_2(y, z) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[2 \cdot \sqrt{\frac{z}{\pi}} \times \exp\left(-\frac{d4_k^2}{4 \cdot z}\right) - d4_k \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{d4_k}{2 \cdot \sqrt{z}}\right) \right].$$

To determine the heat transfer coefficient α_{12} in equations (25) and (26) one can use expression in common case [15]

$$\alpha_{12} = \frac{Nu \cdot \lambda_1}{b_e} \quad (27)$$

where Nu – Nusselt criterion; b_e – equivalent size of the channel.

In general case, it is divided into three modes: turbulent ($Re > 10000$); transitional ($2300 \leq Re \leq 10000$) and laminar ($Re < 2300$).

In the case of turbulent regime one can use the following expression to determine the Nusselt criterion

$$Nu = 0,021 \cdot \varepsilon_l \cdot Re^{0,8} \times \left(\frac{Pr}{Pr_{WT}}\right)^{0,25} \quad (28)$$

where ε_l – a correction factor that takes into account impact of the ratio of the cooling cavity length L_0 to its equivalent size b_e on the heat transfer coefficient; Re – Reynolds criterion; Pr – Prandtl number; Pr_{WT} – Prandtl number at a wall temperature of the cooling cavity. For transitional regime calculation is recommended to carry out by the graph, shown in Figure 4, at this the value NP is determined by expression

$$NP = Nu / \left[Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{WT}}\right)^{0,25} \right]. \quad (29)$$

The following relationship is the most acceptable for laminar regime

$$Nu = 0,15 \cdot \varepsilon_l \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \times \operatorname{Gr}^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_{WT}}\right)^{0,25} \quad (30)$$

where Gr – Grashof number.

To determine the criteria, one can use such expressions

$$Re = \frac{V_1 \cdot b_e \cdot \rho_1}{\eta_1};$$

$$Pr = \frac{C_{p1} \cdot \eta_1}{\lambda_1}; Gr = \frac{g \cdot b_e^3 \cdot \rho_1^2}{\eta_1^2} \cdot \beta \cdot \Delta T, \quad (31)$$

where η_1 – viscosity coefficient of a cooling medium; β – coefficient of volume expansion; ΔT – the temperature difference between the wall surface and the cooling liquid.

The correction factor decreases when increase the ratio of the cooling cavity length L_0 to its equivalent size. When performing the ratio $L_0/b_e > 50$ one can accept $\varepsilon_l = 1$.

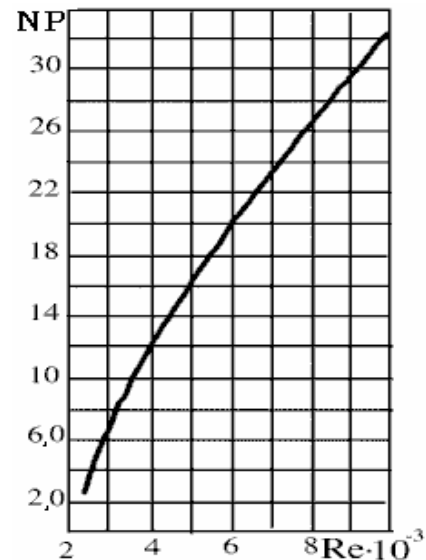


Fig. 4. The graph to determine the Nusselt criterion for the transitional regime

Equivalent size can be determined from the formula $b_e = \frac{4 \cdot S_g}{P}$,

where S_g – square of effective cross-section; P – full (wetted) perimeter, regardless of what part of the perimeter is involved in heat transfer.

For heating liquid fluid one can take $(Pr/Pr_{WT})^{0,25} \approx 1$.

Thus, to find the temperature field distribution in a two-layer system accordingly to Fig. 2 it is necessary to solve the equations (25) and (26). However, this system generally comprises two unknown quantities, namely: T_{1b} and T_{2t} . At this, given quantities in boundary conditions (6) are

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

taken as constant ones. In reality, they will depend on the coordinate z_j . To take into account the last remark and achieve the required accuracy of calculations, it should T_{1b} and T_{2t} to find on short segments along z axle.

The initial values T_{1n} and T_{2n} are also should be constantly changed at each segment. Thus, the final values of the temperature field distribution on the previous segment will correspond to the initial values at the next segment along the axis z . For determining the unknown boundary temperature values from these equations, we obtain the following system of equations

$$T_{1b,j} = T_{1n,j} + \frac{\alpha_{12} \cdot \sqrt{a_1} \cdot (T_{1b,j} - T_{2t,j})}{\lambda_1} \times [E1X_{1,j} + E1X_{2,j}] \quad (32)$$

$$T_{2t,j} = T_{2n,j} - \frac{\alpha_{12} \cdot \sqrt{a_2} \cdot (T_{1b,j} - T_{2t,j})}{\lambda_2} \times [E2X_{1,j} + E2X_{2,j}] \quad (33)$$

In the last two equations index j characterizes the values of the corresponding ones on each segment z_j at zero value for the second coordinate ($y = 0$).

For convenience, the solution of equations (32) – (33) are presented in a matrix form

$$\begin{bmatrix} T_{1b,j} \\ T_{2t,j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{0,0} & A_{0,1} \\ A_{1,0} & A_{1,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CV_0 \\ CV_1 \end{bmatrix}, \quad (34)$$

where

$$A_{0,0} = 1 - \frac{\alpha_{12} \cdot \sqrt{a_1}}{\lambda_1} \cdot E1X_j; \quad A_{0,1} = \frac{\alpha_{12} \cdot \sqrt{a_1}}{\lambda_1} \cdot E1X_j;$$

$$A_{1,0} = \frac{\alpha_{12} \cdot \sqrt{a_2}}{\lambda_2} \cdot E2X_j; \quad A_{1,1} = 1 - \frac{\alpha_{12} \cdot \sqrt{a_2}}{\lambda_2} \cdot E2X_j;$$

$$E1X_j = E1X_{1,j} + E1X_{2,j};$$

$$E2X_j = E2X_{1,j} + E2X_{2,j};$$

$$CV_0 = T_{1n,j}; \quad CV_1 = T_{2n,j}.$$

To solve the above problem program block in the mathematical MathCAD package was developed. Re-solving results are shown in Fig. 4, 5. In this case the initial values are following:

$$\rho_1 = 1,2 \text{ kg/m}^3,$$

$$\lambda_1 = 0,0281 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}, \quad C_{p1} = 1,03 \text{ Kj/(kg} \cdot \text{K)},$$

$$\eta_1 = 2,27 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}, \quad \rho_2 = 3200 \text{ kg/m}^3,$$

$$\lambda_2 = 1,93 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}, \quad C_{p2} = 0,57 \text{ Kj/(kg} \cdot \text{K)},$$

$$V_1 = 0,3 \text{ m/s}; \quad h_1 = 20 \text{ mm}; \quad h_2 = 60 \text{ mm};$$

$$L = 2000 \text{ mm}.$$

The indices correspond to the following designations: 1-channel, 2-TSS. Designations correspond to Standards. One should take into consideration that the channel length L is determined by the number of baffles in HA.

Length temperature behavior of TSS under specified conditions is shown in Fig. 5. The number of partitions along the channel (iz) is 30, the number of partitions in channel depth and thickness of TSS (iy) is 20. The coordinate system corresponds to shown one in Figure 3.

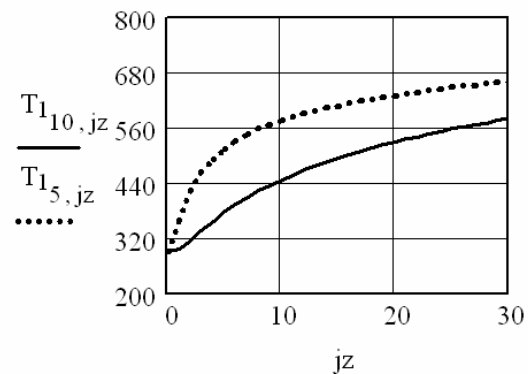


Fig. 5. Length temperature curve of TSS at a fixed depth

As can be seen from Fig. 5 the temperature at TSS, depth of 15mm increases from normal one – at the beginning of the channel and at a length of 2 m is already 570°C. In the mid-plane of TSS ($iy=10$), the temperature will be higher and 670°C.

Air temperature behavior in the channel along length under given conditions is shown in Fig. 6. The air temperature in the channel will change only slightly, at the outlet from TSS and input to the mixer will be 770°C. Temperature behavior de-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

pending on selection of calculation fixed point will be also insignificant and vary within 1-2°C.

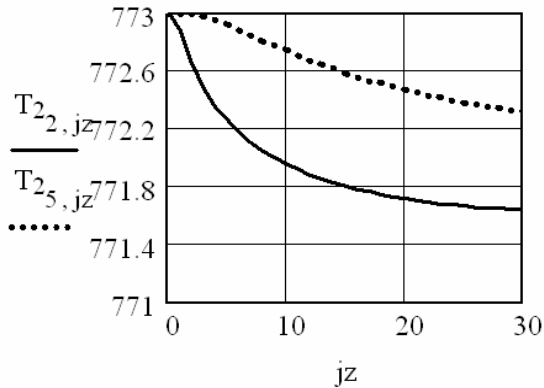


Fig. 6. Temperature curve along the channel length, at a fixed depth

Temperature curve of TSS in depth at a fixed length and given conditions is shown in Fig. 7.

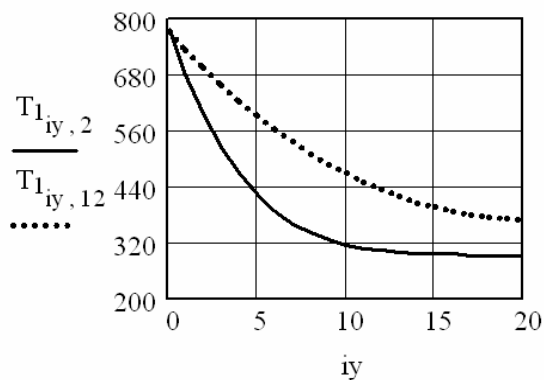


Fig. 7. Depth temperature curve of TSS at a fixed length

As seen from the graph (Fig.7), depth temperature behavior of TSS has exponential nature, in depth of TSS varies within 50°C.

Air temperature behavior in the channel in depth at a fixed channel length under given conditions is shown in Fig. 8.

As seen from the graph (Fig. 8), air temperature behavior in the channel in depth has a logarithmic character, by channel depth varies slightly within 1-2°C.

After analyzing the above data, one can draw the following conclusion: temperature behavior of TSS in depth and length has exponential nature, it is more essential along the length than depth. Air temperature behavior in the length and depth of the channel varies insignificantly.

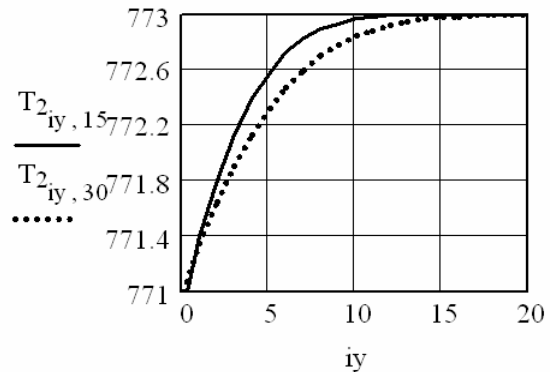


Fig. 8. Air temperature curve in the depth of the channel at a fixed length

Originality and practical value

Technical analysis shows that the proposed method of estimating the temperature field distribution of solid heat accumulator in different modes is effective, technically feasible and allows determining the operation modes of the solid heat accumulator at the specified weight and dimensional characteristics in the design stage of solid heat accumulators.

Conclusions

The method of calculation for temperature fields of solid heat accumulators on charging / discharging modes was proposed.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Белименко, С. С. Разработка критериев эффективности заряда и разряда твердотельного теплового аккумулятора / С. С. Белименко, В. А. Ищенко // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 7–16. doi: 10.15802/stp2014/29945.
2. Габринец, В. А. Оптимальная форма теплового аккумулятора с фазовым переходом в теплоаккумулирующем материале при вертикальном расположении канала подвода и отвода тепла / В. А. Габринец, И. В. Титаренко // Відновлювальна енергетика 21 століття : матер. XIII міжнар. конф. – Крим, 2012. – С. 285–289.
3. Габринец, В. А. Оптимизация грунтового теплового аккумулятора / В. А. Габринец, А. В. Трофименко, Л. В. Накашидзе // Відновлювальна енергетика та енергоефективність у 21 столітті : матер. VII міжнар. наук.-практ. конф. – Київ, 2015. – С. 315–323.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

4. Дан, П. Д. Тепловые трубы : [пер. с англ.] / П. Д. Дан, Д. А. Рей. – Москва : Энергия, 1979. – 272 с.
5. Дружинин, П. В. Математическая модель процесса хранения теплоты в тепловом аккумуляторе / П. В. Дружинин, А. А. Коричев, И. А. Косенков // Техничко-технолог. проблемы сервиса. – 2009. – № 2. – С. 63–65.
6. Кузьяев, И. М. Построение математических моделей для анализа температурных напряжений в рабочих элементах технических систем / И. М. Кузьяев, И. П. Казимиров, С. С. Белименко // Вопр. химии и хим. технологии. – 2011. – № 6. – С. 211–217.
7. Левенберг, В. Д. Аккумуляция тепла / В. Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольстрем. – Киев : Техника, 1991. – 315 с.
8. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высш. шк., 1967. – 600 с.
9. Лыков, А. В. Тепломассообмен / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1972. – 560 с.
10. Математическая модель процесса разрядки теплового аккумулятора фазового перехода / П. В. Дружинин, А. А. Коричев, И. А. Косенков, Е. Ю. Юрчик // Техничко-технолог. проблемы сервиса. – 2009. – № 4 (10). – С. 18–22.
11. Резницкий, Л. А. Тепловые аккумуляторы / Л. А. Резницкий. – Москва : Энергоатомиздат, 1996. – 91 с.
12. McKechhie, J. The heat pipe: a list of pertinent references / J. McKechhie // National Engineering Laboratory, East Kilbride. Applied Heat SR. BIB. – 1972. – P. 2–12.
13. Feldman, K. T. Applications of the heat pipe / K. T. Feldman, G. H. Whiting. / Mechanical Engineering. – 1968. – Vol. 90, № 11. – P. 48–53.
14. Behfard, M. Numerical investigation for finding the appropriate design parameters of a fin-and-tube heat exchanger with delta-winglet vortex generators / M. Behfard, A. Sohankar // Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 52. – Iss. 1. – P. 21–37. doi: 10.1007/s00231-015-1705-1.

С. С. БЕЛІМЕНКО^{1*}, В. О. ІЩЕНКО², В. О. ГАБРИНЕЦЬ³

^{1*}ТОВ «Теплотехніка», пр. Д. Яворницького, 102, Дніпро, Україна, 49000, тел./факс +38 (0562) 33 33 06, ел. пошта director@teplotehnika.dp.ua, ORCID 0000-0002-9935-4778

²Каф. «Теплотехніка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 76, ел. пошта ivatire@mail.ru, ORCID 0000-0002-5948-9483

³Каф. «Теплотехніка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта gabrin62@mail.ru, ORCID 0000-0002-6115-7162

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У ТВЕРДОТІЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРАХ

Мета. На даний час одним із пріоритетних напрямків енергозбереження є економія витрат на теплопостачання в промислових та житлових будівлях за рахунок збереженої теплової енергії в нічний час і віддачі її у денні години. Економічний ефект досягається за рахунок різниці тарифів на вартість електричної енергії в денний і нічний часи. Одним із найбільш поширених типів пристроїв, які дозволяють акумулювати і віддавати отримане тепло, є твердотільні теплові акумулятори. Основна мета роботи: 1) розробка математичного забезпечення для розрахунку температурного поля плоского твердотільного теплового акумулятора, що працює за рахунок накопичення теплової енергії в обсязі теплоакуюючого матеріалу без фазового переходу; 2) визначення розподілу температури в його обсягах при конвективній теплопередачі. **Методика.** Для досягнення мети дослідження використані теорія теплопередачі та інтегральне перетворення Лапласа, на основі якого вирішені задачі визначення температурних полів у каналах теплових акумуляторів, що мають різні форми поперечного перерізу. **Результати.** Авторами розроблено методику розрахунку та отримано розв'язки для визначення температурних полів у каналах твердотільного акумулятора в умовах конвективного теплообміну. Досліджено температурні поля по довжині й по товщині каналів. Проведено експериментальні дослідження на фізичних моделях і промислового обладнання. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано методику розрахунку температурного поля в каналах різного поперечного перерізу твердотільного теплового акумулятора в режимах зарядки і розрядки. Результати розрахунків підтверджуються експериментальними дослідженнями. **Практична значимість.** Запропонована методика використовується при проєк-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

туванні твердотільних теплових акумуляторів різної потужності; організовано серійне виробництво теплових акумуляторів різної потужності.

Ключові слова: твердотільний тепловий акумулятор; твердий акумулюючий матеріал

С. С. БЕЛИМЕНКО^{1*}, В. А. ИЩЕНКО², В. А. ГАБРИНЕЦ³

^{1*}ООО «Теплотехника», пр. Д. Яворницького, 102, Дніпро, Україна, 49000, тел./факс +38 (0562) 33 33 06, ел. пошта director@teplotehnika.dp.ua, ORCID 0000-0002-9935-4778

²Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 76, эл. почта ivatire@mail.ru, ORCID 0000-0002-5948-9483

³Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, эл. почта gabrin62@mail.ru, ORCID 0000-0002-6115-7162

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРАХ

Цель. В настоящее время одним из приоритетных направлений энергосбережения является экономия затрат на теплоснабжение в промышленных и жилых зданиях за счет запасенной в ночное время тепловой энергии и отдачи ее в дневные часы. Экономический эффект достигается за счет разницы тарифов на стоимость электрической энергии в дневное и ночное время. Одним из наиболее распространенных типов устройств, которые позволяют аккумулировать и отдавать полученное тепло, являются твердотельные тепловые аккумуляторы. Основная цель работы: 1) разработка математического обеспечения для расчета температурного поля плоского твердотельного теплового аккумулятора, работающего за счет накопления тепловой энергии в объеме теплоаккумулирующего материала без фазового перехода; 2) определение распределения температуры в его объемах при конвективной теплопередаче. **Методика.** Для достижения целей исследования использованы теория теплопередачи и интегральное преобразование Лапласа, на основе которого решены задачи определения температурных полей в каналах тепловых аккумуляторов, имеющих различные формы поперечного сечения. **Результаты.** Авторами разработана методика расчета и получены решения для определения температурных полей в каналах твердотельного аккумулятора в условиях конвективного теплообмена. Исследованы температурные поля по длине и по толщине каналов. Проведены экспериментальные исследования на физических моделях и промышленном оборудовании. **Научная новизна.** Впервые предложена методика расчета температурного поля в каналах различного поперечного сечения твердотельного теплового аккумулятора в режимах зарядки и разрядки. Результаты расчетов подтверждаются экспериментальными исследованиями. **Практическая значимость.** Предложенная методика используется при проектировании твердотельных тепловых аккумуляторов различной мощности; организовано серийное производство тепловых аккумуляторов различной мощности.

Ключевые слова: твердотельный тепловой аккумулятор; твердый аккумулирующий материал

REFERENCE

1. Belimenko S.S., Ishchenko V.A. Razrabotka kriteriyev effektivnosti zaryada i razryada tverdotelnogo teplovogo akkumulyatora [Development of criteria of charge and discharge efficiency of solid state of heat accumulator]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2014, no. 5 (53), pp. 7-16. doi: 10.15802/stp2014/29945.
2. Gabrinets V.A., Titarenko I.V. Optimalnaya forma teplovogo akkumulyatora s fazovym perekhodom v teploak-kumuliruyushchem materiale pri vertikalnom raspolozhenii kanala podvoda i otvoda tepla [Optimal shape of the heat accumulator with a phase transition in heat-accumulating material at a vertical position of supply and removal of heat]. *Materialy XIII mizhnarodnoi konferentsii «Vidnovliuvalna enerhetyka 21 stolittia»* [Proc. of XIII Intern. Conf. «Renewable energy in the 21st century»]. Krym, 2012, pp. 285-289.
3. Gabrinets V.A., Trofimenko A.V., Nakashidze L.V. Optimizatsiya gruntovogo teplovogo akkumulyatora [Optimization of ground heat accumulator]. *Materialy VII mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii «Vidnovliuvalna enerhetyka ta enerhoefektyvnist u 21 stolitti»* [Proc. of VII Intern. Sci. and Practical Conf. «Renewable energy and energy efficiency in the 21st century»]. Kyiv, 2015, pp. 315-323.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

4. Dan P.D., Rey D.A. *Teplovyye trubyy* [Heat pipes]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 272 p.
5. Druzhinin P.V., Korichev A.A., Kosenkov I.A. Matematicheskaya model protsessa khraneniya teploty v teplovom akkumulyatore [Mathematical model of the heat storage process in the heat accumulator]. *Tekhniko-tehnologicheskkiye problemy servisa – Technical and Technological Service Problems*, 2009, no. 2, pp. 63-65.
6. Kuzyaev I.M., Kazimirov I.P., Belimenko S.S. Postroyeniye matematicheskikh modeley dlya analiza temperaturnykh napryazheniy v rabochikh elementakh tekhnicheskikh sistem [Construction of mathematical models for the analysis of thermal stress in the working elements of technical systems]. *Voprosy khimii i khimicheskkiye tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technologies*, 2011, no. 6, pp. 211-217.
7. Levenberg V.D., Tkach M.R., Golstrem V.A. *Akkumulirovaniye tepla* [Heat storage]. Kiyev, Tekhnika Publ., 1991. 315 p.
8. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Thermal conductivity theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p.
9. Lykov A.V. *Teploobmen* [Heat and mass transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 560 p.
10. Druzhinin P.V., Korichev A.A., Kosenkov I.A., Yurchik Ye.Yu. Matematicheskaya model protsessa razryadki teplovogo akkumulyatora fazovogo perekhoda [A mathematical model of the heat accumulator process for phase transition]. *Tekhniko-tehnologicheskkiye problemy servisa – Technical and Technological Service Problems*, 2009, no. 4 (10), pp. 18-22.
11. Reznitskiy L.A. *Teplovyye akkumulyatory* [Heat accumulators]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1996. 91 p.
12. McKechie J. The heat pipe: a list of pertinent references. National Engineering Laboratory, East Kilbride. Applied Heat SR. BIB. 2–12, 1972.
13. Feldman K.T., Whiting G.H. Applications of the heat pipe. *Mechanical Engineering*, 1968, vol. 90, no. 11, pp. 48-53.
14. Behfard M., Sohankar A. Numerical investigation for finding the appropriate design parameters of a fin-and-tube heat exchanger with delta-winglet vortex generators. *Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 52, issue 1, pp. 21-37. doi: 10.1007/s00231-015-1705-1.

Prof. M. V. Gubinskiy, D. Sc. (Tech.) (Ukraine); Prof. V. G. Sychenko, D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: July 07, 2016

Received: Oct. 27, 2016

УДК 621.333.4.024-0.47.58/.048.72

В. И. ШИНКАРЕНКО^{1*}, О. И. САБЛИН^{2*}, А. П. ИВАНОВ^{3*}

^{1*}Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

^{2*}Каф. «Электроснабжение железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37, эл. почта olegsss@i.ua, ORCID 0000-0001-6784-648X

^{3*}Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта iv_inbox.ru, ORCID 0000-0003-1259-6377

КОНСТРУКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ ТЯГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель. Научная работа посвящена разработке средств и методов формирования множества реальных и потенциальных структурных схем зон рекуперации с различными поездными ситуациями для дальнейшего обучения нейро-нечетких сетей на основе экспертных решений и формирования рационального управления. **Методика.** Для моделирования структурной схемы системы тягового электроснабжения, режимов тягового электропотребления и поездной ситуации в зоне распределения энергии рекуперации 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 и операций и конструктивной аксиоматики. Наиболее сложной и существенной частью аксиоматики является множество формируемых правил подстановки, определяющих процесс вывода соответствующих конструкций. **Результаты.** Разработана специализированная и конкретизированная КПС, которая позволяет учесть все возможности и особенности современного оборудования систем тягового электроснабжения, участков тяговой сети и поездной ситуации. Ее особенность: семантическое наполнение терминального алфавита образами электрооборудования, тяговой сети и потребителей электроэнергии, обладающими соответствующей атрибутикой. Приведенный частный случай формирования структурной схемы демонстрирует возможности КПС применительно к данной задаче. **Научная новизна.** Авторами предложен новый подход к решению задачи рационального использования энергии рекуперации, который заключается в применении методов и средств искусственных нейронных сетей, экспертных систем и нечеткой логики и математико-алгоритмического конструктивизма. В данной работе представлены методы конструктивно-продукционного моделирования структуры зоны распределения энергии рекуперации в системе тяги постоянного тока. **Практическая значимость.** Решение задачи рационального использования энергии рекуперации позволяет значительно экономить энергоресурсы, способствовать техническому переоснащению железнодорожного транспорта Украины путем внедрения современных средств и возможностей. Разработанные модели могут применяться для решения и других задач энергосбережения в различных системах электрического транспорта.

Ключевые слова: рекуперация; энергосбережение; конструктивно-продукционная структура; структурная схема; модель; тяговая подстанция

Введение

Техническое переоснащение железнодорожного транспорта Украины предполагает внедрение современных средств и возможностей. Одна из таких задач заключается в энергосбережении путем рационального использования энергии рекуперации в системах тяги постоянного тока на основе интеллектуального

управления качеством электроэнергии [3, 5, 7], оптимизации распределения энергии рекуперации [18].

Решение задачи предполагает при отсутствии на участке тягового энергоснабжения поездов встречного или попутного следования, способных полностью потребить выделенную энергию рекуперации, аккумулировать ее в современных накопителях [4] или передать в пи-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

тающую зовнішню мережу. Такі можливості, як правило, на даний момент відсутні в Україні. Дослідження доцільності їх використання на різних ділянках енергопостачання є суттєвою задачею енергозбереження.

При відсутності строгої математичної моделі для рішення задачі раціонального використання енергії рекуперації пропонується застосування нейро-нечітких моделей [1, 2, 16], які включають в себе штучні нейронні мережі, експертні системи та нечітку логіку [6, 11, 12, 22]. Такі моделі отримали широке поширення в багатьох практичних задачах розпізнавання та управління [8, 9, 10, 13, 17, 21], в тому числі в електротехнічних системах [14, 15].

В нашому випадку, перешкодою для такого моделювання (і ще в більшій мірі для побудови строгої математичної моделі) є значне різноманітність потенціальних можливостей обладнання ділянок тягового енергопостачання. Для моделювання широкого спектра існуючого та потенціального обладнання ділянок рекуперації пропонується використовувати апарат математико-алгоритмічного конструювання (МАК) [19].

Це дасть можливість на основі експертних рішень для смодельованих методами МАК структурних схем різної комплектації електрообладнання та поїздної ситуації навчити нейрофази мережі для управління системою енергопостачання з метою раціонального використання енергії рекуперації.

В подальшому можливо отримати об'єднані управління.

Цель

Дана робота представляє одну з важливих частин запропонованого методу управління системою тягового електропостачання та споживання з метою раціонального використання енергії рекуперації, а саме: розробка засобів та методів формування множини реальних та потенціальних структурних схем зон рекуперації з різними поїздної ситуаціями для подальшого навчання нейрофази мережі (на основі експертних рішень) та формування раціонального управління.

Основою для розробки відповідних методів є теоретичні положення МАК та конструктивно-продукційні структури.

Методика

Обобщенной конструктивно-продукционной структурой (ОКПС) называется тройка [19]:

$$C_G = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle,$$

де M – неоднорідний носій структури; Σ – сигнатура, що складається з множин операцій зв'язування, підстановки та виводу, операцій над атрибутами та відношення підстановки; Λ – конструктивна аксіоматика. Аксіоматика Λ повністю представлена в [19].

Назначення конструкційно-продукційної структури (КПС) складається в формуванні множин конструкцій з допомогою операцій зв'язування, підстановки, виводу та ін. операцій, задаваних правилами аксіоматики.

В даній роботі під конструкціями розуміються структурні схеми системи тягового електропостачання в зоні розподілу енергії рекуперації з відповідними поїздної ситуаціями.

Для формування конструкцій необхідно виконувати ряд уточнюючих перетворень ОКПС [19]:

- спеціалізація визначає предметну область: семантичну природу носія, кінцеве множин операцій та їх семантику, атрибутику операцій, порядок їх виконання та обмеження на правила підстановки;

- інтерпретація заключається в зв'язуванні операцій сигнатури з алгоритмами виконання певної алгоритмічної структури [20]. При інтерпретації виконується зв'язування інформаційної моделі способу побудови конструкцій та моделі виконавця;

- конкретизація КПС заключається в розширенні аксіоматики множиною правил продукцій, заданні конкретних множин нетермінальних та термінальних символів з їх атрибутами та, при необхідності, значень атрибутів;

- реалізація КПС заключається в формуванні конструкції з елементів носія КПС шляхом виконання алгоритмів, зв'язаних з операціями сигнатури. Реалізація можлива

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

только для предварительно специализированной, интерпретированной и конкретизированной КПС [19].

Приведем основные понятия конструктивно-производственных структур.

Согласно аксиоматике ОКПС формой ${}_w l$ с атрибутом w называется набор терминалов и нетерминалов, объединяемых операциями связывания. Конструкцией называется форма, содержащая только терминалы [19].

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 ${}_{w_i} l_i \rightarrow {}_{w_j} l_j$ [19]. Для формы ${}_{w_l} l = {}_{w_0} \oplus ({}_{w_1} l_1, {}_{w_2} l_2, \dots, {}_{w_h} l_h, \dots, {}_{w_k} l_k)$ и доступного отношения подстановки ${}_{w_h} l_h \rightarrow {}_{w_q} l_q$ такого, что ${}_{w_h} l_h < {}_{w_l} l$ (${}_{w_h} l_h$ является частью ${}_{w_l} l$), результатом трехместной операции подстановки ${}_{w_p} \Rightarrow ({}_{w_h} l_h, {}_{w_q} l_q, {}_{w_l} l)$ будет форма ${}_{w_l} l^* = {}_{w_0} \oplus ({}_{w_1} l_1, {}_{w_2} l_2, \dots, {}_{w_q} l_q, \dots, {}_{w_k} l_k)$ [19], где \oplus – любая операция связывания из Σ .

Операция частичного вывода заключается в:

- выборе одного из доступных правил подстановки $\psi_r : \langle s_r, g_r \rangle \in \Psi$, с отношениями подстановки s_r и выполнении на его основе операций подстановки;

- выполнении операций над атрибутами g_r .

Формы, получаемые в результате операций частичного вывода, начиная с начального нетерминала, являются сентенциальными.

Операция полного вывода (или просто вывода) заключается в последовательном выполнении операции частичного вывода, начиная с начального нетерминала и заканчивая конструкцией.

Результаты

Выполнено моделирование зоны распределения энергии рекуперации, которая может включать один или несколько смежных участков тяговой сети с подстанциями: оборудованных или нет накопителем электроэнергии, возможностью передачи электроэнергии во внешние (поставляющие) сети.

Специализированная конструктивно-производственная модель зоны рекуперации. Определим специализацию ОКПС – конструктор модели (структурной схемы) системы тягового электроснабжения и электрической тяги в зоне распределения энергии рекуперации:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle \xrightarrow{S} C_{ZR} \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_{ZR} \rangle,$$

где $\Lambda_{ZR} = \Lambda \cup \Lambda_1 \cup \Lambda_2$, $\Lambda_1 = \{M_{ZR} \supset T_1 \cup N_1$,

$\Sigma_{ZR} = \{\Xi, \Theta, \Phi\}$, $\Xi = \{ \cdot, \cdot, \cdot, \cdot \}$, $\Phi = \emptyset$,

$\Theta = \{ \Rightarrow, \Leftarrow, \Leftrightarrow \}$, множества: Ξ – отношений (и соответствующих операций) связывания элементов конструкций, Φ – операций над атрибутами, Θ – операций вывода, T_1, N_1 – терминалов и нетерминалов.

Частичная аксиоматика Λ_2 содержит следующие определения, дополнения и ограничения, которые уточняют алфавит, атрибуты носителя, отношения подстановки, задают особенности выполнения операций подстановки и вывода.

Терминальным алфавитом T_1 является множество элементов системы тягового энергоснабжения, потребления и преобразования электроэнергии в сети постоянного тока железных дорог, трамвайных и троллейбусных линий и метрополитенов с их существенными для данной задачи свойствами – атрибутами. Элементы будем обозначать малыми латинскими символами, например, x_a – терминал a с атрибутом x ; x_a – атрибут x терминала a .

Нетерминальный алфавит $N_1 = \{ \varphi \alpha_i \}$ состоит из множества вспомогательных символов с атрибутами, обозначаемых греческими буквами.

Отношения и операции связывания из Ξ задают последовательное и параллельное соединение элементов электрической цепи (табл. 1).

В общем случае операции не обладают свойствами ассоциативности и коммутативности, то есть $(a \oplus b) \oplus c \neq a \oplus (b \oplus c)$, где $a, b, c \in N_1 \cup T_1$, а \oplus – любое отношение связывания из Ξ . Поэтому для однозначного определения порядка выполнения операций связывания будут применяться скобки. В тех частных случаях, где выполняется ассоциативность, скобки могут быть опущены.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Таблица 1
Table 1

Операция	Структурная схема	Электрическая схема
$a \cdot b$		
$a : b$		
$a \times b$		

Модель исполнителя конструирования. Интерпретация КПС на основании алгоритмической структуры заключается в расширении аксиоматики: $\forall \circ \in \Sigma$ задается $(A|_X^Y \dashv \circ)$, то есть операции \circ присваивается значение атрибута в виде $A|_X^Y$ – алгоритма некоторой базовой алгоритмической структуры C_A [20], таким образом операции из сигнатуры Σ связываются с алгоритмами выполнения

$$\langle C_{ZR} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_{ZR} \rangle, C_A = \langle M_A, \Sigma_A, \Lambda_A \rangle \rangle_I \mapsto I \mapsto C_{ZRI} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_3, Z \rangle,$$

где $M_A \supset \bigcup_{A_i^0 \in V_A} (X(A_i^0) \cup Y(A_i^0))$ – носитель алгоритмической структуры, Σ_A – множество операций связывания алгоритмов (в [20] определены операции композиции и условного выполнения), Λ_A – аксиоматика алгоритмической структуры (типичная аксиоматика приведена

в [20]), $V_A = \{A_i^0 |_{X_i}^Y\}$ – множество образующих алгоритмов базовой алгоритмической структуры (множество элементарных алгоритмов, реализуемых некоторым исполнителем), $V_A \subset M_A$; X_i, Y_i – множество определений и значений алгоритма $A_i^0 |_{X_i}^Y$, $\Lambda_3 = \Lambda_{ZR} \cup \Lambda_4$, $\Lambda_4 = \{(A_i^0 |_{X_i}^Y \dashv \otimes_i) : \forall \otimes_i \in \Sigma, A_i^0 |_{X_i}^Y \in \Omega(C_A)\}$, $i = 1..i_{end}$, i_{end} – количество операций в Σ , $\Omega(C_A)$ – множество алгоритмов, конструируемых в C_A .

При интерпретации выполняется связывание информационной модели способа построения конструкций и модели исполнителя.

Терминалы могут интерпретироваться двояко. Если реализация КПС C_{ZR} – реальная зона распределения энергии рекуперации, то терминалы – элементы системы электроснабжения с их техническими характеристиками, а если реализация КПС C_{ZR} – модель зоны распределения энергии рекуперации, то терминалы – условные обозначения соответствующих элементов системы.

Конкретизация конструктивно-производственной модели. Конкретизация конструктивно-производственной структуры заключается в расширении аксиоматики множеством конкретных правил продукции и задании конкретных множеств терминалов и нетерминалов:

$$C_{ZRI} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_3, Z \rangle_{K \mapsto} \\ K \mapsto C_{ZRIC} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_5, Z \rangle,$$

где $\Lambda_5 = \Lambda_3 \cup \Lambda_6$.

Частичная аксиоматика Λ_6 содержит следующие дополнения.

Терминалы алфавита T_1 : $U_{ES} a$ – внешняя система электроснабжения с атрибутом U_{ES} – уровень входного напряжения системы тягового электроснабжения; $\eta, U_{in}, U_{out} b$ – понижающий трансформатор с атрибутами η – к.п.д., U_{in}, U_{out} – входное и выходное напряжение; $\eta, U_{in}, U_{out} c$ – выпрямитель с соответствующими атрибутами; $\eta, U_{in}, U_{out} d$ – инвертор; $\eta, W, W_{max} e$ – накопитель электроэнергии с атрибутами:

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

W, W_{\max} – накопленая и максимальная электрическая емкость; ${}_{\eta, \rho, L, \bar{X}, n} f$ – тяговая сеть с атрибутами: L – длина участка; ρ – удельное сопротивление сети; \bar{X} – вектор размерности n ; ${}_{v, l, P} t$ – электроподвижной состав с атрибутами: v – режим движения; l – положение на межподстанционной зоне; P – потребляемая/выделяемая мощность; ${}_{\eta, U_{in}, U_{out}, \bar{U}, n} h$ – регулятор напряжения выпрямителя; \bar{U} – вектор размерности n , каждый элемент которого u_i – регулируемые уровни выходного напряжения; x – переключатель.

Кроме указанных выше атрибутов, все терминалы имеют идентифицирующий атрибут id , который позволяет однозначно определить конкретное оборудование системы электропитания.

Нетерминальный алфавит N_1 состоит из вспомогательных элементов $N_1 = \{\sigma, \alpha, \beta, \delta, \gamma, \theta, \lambda\}$. Начальный нетерминал – σ .

Аксиоматика Λ_6 содержит следующие правила продукций.

Первое правило содержит отношение, связывающее участок тяговой сети, для которой принимается решение об управлении энергией рекуперации с двумя питающими подстанциями:

$$s_1 = \langle \sigma \rightarrow \alpha \cdot \beta \cdot \alpha \rangle.$$

Правило s_2 позволяет дополнить модель следующим (соседним) участком (итеративно несколькими участками):

$$s_2 = \langle \alpha \rightarrow \alpha \times (\beta \cdot \alpha) \rangle.$$

Следующее правило позволяет моделировать путевое разветвление с соответствующей тяговой сетью и подстанциями:

$$s_3 = \langle \alpha \rightarrow (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha) \rangle.$$

s_4 – вспомогательное правило для оборудования тяговой подстанции

$$s_4 = \langle \alpha \rightarrow \delta \times \gamma \rangle.$$

Правило s_5 предназначено для включения накопителя энергии с переключателем в модель

тяговой подстанции, s_6 – альтернатива правилу s_5 : подстанция накопителем не оборудована:

$$s_5 = \langle \delta \rightarrow {}_{\eta, W, W_{\max}} e \cdot x \rangle;$$

$$s_6 = \langle \delta \rightarrow \varepsilon \rangle.$$

Символ ε – пусто, обозначает отсутствие соединения на структурной и электрической схемах.

Правила s_7 и s_8 позволяет включить в схему тяговой подстанции питание от внешней энергосистемы и понижающий трансформатор:

$$s_7 = \langle \gamma \rightarrow {}_{U_{ES}} a \cdot {}_{\eta, U_{in}, U_{out}} b \cdot (\theta : \lambda) \rangle;$$

$$s_8 = \langle \gamma \rightarrow (\theta : \lambda) \cdot {}_{U_{ES}} a \cdot {}_{\eta, U_{in}, U_{out}} b \rangle.$$

Два альтернативных правила s_9 и s_{10} позволяют включить в структурную схему выпрямитель с регулятором напряжения (s_9) или без последнего (s_{10}):

$$s_9 = \langle \theta \rightarrow {}_{\eta, U_{in}, U_{out}} c \rangle;$$

$$s_{10} = \langle \theta \rightarrow {}_{\eta, U_{in}, U_{out}} c \cdot {}_{\eta, U_{in}, U_{out}, \bar{U}, n} h \rangle.$$

Альтернативные правила s_{11} и s_{12} позволяют включить в структурную схему инвертор с переключателем (s_{11}) или без обоих (s_{12}):

$$s_{11} = \langle \lambda \rightarrow {}_{\eta, U_{in}, U_{out}} d \cdot x \rangle;$$

$$s_{12} = \langle \lambda \rightarrow \varepsilon \rangle.$$

Правило, позволяющее моделировать электропитание многопутных участков

$$s_{13} = \langle \beta \rightarrow \beta : \beta \rangle$$

и с возможными перемычками на участке

$$s_{14} = \langle \beta \rightarrow \beta \cdot \beta \rangle.$$

Правило s_{15} позволяет заменить нетерминал β на участок тяговой сети, а s_{16} и s_{17} – на участок тяговой сети с электроподвижным составом:

$$s_{15} = \langle \beta \rightarrow {}_{\eta, \rho, L, \bar{X}, n} f \rangle;$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$s_{16} = \langle \beta \rightarrow_{v, l, P t \cdot \eta, \rho, L, \bar{x}, n} f \rangle;$$

$$s_{17} = \langle \beta \rightarrow_{\eta, \rho, L, \bar{x}, n} f \cdot_{v, l, P t} \rangle.$$

Реализация конкретной модели зоны рекуперации. В результате вывода на основании правил подстановки с учетом аксиоматики специализированной КПС C_{ZR} может быть реализовано бесконечное количество моделей зон рекуперации, включая модели всех существующих и проектируемых.

Продемонстрируем вывод модели (в виде структурной схемы) одной из таких зон рекуперации.

В результате операции частичного вывода ($\sigma \mid \Rightarrow l_1$), с выбором правила подстановки s_1 будет сформирована сентенциальная форма $l_1 = \alpha \cdot \beta \cdot \alpha$, и соответствующая ей структурная схем, представленная на рис. 1.

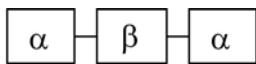


Рис. 1. Структурное представление сентенциальной формы l_1

Fig. 1. Structural representation of sentential form l_1

Продолжая подстановку $l_1 \mid \Rightarrow l_2$, с применением правила s_2 , получим сентенциальную форму $l_2 = \alpha \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot \alpha))$ и структурную схему, с заложенными заготовками двух участков тяговой сети и трех тяговых подстанций (рис. 2).

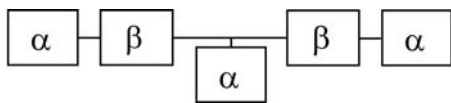


Рис. 2. Структурное представление сентенциальной формы l_2

Fig. 2. Structural representation of sentential form l_2

Применение правила s_3 при подстановке $l_2 \mid \Rightarrow l_3$ позволяет получить $l_3 = \alpha \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$ и структурную схему, в которой заложено разветвление пути (с контактной сетью), питаемое отдельными тяговыми подстанциями (рис. 3).

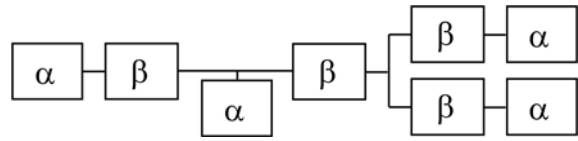


Рис. 3. Структурное представление сентенциальной формы l_3

Fig. 3. Structural representation of sentential form l_3

Продолжая подстановки ($l_3 \mid \Rightarrow l_4$) по правилу s_4 , получим $l_3 = (\delta \times \gamma) \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$ и структурную схему с основами конфигурации электрооборудования на одной из тяговых подстанций (рис. 4).

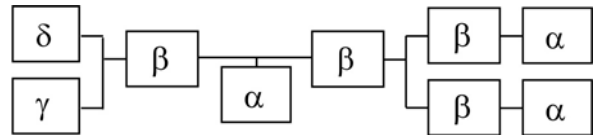


Рис. 4. Структурное представление сентенциальной формы l_4

Fig. 4. Structural representation of sentential form l_4

Дальнейшая подстановка $l_4 \mid \Rightarrow l_5$ по правилу s_5 позволяет получить $l_5 = ((e \cdot x) \times \gamma) \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$ с добавлением в структурную схему на рис. 4 накопителя электроэнергии на соответствующей тяговой подстанции (рис. 5).

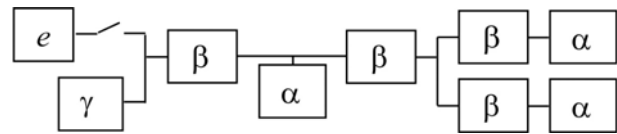


Рис. 5. Структурное представление сентенциальной формы l_5

Fig. 5. Structural representation of sentential form l_5

Применение правила s_7 при подстановке $l_5 \mid \Rightarrow l_6$ позволяет получить $l_6 = ((e \cdot x) \times (a \cdot b) \cdot (\theta : \lambda)) \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$. Структурна схема на рис. 5 дополнена оборудованием для передачи избыточной энергии рекуперации во внешнюю питающую сеть от соответствующей тяговой подстанции (рис. 6).

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

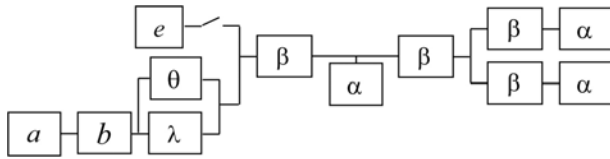


Рис. 6. Структурное представление сентенциальной формы l_6

Fig. 6. Structural representation of sentential form l_6

Последовательное применение правил s_{10} и s_{11} при подстановках $l_6 \Rightarrow l_7 \Rightarrow l_8$ позволяют получить $l_8 = ((e \cdot x) \times (a \cdot b) \cdot ((c \cdot h) : (d \cdot x))) \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$. По структурной схеме (рис. 6) завершена комплектация оборудования соответствующей подстанции инвертором и регулятором напряжения. Структурная схема этой тяговой подстанции полностью сформирована (рис. 7).

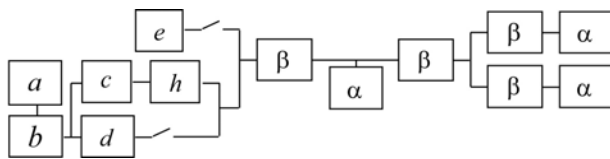


Рис. 7. Структурное представление сентенциальной формы l_8

Fig. 7. Structural representation of sentential form l_8

Следующая последовательность подстановок $l_8 \Rightarrow l_9 \Rightarrow \dots \Rightarrow l_{23}$, с применением правил $s_4, s_6, s_7, s_8, s_{11}, s_4, s_6, s_8, s_9, s_{10}, s_4, s_6, s_8, s_9, s_{11}$ позволяет получить $l_{23} = ((e \cdot x) \times (a \cdot b) \cdot ((c \cdot h) : (d \cdot x))) \cdot \beta \cdot ((a \cdot b \cdot c) \times \beta \cdot (\beta \cdot (c : (d \cdot x) \cdot b \cdot a)) \times (\beta \cdot c \cdot b \cdot a))$. В результате операций частичного вывода полностью сформирована структурная схема всех тяговых подстанций зоны потребления энергии рекуперации (рис. 8).

Заканчивается вывод подстановками $l_{23} \Rightarrow l_{24} \Rightarrow \dots \Rightarrow l_{30}$, с применением правил $s_{13}, s_{13}, s_{15}, s_{14}, s_{17}, s_{15}, s_{15}, s_{15}, s_{16}, s_{15}$, получая при этом $l_{30} = ((e \cdot x) \times (a \cdot b) \cdot ((c \cdot h) : (d \cdot x))) \cdot (f : (f \cdot t \cdot f)) \cdot ((a \cdot b \cdot c) \times (f : f) \cdot (t \cdot f \cdot (c : (d \cdot x) \cdot b \cdot a)) \times (f \cdot c \cdot b \cdot a))$ и структурную схему на рис. 9.

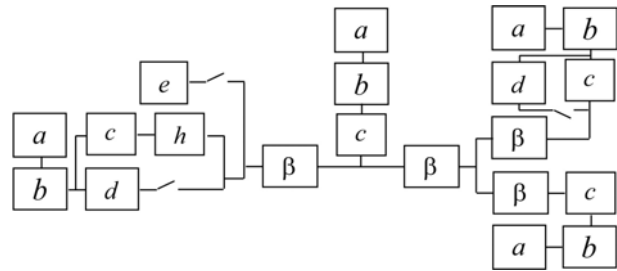


Рис. 8. Структурное представление сентенциальной формы l_{23}

Fig. 8. Structural representation of sentential form l_{23}

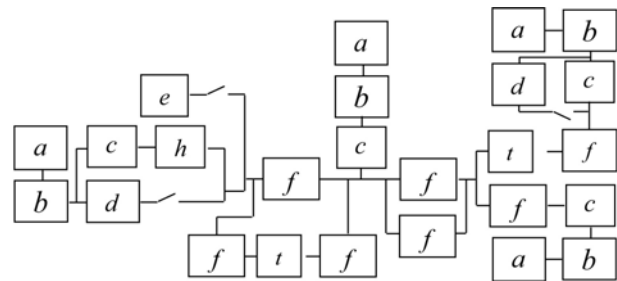


Рис. 9. Структурная схема зоны потребления энергии рекуперации (конструкция l_{30})

Fig. 9 Block diagram of consumption zone of recovering energy (design l_{30})

Сформированная структурная схема участка потребления энергии рекуперации моделирует структуру задействованных тяговых подстанций и поездную ситуацию.

Атрибутика элементов схемы формируется устройствами измерения и передачи информации и экспертными заключениями.

Научная новизна и практическая значимость

Предложен новый подход к решению задачи рационального использования энергии рекуперации, который заключается в применении методов и средств искусственных нейронных сетей, экспертных систем и нечеткой логики и математико-алгоритмического конструктивизма.

В данной работе представлены методы конструктивно-продукционного моделирования структуры зоны распределения энергии рекуперации в системе тяги постоянного тока.

Выполнена конкретизация КПС, которая позволяет учесть все возможности и особенности современного оборудования систем тягового

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

електроснабження, участків тягової мережі і поїздної ситуації.

Выводы

Одним из основных направлений развития экономики Украины является энергосбережение, что связано со сложной ситуацией на рынке энергоносителей.

Задача рационального (и даже просто) использования энергии рекуперации позволяет значительно экономить энергоресурсы.

Разработанный метод моделирования основан на возможностях КПС в новой предметной области. Терминальный алфавит семантически наполнен образами электрооборудования, тяговой сети и потребителями электроэнергии, обладающими соответствующей атрибутикой.

Приведенный частный случай формирования структурной схемы демонстрирует возможности КПС применительно к данной задаче.

В рамках выбранного направления исследований разрабатываются необходимые инструментальные программные средства для формирования структурных схем зон потребления энергии рекуперации, получения экспертных решений по управлению и формированию нейроразрешений сетей принятия решений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гибридные нейро-фаззи модели и мульти-агентные технологии в сложных системах : монография / Е. В. Бодянский, В. Е. Кучеренко, Е. И. Кучеренко [и др.] ; под ред. Е. В. Бодянского. – Днепропетровск : Системные технологии, 2008. – 403 с.
2. Горбачев, С. В. Нейро-нечеткие методы в интеллектуальных системах обработки и анализа многомерной информации / С. В. Горбачев, В. И. Сырякин. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2014. – 441 с.
3. Закарюкин, В. П. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. В. Черепанов. – Иркутск : ИрГТУ, 2015. – 218 с.
4. Крюков, А. В. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных накопителями энергии / А. В. Крюков, А. В. Черепанов // Естество- и инж. науки – развитию регионов Сибири : тез. XIII (XXXV) Всерос. науч.-техн. конф. (21.04–25.04.2014) / Братский гос. ун-т. – Братск, 2014. – С. 4.
5. Моделирование взаємодії електрорухомого складу в режимі рекуперації електроенергії розосередженою системою тягового електропостачання / О. І. Саблін, В. Г. Кузнєцов, О. І. Бондар, В. В. Артемчук // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 7. – С. 46–53.
6. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский ; пер. с польск. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.
7. Саблін, О. І. Аналіз якості рекуперуваної електроенергії в системі електричного транспорту / О. І. Саблін // Вісн. НТУ «ХПІ». – Харків, 2013. – № 38 (1011). – С. 187–190.
8. A Multi-Swarm Optimizer Based Fuzzy Modeling Approach for Dynamic Systems Processing / B. Niu, Y. Zhu, X. He, H. Shen // Neurocomputing. – 2008. – Vol. 71. – Iss. 7–9. – P. 1436–1448. doi: 10.1016/j.neucom.2007.05.010.
9. Bodyanskiy, Ye. Hybrid Adaptive Wavelet-Neuro-Fuzzy System for Chaotic Time Series Identification / Ye. Bodyanskiy, O. Vynokurova // Information Sciences. – 2013. – Vol. 220. – P. 170–179. doi: 10.1016/j.ins.2012.07.044.
10. Bodyanskiy, Ye. Modified Probabilistic Neuro-Fuzzy Network for Text Documents Processing / Ye. Bodyanskiy, I. Pliss, V. Volkova // Intern. J. of Computing. – 2012. – Vol. 11. – Iss. 4. – P. 391–396.
11. Computational Intelligence. A Methodological Introduction / R. Kruse, C. Borgelt, F. Klawonn [et al.]. – London : Springer Verlag, 2013. – 490 p.
12. Du, K.-L. Neural Networks and Statistical Learning / K.-L. Du, M. N. S. Swamy. – London : Springer Verlag, 2014. – 824 p. doi: 10.1007/978-1-4471-5571-3
13. Jang, J.-S. R. Neuro-Fuzzy and Soft Computing – Computational Approach to Learning and Machine Intelligence / J.-S. R. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani. – New Dehli : PHI Learning, 2010. – 614 p.
14. Jenő Paul, P. Neuro-Fuzzy Based Constant Frequency-Unified Power Quality Conditioner / P. Jenő Paul, T. Ruban Deva Prakash // Intern. J. of System Signal Control and Engineering Application. – 2011. – Vol. 4. – Iss. 1. – P. 10–17. doi: 10.3923/ijsceapp.2011.10.17.
15. Kori, A. K. Neuro Fuzzy System Based Condition Monitoring of Power Transformer / A. K. Kori, A. K. Sharma, A. K. S. Bhadoriya // Intern. J. of Computer Science. – 2012. – Vol. 9. – Iss. 2, № 1. – P. 495–499.
16. Kosko, B. Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intel-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- ligence / B. Kosko. – NJ, Prentice Hall, 1992, 449 p.
17. Mukherjee, V. Intelligent Particle Swarm Optimized Fuzzy PID Controller for AVR System / V. Mukherjee, S. P. Ghoshal // *Electric Power Systems Research*. – 2007. – Vol. 77. – Iss. 12. – P. 1689–1698. doi: 10.1016/j.epsr.2006.12.004.
 18. Nasri, A. Timetable Optimization for Maximum Usage of Regenerative Energy of Braking in Electrical Railway Systems / A. Nasri, M. Fekri Moghadam, H. Mokhtari // *Intern. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (14.06–16.06.2010)*. – Pisa, Italy, 2010. – P. 1218–1221. doi: 10.1109/SPEED-AM.2010.5542099.
 19. 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.
 20. 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.
 21. Sood, A. Crossroads in Classification: Comparison and Analysis of Fuzzy and Neuro-Fuzzy Techniques / A. Sood, S. Aggarwal // *Intern. J. of Computer Applications*. – 2011. – Vol. 24, № 2. – P. 13–17. doi: 10.5120/2924-3866.
 22. *Springer Handbook of Computational Intelligence* / Eds. J. Kacprzyk, W. Pedrycz. – Berlin–Heidelberg : Springer-Verlag, 2015. – 1634 p. doi: 10.1007/978-3-662-43505-2.

В. І. ШИНКАРЕНКО^{1*}, О. І. САБЛІН^{2*}, О. П. ІВАНОВ^{3*}

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

^{2*}Каф. «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37, ел. пошта olegsss@i.ua ORCID 0000-0001-6784-648X

^{3*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта iv_@inbox.ru, ORCID 0000-0003-1259-6377

КОНСТРУКТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОНИ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета. Наукова робота присвячена розробці методів та засобів формування множини реальних і потенційних структурних схем зон рекуперації з різними поїзними ситуаціями для подальшого навчання нейронечітких мереж на основі експертних рішень для формування раціонального управління. **Методика.** Для моделювання структурної схеми системи тягового електропостачання, режимів тягового електроспоживання та поїзної ситуації у зоні розподілу енергії рекуперації застосована методологія математико-алгоритмічного конструктивізму. Даний підхід передбачає розробку конструктивно-продукційних структур (КПС) з перетвореннями спеціалізації, інтерпретації, конкретизації та реалізації. Розробка КПС передбачає визначення розширюваного носія, сигнатури відносин і операцій та конструктивної аксіоматики. Найбільш складною та істотною частиною аксіоматики є множина сформованих правил підстановки, що визначають процес виведення відповідних конструкцій. **Результати.** Розроблено спеціалізовану і конкретизовану КПС, яка дозволяє врахувати всі можливості та особливості сучасного обладнання систем тягового електропостачання, ділянок тягової мережі й поїзної ситуації. Її особливість: семантичне наповнення термінального алфавіту образами електрообладнання, тягової мережі та споживачів електроенергії, що володіють відповідною атрибутикою. Наведений окремий випадок формування структурної схеми демонструє можливості КПС стосовно даної задачі. **Наукова новизна.** Авторами запропоновано новий підхід до вирішення задачі раціонального використання енергії рекуперації, який полягає в застосуванні методів та засобів штучних нейронних мереж, експертних систем нечіткої логіки й математико-алгоритмічного конструктивізму. У даній роботі представлені методи конструктивно-продукційного моделювання структури зони розподілу енергії рекуперації у системі тяги постійного струму. **Практична значимість.** Рішення задачі раціонального використання енергії рекуперації дозволяє значно економити енергоресурси, сприяти технічному переоснащенню залізничного транс-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

порту України шляхом впровадження сучасних засобів і можливостей. Розроблені моделі можуть застосовуватися для вирішення й інших задач енергозбереження в різних системах електричного транспорту.

Ключові слова: рекуперация; енергозбереження; конструктивно-продукційна структура; структурна схема; модель; тягова підстанція

V. I. SHYNKARENKO^{1*}, O. I. SABLIN^{2*}, O. P. IVANOV^{3*}

^{1*}Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

^{2*}Dep. «Electricity Supply of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 37, e-mail olegsss@i.ua, ORCID 0000-0001-6784-648X

^{3*}Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail iv_@inbox.ru, ORCID 0000-0003-1259-6377

CONSTRUCTIVE MODELLING FOR ZONE OF RECOVERY ENERGY DISTRIBUTION OF DC TRACTION

Purpose. The article is aimed to develop the means and methods of forming a plurality of real and potential structural diagrams for zones of energy recovery and different locations of trains for further training neuro-fuzzy networks on the basis of expert solutions and also for the formation of good control. **Methodology.** Methodology of mathematical and algorithmic constructivism for modeling the structural diagrams of the electric supply system and modes of traction power consumption and the train's locations in zones of energy recovery was applied. This approach involves the development of constructive-synthesizing structures (CSS) with transformation by specialization, interpretation, specification and implementation. Development CSS provides an extensible definition media, relations and the signature of operations and constructive axiomatic. The most complex and essential part of the axioms is the set formed by the substitution rules defining the process of withdrawal of the corresponding structures. **Findings.** A specialized and specified CSS, which allows considering all the possibilities and features, that supply power traction systems with modern equipment, stations and trains location was designed. Its feature: the semantic content of the terminal alphabet images of electrical traction network and power consumers with relevant attributes. A special case of the formation of the structural diagram shows the possibilities CSS in relation to this problem. **Originality.** A new approach to solving the problem of rational use of energy recovery, which consists in application of the methods and means of artificial neural networks, expert systems, fuzzy logic and mathematical and algorithmic constructivism. This paper presents the methods of constructive simulation of a production-distribution of energy recovery zone structure in the system of the DC traction. **Practical value.** The tasks decision of the rational use of energy recovery can significantly save energy, contribute to the technical re-equipment of a railway transportation of Ukraine through the introduction of modern means and capabilities. The developed model can be used to solve other energy-saving tasks in different systems of electric transport.

Keywords: energy recovery; energy conservation; constructive-synthesizing structures; structural diagrams; model; traction substation

REFERENCES

1. Bodyanskiy Ye. V., Kucherenko V. Ye., Kucherenko Ye. I., Mikhalev A. I., Filatov V. A. *Gibridnyye neuro-fazzi modeli i multiagentnyye tekhnologii v slozhnykh sistemakh* [Hybrid neuro-fuzzy models and multi-agent technologies in complex systems]. Dnipropetrovsk, Sistemnyye tekhnologii Publ., 2008. 403 p.
2. Gorbachev S.V., Syryamkin V.I. *Neuro-nechetkiye metody v intellektualnykh sistemakh obrabotki i analiza mnogomernoy informatsii* [Neuro-fuzzy techniques in intelligent systems of processing and analysis of multi-dimensional information]. Tomsk, Izdatelstvo Tomskogo universiteta Publ., 2014. 441 p.
3. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. *Intellektualnyye tekhnologii upravleniya kachestvom elektroenergii* [Intelligent technologies of electric power quality control]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2015. 218 p.
4. Kryukov A.V. Cherepanov A.V. *Modelirovaniye sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh napositelyami energii* [Modelling of the systems of traction power supply, equipped with energy storages]. *Tezisy XIII (XXXV) Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Yestestvennyye i inzhenernyye nauki –*

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- razvitiyu regionov Sibiri (21.04-25.04.2014)*» [Abstracts of XIII (XXXV) All-Russian Scientific and Practical Conf. «Natural sciences and engineering – development of Siberia»]. Bratsk, 2014, p. 4.
5. Sablin O.I., Kuznietsov V.H., Bondar O.I., Artemchuk V.V. Modeliuvannia vzaiemodii elektrorukhomoho skladu v rezhymi rekuperatsii elektroenerhii rozoseredzhenoiu systemoiu tiahovoho elektropostachannia [Modeling the interaction of electric motive power in the recovery mode of electric energy dispersed by the traction power supply system]. *Elektryfikatsiia transportu – Transport Electrification*, 2014, vol. 7, pp. 46-53.
 6. Rutkovskaya D., Pilinskiy M., Rutkovskiy L. *Neyronnyye seti, geneticheskiye algoritmy i nechetkiye sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2004. 452 p.
 7. Sablin O.I. Analiz kachestva rekuperiruyemoy elektroenergii v sisteme elektricheskogo transporta [Analysis of the quality of electric energy recoverable in the system of electric transport]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut»* [Bulletin of National Technical University «Kharkiv Polytechnical Institute»], 2013, vol. 38 (1011), pp. 187-190.
 8. Niu B., Zhu Y., He X., Shen H. A Multi-Swarm Optimizer Based Fuzzy Modeling Approach for Dynamic Systems Processing. *Neuro-computing*, 2008, vol. 71, issues 7-9, pp. 1436-1448. doi: 10.1016/j.neucom.2007.05.010.
 9. Bodyanskiy Ye., Vynokurova O. Hybrid Adaptive Wavelet-Neuro-Fuzzy System for Chaotic Time Series Identification. *Information Sciences*, 2013, vol. 220, pp. 170-179. doi: 10.1016/j.ins.2012.07.044.
 10. Bodyanskiy Ye., Pliss I, Volkova V. Modified Probabilistic Neuro-Fuzzy Network for Text Documents Proc. *International Journal of Computing*, 2012, vol. 11, issue 4, pp. 391-396.
 11. Kruse R., Borgelt C., Klawonn F., Moeves C., Steinbrecher M., Held P. *Computational Intelligence. A Methodological Introduction*. London, Springer Verlag Publ., 2013. 490 p.
 12. Du K.-L., Swamy M.N.S. *Neural Networks and Statistical Learning*. Springer Verlag Publ., 2014. 824 p. doi: 10.1007/978-1-4471-5571-3.
 13. Jang J.-S.R., Sun C.-T., Mizutani E. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing – Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. New Dehli, PHI Learning Publ., 2010. 614 p.
 14. Jeno Paul P., Ruban Deva Prakash T. Neuro-Fuzzy Based Constant Frequency-Unified Power Quality Conditioner. *International Journal of System Signal Control and Engineering Application*, 2011, vol. 4, issue 1, pp.10-17. doi: 10.3923/ijssceapp.2011.10.17.
 15. Kori A.K., Sharma A.K., Bhadoriya A.K.S. Neuro Fuzzy System Based Condition Monitoring of Power Transformer. *International Journal of Computer Science*, 2012, vol. 9, issue 2, no. 1, pp. 495-499.
 16. Kosko B. *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*. NJ, Prentice Hall Publ., 1992. 449 p.
 17. Mukherjee V., Ghoshal S.P. Intelligent Particle Swarm Optimized Fuzzy PID Controller for AVR System. *Electric Power Systems Research*, 2007, vol. 77, issue 12, pp. 1689-1698. doi: 10.1016/j.epsr.2006.12.004.
 18. Nasri A., Fekri Moghadam M., Mokhtari H. Timetable Optimization for Maximum Usage of Regenerative Energy of Braking in Electrical Railway Systems. *Int. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (14.06.-16.06.2010)*. Pisa, 2010, pp. 1218-1221.
 19. 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.
 20. 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.
 21. Sood A., Aggarwal S. Crossroads in Classification: Comparison and Analysis of Fuzzy and Neuro-Fuzzy Techniques. *International Journal of Computer Applications*, 2011, vol. 24, no. 2, pp.13-17. doi: 10.5120/2924-3866.
 22. Касprzyk J., Pedrycz W. *Springer Handbook of Computational Intelligence*. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 2015, 1634 p. doi: 10.1007/978-3-662-43505-2.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. В. Скалозубом (Украина); д.физ.-мат.н., проф. В. Е. Белозеровым (Украина)

Поступила в редколлегию: 06.07.2016

Принята к печати: 11.10.2016

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.791.92:629.4.027.4

О. А. ГАЙВОРОНСЬКИЙ^{1*}

^{1*}Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича, 11, Київ, Україна, 03068, тел. +38 (044) 205 20 95, ел. пошта gajva@ukr.net, ORCID 0000-0002-8146-7790

УМОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВІДНОВЛЕНИХ НАПЛАВЛЕННЯМ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

Мета. В роботі передбачається встановити закономірності формування структури і фізико-механічних властивостей колісних сталей при дуговому наплавленні та розробити технологічні рекомендації щодо відновлення поверхонь зносу залізничних коліс. Вони забезпечать підвищення надійності та безпеки руху транспорту в умовах зростаючих експлуатаційних навантажень. **Методика.** Для досягнення поставленої мети досліджено: 1) вплив експлуатаційних навантажень на структурні зміни та властивості металу колеса; 2) вплив дугового наплавлення на структурно-фазовий склад та властивості металу зони термічного впливу, його опірність крихкому і уповільненому руйнуванню; 3) вплив наплавленого металу на формування напруженого стану наплавлень та їх опірність утворенню тріщин; 4) зносостійкість відновленого металу при терті-ковзанні пари «колесо-рейка». **Результати.** Найбільш напруженою ділянкою профілю кочення залізничних коліс вантажних вагонів при експлуатації є місце переходу від поверхні кочення до гребеня. Тому при відновленні наплавленням коліс необхідно, перш за все, забезпечити підвищену опірність крихкому руйнуванню металу в цій зоні. Для уникнення появи холодних тріщин при наплавленні необхідно обмежувати швидкість охолодження в зоні термічного впливу до 16,0 °C/с (в інтервалі 600...500 °C) при вмісті вуглецю $C < 0,60 \%$ та до 8,0 °C/с при $C = 0,60...0,65 \%$. При цьому, порівняно висока опірність крихкому руйнуванню забезпечується, коли буде сформована структура, яка не містить верхній бейніт, а частка мартенситу не перевищує кількості нижнього бейніту (співвідношення М/Бн < 1). Витримка колеса на протязі 3,5–4,5 годин при температурі 100 °C після наплавлення в процесі його уповільненого охолодження сприяє підвищенню опірності крихкому руйнуванню металу зони термічного впливу в 1,8–2,3 рази. **Наукова новизна.** Автором розвинуто уявлення щодо структурно-фазових змін, які відбуваються в металі залізничного колеса при дуговому наплавленні. Встановлений взаємозв'язок між вмістом вуглецю в сталі, швидкістю її охолодження при наплавленні, опірністю утворенню тріщин і крихкому руйнуванню. Встановлено вплив умов охолодження колеса після наплавлення на властивості металу. **Практична значимість.** Розроблені технологічні рекомендації щодо відновлення наплавленням залізничних коліс вантажних вагонів. Їх застосування забезпечить підвищення якості відновлення наплавленням залізничних коліс, надійність та безпеку руху транспорту в умовах зростаючих експлуатаційних навантажень.

Ключові слова: залізничне колесо; дугове наплавлення; зона термічного впливу; структура; холодні тріщини; крихке руйнування; наплавлений метал; зносостійкість; технологічні рекомендації

Вступ

Для виготовлення коліс вантажних вагонів сьогодні в Україні використовується колісна сталь марки 2, вміст вуглецю в якій складає 0,55–0,65 %. Колеса з такої сталі мають достатньо високу на-

дійність при експлуатації. Рівень навантаження на вісь колісної пари вантажних вагонів при експлуатації на залізничних коліях становить до 23,5 т.

З метою підвищення експлуатаційної міцності і зменшення зносу залізничних коліс сього-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

дні в Україні розглядаються декілька напрямів створення нових колісних сталей. По-перше, пропонується збільшення вмісту вуглецю в сталі до 0,75 %, як і при виготовленні коліс в ЄС, США та Японії. Це найбільш простий шлях, який не потребує додаткових витрат та зміни технологічного процесу виготовлення залізничних коліс. Другий напрямок, мікролегування існуючої колісної сталі карбо- і нітридоутворюючими елементами, за рахунок чого можливо забезпечити диспергування структури металу. Це буде сприяти зростанню пластичних властивостей металу колеса при більшому рівні його міцності [1, 3].

Підвищити міцність виробів та знизити вірогідність утворення дефектів на поверхні кочення залізничних коліс можливо також за рахунок отримання бейнітної структури металу. Це третій напрямок. При цьому забезпечуються високі показники механічних властивостей і опірності крихкому руйнуванню металу при збільшенні зносостійкості залізничних коліс. Але при існуючому вмісті вуглецю в колісній сталі марки 2 отримання бейнітної структури металу потребує зміни технологічного процесу при виготовленні залізничних коліс. За кордоном розглядається також можливість застосування коліс, виготовлених зі сталі при зниженому вмісті вуглецю ($C \leq 0,30$ %). Формування бейнітної структури металу колеса в цьому випадку досягається при додатковому легуванні сталі нікелем, хромом, молібденом та іншими елементами (разом до 8,0 %) [14, 18].

Всі напрями розробки нових колісних сталей сьогодні активно відпрацьовуються. Але при створенні нових залізничних коліс підвищеної міцності необхідно також передбачати, чи можливо буде їх відновлювати після зносу в умовах вітчизняного виробництва.

В процесі експлуатації колеса зношуються за профілем кочення. Через особливості роботи пари тертя-кочення «колесо-рейка» більш всього схильна до зносу робоча поверхня гребеня колеса. Цей знос пов'язаний з механічним тертям контактуючого металу. Величина зносу залежить від багатьох факторів, пов'язаних з умовами навантаження колісних пар при експлуатації, станом контактуючих поверхонь і геометричних параметрів профілю колеса та рейки, співвідношення їх твердості та ін. На

поверхні кочення коліс виникають також дефекти, які мають назву «вищербини». Ці дефекти мають термомеханічний характер, які утворюються при проковзуванні коліс по рейках з формуванням гартівних структур в приповерхневому шарі металу, що в подальшому призводить до його відшарування [2, 4, 6, 9, 13]. При збільшенні вмісту вуглецю в колісній сталі вірогідність утворення «вищербин» різко зростає.

Застосування технології наплавлення при відновленні коліс економічно вигідно. Відновлення наплавленням дозволяє зменшити відходи металу обода при його механічному обточуванні за профілем кочення, а також підвищити зносостійкість колеса за рахунок наплавлення металу з наперед заданими властивостями. Для цього застосовуються способи дугового наплавлення під шаром флюсу дротами суцільного перетину, а також спеціальне зварювальне і допоміжне устаткування. Технології відновлення наплавленням коліс, що зараз застосовуються, не завжди враховують всі чинники, які впливають на надійність відновлених виробів. В результаті, в деяких випадках, при напавленні утворюються тріщини. Це значно підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій в умовах експлуатації і може призвести до суттєвих пошкоджень залізничного транспорту.

Зварюваність високоміцних вуглецевих сталей, до яких відносять і колісні сталі, до сьогодні практично не досліджувалась, про що свідчить відсутність інформації в спеціалізованій літературі. Було прийнято тезу, що вироби з цих сталей не можливо зварювати в звичайних умовах виробництва без уникнення в них тріщин. Винятком є тільки технології відновлення наплавленням виробів, які були розроблені за результатами обмежених експериментів. Тому розробка науково обґрунтованих технологій наплавлення залізничних коліс, які б базувалися на результатах глибоких досліджень впливу дугового зварювання на структурні зміни та властивості металу зони термічного впливу (ЗТВ) колісних сталей залежно від вмісту в них вуглецю, на особливості опірності наплавлень уповільненому і крихкому руйнуванню при статичних та циклічних навантаженнях, є актуальним завданням. Це дозволить суттєво підвищити безпеку руху на залізничному транспорті в умовах зростаючих експлуатаційних навантажень.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Слід також зазначити, що відновлення наплавленням сьогодні дозволено галузевими нормативними документами та застосовується при ремонтах залізничних коліс вантажних вагонів магістрального транспорту, коліс та бандажів транспорту гірничо-збагачувальних та металургійних підприємств, кранових коліс, бандажів трамвайних коліс міського транспорту.

Мета

Метою роботи було встановлення основних закономірностей у формуванні структури і фізико-механічних властивостей колісних сталей при дуговому наплавленні та розроблення технологічних рекомендацій щодо відновлення поверхонь зносу залізничних коліс, які забезпечать підвищення надійності та безпеки руху транспорту в умовах зростаючих експлуатаційних навантажень.

Методика

Для досягнення поставленої мети при виконанні роботи досліджено вплив експлуатаційних навантажень на структурні зміни і властивості металу колеса, вплив дугового наплавлення на структурно-фазовий склад і властивості металу ЗТВ, його опірність крихкому і уповільненому руйнуванню, вплив наплавленого металу на формування напруженого стану наплавлень та їх опірність утворенню тріщин, досліджено зносостійкість відновленого металу при терті-ковзанні пари «колесо-рейка».

Кінетику структурних перетворень в металі ЗТВ досліджували методом імітації термодифузійного циклу дугового наплавлення. Для цього використовували сучасний дослідний комплекс «Gleeble-3800», оснащений термостатом і високошвидкісним дилатометром [7]. При дослідженнях структурних змін в металі застосовували традиційні методи оптичної, растрової і електронної мікроскопії. Для оцінки міцності, в'язкості руйнування та рівнів внутрішніх напружень в структурі металу ЗТВ використовували новітній розрахунково-аналітичний метод оцінки, розроблений в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ [17]. Цей метод оцінки базується на використанні параметрів структури та субструктури, визначених методами растрової і електронної мікроскопії, при розрахунках властивостей металу.

Опірність утворенню холодних тріщин визначали при випробуваннях зразків з одношаровими наплавленнями за методом Імплант [8]. Опірність металу ЗТВ крихкому руйнуванню оцінювали при трьохточковому вигині модельних зразків з використанням критеріїв механіки руйнування [11]. Попередньо модельні зразки були термооброблені по заданому термодифузійного циклу дугового наплавлення, і в центральній частині яких була вирощена тріщина втоми глибиною 3 мм. Тріщиностійкість оцінювали при триточковому вигині та при циклічному навантаженні зразків багатшарових зварних з'єднань товщиною 20 мм на спеціалізованому дослідному обладнанні (установка Фрідлянда та УМП-1 відповідно). Опір зносу оцінювали при терті-ковзанні модельних зразків з багатшаровим наплавленням на дослідному обладнанні ІЕЗ ім.Є.О. Патона НАНУ [12].

Як об'єкт досліджень використовували колісну сталь марки 2 (КС2), а також для визначення впливу вмісту вуглецю в сталі – конструкційну сталь 65Г та рейкову сталь М76 такого складу (мас. %):

– **КС2**: 0,58 С; 0,44 Si; 0,77 Mn; 0,10 Ni; 0,05 Cr; 0,012 S; 0,011 P;

– **65Г**: 0,65 С; 0,19 Si; 0,91 Mn; 0,18 Ni; 0,16 Cr; 0,017 S; 0,010 P;

– **М76**: 0,74 С; 0,30 Si; 0,80 Mn; 0,10 Ni; 0,15 Cr; 0,012 S; 0,011 P.

Результати

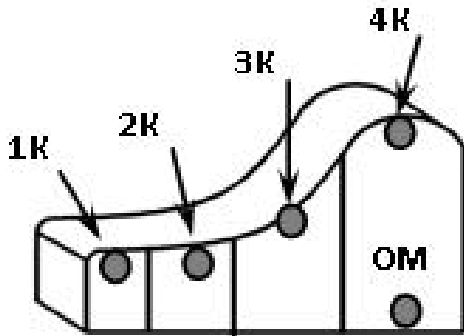
На першому етапі роботи методами оптичної, растрової і електронної мікроскопії, а також розрахунково-аналітичним методом визначено ділянку профілю кочення залізничного колеса, яка зазнає найбільших змін структури металу під дією тривалих експлуатаційних навантажень. Встановлено, що це є зона переходу від поверхні кочення до гребеня колеса (ЗК, рис.1, а).

Для цієї ділянки характерне підвищення міцності приповерхневого шару металу в 1,5–1,8 разу (від 950 до 1 400–1 700 МПа) при формуванні протяжних смугових структур шириною до 30–70 мкм, наявність розкратаних неметалевих вкраплень довжиною до 160 мкм і сітки тріщин довжиною до 350 мкм (рис. 1, б). Встановлено, що щільність дислокацій в структурі металу підвищується до $\rho \approx 2...4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$,

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

а критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{1C} , визначений розрахунковим методом за параметрами структури, знижується в середньому на 50 % (з 30 до 15 МПа·м^{1/2}).

а–а



б–б



Рис. 1. Умовна схема (а) профілю кочення залізничного колеса та структура металу (б, $\times 500$) в приповерхневому шарі при експлуатаційних навантаженнях

Fig. 1. Conventional diagram (a) of railway wheel rolling profile and metal structure (b, $\times 500$) in the surface layer at operational loads

Отримані результати досліджень дозволили зробити висновок, що перед наплавленням необхідно метал поверхні кочення, прилеглий до гребеня, механічно видаляти на глибину не менше ніж 1,0 мм. А при відновленні металу коліс необхідно забезпечити підвищену опірність крихкому руйнуванню наплавлень особливо в цій зоні. Це може бути реалізовано лише за умови застосування контрольованого термічного циклу. При цьому наплавлення необхідно починати з-під гребеня колеса при горизонтальному положенні колісної пари.

При імітації термодформаційного циклу наплавлення (комплекс «Gleeble 3800») моде-

льні зразки нагрівали до температури 1 250 °С зі швидкістю 25 °С/с (характерно для умов звичайної термічної обробки) та 210°С/с (умови дугового наплавлення). Час перебування металу при температурах вище A_{c3} , залежно від умов нагріву і швидкості охолодження, становив $t_1 = 23\text{--}66$ с та $t_1 = 7\text{--}10$ с відповідно. Швидкість охолодження зразків $W_{6/5}$ (в діапазоні температур 600–500 °С) змінювалася в межах 2,5–64 °С/с. Використовували також можливість дослідного устаткування охолоджувати зразки при постійному зниженні температури, імітуючи реальні умови при дуговому наплавленні. За результатами досліджень побудовані термодинамічні діаграми перетворення переохолодженого аустеніту в металі ЗТВ сталі КС2 (рис. 2).

Встановлено, що незавершеність процесів гомогенізації аустеніту, внаслідок швидкого нагріву і обмеженого часу перебування металу при температурах вище точки A_{c3} при дуговому наплавленні, суттєво впливає на перетворення переохолодженого аустеніту в ЗТВ. При швидкості охолодження 2,5–30 °С/с, яка характерна дуговому наплавленню, в металі ЗТВ формуються виключно гартівні структури. При цьому мінімальна швидкість охолодження $W_{6/5}$, при якій починається формування мартенситної складової в структурі металу при $C = 0,58$ %, знижується від 30 °С/с до 8 °С/с, а критична швидкість охолодження W_{50M} , при якій в структурі металу ЗТВ утворюється 50 % мартенситу, становить 20 °С/с. Структура металу ЗТВ залежно від швидкості охолодження наведена на рис. 3, де мартенситна складова подана у вигляді світлих ділянок.

Під впливом термодформаційного циклу дугового наплавлення змінюється також характер перетворення переохолодженого аустеніту в проміжній області. Утворення нижнього бейніту починається при 12° С/с. Максимальна його кількість (61 %) при 16 °С/с. При збільшенні швидкості охолодження до 25 °С/с об'ємна частка нижнього бейніту знижується до 26 %, а мартенситу збільшується до 71 %. При швидкості охолодження $W_{6/5} < 8$ °С/с перетворення відбувається в інтервалі 680–560 °С, формується структура верхнього бейніту. Перліт в структурі, на відміну від уповільненого нагріву, не виявлено. Вплив швидкості охолодження $W_{6/5}$

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

на зміну структурного складу залежно від умов дії ТДЦН наведено на рис. 4.

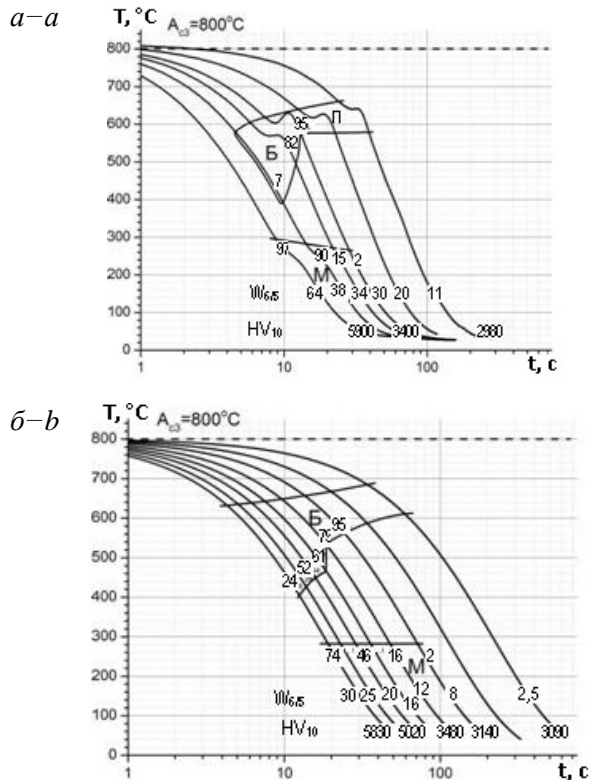
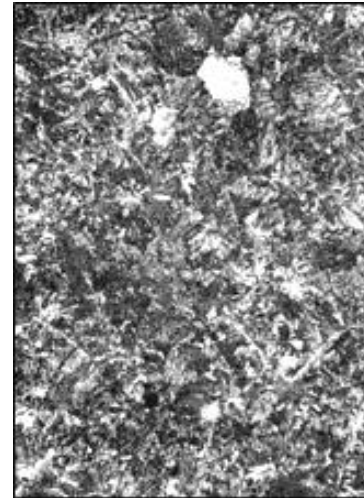


Рис. 2. Термокінетичні діаграми перетворення переохолодженого аустеніту в металі ЗТВ сталі КС2:
а – $t_1 = 23-66$ с; б – $t_1 = 7-10$ с

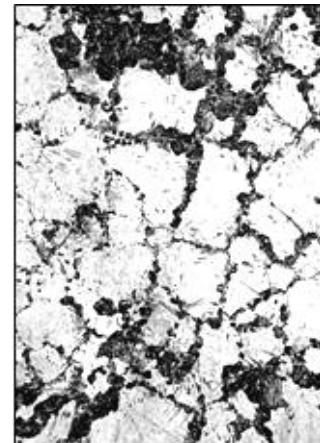
Fig. 2. CCT diagram for transformation of supercooled austenite in HAZ simulated metal of KS2 steel:
а – $t_1 = 23-66$ s; б – $t_1 = 7-10$ s

При збільшенні вмісту вуглецю в сталі до 0,65 % утворення мартенситу зміщується на 40°C в область більш низьких температур, а твердість загартованого металу підвищується в 1,4 рази. При цьому мартенсит утворюється вже при $2,0^\circ\text{C}/\text{с}$. А критична швидкість охолодження W_{50M} зменшується до $7,0^\circ\text{C}/\text{с}$. Змінюється також характер проміжного бейнітного перетворення. Структура металу переважно верхнього бейніту, яка утворюється в металі ЗТВ сталі з $C = 0,58\%$ при $8,0^\circ\text{C}/\text{с}$, при збільшенні вмісту вуглецю змінюється на структуру нижнього бейніту, в якій об'ємна частка верхнього бейніту не перевищує 10 %, а твердість загартованого металу підвищується в 1,2 рази.

а–а



б–б



в–в

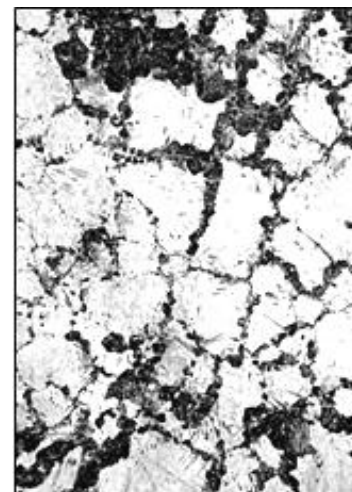


Рис. 3. Структура металу ЗТВ сталі КС2 ($\times 320$):
а – $W_{6/5} = 8^\circ\text{C}/\text{с}$; б – $16^\circ\text{C}/\text{с}$; в – $25^\circ\text{C}/\text{с}$

Fig. 3. Structure of HAZ metal of KS2 steel ($\times 320$):
а – $W_{6/5} = 8^\circ\text{C}/\text{с}$; б – $16^\circ\text{C}/\text{с}$; в – $25^\circ\text{C}/\text{с}$

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

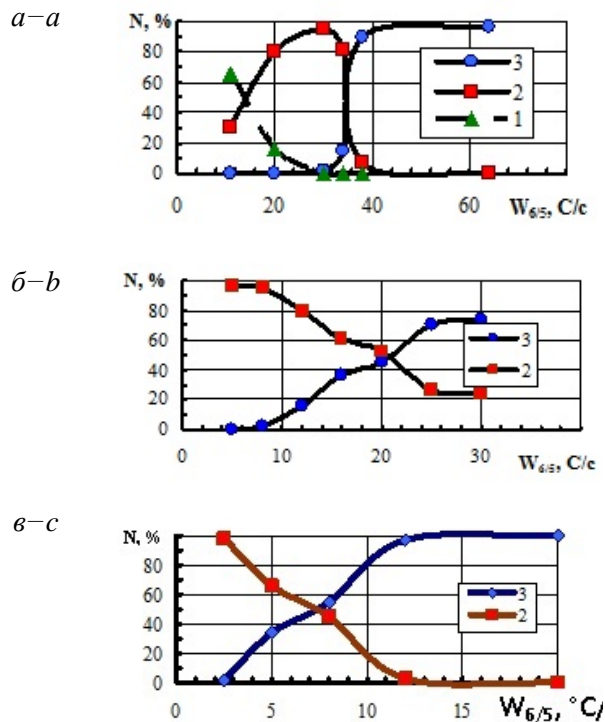


Рис. 4. Структурний склад металу в ЗТВ сталі КС2 (а, б) та сталі 65Г (в):
 а – $t_l = 23-66$ с; б, в – $t_l = 7-10$ с; 1 – перліт;
 2 – бейніт; 3 – мартенсит

Fig. 4. Structural composition of HAZ metal of KS2 steel (a, b) and 65G steel (c):
 а – $t_l = 23-66$ s; b, c – $t_l = 7-10$ s; 1 – perlite;
 2 – bainite; 3 – martensite

Формування гартівних структур зумовлює підвищені показники міцності і низькі пластичні властивості металу ЗТВ. Тимчасовий опір металу, який зазнав дії ТДЦН, залежно від вмісту вуглецю та швидкості охолодження, становить 940–1280 МПа, границя текучості 600–920 МПа. При збільшенні вмісту вуглецю в сталі показники пластичності при статичному руйнуванні знижуються майже в 3 рази (δ_5 від 13,3 до 4,7 %, ψ від 33,3 до 12,6 %). В'язкість загартованого металу при ударі (КСУ) при температурі -40°C не перевищує 5,0–8,0 Дж/см².

Кількісну оцінку опірності утворення холодних тріщин (уповільненому руйнуванню – УР) одношарових наплавлень виконували відповідно до загальновідомого методу Імплант. При випробуваннях використовували зразки \varnothing 6 мм. За результатами випробувань побудовано діаграму $W_{6/5} = f(C)$, наведену на рис. 5, яка відо-

бражає зміну опірності металу ЗТВ залежно від вмісту вуглецю в сталі.

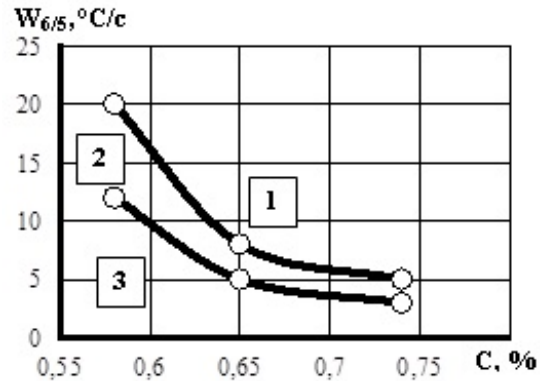


Рис. 5. Опірність утворенню холодних тріщин в наплавленні залежно від вмісту вуглецю в сталі: 1 – область активного розвитку, де попередити утворення тріщин не можливо ($\sigma_{KR} < 0,30 \sigma_{0,2}$); 2 – область підвищеної опірності, де за певних умов можливо уникнути утворення тріщин ($\sigma_{KR} \geq 0,45 \sigma_{0,2}$); 3 – умови наплавлення, де тріщини не утворюються навіть при наявності концентратора

Fig. 5. Resistance to formation of cold cracks in building-up depending on the carbon content of steel: 1 – area of active development where it is not possible to prevent the crack formation ($\sigma_{KR} < 0.30 \sigma_{0,2}$); 2 – area of high resistance where under certain conditions it is possible to prevent the crack formation ($\sigma_{KR} \geq 0.45 \sigma_{0,2}$); 3 – building-up conditions where cracks do not form even if there is a concentrator

У ході досліджень встановлено, що при наплавленні на погонній енергії $Q_{ЗВ} \leq 8,6$ кДж/см без попереднього підігріву метал ЗТВ, незалежно від вмісту вуглецю в сталі, має дуже низьку опірність до УР, критичні напруження руйнування становлять $\sigma_{KR} = 0,07-0,14 \sigma_{0,2}$. При цьому встановлено також, що рівень опірності УР суттєво залежить від структурного стану металу ЗТВ. Для підвищення опірності уповільненому руйнуванню металу ЗТВ від $\sigma_{KR} = 0,07 \sigma_{0,2}$ до $\sigma_{KR} \geq 0,45 \sigma_{0,2}$ необхідно обмежувати швидкість охолодження до $W_{6/5} \leq 16,0$ °C/c для сталі при вмісті вуглецю $C < 0,60$ %, до $W_{6/5} \leq 8,0$ °C/c при $C = 0,60-0,65$ %, до $W_{6/5} \leq 5,0$ °C/c при $C \leq 0,75$ %. За таких умов в металі ЗТВ формуються гартівні бейнітно-мартенситні структури, які мають достатньо високу здатність до мікропластичного деформування без утворення мікротріщин.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Якщо проаналізувати результати випробувань, які наведені на рис. 2–5, то можна зробити такий висновок. При формуванні гартівної структури, яка має співвідношення структурних складових на рівні $M/B_n > 1$, в ЗТВ активно утворюються холодні тріщини. Як показав експеримент, час утворення магістральної тріщини, яка вражає 100 % перерізу металу, становить не більше ніж 5 хвилин. І попередити її утворення в таких умовах наплавлення практично не можливо.

При формуванні гартівної структури, яка має співвідношення структурних складових на рівні $M/B_n \leq 1$, в ЗТВ утворення тріщин відбувається протягом 40–50 хвилин. Але попередити їх утворення можливо за рахунок затримки охолодження металу в області температур 100–200 °С при мартенситному перетворенні ($T \leq T_{Mn}$). За таких умов охолодження металу буде сформована структура з мартенситом відпуску.

Вплив погонної енергії наплавлення та температури попереднього підігріву на швидкість охолодження металу та структурно-фазовий склад металу ЗТВ колісної сталі наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Структурно-фазовий склад металу ЗТВ колісної сталі марки 2 (058 % С)

Table 1

Structural and phase composition of HAZ metal of grade 2 wheel steel (058 % C)

$Q_{\text{НАПЛ}}$, кДж/см	$T_{\text{ПП}}$, °С	$W_{6/5}$, °С/с	Структура ЗТВ
8,6	–	25–30	71–74 % М
	100	12–15	12–34 % М
	150	8–10	2–9 % М
	200	5–7	≥ 95 % Б
	250	3–4	≥ 95 % Б
11,5	–	15–17	34–39 % М
	50	12–14	12–30 % М
	100	6–8	≥ 95 % Б
15,0	–	10–12	9–16 % М

З наведених даних видно, при однодуговому наплавленні залізничних коліс, виготовлених з колісної сталі марки 2 при вмісті вуглецю

0,58 %, на погонній енергії 11–12 кДж/см, що відповідає режиму – струм 300–350 А, напруга на дузі 32–34 В, швидкість 15–20 м/г, навіть без попереднього підігріву в ЗТВ буде сформована структура металу, в якій можливо попередити утворення холодних тріщин, застосовуючи уповільнене охолодження колеса після наплавлення. При застосуванні попереднього підігріву до 100 °С утворення холодних тріщин в наплавленому колесі практично не можливо.

Але, як показує практика, відновлені колеса, при напавленні яких застосовується попередній підігрів з температурою 150 °С, іноді зазнають руйнування безпосередньо в цехових умовах ремонту. Для виявлення цих причин утворення тріщин були виконані подальші дослідження, спрямовані на підвищення опірності відновлених коліс крихкому руйнуванню.

Відомо, що стійкість високоміцних сталей проти утворення тріщин під дією навантажень залежить від ступеня його загартованості та наявності дифузійного водню, який переміщується до нещільностей структури та підвищує в ній внутрішні напруження. Багатьма дослідниками відмічається також той факт, що зі збільшенням міцності та ступеня загартованості сталі негативний вплив водню посилюється. Відомо також, що швидкість дифузії водню залежить від хімічного складу та структури металу, а також його температури. Із зростанням температури дифузійні процеси відбуваються більш інтенсивно і при температурі середовища 100 °С кількість водню, що виділяється з металу за один і той же час, буде майже на порядок більша ніж при кімнатній температурі.

Особливості крихкого руйнування загартованого металу ЗТВ досліджували за оригінальною методикою з використанням модельних зразків прямокутного перерізу з надрізом по центру, з вершини якого була вирощена тріщина в томи глибиною 3 мм. Зразки навантажували сталіми зусиллям при триточковому вигині. Частина зразків випробовувалась у стані після термообробки та вирощування тріщини, а інша частина – додатково наводнювалась електролітичним способом до стану, коли вміст дифузійного водню $[H]_{\text{диф}}$ в них досягав 0,2; 0,5; 1,2 та 1,5 мл/100 г. Критерієм оцінки під час досліджень був критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} .

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Дослідженнями встановлено, що метал ЗТВ високоміцних вуглецевих сталей має підвищену схильність до крихкого руйнування. Порівняно з вихідним станом опірність крихкому руйнуванню металу ЗТВ знижується для сталі КС2 в 1,5–2,3 разу, а для сталі 65Г в 1,4–3 рази. При цьому суттєво впливає структурно-фазовий склад загартованого металу. При формуванні в металі ЗТВ бейнітної структури, яка складається переважно з верхнього бейніту, показник K_{IC} найнижчий. Узагальнені результати досліджень наведено на рис. 6.

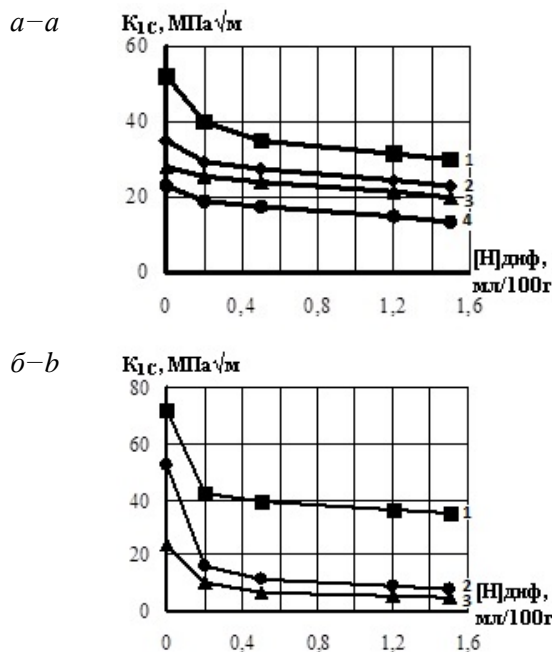


Рис. 6. Крихке руйнування модельних зразків сталі КС2 (а) та 65Г (б): а) 1 – сталь у вихідному стані; 2 – ЗТВ, 20°C/с; 3 – 13,5°C/с; 4 – 6°C/с; б) 1 – сталь у вихідному стані; 2 – ЗТВ, 6°C/с; 3 – 13,5°C/с

Fig. 6. Brittle fracture of modelling samples of KS2 (a) and 65G steel (b): а) 1 – steel in initial state; 2 – HAZ, 20°C/s; 3 – 13.5°C/s; 4 – 6°C/s; б) 1 – steel in initial state; 2 – HAZ, 6°C/s; 3 – 13.5°C/s

Узагальнюючі наведені дані можна констатувати, що для досягнення порівняно високої опірності крихкому руйнуванню необхідно забезпечити умови, коли в металі ЗТВ буде сформована бейнітно-мартенситна структура, яка не містить верхній бейніт (Бв), а частка мартенситу не перевищує кількості нижнього бейніту (співвідношення М/Бн < 1).

Наявність дифузійного водню в наплавленнях додатково окрихчує загартований метал ЗТВ, його здатність до мікропластичного деформування суттєво знижується, а процеси розвитку тріщин прискорюються. При вмісті дифузійного водню в ЗТВ на рівні 0,2 мл/100г опірність крихкому руйнуванню загартованого металу знижується, залежно від його структурного стану та вмісту вуглецю в сталі, в 1,2–3,2 разу. При збільшенні його вмісту до 1,5 мл/100г опірність крихкому руйнуванню металу ЗТВ сталі КС2 знижується в 1,5 разу, для сталі 65Г – в 5–6,5 разу.

Узагальнені результати фактографічних досліджень поверхні зламів металу ЗТВ сталей КС2 та 65Г наведено в табл. 2.

Характерні поверхні зламів в зоні магістрального розвитку тріщини сталі 65Г наведено на рис. 7.

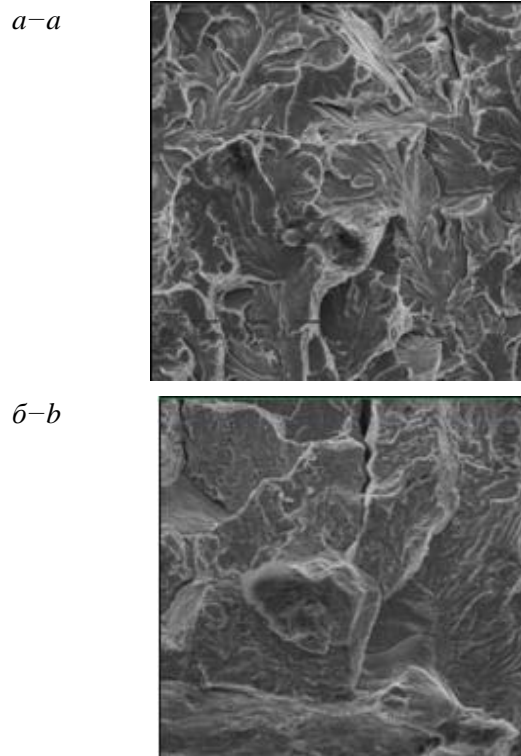


Рис. 7. Злам металу ЗТВ сталі 65Г (13,5 °С/с) в зоні магістрального розвитку тріщини (×1010): а – зразок без наводнення; б – 0,5 мл/100 г

Fig. 7. Fracture of HAZ metal of 65G steel (13.5 °C/s) in the main crack area (×1010): а – sample without hydrogenation; б – 0.5 ml/100 g

Таблиця 2
Характер зламу металу ЗТВ
в зоні розвитку магістральної тріщини

Table 2

Nature of HAZ metal fracture
in the main crack area

[H] _{диф} , мл/100г	КС2			
	6,0 °С/с (98 % Бв)		13,5 °С/с (25 % Бв, 50 % Бн, 23 % М)	
	<u>КВЗ</u> , % L _{ВТ,МКМ}	<u>КМЗ</u> , % L _{ВТ,МКМ}	<u>КВЗ</u> , % L _{ВТ,МКМ}	<u>КМЗ</u> , % L _{ВТ,МКМ}
0	<u>100</u> 40	–	<u>100</u> 5	–
0,2	<u>80</u> 100	<u>20</u> 100	<u>70</u> 40	<u>30</u> 40
0,5	<u>70</u> 120	<u>30</u> 120	<u>65</u> 60	<u>35</u> 60

Закінчення табл. 2

End of table 2

[H] _{диф} , мл/100г	Сталь 65Г			
	6,0 °С/с (60 % Б, 40 % М)		13,5 °С/с (100 % М)	
	<u>КВЗ</u> , % L _{ВТ,МКМ}	<u>КМЗ</u> , % L _{ВТ,МКМ}	<u>КВЗ</u> , % L _{ВТ,МКМ}	<u>КМЗ</u> , % L _{ВТ,МКМ}
0	<u>95</u> 30	<u>5</u> 30	<u>80</u> 60	<u>20</u> 60
0,2	<u>50</u> 150	<u>50</u> 150	<u>30</u> 220	<u>70</u> 220
0,5	<u>40</u> 170	<u>60</u> 170	<u>20</u> 250	<u>80</u> 250

При наводненні металу ЗТВ розвиток магістральної тріщини характеризується не тільки як крихке руйнування по тілу зерен (КВЗ), а також як крихке міжзеренне (КМЗ). З підвищенням вмісту дифузійного водню в зламі збільшується частка КМЗ та довжина вторинних тріщин (L_{ВТ}). Найбільш різкі зміни в характері руйнування при підвищенні вмісту водню спостері-

гаються в металі з більшим вмістом вуглецю. При швидкості охолодження 6,0 °С/с в металі ЗТВ сталі 65Г формується бейнітно-мартенситна структура (60 % Б, 40 % М). Наводнення такого металу рівнем 0,2 мл/100г призводить до суттєвого зниження його опірності крихкому руйнуванню, коефіцієнт K_{1С} знижується майже в 3,2 разу. При цьому частка КМЗ підвищується практично на порядок – від 5 до 50 % [15].

Як показали виконані дослідження, наявність водню в ЗТВ різко окрихчує метал. При цьому з підвищенням вмісту вуглецю в сталі негативний вплив водню збільшується. При дуговому наплавленні під шаром флюсу його вміст в металі ЗТВ неможливо отримати нижче 0,2 мл/100г (в наплавленому металі [H]_{диф} ≥ 1,5 мл/100г). Тому необхідно застосувати додаткові технологічні операції по його видаленню з металу наплавлень. При відновленні залізничних коліс зниження вмісту водню в металі ЗТВ можна досягти тільки в процесі уповільненого охолодження коліс після наплавлення.

Цей висновок підтвердили результати подальших досліджень при визначенні впливу умов охолодження на опірність крихкому руйнуванню металу ЗТВ сталі КС2. Встановлено, що підвищити опірність крихкому руйнуванню металу ЗТВ в 1,8–2,3 разу можливо при витримці металу при температурі 100°С. При цьому пластичні властивості металу збільшуються в 1,5–1,8 разу, а частка в'язкою складової в структурі зламу при розвитку магістральної тріщини підвищується до 20 % (табл. 3). Це відбувається внаслідок видалення дифузійного водню з металу та, як показали спеціальні металографічні дослідження, зменшення щільності дислокацій в загартованій структурі (в 1,5 разу) [16].

Забезпечити такі умови на виробництві можливо при застосуванні технологічної операції уповільненого охолодження коліс після наплавлення в термокамерах, де вони повинні знаходитися при температурі 250–100 °С протягом 3–5 годин (температура ободу колеса після наплавлення гребеня 260–295 °С). Щоб витримати метал у вказаному діапазоні температур швидкість охолодження повинна бути не більше ніж 35–40 °С за годину. Досягти таких умов

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

можливо в спеціальних термокамерах, виготовлених із застосуванням теплоізолюючих матеріалів.

Вибір зварювальних матеріалів для наплавлення залізничних коліс виконували за результатами досліджень впливу типу наплавленого металу на його фізико-механічних властивості.

Встановлено, що необхідний рівень механічних властивостей наплавленого металу ($\sigma_B \geq 700$ МПа, $KCU_{+20} \geq 20$ Дж/см²) при відновленні коліс можливо забезпечити при використанні дротів Св-08ХМ, Св-08ХМФ та порошкового дроту ПП-АН180МН/90 (система легування 10ХНМГСФТ) (табл. 4).

Таблиця 3

Вплив умов охолодження на характер зламу металу ЗТВ сталі КС2 (6,0°С/с; 0,5 см³/100г)

Table 3

Influence of cooling on the fracture nature of HAZ metal of KS2 steel (6.0°C/s, 0.5 cm³/100g)

Умови	K _{1C} , МПа√м	Характеристика зламу		
		КВЗ, % L _{ВТ} , мкм	КМЗ, % L _{ВТ} , мкм	В'язкий, %
звичайні	17,5	70/120	30/120	–
3 доби при 20 °С	26	95/30	–	5
2 години при 100 °С	32	90/30	–	10
6 годин при 100 °С	40	80/30	–	20

Таблиця 4

Механічні властивості наплавленого металу

Table 4

Mechanical properties of weld metal

Дріт	σ ₀₂ , МПа	σ _B , МПа	δ ₅ , %	Ψ, %	KCU, Дж/см ²	
					+20 °С	-40 °С
Св-08ХМ	535	705	21,0	61,0	98	42
Св-08ХМФ	610	730	17,2	56,3	86	40
ПП-АН180МН/90	680	750	16,5	57,5	145	98

doi 10.15802/stp2016/84078

При використанні дроту ПП-АН180МН/90 забезпечується необхідний рівень твердості наплавленого металу (для КС2 НВ ≥ 2 500 МПа) незалежно від кількості шарів наплавлень та температури попереднього підігріву (рис. 8).

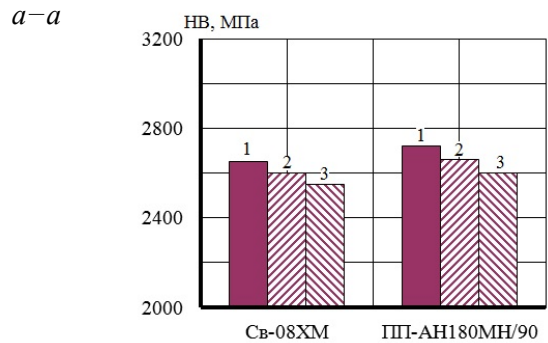


Рис. 8. Твердість металу, наплавленого при температурі 150 °С (а) та 250 °С (б): 1 – одношарове наплавлення; 2 – двошарове; 3 – наплавлення в три шари

Fig. 8. Hardness of the metal, built-up at temperature of 150 °С (a) and 250 °С (b): 1 – one layer building-up; 2 – double-layer; 3 – three-layer building-up

Встановлено, що при застосуванні низьколегованих матеріалів бейнітного або бейнітно-мартенситного класу (система легування 10ХНМГСФТ), в наплавленому металі, зоні сплавлення та ЗТВ наплавлень формується структура з рівномірним розподілом напружень II роду [5]. Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{1C} для наплавленого металу, який вираховувався за параметрами структури та субструктури, в середньому на 25 % вищий стосовно наплавлень, виконаних дротом Св-08Г2С (25 та 20 МПа√м відповідно). Пов'язано це з тим, що в наплавленому металі з бейнітно-мартенситною структурою формується субструктура, зерна якої мають менші розміри, а розподіл дислокацій відбувається більш рів-

© О. А. Гайворонський, 2016

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

номірно, ніж в металі з феритно-перлітною структурою. При цьому добре відомо, що метал з перлітною структурою, яка має фазові виділення цементиту, руйнується більш крихко. Це повинно сприяти підвищенню тріщиностійкості зазначених наплавлень при експлуатаційних навантаженнях.

Досліджено тріщиностійкість зварних з'єднань при циклічному навантаженні вигномом (рис. 9). Встановлено, що при застосуванні попереднього підігріву і уповільненого охолодження після зварювання зі швидкістю 35–40 °С/годину, забезпечується достатньо висока опірність з'єднань руйнуванню від втоми. Критичні напруження руйнування в 1,5–1,9 разу перевищують максимальні напруження, що утворюються в ободі колеса при експлуатації (орієнтовно $\sigma_a \leq 55$ МПа).

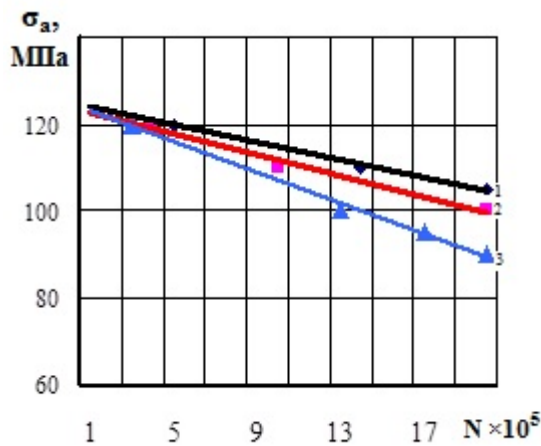


Рис. 9. Циклічна довговічність з'єднань сталі КС2 при зварюванні:

1 – дріт Св-08ХМ; 2 – ПП-АН180МН/90; 3 – Св-08Г2С

Fig. 9. Cyclic durability of KS 2 steel joints during welding:

1 – wire Sv-08HM; 2 – PP-AN180MN/90; 3 – Sv-08G2S

Виконано порівняльну оцінку зносостійкості відновленого наплавленням металу при застосуванні зварювальних матеріалів бейнітного та бейнітно-мартенситного класу. Встановлено, що метал, наплавлений дротами Св-08ХМ, Св-08ХМФ та ПП-АН180МН/90, має достатньо високий опір зносу при терті-ковзанні при контакті з рейкою (рис. 10).

Встановлено, що порівняно з парою «КС2 – М76» зносостійкість наплавненого цими дротами металу зростає до 2,5 разу. При цьому також суттєво зменшується знос рейки. При на-

плавненні дротом ПП-АН180МН/90 в металі формується однорідна і дисперсна структура, метал більш здатний до опору зносу під навантаженням і його зносостійкість не залежить від кількості шарів наплавлень. В приповерхневому шарі наплавненого металу на глибину до 100 мкм спостерігаються смуги пластичного деформування, розмір яких знаходиться в межах 310×25...60 мкм, (коефіцієнт форми $\alpha \sim 6-8$). Інтегральна твердість металу підвищується до 2 860 МПа. Отримані результати дозволили остаточно визначитися з вибором зварювальних матеріалів для наплавлення.

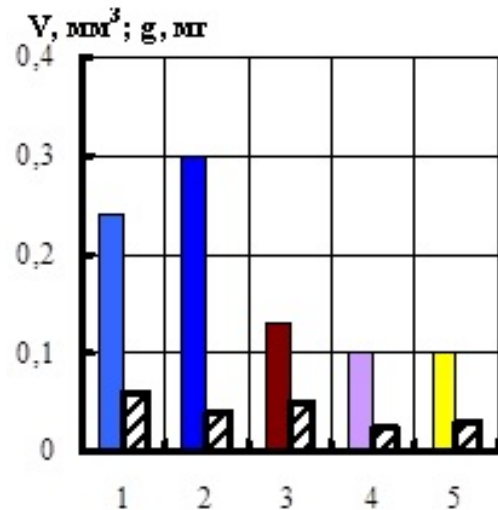


Рис. 10. Знос наплавненого металу (V) в контакт з рейкою (g – знос рейки, штриховані стовпчики).

Одношарове наплавлення, підігрів 150 °С:

1 – сталь КС2; 2 – Св-08Г2С; 3 – Св-08ХМ, 4 – Св-08ХМФ, 5 – ПП-АН180МН/90

Fig. 10. Weld metal wear (V) in contact with track (g – track wear, primed columns).

Single-layer building-up, heated to 150 °С:

1 – KS2 steel; 2 – Sv-08G2S; 3 – Sv-08HM, 4 – Sv-08HMF, 5 – PP-AN180MN/90

Узагальнюючи результати комплексних досліджень основних закономірностей у формуванні структури і фізико-механічних властивостей колісних сталей та наплавненого металу можливо науково обґрунтувати вимоги до технології відновлення наплавленням профілю кочення залізничних коліс вантажних вагонів. Технологічні рекомендації, які забезпечать підвищення якості відновлення наплавленням залізничних коліс, виготовлених з колісної сталі марки 2, їх надійність та безпека руху транспо-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

рту в умовах зростаючих експлуатаційних навантажень, наведено в табл. 5. Вони складаються з вимог до підготовки коліс перед наплавленням, до способу, техніки та режимів наплавлення, до зварювальних матеріалів, до температури попереднього підігріву залежно від вмісту вуглецю в сталі та умов уповільненого охолодження коліс після наплавлення. Виконані дослідження показали, що технологічна операція з уповільнення охолодження коліс після наплавлення є найбільш важливою з точки зору забезпечення надійної працездатності відновлених коліс.

Таблиця 5

Технологічні рекомендації щодо відновлення наплавленням залізничних коліс вантажних вагонів магістрального транспорту

Table 5

Technological recommendations for building-up by welding of freight wagons wheels of main transport

№ п/п	Технологічна операція	Параметр	Результат
1	Обробка поверхні під гребенем перед наплавленням	Товщина видаленого шару $\geq 1,0$ мм	Видалення дефектів на поверхні колеса в місці початку наплавлення
2	Встановлення колісної пари в горизонтальне положення для наплавлення	Початок наплавлення – місце переходу від поверхні кочення до гребеня	Забезпечення оптимальних властивостей металу ЗТВ в найбільш навантаженої ділянці профілю колеса
3	Проожарювання флюсу (1) та порошкового дроту (2)	1. при 350°C, 2 години; 2. при 230 °C, 2,5 години.	Зниження вмісту [Н]диф в наплавленому металі
4	Застосування матеріалів для наплавлення бейнітного та бейнітно-мартенситного класу	Св-08ХМ або Св-08ХМФ $\varnothing 3-4$ мм, ПП-АН180МН/90 (10ХНМГСФТ) $\varnothing 2$ мм та інші	Міцність відновленого металу $\sigma_B \geq 700$ МПа, підвищена зносостійкість, рівномірний розподіл напружень II роду

Закінчення табл. 5

End of table 5

№ п/п	Технологічна операція	Параметр	Результат
5	Попередній підігрів ободу колеса (швидкість нагріву ≤ 10 °C/хв.)	– $T_{пп} = 100^\circ\text{C}$ при $C \leq 0,60\%$; – $T_{пп} = 150^\circ\text{C}$ при $C = 0,61-0,65\%$	Виключення вірогідності утворення холодних тріщин при наплавленні
6	Однодугове(1) або двохдугове (2) наплавлення	1. $Q_{напл} = 12-15$ кДж/см 2. $Q_{напл} = 10-12$ кДж/см	При двохдуговому наплавленні в 1,5 рази вище працездатність та можливо знизити $T_{пп}$ на 50 °C від вказаної
7	Уповільнене охолодження коліс після наплавлення в термокамерах	Охолодження до 4–5 годин із швидкістю $\leq 35-40$ °C/год (в інтервалі температур 250–100 °C)	Видалення водню з наплавлень, зниження рівня напружень II роду, підвищення в 1,8–2,3 рази опірності крихкому руйнуванню

Наукова новизна та практична значимість

Розвинуто уявлення щодо структурно-фазових змін, які відбуваються в металі залізничного колеса при дуговому наплавленні. Встановлено взаємозв'язок між вмістом вуглецю в сталі, швидкістю її охолодження при наплавленні та опірністю утворенню тріщин і крихкому руйнуванню. Встановлено вплив умов охолодження колеса після наплавлення на властивості металу.

За результатами роботи розроблено науково обґрунтовані технологічні рекомендації щодо відновлення наплавленням залізничних коліс вантажних вагонів, які визначають конструктивну схему та метод наплавлення, вибір зварювальних матеріалів, температури попереднього підігріву колеса залежно від вмісту вуглецю в сталі, параметри уповільненого охолодження коліс після наплавлення. Застосування рекомендацій забезпечить підвищення якості відновлення наплавленням залізничних коліс, їх на-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

дійність та безпеку руху транспорту в умовах зростаючих експлуатаційних навантажень. Основні положення технології наплавлення залізничних коліс захищені Патентом України [10].

Розроблено Технічні умови України ТУ У 30.2–05416923–106:2013 «Відновлення дуговими процесами зварювання профілю поверхні кочення залізничних коліс», які регламентують технічні вимоги як до процесу відновлення наплавленням зношених гребенів коліс, так і до відновлення всього профілю кочення коліс, включаючи ремонт локальних дефектів типу «вищербини».

Висновки

1. Метал колеса на ділянці переходу від поверхні кочення до гребеня при експлуатації зазнає найбільших деформацій і зміцнення, а в приповерхневому шарі утворюються мікротріщини довжиною до 350 мкм. Тому перед наплавленням необхідно механічно видаляти метал на глибину не менше ніж 1,0 мм. А при відновленні коліс необхідно забезпечити підвищену опірність крихкому руйнуванню наплавлень особливо в цій зоні.

2. При наплавленні в металі зони термічного впливу колеса утворюються гартівні бейнітно-мартенситні структури. Мінімальна швидкість охолодження металу, при якій починається формування мартенситу, становить 8 °C/с (в інтервалі 600–500 °C) при вмісті вуглецю в сталі з 0,58 % та 2 °C/с при 0,65 % вуглецю.

3. Для підвищення опірності утворенню тріщин необхідно обмежувати швидкість охолодження до 16,0 °C/с при вмісті вуглецю $C < 0,60$ %, та до 8,0 °C/с при $C = 0,60–0,65$ %. За таких умов метал має достатньо високу здатність до мікропластичного деформування без утворення тріщин.

4. Для упередження крихкого руйнування металу ЗТВ необхідно забезпечити умови, коли в процесі наплавлення буде сформована структура, яка не містить верхній бейніт, а частка мартенситу не перевищує кількості нижнього бейніту (співвідношення М/Бн < 1).

5. Суттєвому підвищенню опірності крихкому руйнуванню металу ЗТВ сприяє уповільнення охолодження коліс після наплавлення, коли відбувається витримка колеса при температурі 250–100 °C протягом 3–5 годин. При

цьому швидкість охолодження повинна бути не більше ніж 35–40 °C за годину. Досягти таких умов можливо в спеціальних термокамерах, виготовлених із застосуванням теплоізолюючих матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабаченко, А. И. Влияние микролегирования стали на вязкость разрушения железнодорожных колес / А. И. Бабаченко, И. Г. Узлов, Ж. А. Дементьева // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 2005. – № 5. – С. 46–47.
2. Влияние состава наплавленного металла на структуру и механические свойства железнодорожных колес / А. А. Гайворонский, В. Д. Позняков, Л. И. Маркашова [и др.] // *Автоматическая сварка.* – 2012. – № 8. – С. 18–24.
3. Дефекти залізничних коліс / І. О. Вакулєнко, В. Г. Анофрієв, М. А. Грищенко, О. М. Перков. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2007. – 112 с.
4. Исследование причин образования дефектов на поверхности катания высокопрочных колес в процессе эксплуатации / А. И. Бабаченко, А. А. Кононенко, Ж. А. Дементьева [и др.] // *Залізн. трансп. України.* – 2010. – № 5. – С. 35–38.
5. Контактно-втомна пошкоджуваність поверхні кочення залізничних коліс типу КП-2 та КП-Т / О. П. Осташ, І. М. Андрейко, В. В. Кулик, В. І. Прокопєць // *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна.* – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 39. – С. 118–122.
6. Контактно-усталостное повреждение колес грузовых вагонов / под ред. проф. С. М. Захарова. – Москва : Интекст, 2004. – 160 с.
7. Костин, В. А. Современные возможности моделирования превращения аустенита в сварных швах низколегированных сталей / В. А. Костин, Г. М. Григоренко, В. Ю. Орловский // *Автоматическая сварка.* – 2008. – № 3. – С. 31–34.
8. Макаров, Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей / Э. Л. Макаров. – Москва : Машиностроение, 1981. – 247 с.
9. Новые методы оценки сопротивляемости металлов хрупкому разрушению / под ред. Ю. Н. Роботнова. – Москва : Мир, 1972. – 439 с.
10. Пат. 107301 Україна, МПК 2014.01, В 23 Р 6/00. Спосіб відновлення виробів з високовуглецевих сталей / Гайворонський О. А., Позняков В. Д., Клапатюк А. В. (Україна); заявник та патентовласник Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- ни. – № а 2013 14813 ; заявл. 17.12.2013 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23. – 5 с.
11. Рябцев, И. И. Блочно-модульная установка для испытаний наплавленного металла / И. И. Рябцев, Я. П. Черняк, В. В. Осин // Сварщик. – 2004. – № 1. – С. 18–20.
 12. Совершенствование химического состава стали для железнодорожных колес, обеспечивающего повышение их стойкости к образованию дефектов на поверхности катания / А. И. Бабаченко, П. Л. Литвиненко, А. В. Кныш [и др.] // Фундамент. и прикл. проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. / ИЧМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 23. – С. 226–233.
 13. Шур, Е. А. К вопросу об оптимизации соотношения твердости рельсов и колес / Е. А. Шур // Вестн. ВНИИЖТа. – 2006. – № 3. – С. 9–14.
 14. Cassidy, Ph. Wrought materials way prolong wheel lifewheel sat technology / Ph. Cassidy // Intern. Railway J. – 2001. – № 12. – P. 40–41.
 15. Estimation of the strength and crack resistance of the metal of railway wheels after long-term operation / L. I. Markashova, V. D. Poznyakov, A. A. Gaivoronskii [et al.] // Materials Science. – 2012. – Vol. 47. – Iss. 6. – P. 799–806. doi: 10.1007/s11003-012-9458-1.
 16. Stevenot, G. L'innovation dans les roués ferroviates et l'volution des march's / G. Stevenot, F. Damilly // Revue Générale des Chemins de Fer. – 2002. – № 5. – P. 33–39.
 17. Structure and mechanical properties of the heat affected zone of restored railway wheels / O. A. Haivorons'kyi, V. D. Poznyakov, L. I. Markashova [et al.] // Materials Science. – 2016. – Vol. 51. – Iss. 4. – P. 563–569. doi: 10.1007/s11003-016-9876-6.
 18. Wpływ wodoru dyfuzyjnego na odporność pękaniu kruchemu metalu strefy wpływu termicznego wysokowytrzymałej stali węglowej / A. Gajworonski, S. Kasatkin, L. Markaszowa, T. Zuber // Przegląd Spawalnictwa. – 2014. – № 12. – P. 49–55.

А. А. ГАЙВОРОНСКИЙ^{1*}

^{1*}Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, Киев, Украина, 03068, тел. +38 (044) 205 20 95, эл. почта gajva@ukr.net, ORCID 0000-0002-8146-7790

УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕННЫХ НАПЛАВКОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

Цель. В работе предполагается установить закономерности формирования структуры и физико-механических свойств колесных сталей при дуговой наплавке и разработать технологические рекомендации по восстановлению поверхностей износа железнодорожных колес. Они обеспечат повышение надежности и безопасности движения транспорта в условиях растущих эксплуатационных нагрузок. **Методика.** Для достижения поставленной цели исследовано: 1) влияние эксплуатационных нагрузок на структурные изменения и свойства металла колеса; 2) влияние дуговой наплавки на структурно-фазовый состав и свойства металла зоны термического влияния, его сопротивляемость хрупкому и замедленному разрушениям; 3) влияние наплавленного металла на формирование напряженного состояния наплавки и их сопротивляемость образованию трещин; 4) износостойкость восстановленного металла при трении-скольжении пары «колесо-рельс». **Результаты.** Наиболее напряженным участком профиля качения железнодорожных колес грузовых вагонов при эксплуатации является место перехода от поверхности катания до гребня. Поэтому при восстановлении наплавкой колес необходимо, прежде всего, обеспечить повышенную сопротивляемость хрупкому разрушению металла в этой зоне. Для исключения образования трещин при наплавке необходимо ограничивать скорость охлаждения в зоне термического влияния до 16,0 °С/с (в интервале 600...500 °С) при содержании углерода $C < 0,60$ %, и до 8,0 °С/с при $C = 0,60...0,65$ %. При этом, сравнительно высокая сопротивляемость хрупкому разрушению обеспечивается, когда в процессе наплавки будет сформирована структура, которая не содержит верхней бейнит, а доля мартенсита не превышает количества нижнего бейнита (соотношение М/Бн < 1). Выдержка колеса на протяжении 3,5–4,5 часов при температуре 100 °С после наплавки в процессе его замедленного охлаждения способствует повышению сопротивляемости хрупкому разрушению металла зоны термического влияния в 1,8–2,3 раза. Это происходит в результате удаления диффузионного водорода из металла и снижение в 1,5 раза напряжений второго рода в объеме рельсов бейнита и мартенсита. **Научная новизна.** Автором развиты знания о структурно-фазовых изменениях, которые происходят в металле железнодорожного колеса при дуговой наплавке. Установлена взаимосвязь между содержанием углерода в стали, скоростью ее охлаждения при наплавке, сопротивляемостью образованию трещин и хруп-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

кому разрушению. Установлено влияние условий охлаждения колеса после наплавки на свойства металла. **Практическая значимость.** Разработаны технологические рекомендации по восстановлению наплавкой железнодорожных колес грузовых вагонов. Их применение обеспечит повышение качества восстановления наплавкой железнодорожных колес, надежность и безопасность движения транспорта в условиях растущих эксплуатационных нагрузок.

Ключевые слова: железнодорожное колесо; дуговая наплавка; зона термического влияния; структура; холодные трещины; хрупкое разрушение; наплавленный металл; износостойкость; технологические рекомендации

О. А. НАИВОРОНСЬКИЙ^{1*}

^{1*}Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine, Kazimir Malevich St., 11, Kyiv, Ukraine, 03068, tel. +38 (044) 205 20 95, e-mail gajva@ukr.net, ORCID 0000-0002-8146-7790

TERMS OF ENSURING QUALITY OF THE RAILWAY WHEELS BUILT UP BY WELDING

Purpose. The paper assumes to set the basic laws in determining the structure and physical-mechanical properties of wheel steels during arc welding technology and to develop the recommendations for reconstruction of railway wheel wear surfaces that will improve the reliability and safety of traffic in terms of increasing operating loads.

Methodology. To achieve this purpose the paper studied 1) the influence of operating loads on structural changes and properties of metal wheels; 2) the impact of arc welding on structural and phase composition and properties of the metal heat-affected zone, its resistance to brittle and slow fracture; 3) the impact of welded metal on the formation of the stress state of the welds and their resistance to formation cracks; 4) wear resistance of built up metal during friction-slip of the «wheel-rail» pair. **Findings.** The most intense zone of the rolling profile of freight railway wheels during operation is a place of transition from rolling surface to the ridge. Therefore, the wheel building up by welding requires first of all the increased resistance to brittle fracture of metal in this area. It is established that welding in the metal of the wheel heat-affected zone cause formation of the hardened bainite-martensite structures. The minimum metal cooling rate, at which the martensite start forming is 8 °C / s (in the range of 600...500 °C) when the content of carbon in steel is 0.58 % and 2 °C/s at 0.65 % of carbon. It is shown that to increase resistance to cracking it is necessary to limit the cooling rate to 16.0 °C/s when the carbon content is C < 0.60 % and to 8.0 °C / s when C = 0.60...0.65 %. Under these conditions, the metal has rather high ability to mikroplastic deformation without cracking. It was founded that to improve the critical stress intensity factor K_{IC} at brittle fracture it is necessary to provide conditions when welding would result in the built up structure that does not contain upper bainite and the martensite share does not exceed the number of lower bainite (ratio of M/Bn < 1). It is proved that exposure of wheels within 3.5-4.5 hours at 100 °C after welding, during their slow cooling improves resistance to brittle fracture of metal heat-affected zone by 1.8-2.3 times. This is due to the removal of diffusion hydrogen from the metal and reduction of the II type stress in the lath volume of bainite and martensite by 1.5. **Originality.** The author has developed the idea of the structural-phase changes that occur in the metal of railway wheels during arc welding. The relation between the carbon content in steel, cooling rate during welding and resistance to cracking and brittle fracture was found. The authors determined the influence of after-welding wheel cooling conditions on the metal properties. **Practical value.** Technological recommendations for railway freight wheel building up by welding were developed. Their application will improve quality of the railway wheels built up by welding, reliability and safety of traffic in conditions of growing operating loads.

Keywords: railway wheel; arc welding; heat-affected zone; structure; cold cracks; brittle fracture; weld metal; wear resistance; technological recommendations

REFERENCES

1. Babachenko A.I., Uzlov I.G., Dementeva Zh.A. Vliyaniye mikrolegirovaniya stali na vyazkost razrusheniya zheleznodorozhnykh koles [Steel microalloying impact on fracture toughness of railway wheels]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost – Metallurgical and Mining Industry*, 2005, no. 5, pp. 46-47.
2. Gayvoronskiy A.A., Poznyakov V.D., Markashova L.I., Bernikova Ye.N., Klapatyuk A.V., Alekseenko T.A., Shishkevich A.S. Vliyaniye sostava naplavlennogo metalla na strukturu i mekhanicheskiye svoystva

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- zheleznodorozhnykh koles [Impact of weld metal composition on the structure and mechanical properties of railway wheels]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic Welding*, 2012, vol. 8, pp. 18-24.
3. Vakulenko I.O., Anofriiev V.H., Hryshchenko M.A., Perkov O.M. *Defekty zaliznychnykh kolis* [Defects of railway wheels]. Dnipropetrovsk, Makovetskyi Publ., 2007. 112 p.
 4. Babachenko A.I., Kononenko A.A., Dementeva Zh.A., Litvinenko P.L., Knysh A.V. Issledovaniye prichin obrazovaniya defektov na poverkhnosti kataniya vysokoprochnykh koles v protsesse ekspluatatsii [Research the causes of defects on the surface of high-rolling wheels at operation]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2010, vol. 5, pp. 35-38.
 5. Ostash O.P., Andreiko I.M., Kulyk V.V., Prokopets V.I. Kontaktno-vtomna poshkodzhuvanist poverkhni kochennia zaliznychnykh kolis typu KP-2 ta KP-T [The contact fatigue damage of the wheel thread by types KP-2 ta KP-T]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 39, pp. 118-122.
 6. Zakharov S.M. *Kontaktno-ustalostnoye povrezhdeniye koles gruzovykh vagonov* [The contact-fatigue damage of wheels in freight cars]. Moscow, Intekst Publ., 2004. 160 p.
 7. Kostin V.A., Grigorenko G.M., Orlovskiy V.Yu. Sovremennyye vozmozhnosti modelirovaniya prevrashcheniya austenita v svarnykh shvakh nizkolegированных сталей [Contemporary modeling capabilities of austenite transformation in welding seams of low-alloy steels]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic Welding*, 2008, no. 3, pp. 31-34.
 8. Makarov E.L. *Kholodnyye treshchiny pri svarke legirovannykh staley* [Cold crackings at alloy steels welding]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1981. 247 p.
 9. Robotnov Yu. N. *Novyye metody otsenki soprotivlyayemosti metallov khrupkomu razrusheniyu* [New methods for metallic resistance evaluation to brittle fracture]. Moscow, Mir Publ., 1972. 439 p.
 10. Haivoronskyi O.A., Pozniakov V.D., Klapatiuk A.V. *Sposib vidnovlennia vyrobiv z vysokovuhletsevykh stalei* [Reduction method for products of high-carbon steels]. Patent Ukraine, no. a 201314813, 2014.
 11. Ryabtsev I.I., Chernyak Ya.P., Osin V.V. Blochno-modulnaya ustanovka dlya ispytaniy naplavlennogo metalla [Modular facility for weld metal test]. *Svarshchik – Welder*, 2004, no. 1, pp. 18-20.
 12. Babachenko A.I., Litvinenko P.L., Knysh A.V., Dementeva Zh.A., Khulin A.N., Shpak Ye.A. Sovershenstvovaniye khimicheskogo sostava stali dlya zheleznodorozhnykh koles, obespechivayushchego povysheniye ikh stoykosti k obrazovaniyu defektov na poverkhnosti kataniya [Chemical composition improvement of steel for railway wheels, ensuring increase of their resistance to formation of defects on the roll surface]. *Sbornik nauchnykh trudov «Fundamentalnyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii»* [Proc. «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy»], 2011, issue 23, pp. 226-233.
 13. Shur Ye.A. K voprosu ob optimizatsii sootnosheniya tverdosti relsov i koles [To the question of ratio optimization of rails and wheels hardness]. *Vestnik VNIIZhTa – Bulelin of All-Russian SRIRT*, 2006, no. 3, pp. 9-14.
 14. Cassidy Ph. Wrought materials way prolong wheel lifewheel sat technology. *Intern. Railway Journal*, 2001, no. 12, pp. 40-41.
 15. Markashova L.I., Poznyakov V.D., Gaivoronskii A.A., Berdnikova E.N., Alekseenko T.A. Estimation of the strength and crack resistance of the metal of railway wheels after long-term operation. *Materials Science*, 2012, vol. 47, issue 6, pp. 799-806. doi: 10.1007/s11003-012-9458-1.
 16. Stevenot G., Damilly F. L'innovation dans les roués ferroviates et l'volution des march's. *Revue Générale des Chemins de Fer*, 2002, no. 5, pp. 33-39.
 17. Haivorons'kyi O.A., Poznyakov V.D., Markashova L.I., Ostash O.P., Kulyk V.V., Alekseenko T.O., Shyshkevych O.S. Structure and mechanical properties of the heat affected zone of restored railway wheels. *Materials Science*, 2016, vol. 51, issue 4, pp. 563-569. doi: 10.1007/s11003-016-9876-6.
 18. Gajworonski A., Kasatkin S., Markaszowa L., Zuber T. Wplyw wodoru dyfuzyjnego na odporność pękaniu kručemu metalu strefy wplywu termicznego wysokowytrzymałej stali węglowej. *Przegląd Spawalnictwa*, 2014, no. 12, pp. 49-55.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І. А. Рябцевим (Україна); д.т.н., проф. І. О. Вакуленком (Україна)

Надійшла до редколегії: 23.05.2016

Прийнята до друку: 15.09.2016

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 625.032.3-048.24

Р. КРАЙС^{1*}, В. С. ЛІСНИЧИЙ^{2*}

^{1*} Flaig+Hommel GmbH (ТОВ), Verbindungselemente Heer Str., 1, Альдінген, Німеччина, 78554, тел. +49 (074) 24 96 20, ел. пошта roland.kreis@flaig-hommel.de, ORCID 0000-0002-0042-9697

^{2*} АТ «Науково-впроваджувальний центр «Вагони», а/с 356, Санкт-Петербург, Російська Федерація, 190031, тел. +7 (921) 316 87 37, ел. пошта Lesnichy1@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0046-0918

ВИКОРИСТАННЯ ШЕСТИГРАННИХ СУЦІЛЬНОМЕТАЛЕВИХ САМОСТОПОРНИХ FS-ГАЙОК У РУХОМОМУ СКЛАДІ ЗАЛІЗНИЦЬ ШИРИНИ КОЛІЇ 1520 ММ

Мета. Однією з ключових вимог до рухомого складу нового покоління є потреба збільшення гарантійних строків або пробігів між технічними обслуговуваннями в експлуатації та між плановими ремонтами, що призведе до зниження витрат на технічне обслуговування та ремонт рухомого складу за його життєвий цикл. У зв'язку з цим при будівництві, ремонті, модернізації рухомого складу прагнуть використовувати кріпіння, який забезпечить високу надійність під дією вібрації. Цим вимогам відповідає шестигранна самостопорна суцільнометалева FS-гайка багаторазового використання компанії-виробника Flaig+Hommel GmbH. Тому в роботі необхідно розглянути результати випробувань на підтвердження надійності FS-гайок у нових умовах. **Методика.** Для підтвердження функціональності різьбових з'єднань із FS-гайками для рухомого складу залізниць ширини колії 1520 мм проведений комплекс випробувань: 1) випробування навантаженням та на стопорний момент згідно з ISO 2320 при нормальних кліматичних умовах та після впливу низьких температур; 2) випробування на рухомому складі в умовах ресурсних пробігових навантажень та в підконтрольній експлуатації вагонів. **Результати.** Проведені випробування FS-гайок та представлені результати свідчать про те, що суцільнометалеві самостопорні FS-гайки відповідають міжнародним стандартам, підтверджують надійність в експлуатації на рухомому складі залізниць ширини колії 1520 мм. Зокрема, під час експлуатації зберігається стопорний момент та момент затягування в різьбових з'єднаннях на необресорених частинах та на обресорених частинах візків вантажних вагонів в умовах вібронавантажень при багаторазовому використанні FS-гайок. **Наукова новизна.** Розроблений комплекс програм і методик вдосконалений проведення додаткових випробувань після впливу на різьбові з'єднання з FS-гайками низьких температур, а також контрольними операціями оцінки стану різьбових з'єднань із FS-гайками в умовах підконтрольної експлуатації рухомого складу. Це в повній мірі дозволяє підтвердити надійність використання FS-гайок на рухомому складі залізниць ширини колії 1520 мм. **Практична значимість.** Застосування FS-гайок дозволяє відмовитись від використання у різьбових з'єднаннях рухомого складу ширини колії 1520 мм таких елементів як корончаті гайки, пружні шайби, стопорні шайби, зубчаті шайби, запобіжні пластини, одноразові скріплення, контргайки тощо, щоб гарантувати технічні вимоги до інноваційного рухомого складу. Також сучасні виробничі технології FS-гайок забезпечують тривалу роботу в умовах забрудненості, вологості, перепадів температури та інших несприятливих факторів.

Ключові слова: FS-гайка; різьбове з'єднання; рухомий склад; випробування

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Вступ

Сучасним елементом різьбового з'єднання універсального використання, яке працює в умовах вібрації, є шестигранна самостопорна суцільнометалева FS-гайка багаторазового використання компанії-виробника Flaig+Hommel GmbH (далі – FS-гайка), що успішно зарекомендувала себе протягом декількох десятиліть, зокрема на транспорті у країнах Європи, а також з 2012 року у Росії.

FS-гайка відповідає вимогам стандартів ISO 7042, ISO 10513, ISO 7044, ISO 12126, ISO 2320.

Приклад умовного позначення FS-гайки: *FS M16 ISO 7042-8-Zn8.*, де

- *FS* – зареєстрований товарний знак Flaig+Hommel GmbH;
- *M16* – параметри різьби;
- *ISO 7042* – стандарт відповідності гайки;
- *8* – клас міцності гайки;
- *Zn8* – тип і товщина покриття.

FS-гайка може бути встановлена на будь-який залізничний рухомий склад, якщо проектною документацією на нього передбачено кріплення деталі різьбовим з'єднанням з використанням будь-якої гайки.

Розміри основних типів FS-гайок наведені в табл. 1, а позначення розмірів – на рис. 1. FS-гайки мають поле допуску різьби *6H*. Слід за-

значити, що крім основних типів, наведених у табл. 1, можливе виготовлення FS-гайок великих розмірів – до M110– спеціальної форми для умов різної складності використання у конструкції різьбового з'єднання.

FS-гайка складається з двох елементів (рис. 1): тіло гайки та запресований у нього металевий стопорний пружний елемент з тією ж різьбою, що і тіло гайки, зі зміщенням по кроку. Стопорний елемент перешкоджає вільному обертанню гайки по різьбі болта, забезпечуючи виникання стопорного моменту по всій круглості профілю різьби (360°), який утримує гайку від будь-яких послаблень та провертань по різьбі при дії вібрації. Стопорний елемент діє в осьовому та радіальному напрямку. Слід зазначити, що стопорний елемент ні в якому разі не пошкоджує спряжену різьбу болта.

Працездатність FS-гайок, яка полягає у збереженні стопорного моменту, зазначеного в ISO 2320, може складати до п'ятнадцяти циклів закручування-відкручування у разі дотримання вимог виробника щодо експлуатації FS-гайки. Для захисту від корозії FS-гайка має електролітичне покриття у відповідності з ISO 4042. Під час виготовлення на FS-гайку наносять обов'язкове маркування, важливим елементом якого є зареєстрований товарний знак «FS».

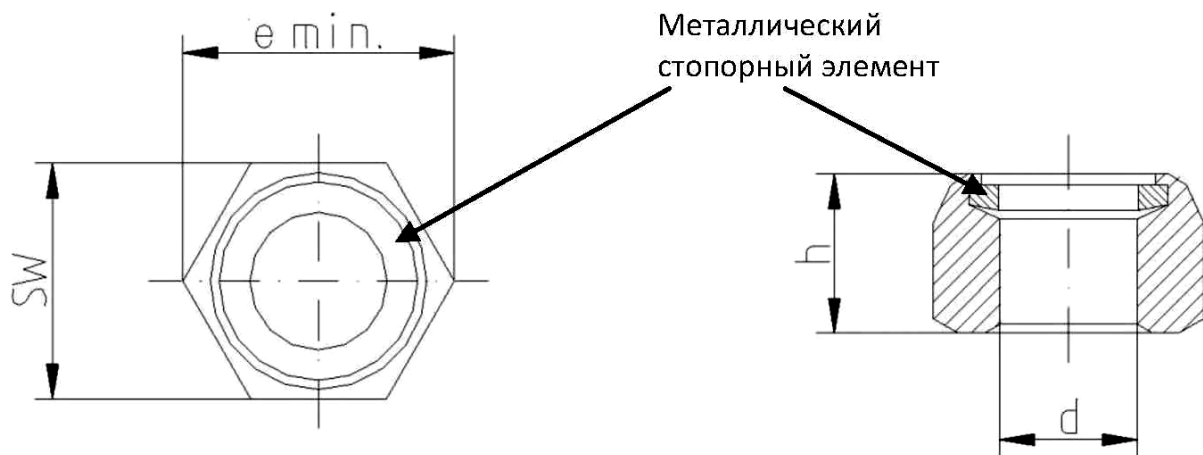


Рис. 1. Конструкція та позначення геометричних розмірів FS-гайки

Fig. 1. The design and geometric dimensions of FS-nuts

Таблиця 1

Розміри FS-гайок

Table 1

FS-nuts dimensions

Позначення гайки, d	Розмір, мм						
	h				S_w		e_{min}
	max		min		max	min	
	Безфланцева	З фланцем	Безфланцева	З фланцем			
M5	5,1	6,2	4,80	5,70	8	7,78	
M6	6,0	7,3	5,40	6,80	10	9,78	11,05
M8	8,0	9,4	7,14	8,74	13	12,73	14,38
M10	10,0	11,4	8,94	10,34	16	15,73	17,77
M12	12,0	13,8	11,57	12,57	18	17,73	20,03
M14	14,1	15,9	13,40	14,80	21	20,67	23,36
M16	16,4	18,3	15,70	17,20	24	23,67	26,75
M20	20,3	22,4	19,00	20,30	30	29,16	32,95
M24	23,9	–	22,60	–	36	35,00	39,55
M30	30,0	–	27,30	–	46	45,00	50,85
M36	36,0	–	33,10	–	55	53,80	60,79

Відмінною особливістю монтажу FS-гайки є те, що стопорний елемент повинен завжди розташовуватися з протилежного боку від початку наживлення FS-гайки на різьбу болта.

Для забезпечення якості з'єднання деталей та тривалої працездатності стопорного елемента FS-гайки необхідно дотримуватись та контролювати момент затягування (табл. 2). Наведені значення моментів затягування рекомендовані Flaig+Hommel GmbH, але конструктор рухомого складу може коригувати момент затягування для конкретного з'єднання відповідно до чинних нормативів на різьбові з'єднання та особистостей конкретної конструкції (момент тертя, властивості поверхні, до якої притягується гайка тощо). Фактичний момент затягування FS-гайки ($M_{факт}$) є сумою розрахункового моменту затягування ($M_{розр}$) та стопорного моменту ($M_{стоп}$).

Важливою вимогою, пов'язаною з особливістю конструкції FS-гайки, є швидкість нагвин-

чування FS-гайки при використанні автоматизованого інструмента. Рекомендована Flaig+Hommel GmbH швидкість нагвинчування – 30 об/хв, оскільки при такій швидкості забезпечується найбільш сприятлива взаємодія стопорного елемента FS-гайки з різьбою болта. Після аналізу конкретних умов монтажу та інструмента на підприємстві, де відбувається збірка конструкції, швидкість монтажу може бути збільшена за рекомендацією Flaig+Hommel GmbH, але не більше, ніж до 100 об/хв, оскільки при збільшенні обертів суттєво зростає температура нагріву болта та FS-гайки внаслідок роботи стопорного елемента FS-гайки. Нагрівання неминуче, оскільки при нагвинчуванні FS-гайки долається зусилля стопорного моменту.

Моменти затягування FS-гайок

Wrench torque of FS-nuts

Моменти затягування (Н·м), дійсні для $\mu_{\text{прив}} = 0,1^*$							
Стандартна різьба				Дрібна різьба			
Клас міцності Параметри різьби	8	10	12	Клас міцності Параметри різьби	8	10	12
M5	4,8	7,1	8,3	–			
M6	8,3	12	14	–			
M8	20	30	35	M8x1	22	32	37
M10	40	59	69	M10x1,25	42	62	72
M12	69	100	120	M12x1,5	72	105	125
M14	110	160	190	–			
M16	170	250	290	M16x1,5	180	265	310
M20	340	490	570	M20x1,5	375	530	620
M24	590	840	980	M24x2	630	900	1 050
M30	1 200	1 700	1 950	M30x2	1 300	1 850	2 150
M36	2 150	3 050	3 600	M36x2	2 400	3 500	4 000

* $\mu_{\text{прив}}$ – приведений коефіцієнт тертя

При другому та наступних використаннях FS-гайки бажана перевірка присутності у неї стопорного моменту, щоб переконатися у її справності, тому що стопорні властивості, можливо, були втрачені у разі порушення умов експлуатації і недотримання правил монтажу. Засіб перевірки стопорних властивостей досить простий та полягає в тому, що треба наживити FS-гайку на болт «від руки», виключивши використання будь-яких інструментів, поки кромка болта не вступить у взаємодію зі стопорним елементом FS-гайки. Коли вже стопорний елемент почне входити у зчеплення з різьбою болта, тоді закручування FS-гайки «від руки» буде вкрай важке, тобто практично неможливе, і це означатиме, що стопорний момент у FS-гайки присутній.

Мета

Відповідно до прийняття конструктивних рішень щодо використання самостопорних FS-гайок в різьбових з'єднаннях кріплення деталей

рухомого складу нового покоління ширини колії 1520 мм, зокрема у візка вантажного вагона, виникла необхідність виконання комплексу додаткових випробувань на підтвердження надійності FS-гайок у нових умовах.

Методика

На першому етапі випробувань FS-гайки перевіряли на працездатність методом, описаним у ISO 2320, як при кімнатній температурі, так і після дії на різьбові з'єднання з FS-гайками низької температури (-60°C).

Випробування виконувались на території підприємства Flaig+Hommel GmbH в атестованій лабораторії з необхідними засобами вимірювання та тестування. Для впливу низької температури на різьбові з'єднання з FS-гайками вони були закладені в термокамеру та витримувались при температурі -60°C протягом 6 годин.

Випробування виконувались стосовно таких типів FS-гайок:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- FS M 20 DIN 980/ISO 7042-10-Zn8;
- FS M 20 DIN EN 1664-10-Zn8;
- FS M 24 DIN 980/ISO 7042-10-Zn8,

які випадковим чином були обрані з серійної партії продукції, по дев'ять кожного типу:

- по три для вимірювання стопорного моменту моментним ключем (FS-гайка «а» (рис. 2));
- по три для випробування навантаженням по ISO 2320 до впливу низької температури (FS-гайка «с» (рис. 3));
- по три для вимірювання стопорного моменту автоматично по ISO 2320 до і після впливу низької температури, а також для випробувань навантаженням після впливу низької температури (FS-гайка «b» (рис. 4)).

Порядок робіт на першому етапі випробувань був наступний:

- а) візуально оцінювався зовнішній вигляд, якість покриття та маркування кожної FS-гайки (рис. 5);

б) визначались геометричні розміри кожної FS-гайки та її різьби;

в) виконувались випробування кожної FS-гайки навантаженням, визначався стопорний момент згідно з ISO 2320 при кімнатній температурі;

г) виконувались випробування кожної FS-гайки навантаженням, визначався стопорний момент згідно з ISO 2320 після впливу низької температури (-60°C).

Для вимірювання геометричних розмірів FS-гайок були взяті три FS-гайки «b» кожного типу, які в подальшому випробувались на стопорні властивості до і після впливу низької температури та навантаженням після впливу низької температури.



Рис. 2. Зразки FS-гайок для визначення стопорного моменту моментним ключем

Fig. 2. FS-nuts samples for determining the locking moment with a torque wrench



Рис. 3. Зразки FS-гайок для випробувань навантаженням до впливу низької температури

Fig. 3. FS-nuts samples for testing by load to the low temperature impact

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ



Рис. 4. Зразки FS-гайок для визначення стопорного моменту автоматично до і після впливу низької температури, а також випробувань навантаженням після впливу низької температури

Fig. 4. FS-nuts samples for determining the stopping moment automatically before and after low temperature impact and testing by load after low temperature impact

Для FS-гайок, на яких виконувались вимірювання геометричних розмірів, було здійснено також контроль різьби відповідними калібрами.

До тестуванням випробувань на стопорні властивості автоматичним засобом зразків FS-гайок «b» відповідно до ISO 2320 була виконана перевірка стопорного моменту за допомогою моментного ключа (рис. 6) у дев'яти зразків FS-гайок «a» (по три FS-гайки кожного типу). Стопорний момент фіксувався при першому та п'ятому закручуванні та відкручуванні, чотирнадцятому закручуванні до дії низької температури а потім, при п'ятнадцятому відкручуванні після впливу низької температури. Результати наведені у табл. 6. Слід зазначити, що вимоги ISO 2320 по достатній кількості у п'ять циклів,

при яких повинні зберігатися стопорні властивості стопорної гайки, перевищені, що свідчить про високий резерв конструкції FS-гайки зберігати основну властивість – стопорний момент!

Відповідно до ISO 2320 для дев'яти зразків «с» (по три FS-гайки кожного типу) виконані випробування навантаженням до впливу низької температури. Для FS-гайок M20 випробування були виконані на пресі MAREM (рис. 7) з навантаженням до 259,7 кН та для FS-гайок M24 – на пресі KRAFTAUFNEHMER (рис. 8) з навантаженням до 374,2 кН. У подальших випробуваннях ці FS-гайки не були використані, оскільки вплив навантаженням – це екстремальні умови, після яких стопорні властивості FS-гайки не можуть бути гарантовані.



Рис. 5. Візуальний огляд FS-гайок під збільшувальним склом

Fig. 5. Visual inspection of FS-nuts under the zoom

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ



Рис. 6. Моментний ключ

Fig. 6. Torque wrench



Рис. 7. Випробування FS-гайки M20 навантаженням

Fig. 7. Test of FS-nut by M20 load



Рис. 8. Випробування FS-гайки M24 навантаженням

Fig. 8. Test of FS-nut by M20 load

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Відповідно до ISO 2320 для дев'яти зразків «b» (по три FS-гайки кожного типу), на яких вимірювались геометричні параметри та контролювалася різьба, виконані випробування стопорного моменту на стенді SCHATZ (рис. 9). Стопорний момент визначався при першому закручуванні та відкручуванні та при п'ятому відкручуванні. За результатами вимірювань відзначено, що значення моменту лежить у відповідному з ISO 2320 діапазоні для FS-гайки класу міцності 10 (результати подібні до результатів, наведених у табл. 6).

Після випробувань при кімнатній температурі різьбові з'єднання з FS-гайками «b» були поміщені в термокамеру та заморожені до температури -60°C , при якій були витримані 6 годин.

Після видалення з термокамери FS-гайок «b» та витримки при кімнатній температурі протягом чотирьох годин були виконані випробування на відповідність стопорного моменту вимогам ISO 2320. Стопорний момент визначався для першого закручування та відкручування та для п'ятого відкручування. Слід зазначити, що перше закручування після впливу низької температури відповідає фактично сьомому закручуванню, а п'яте розкручування – одинадцятому, оскільки ті ж самі FS-гайки до впливу низької температури піддавалися випробуванням на вимірювання стопорного моменту протягом п'яти циклів закручування-відкручування, а потім були закручені шостий раз і поміщені в термокамеру. За результатами вимірювань визначена відповідність значень стопорного моменту припустимому діапазону відповідно до ISO 2320 для FS-гайок класу міцності 10 (результати подібні до результатів, наведених у табл. 6).

FS-гайки «b», які були від впливом низької температури та випробувані на відповідність стопорного моменту, також були випробувані навантаженням відповідно до ISO 2320.

На другому етапі випробувань FS-гайки контролювалися в умовах руху поїзда під час ресурсних пробігових випробувань візків моделі 18-9855 універсального вантажного вагона моделі 12-9853. Випробуванням були піддані такі типи гайок, які належать до конструкції візка:

- FS M 20 DIN 980/ISO 7042-10-Zn8;
- FS M 20 DIN EN 1664-10-Zn8;
- FS M 24 DIN 980/ISO 7042-10-Zn8.

Метою цього етапу випробування було перевірити надійність кріплення деталей візка FS-гайками в умовах вібронавантажень під час руху поїзда. Завдання випробувань було спрямовано на оцінку цілісності різьбових з'єднань з FS-гайками та збереження належних властивостей стопорного моменту.

Випробування були виконані відповідно до розробленої АТ «НВЦ «Вагони» програми та методики ресурсних пробігових випробувань візків моделей 18-9855.

Випробування виконувались на експериментальному залізничному полігоні на станції Щербинка Московської залізниці, включенням вагона, на якому виконувались випробування, до складу вантажного поїзда. Поїзд мав вагу близько 9 тисяч тонн і рухався під час випробувань з середньою швидкістю 70 км/год. Вагон, який проходив випробування, був навантажений до максимального навантаження (25 тс від однієї колісної пари на колію).

Огляд різьбових з'єднань з FS-гайками було виконано перед початком випробувань. Проміжні огляди були виконані після 24 тисяч км та 53 тисяч км пробігу вагона. Підсумковий огляд був виконаний після 85 тисяч км пробігу, що відповідало еквівалентному пробігу 255 тисяч км з урахуванням так званого коефіцієнта форсування – 3, призначеного для експериментального полігону на станції Щербинка.

Під час огляду різьбових з'єднань з FS-гайками виконувались такі дії:

- візуально визначалась цілісність з'єднань;
- визначалось, чи є послаблення FS-гайок;
- визначався момент затягування FS-гайки.

Третій етап випробування – це нагляд та контроль FS-гайок в умовах підконтрольної експлуатації всіх вагонів, побудованих Тіхвінським вагонобудівним заводом (Росія) на мережі залізниць ширини колії 1 520 мм з 2012 року.

Найбільший пробіг, якого досягли вагони першого випуску Тіхвінського вагонобудівного заводу, станом на 1 червня 2016 року склав більше ніж 400 тисяч км. Варто зазначити, що більшість вагонів інтенсивно експлуатуються в умовах залізниць Сибіру і Далекого Сходу.

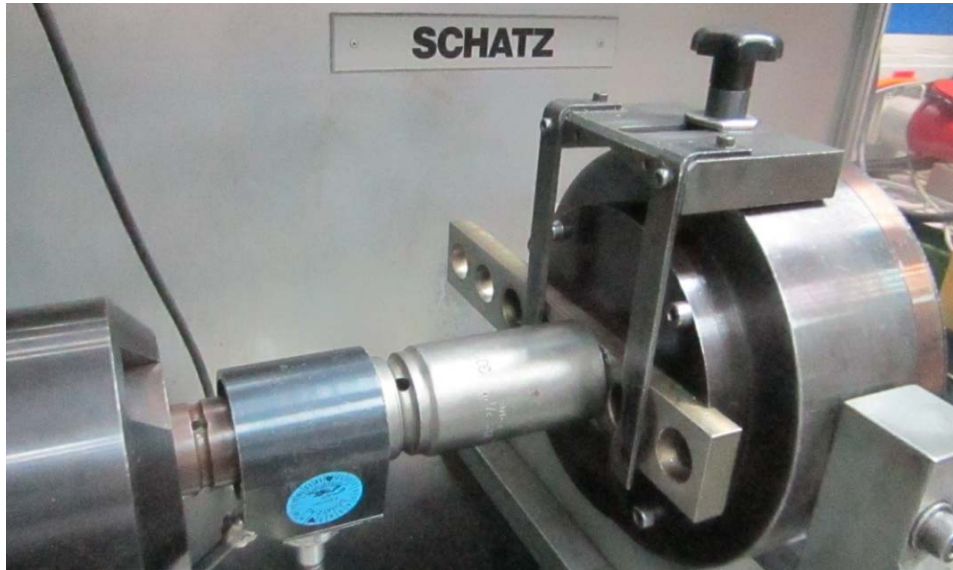


Рис. 9. Випробування FS-гайок автоматичним вимірюванням стопорного моменту на стенді SCHATZ

Fig. 9. Test of FS-nut by automatic measurement of locking moment on the stand SCHATZ

Відповідно до програм та методик підконтрольної експлуатації візків моделей 18-9810 та 18-9855, розроблених АТ «НВЦ «Вагони», у межах виконання планових комісійних оглядів візків на території вагоноремонтних підприємств оцінювався стан FS-гайок у різьбових з'єднаннях.

Станом на 1 червня 2016 року відбулося п'ять запланованих комісійних оглядів за весь час підконтрольної експлуатації з 2012 року. Під час оглядів оцінювалось послаблення FS-гайок шляхом заміру моменту затягування, присутність чи відсутність стопорного моменту, зверталася увага на присутність чи відсутність пошкоджень FS-гайок, зокрема, різьби.

Слід зазначити, що за весь зазначений період підконтрольної експлуатації під час планових оглядів відбулося шість циклів закручувань-відкручувань FS-гайок візків, що перевищує вимоги ISO 2320 по достатній кількості у п'ять циклів, при яких повинні зберігатися стопорні властивості стопорної гайки.

Крім того, в експлуатації разом із регулярними оглядами рухомого складу на території пунктів технічного обслуговування вантажних вагонів, додатково до програми підконтрольної експлуатації, представниками виробника

вагонів здійснюються випадкові періодичні обстеження FS-гайок. При цьому перевіряється збереження моменту затягування та оцінюється зовнішній стан різьбових з'єднань з FS-гайками.

Результати

На першому етапі випробувань

1. Результати візуального контролю зовнішнього вигляду FS-гайок (покриття, наявність маркування), вимірювання геометричних розмірів і контролю різьби наведені в табл. 3–5. Результати показали, що дефекти на всіх зразках FS-гайок відсутні, покриття рівномірне, маркування є та чітко читається, всі розміри знаходяться у відповідних межах, а різьба відповідає калібру.

2. Результати вимірювань стопорного моменту за допомогою моментного ключа показали, що стопорні моменти всіх випробовуваних FS-гайок були в межах згідно з ISO 2320, зокрема, як при п'ятому відкручуванні при кімнатній температурі, такі і при п'ятнадцятому відкручуванні після впливу на різьбові з'єднання низької температури $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результати вимірювання стопорних моментів моментним ключем зведені в табл. 6.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. Результати автоматичних вимірювань стопорного моменту FS-гайок згідно з ISO 2320, показали, що стопорні моменти всіх випробовуваних FS-гайок були у відповідних межах згідно з ISO 2320 як при першому, так і при п'ятому відкручуванні до впливу на них низької температури $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, а також після впливу низької температури при сьомому та одинадцятому відкручуванні.

4. Результати випробувань навантаженням згідно з ISO 2320 (для FS-гайок M20 – до 259,7 кН, для FS-гайок M24 – до 374,2 кН) як до впливу низької температури $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, так і після впливу низької температури показали, що у всіх випробовуваних FS-гайках деформації різьби не сталася.

На другому етапі випробувань

У результаті оцінювання фактичного стану різьбових з'єднань з FS-гайками під час ресурсних пробігових випробувань візків моделі 18-9855 на експериментальному полігоні (станція Щербинка Московської залізниці):

- дефекти різьбових з'єднань з FS-гайками були відсутні;
- послаблення кріплень з FS-гайками були відсутні;

– прогалини між FS-гайками і поверхнями, до яких вони прилягають, були відсутні;

– моменти затягування FS-гайок відповідали конструкторській документації на візки (всього було виконано від час випробувань чотири цикли закручувань-відкручувань FS-гайок, втрат стопорних властивостей не було).

На третьому етапі випробувань

За весь час підконтрольної експлуатації вантажних вагонів з візками моделей 18-9810 та 18-9855 на мережі залізниць ширини колії 1 520 мм (з 2012 року пробіг вагонів першого випуску склав в червні 2016 року більш ніж 400 тисяч км) до різьбових з'єднань з FS-гайками зауважень не було, що підтверджено актами комісійних оглядів вагонів.

За час проведення планових оглядках відбулося шість циклів закручувань-відкручувань FS-гайок візків, що перебільшує вимоги ISO 2320 по достатній кількості у п'ять циклів, при яких повинні зберігатися стопорні властивості стопорної гайки.

Таблиця 3

**Результати візуального огляду та вимірювань геометричних параметрів
FS M 20 DIN 980 /ISO 7042-10-Zn8**

Table 3

**The results of the visual inspection and measurement of geometrical parameters
FS M 20 DIN 980 / ISO 7042-10-Zn8**

	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Норма
Зовнішній вигляд	Без дефектів	Без дефектів	Без дефектів	Без дефектів
Покриття	Рівномірне, відповідає ISO 4042	Рівномірне, відповідає ISO 4042	Рівномірне, відповідає ISO 4042	По ISO 4042
Маркування	У належності, читається чітко	У належності, читається чітко	У належності, читається чітко	–
Габаритні розміри, мм:				$S_{\max} = 30;$ $S_{\min} = 29,16;$ $e_{\min} = 32,95;$ $h_{\max} = 20;$ $h_{\min} = 18$
S	29,90	29,81	29,80	
(e)	34,10	34,05	34,06	
(h)	19,90	19,83	19,84	
Контроль різьби калібром	Без відхилень	Без відхилень	Без відхилень	Прохід-непрохід калібру

Таблиця 4

**Результати візуального огляду та вимірювань геометричних параметрів
FS M 20 DIN EN 1664-10-Zn8**

Table 4

**The results of the visual inspection and measurement of geometrical parameters
FS M 20 DIN EN 1664-10-Zn8**

	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Норма
Зовнішній вигляд	Без дефектів	Без дефектів	Без дефектів	Без дефектів
Покриття	Рівномірне, відповідає ISO 4042	Рівномірне, відповідає ISO 4042	Рівномірне, відповідає ISO 4042	По ISO 4042
Маркування	У належності, читається чітко	У належності, читається чітко	У належності, читається чітко	–
Габаритні розміри, мм:				$S_{max} = 30;$ $S_{min} = 29,16;$
S	29,85	29,82	29,85	$e_{min} = 32,95;$
(e)	33,90	33,97	33,97	$h_{max} = 22,4;$
(h)	21,98	21,98	22,00	$h_{min} = 20,3$
Контроль різьби калібром	Без відхилень	Без відхилень	Без відхилень	Прохід-непрохід калібру

Таблиця 5

**Результати візуального огляду та вимірювань геометричних параметрів
FS M 24 DIN 980/ISO 7042-10-Zn8**

Table 5

**The results of the visual inspection and measurement of geometrical parameters
FS M 24 DIN 980 / ISO 7042-10-Zn8**

	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Норма
Зовнішній вигляд	Без дефектів	Без дефектів	Без дефектів	Без дефектів
Покриття	Рівномірне, відповідає ISO 4042	Рівномірне, відповідає ISO 4042	Рівномірне, відповідає ISO 4042	на ISO 4042
Маркування	У належності, читається чітко	У належності, читається чітко	У належності, читається чітко	–
Габаритні розміри, мм:				$S_{max} = 36;$ $S_{min} = 35;$
S	35,68	35,71	35,67	$e_{min} = 39,55;$
(e)	40,59	40,55	40,59	$h_{max} = 23,9;$
(h)	23,88	23,76	23,84	$h_{min} = 22,6$
Контроль різьби калібром	Без відхилень	Без відхилень	Без відхилень	Прохід-непрохід калібру

Результати перевірки стопорного моменту моментним ключем

Table 6

Test results of locking moment with torque wrench

Режим роботи	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Норматив по ISO 2320
	Стопорний момент, Н·м			
FS M 20 DIN 980/ISO 7042-10-Zn8				
при кімнатній температурі – перше закручування	29	16	21	перше закручування – max 72; п'яте відкручування – min 7
при кімнатній температурі – п'яте відкручування	22	12	14	
при кімнатній температурі – чотирнадцяте відкручування	8	7	7	
після впливу низької температури – п'ятнадцяте відкручування	8	8	7	
FS M 20 DIN EN 1664-10-Zn8				
при кімнатній температурі – перше закручування	15	20	15	перше закручування – max 72; п'яте відкручування – min 7
при кімнатній температурі – п'яте відкручування	12	14	10	
при кімнатній температурі – чотирнадцяте відкручування	9	10	9,5	
після впливу низької температури – п'ятнадцяте відкручування	10	10	9,5	
FS M 24 DIN 980/ISO 7042-10-Zn8				
при кімнатній температурі – перше закручування	29	25	29	перше закручування – max 106; п'яте відкручування –min 10,5
при кімнатній температурі – п'яте відкручування	20	15,5	20	
при кімнатній температурі – чотирнадцяте відкручування	15	14	14	
після впливу низької температури – п'ятнадцяте відкручування	16	14	14	

Наукова новизна та практична значимість

Розроблений комплекс програм і методик вдосконалено виконанням додаткових випробувань після впливу на різьбові з'єднання з FS-гайками низьких температур, а також контрольними операціями оцінки стану різьбових з'єднань з FS-гайками в умовах підконтрольної

експлуатації рухомого складу, що повною мірою дозволяє підтвердити надійність використання FS-гайок на рухомому складі залізниць ширини колії 1 520 мм.

Застосування FS-гайок дозволяє відмовитись від використання додаткових елементів у різьбових з'єднаннях рухомого складу ширини колії 1 520 мм, які використовуються як запобіжник послабленню з'єднання при вібрації,

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

зокрема корончаті гайки, пружні шайби, стопорні шайби, зубчаті шайби, запобіжні пластини, одноразові скріплення, контргайки тощо, щоб гарантувати технічні вимоги до інноваційного залізничного рухомого складу. Також сучасні виробничі технології FS-гайок забезпечують тривалу їх роботу в умовах забрудненості, вологості, перепадів температури та інших несприятливих факторів.

Висновки

Виконаний комплекс випробувань FS-гайок та наведені результати повною мірою свідчать про те, що суцільнометалеві самостопорні FS-гайки відповідають міжнародним стандартам, підтверджують надійність в експлуатації на рухомому складі залізниць ширини колії 1 520 мм, зокрема під час експлуатації зберігається стопорний момент та момент затягування у різьбових з'єднаннях на необресорених частинах та на обресорених частинах візків вантажних вагонів в умовах вібронавантажень при багаторазовому використанні FS-гайок. Слід зазначити, що вимоги ISO 2320 по достатній кількості у п'ять циклів, при яких повинні зберігатися стопорні властивості стопорної гайки, перевищені, що свідчить про високий резерв конструкції FS-гайки зберігати основну властивість – стопорний момент.

На підставі висновків за результатами випробувань FS-гайки можуть бути рекомендовані для заміщення таких елементів, як корончаті гайки з шплінтами, звичайні гайки з додатковими елементами (пружні шайби, стопорні шайби, зубчаті шайби, запобіжні пластини, контргайки) одноразові скріплення тощо на існуючому рухомому складі, а також для використання на новому сучасному рухомому складі залізничного транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гайки цельнометаллические самостопорящиеся : протокол дополнительных испытаний после воздействия на болтовые соединения низких температур / утв. зам. ген. директора ОАО «НВЦ «Вагоны» А. М. Орловой 28.11.2012. – Санкт-Петербург, 2012. – 96 с.
2. Гайки цельнометаллические самостопорящиеся : протокол предварительных испытаний / утв. ген. директором ОАО «НВЦ «Вагоны» Ю. П. Бороненко 04.07.2012. – Санкт-Петербург, 2012 – 9 с.
3. Мямлін, С. В. Особливості інноваційних рішень ходової частини сучасних конструкцій вантажних вагонів / С. В. Мямлін, Л. О. Недужа, О. О. Тен // Інноваційні технології на залізничному транспорті : зб. наук. пр. IV Міжнар. наук.-практ. конф. – Луганськ, 2013. – С. 52–53.
4. Орлова, А. М. Расчётно-экспериментальный метод прогнозирования износа в узлах трения тележек модели 18-9855 типа Barber S-2-R / А. М. Орлова, В. С. Лесничий // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 3 (58). – С. 56–59.
5. Орлова, А. М. Тележка типа «Barber S-2-R»: первый этап эксплуатации / А. М. Орлова, В. С. Лесничий // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – № 4 (32). – С. 20–23.
6. Тележка двухосная 18-9855, тип 3 по ГОСТ 9246-2013 : отчет о результатах проведения подконтрольной эксплуатации за четыре года / утв. ген. директором АО «НВЦ «Вагоны» Ю. П. Бороненко 16.05.2016. – Санкт-Петербург, 2016. – 15 с.
7. Тележка типа «Barber S-2-R»: ресурсные пробные испытания / А. М. Орлова, В. С. Лесничий, И. В. Сухих, Е. И. Юрьева. – Вагоны и вагонное хозяйство. – 2011. – № 2 (26). – С. 40–41.
8. Ahmadian, H. Generic element formulation for modelling bolted lap joints / H. Ahmadian, H. Jalali // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2007. – Vol. 21. – Iss. 5. – P. 2318–2334. doi: 10.1016/j.ymsp.2006.10.006.
9. Ibrahim, R. A. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners / R. A. Ibrahim, C. L. Pettit // J. of Sound and Vibration. – 2005. – Vol. 279. – Iss. 3–5. – P. 857–936. doi: 10.1016/j.jsv.2003.11.064.
10. Ouyang, H. J. Experimental and theoretical studies of a bolted joint excited by a torsional dynamic load / H. J. Ouyang, M. J. Oldfield, J. E. Motterhead // Intern. J. of Mechanical Sciences. – 2006. – Vol. 48. – Iss. 12. – P. 1447–1455. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2006.07.015.
11. Three-dimensional finite element analysis of the mechanical properties of helical thread connection / G. Yang, J. Hong, L. Zhu [et al.] // Chinese J. of Mechanical Engineering. – 2013. – Vol. 26. – Iss. 3. – P. 564–572. doi: 10.3901/cjme.2013.03.564
12. Wang, Z. A reliable fatigue prediction model for bolts under cyclic axial loading / Z. Wang, B. Xu, Y. Jiang // Proc. of the 5th ISSAT Intern. Confer-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- ence on Reliability Quality in Design. – 1999. – P. 137–141.
13. Zhao, H. Stress concentration factors within bolt–nut connectors under elasto-plastic deformation / H. Zhao // Intern. J. of Fatigue. – 1998. – Vol. 20. – Iss. 9. – P. 651–659. 10.1016/s0142-1123(98)-00036-x.

Р. КРАЙС^{1*}, В. С. ЛЕСНИЧИЙ^{2*}

^{1*}Flaig+Hommel GmbH, Verbindungselemente Heer Str., 1, Альдинген, Германия, 78554, тел. +49 (074) 24 96 20, эл. почта roland.kreis@flaig-hommel.de, ORCID 0000-0002-0042-9697

^{2*}АО «Научно-внедренческий центр «Вагоны», а/я 356, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 190031, тел. +7 (921) 316 87 37, эл. почта Lesnichy1@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0046-0918

ПРИМЕНЕНИЕ ШЕСТИГРАННЫХ ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ САМОСТОПОРЯЩИХСЯ FS-ГАЕК НА ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ КОЛЕИ 1520 ММ

Цель. Одним из ключевых требований, предъявляемых к подвижному составу нового поколения, является потребность увеличения гарантийных сроков или пробегов между пунктами технического обслуживания и в периоды между плановыми ремонтами, что приведёт к снижению затрат на обслуживание и ремонт подвижного состава за его жизненный цикл. В связи с этим при строительстве, ремонте, модернизации подвижного состава стремятся использовать крепеж, который обеспечит высокую надежность под действием вибрации. Этим требованиям отвечает шестигранная самостопорящаяся цельнометаллическая FS-гайка многократного использования компании-производителя Flaig+Hommel GmbH. Поэтому в работе необходимо рассмотреть результаты испытаний на подтверждение надежности FS-гаек в новых условиях. **Методика.** Для подтверждения функциональности резьбовых соединений с FS-гайками на подвижном составе железных дорог колеи 1520 мм проведён комплекс испытаний: 1) испытания пробной нагрузкой и на стопорный момент в соответствии с ISO 2320 при нормальных климатических условиях и после воздействия низких температур; 2) испытания на подвижном составе в условия ресурсных пробеговых нагрузок и в поднадзорной эксплуатации вагонов. **Результаты.** Проведённые испытания свидетельствуют о том, что самостопорящиеся цельнометаллические FS-гайки отвечают требованиям международных стандартов, подтверждают надёжность в эксплуатации на подвижном составе железных дорог колеи 1520 мм. В частности, во время эксплуатации сохраняется стопорный момент и момент затяжки в резьбовых соединениях как на обрессоренных, так и на необрессоренных частях тележек грузовых вагонов в условиях вибронгрузок при многократном использовании FS-гаек. **Научная новизна.** Разработанный комплекс программ и методик усовершенствован проведением дополнительных испытаний после воздействия на резьбовые соединения с FS-гайками низких температур, а также контрольными операциями оценки состояния резьбовых соединений с FS-гайками в условиях подконтрольной эксплуатации подвижного состава. Это в полной мере позволяет подтвердить надёжность использования FS-гаек на подвижном составе железных дорог колеи 1520 мм. **Практическая значимость.** Применение FS-гаек позволяет отказаться от использования в резьбовых соединениях подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм таких элементов как корончатые гайки, пружинные шайбы, стопорные шайбы, зубчатые шайбы, предохранительные пластины, одноразовые скрепления, контргайки, чтобы обеспечить технические требования, предъявляемые к инновационному подвижному составу. Также современные технологии производства FS-гаек обеспечивают длительность их работы в условиях загрязнений, влажности, перепадов температур и других неблагоприятных факторов.

Ключевые слова: FS-гайка; резьбовое соединение; подвижной состав; испытания

Р. KREIS^{1*}, V. S. LISNYCHYI^{2*}

^{1*}Flaig+Hommel GmbH, Verbindungselemente Heer Str., 1, Aldingen, Germany, 78554, tel. +49 (074) 24 96 20, e-mail roland.kreis@flaig-hommel.de, ORCID 0000-0002-0042-9697

^{2*}Joint-Stock Company «Scientific innovation center «Vagony», p.o. box 356, Saint-Petersburg, Russia, 190031, tel. +7 (921) 316 87 37, e-mail Lesnichy1@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0046-0918

APPLICABILITY OF FS-ALL-METAL SELF-LOCK NUTS FOR RAILWAY ROLLING STOCK OF 1520 MM GAUGE

Purpose. One of key requirements for rolling stock of next generation is essential increase of warranty period or running between maintenance depots and in periods between programming repair works. This will lead to a reduction of costs to maintenance and repair during service life of rolling stock. In this regard, the industry aspires to use (during construction, repairs, modernization of rolling stock) a modern screw joints in structures for fixing parts. These screw joints could provide a high reliability under the action of vibration load. FS-hexagon all-metal self-lock nuts of multiple use, Flaig + Hommel GmbH company meets these requirements. Therefore, there is the need to consider the results of tests to confirm the reliability of FS-nuts in the new environment. **Methodology.** Test complex of developed programs and methods was carried out on railway rolling stock for functional demonstration of screw joints with FS-nuts. These tests include: 1) proof test and locking moment test as specified in ISO 2320 under normal climatic conditions and after low temperatures impact; 2) running test for rolling stock, secured the most load condition and according to supervised operation of next generation cars on the railway. **Findings.** Results of the tests testify that FS-all-metal self-lock nuts meet the requirements of international standards and confirm the reliability of the next generation rolling stock during its operation on the railway of 1520 mm gauge. Namely, locking moment and tightening torque is maintained in screw joints both on spring-suspended and unsprung parts of freight car bogies by the action of vibration load under multiple use of FS-nuts. **Originality.** The developed software and methods was improved by conducting additional tests after exposure of screw joints with FS-nuts to low temperatures, as well as by control operations for assessing the condition of screw joints with FS-nuts, in the conditions of controlled operation of rolling stock. It fully allows confirming the reliability of the FS-nuts on the rolling stock of 1520 mm gauge railways. **Practical value.** Application of FS-nuts makes it possible to stop using secondary members in screw joints of railway rolling stock of 1520 mm gauge. These secondary members are used for reaction to slacking under vibration and consist of castle nuts, retaining washers, locking washers, serrated washers, check plates, disposable clamps. Using FS-nuts allow providing the rating rules for next generation of rolling stock. Besides the modern technologies of FS-nuts production provide their prolonged running time under the conditions of pollution, humidity, differential temperature and other adverse factors.

Keywords: FS-nut; screw joint; rolling stock; tests

REFERENCES

1. Orlova A.M. *Gayki tselnometallicheskiye samostoporyashchiesya: protokol dopolnitelnykh ispytaniy posle vozdeystviya na boltovyye soyedineniya nizkikh temperatur* [Hexagonal, all metal self-lock nuts. Protocol of additional tests after low temperatures impact on bolted assemblies]. Saint Petersburg, 2012. 96 p.
2. Boronenko Yu.P. *Gayki tselnometallicheskiye samostoporyashchiesya: protokol predvaritelnykh ispytaniy* [Hexagonal, all metal self-lock nuts. Protocol of additional tests]. Saint Petesburg, 2012. 9 p.
3. Miamlin S.V., Neduzha L.O., Ten O.O. *Osoblyvosti innovatsiynykh rishen khodovoi chastyny suchasnykh konstruktsii vantazhnykh vahoniv* [Features of innovative solutions of undercarriage in modern designs of freight cars]. *Zbirnyk naukovykh prats IV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Innovatsiini tekhnologii na zaliznychnomu transporti»* [Proc. of IV Intern. Sci. and Practical Conference «Innovative technologies at railway transport»]. Luhansk, 2013, pp. 52-53.
4. Orlova A.M., Lesnichiy V.S. *Raschetno-eksperimentalnyy metod prognozirovaniya iznosa v uzlakh treniya tezhkek modeli 18-9855 tipa Barber S-2-R* [The calculated and experimental method of wear forecasting in friction units in bogies, model 18-9855 such as Barber S-2-R]. *Transport Rossiyskoy Federatsii – Transport of Russian Federation*, 2015, no. 3 (58), pp. 56-59.
5. Orlova A.M., Lesnichiy V.S. *Tezhka tipa «Barber S-2-R»: pervyy etap ekspluatatsii* [Bogie, type «Barber S-2-R»: a first step of operation]. *Vagony i vagonnoye khozyaystvo – Cars and Car Maintenance*, 2012, no. 4 (32), pp. 20-23.
6. Boronenko Yu.P. *Tezhka dvukhosnaya 18-9855, tip 3 po GOST 9246-2013: otchet o rezultatakh provedeniya podkontrolnoy ekspluatatsii za chetyre goda* [Bogie biaxial 18-9855, type 3 on State Standard 9246-2013. Report about results of controlled operation for four years]. Saint Petersburg, 2016. 15 p.
7. Orlova A.M., Lesnichiy V.S., Sukhikh I.V., Yureva Ye.I. *Tezhka tipa «Barber S-2-R»: resursnyye probegovyye ispytaniya* [Bogie, type «Barber S-2-R»: resource running tests]. *Vagony i vagonnoye khozyaystvo – Cars and Car Maintenance*, 2011, no. 2 (26), pp. 40-41.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. Ahmadian H., Jalali H. Generic element formulation for modelling bolted lap joints. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, vol. 21, issue 5, pp. 2318-2334. doi: 10.1016/j.ymssp.2006.10.006.
9. Ibrahim R.A., Pettit C.L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol. 279, issue 3–5, pp. 857-936. doi: 10.1016/j.jsv.2003.11.064.
10. Ouyang H.J., Oldfield M.J., Mottershead J.E. Experimental and theoretical studies of a bolted joint excited by a torsional dynamic load. *Intern. Journal of Mechanical Sciences*, 2006, vol. 48, issue 12, pp. 1447-1455. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2006.07.015.
11. Yang G., Hong J., Zhu L., Li B., Xiong M., Wang F. Three-dimensional finite element analysis of the mechanical properties of helical thread connection. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, vol. 26, issue 3, pp. 564-572. doi: 10.3901/cjme.2013.03.564.
12. Wang Z., Xu B., Jiang Y. A reliable fatigue prediction model for bolts under cyclic axial loading. Proc. of the 5th ISSAT Intern. Conference on Reliability Quality in Design, 1999, pp. 137-141.
13. Zhao, H. Stress concentration factors within bolt–nut connectors under elasto-plastic deformation. *Intern. Journal of Fatigue*, 1998, vol. 20, issue 9, pp. 651-659. doi: 10.1016/s0142-1123(98)00036-x.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С. В. Мямліним (Україна); науковим комітетом XIV Міжнародної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту. Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження»

Надійшла до редколегії: 12.05.2016

Прийнята до друку: 14.09.2016

UDC 629.45/46-049.6

L. A. MURADIAN^{1*}

^{1*}Dep. «Cars and Rolling Stock», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, e-mail leon59@bk.ru, ORCID 0000-0003-1781-4580

PROBABILISTIC-PHYSICAL APPROACH TO DESCRIBE AND DETERMINE THE RELIABILITY OF CARS

Purpose. The article aims to develop an algorithm and a sequence of description and determination of car reliability to predict certain quantitative indicators of the studied elements, parts and units, or a car as a whole on the basis of probabilistic-physical approach. **Methodology.** For the calculation of the indicators of reliability, durability and safety of cars the probabilistic-physical method was used, which takes into account the resources consumption inevitable in the operation of cars. The methodology of quantifying the reliability is based on the study of the physical-mechanical and physical-chemical properties and parameters of various elements, with the identification of principles of the aging processes of the elements or parts (with operating time) to determine the analytical dependencies of these processes from the indicators of cars reliability. **Findings.** On the basis of probabilistic-physical approach it was developed a model to describe and determine the reliability of the cars. At this the method of calculation based on probabilistic-physical model is fundamentally different from all known rigorous probabilistic methods by the fact that it considers a continuous set of states of the elements, parts and systems of the car during continuous time. If there exists or (if it possible to find) the information parameter about the resource consumption of the car element with evaluation of its change speed, and knowing its limit, based on the built car reliability model with the involvement of probabilistic-physical approach, one can predict all the necessary quantitative indicators of reliability of the studied elements, parts and units or a car as a whole. **Originality.** The methodology of the reliability construction with the use of probabilistic-physical model with DN-distribution was further developed in the article. The specific physical interpretation of the constants of DN-distribution of failures makes it possible to evaluate them according to the results of the study of certain parameters characterizing the technical condition of the car. On the basis of probabilistic-physical approach the algorithm and the sequence of description and determination of cars reliability to predict certain quantitative reliability indicators of the studied elements, parts and units, or a car as a whole were developed. **Practical value.** The results make it possible to calculate in practice the quantitative indicators of reliability of cars or their individual elements for further prediction of the overall reliability during operation.

Keywords: probabilistic-physical approach; reliability; technical condition of cars; failure model; development

Introduction

In the reliability theory coexist two directions related in ideology and general system of concepts, but different in approaches [5-8, 11, 13-16].

The first direction includes the systemacity, statistical character, i.e. mathematical theory of reliability, the second one can be called the physical theory of reliability. The object of the system (statistical, mathematical) theory of reliability is the system of elements interacting in terms of survival in logical schemes: graphs, fault trees, etc.

Background information in the system reliability theory usually form the indicators of elements reliability that are determined by statistical analysis of the test results and (or) operational data. The task of system reliability theory is solved within

the framework of the probability theory and mathematical statistics, which is without involvement physical models of failures and the physical phenomena that cause and accompany the emergence of failures.

The origins of the physical theory of reliability can be found in earlier works on statistical interpretation of assurance factor when calculating engineering structures [3, 4]. A distinctive feature of the physical theory of reliability lies in the fact that the system survival and the possibility of failure initiation are considered as the result of interaction between the system and external influences (operational loads, environmental conditions, etc.), as well as mechanical, physical and chemical processes that occur in the system components during its operation. The models and methods of natural

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

and technical sciences in the physical theory of reliability are widely used together with the means of probability theory and mathematical statistics.

Physical reliability theory indicates that first of all the car reliability is provided by consistency or little change in physical-mechanical and physico-chemical properties (within the permissible limits) of each element. That is it should be provided the safety of the physical-mechanical and physical-chemical properties of each element of the car in the original (initial) form or with of minor change that will not lead to a significant deterioration in the internal state of element materials, parts and units. First of all, it concerns the safety of such properties as microstructure, chemical and phase composition of materials that directly influence the change in hardness, strength, plasticity, wear, corrosive, and erosive resistance and other properties. In turn constancy or a small change (within the permissible limits) in these properties provides long and reliable operation of the elements and the car as a whole, which is based on physical reliability.

Purpose

The article aims to develop an algorithm and a sequence of description and determination of car reliability to predict certain quantitative reliability indicators of the studied elements, parts and units, or a car as a whole on the basis of probabilistic-physical approach.

Methodology

Physical reliability of various kinds of materials is the foundation of any reliability (operational, local, integrated, etc.) of certain elements, parts and units, and the car in general. However, if to the material of the elements, parts and units of the car one applies only the concept of physical reliability, to the construction of various cars along with the physical reliability the concepts of constructive and technological reliability can be applied.

The technical literature and regulatory documents in principle does not contain such concepts as constructive and technological reliability. But the introduction of such terms is always dictated by production necessity, especially at the stage of designing and manufacturing of cars. Furthermore, it should be noted the existence of operational reli-

ability of cars, which has a direct link with the physical reliability including with constructive and technological. Moreover, it should be noted the existence of operational reliability of cars, which has a direct communication with the physical reliability including the constructive and technological ones.

When designing cars, in accordance with the regulations [12], the constructive reliability includes the probability of reliable operation with certain (necessary) value. That is, at this stage a mathematical tool of reliability theory without taking into account possible (during manufacturing and operation) changes in physical-mechanical and physical-chemical properties of certain elements, parts, etc.

In the production process of cars (the initial time) parts and units are made of different materials, which have certain (projected) design, and which will operate in a car. Reliability and ultimately failure-free operation of this part will be determined not only by the initial properties of material, but also by the way in which, the assembly of elements and parts will influence the loss of the physical-mechanical and physical-chemical properties in the interaction of these elements during operation of cars. For example, if the element or part of the car is designed in the way that there are stress concentrators (sharp corners, irrationally located holes, etc.), then as a result of static and dynamic loadings during operation in the areas of stress concentration the cracks will be formed with subsequent destruction of the system of certain unit or car in general. If one projects the design of these elements or parts with fillets, the above mentioned destruction processes will not take place that is the overall reliability of the car assembly will be higher.

Another feature of constructive reliability of cars is the preservation of the initial (projected) design of the elements or parts during operation in its original form. For example, if during operation of different types of cars the assembly of elements, parts or units does not undergo significant changes, the survival and reliability of such system is guaranteed.

If during operation of car a random displacement of its elements in relation to the others beyond the permissible limits took place, or there was a loss of certain elements (due to prolonged

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

vibration there occurred screw detwisting, loss of bolts or certain elements, parts, their skewing took place, etc.), then ultimately such system will be unworkable and unreliable. Consequently, non-compliance of the original (initial) form preservation of the relative orientation of elements or parts of the system or the change of its completeness can cause failure. That such failure is a sign of low level of constructive reliability and, in some cases, of technological reliability of car.

Paramount importance of reliability is connected with the fact that its level largely determines the development of automation of production processes, intensification of working processes, materials and energy saving.

The urgency of reliability increases due to the complexity of modern machines and the importance of the functions they perform [4, 7, 10]. Modern hardware consists of many interacting mechanisms, machines and devices. Failure of even one element of a complex system leads to the failure of all system.

One of the problems of modern reliability theory based on classical probabilistic methods is the inability of adequate accurate prediction of the moment of failure emergence as a random event. Since, the moment of the object (especially durable one) failure usually preceded by the complex internal changes, these changes in freight cars may appear in different ways depending on the location and nature of the failure.

Recent studies of reliability, conducted for various products, machines and components [7, 8, 10-12] show that for the calculation of the values of reliability, durability and safety of cars one can apply probabilistic-physical method that takes into account resources consumption inevitable in the operation of cars.

The methodology of quantifying the reliability is based on the study of the physical-mechanical and physical-chemical properties and parameters of various types of technical means. On the basis of this study one can identify the principles of the aging processes of the elements or parts with operating time (during resource consumption), as well as determine the analytical dependencies of these processes with the indicators of reliability of cars. When studying the aging processes of cars, i.e. the degradation processes, one can apply the mathematical methods of studying the internal changes

in the physical-mechanical and physical-chemical properties involving the theory of stochastic processes and using stochastic equations and physical modeling of the use of resource of the elements, parts and units of the car conducting the reliability tests.

The use of degradation models based on random processes and stochastic kinetic equations makes it possible to find dependences of the probability of reliable operation (or failure) and physical-mechanical and physical-chemical properties (or certain parameter) that led to the car failure. The obtained results of solutions of stochastic equations that describe the internal properties of the elements or parts of different technical means are repeatedly confirmed by long tests of the designed physical models that make it possible to make reliable adequate conclusions involving statistical tool [1, 2, 9]. This, in turn, opens the possibility to perform the calculations of physical reliability of different types of cars in the process of aging and using the resources, taking into account the degradation processes in materials of their elements and parts, in the case when the failure rate is acting as a function of operating time. This approach provides solution of many practical problems existing in the modern theory of reliability.

As it is known [7, 12], the state of reliability of cars during manufacture and maintenance of this reliability at a sufficient level during operation is greatly influenced by the processes of aging, fatigue and fracture of metals and alloys. The successful solution of these problems first of all lies in the development of new technology, methodology, physical theory of aging, fatigue and fracture of materials instead of outdated one. In the second place is the generalization of disaggregated experimental data on the mechanism of aging and fatigue in order to create a general physical theory of «aging-fatigue-destruction» of all sorts of materials from the beginning of their production to the total destruction. And then is the search and development of new technologies for production of parts, which reduce the level of fatigue and aging of materials at the stage of their processing.

Findings

Let us consider provision of the probabilistic-physical approach to the problems of reliability theory. The technical condition of cars depends on

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

the values of the internal parameters D_i , which will be unchanged during operation. With the accumulation of operating time and resource consumption these parameters that will determine the technical condition of the cars are changing (dropping from the reliability position), thereby approaching to the appropriate limit values: $D_i(t) \rightarrow D_{epi}$.

Initial technical condition of the car according to some information about the internal parameters will be determined by the following vector:

$$D_o = (D_{o1}, D_{o2}, \dots, D_{oi}), \quad (1)$$

where D_{oi} – is the value of defining parameter that was obtained for the i -th element in the initial moment of monitoring the technical condition of the car.

According to some information the following vector will correspond, to the limit condition respectively and, thus, to the working limit T_{ep} of the car:

$$D_{ep} = (D_{ep1}, D_{ep2}, \dots, D_{epi}). \quad (2)$$

Components of vectors of the obtained information (1) and (2) differ. This fact can be described by the parameter of changing the technical condition α for the i -th period of the operating time (mileage) of the car. According to its content this value is a random one and characterizes the change of determining parameter for the unit of operating hours (mileage), which can be defined as a unit of measurement of the technical state parameter divided by the unit of operating time of the car.

Similar to (1) and (2), the parameter of technical condition of the structural elements of the car for some operating moments can also be represented as vectors:

$$\alpha_1 = (\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{1i}); \quad (3)$$

$$\alpha_{ep} = (\alpha_{ep1}, \alpha_{ep2}, \dots, \alpha_{epi}), \quad (4)$$

where α_1, α_{ep} – are correspondingly the parameters of changing the technical state of structural element of the car for the first and boundary periods of the operating time (mileage).

At the moment when the determining parameter of the components of the car structural elements achieves the boundary value there occurs its fail-

ure. The condition of the car failure can be written as follows:

$$\lim_{D_i(t) \rightarrow D_{epi}(t)} \left(\frac{D_i(t)}{D_{epi}} \right) = 1. \quad (5)$$

If we imagine that we can «observe» the degradations and «fix» the moments when the determining parameters D_i achieve their boundary values D_{epi} , then we will obtain time interval to obtain an array of operating hours (mileage) $\{t_i\}$ in the time interval from t_{\min} to t_{\max} $\{t_i\}$. After we processed the array $\{t_i\}$ with the known method, that is, dividing the interval $t_{\min} \dots t_{\max}$ by l of the intervals with the length Δt and counted the number of failures $n(\Delta t)$ for each interval, we obtain the distribution density of failures in the specified interval of the operating hours (mileage). During mathematical modeling of the processes of degradation of «observation» and «fixing» are made on the basis of decision on the solution of (5) at the given initial and boundary conditions.

The obtained conditional $\omega(t, D)$ density of the implementation probability of one or another trajectory has simple relationship with the distribution density of operating hours (mileage) of the car to the failure:

$$f(t) = - \int_{-\infty}^1 \frac{\partial \omega(D_o(t_o), D(t))}{\partial t} dD. \quad (6)$$

The degradation of properties of the structural elements of the car can have both monotonous and non-monotonous nature. Solution of the probability density equation (6) for monotonous and non-monotonous processes of degradation of structural elements of the car should differ only by different boundary conditions.

Changing the determining parameters of the car elements during operation is described by the stochastic Markov process, when the transition of physical parameters from the one value to another (from one state to another) has probabilistic nature, i.e. it is the Markov process of diffusion type.

At this the conditional probability density of transition from the one state to another $\omega(t, D)$ can be determined using the following equation in partial derivatives, which is similar to the diffusion

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

equation in the theory of mass transfer in the solid state physics:

$$\frac{\partial \omega(t, D)}{\partial t} + a \frac{\partial \omega(t, D)}{\partial D} - b^2 \frac{\partial^2 \omega(t, D)}{\partial D^2} = 0, \quad (7)$$

where t – is the operating hours (mileage) of the car; a – is the average rate of change of the determining parameter of structural element (in other way – drift coefficient); $D = D(t)$ – is the determining parameter of structural element that determines its technical condition; b – is the flow coefficient of the probabilities of technical condition of the structural element, at that b^2 is the average speed of dispersion change of the determining parameter of the structural element.

Then the expression for the law of distribution of the service life of the car to the failure, i.e. the mathematical model of failures, according to the fact that the change of the technical state of the car as a whole can be described by an exponential pattern will look like:

$$f(t) = \frac{1}{bt\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(1-at)^2}{2b^2 t}\right]. \quad (8)$$

The equation (8) will represent the mathematical model of change of the car technical condition according to the determining parameters of structural elements or DN-model (DN-distribution) [2].

The above-mentioned distribution in the scientific literature [2, 4, 10] was named as the DN-distribution or diffusion non-monotonous distribution, because it results from the solution of the flow equation (diffusion) of probabilities.

In addition, the probability diffusion coefficient of the technical condition of the car b will be equal to:

$$b = \frac{\sigma_a}{\sqrt{a}} = \frac{\sigma_a \sqrt{a}}{\sqrt{a} \sqrt{a}} = \frac{\sigma_a}{a} \sqrt{a}. \quad (9)$$

The ratio σ_a/a acts as a coefficient of variation V_3 of the process of changing the technical condition of the car. In the DN-model of failures the variation coefficient of operating hours (mileage) to the failure V of any element, part or unit of the car coincides with the variation coefficient of the speed of change taking place in the internal processes of changing the technical condition of the car V_3 .

For the flow coefficient of probabilities of the technical condition of the car b the following relationship can be written:

$$b = V\sqrt{a}. \quad (10)$$

Experience of theoretical estimates according to the specified mathematical model shows that it is more convenient to avoid the use of the average speed of technical state changing a , but to use the value reduced to it:

$$\mu = \frac{1}{a}. \quad (11)$$

Then, taking into account the above mentioned relationships, the distribution density (8) will take the following form:

$$f(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{V_t t \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(\mu-t)^2}{2V_t^2 \mu t}\right], \quad (12)$$

where μ – is a scale parameter of distributon; V – is a variation coefficient of operating hours (mileage) to the failure – the parameter of the distribution form.

Let us find out the content of parameter of the scale distribution parameter μ from the standpoint of the reliability theory. To make this let us show that it nothing else but the average value of the operating time (mileage) of the car t , i.e. the mathematical expectation of the operating time to the failure.

According to the works [2, 10] – the mathematical expectation of a random variable t is the first initial statistical moment. Since the operating time (mileage) of the car t is a continuous random variable in the range of definition $(0, \infty)$, then the expression for the mathematical expectation operating time (mileage) of the car to the failure T_o will take the following form:

$$T_o = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (13)$$

Let us apply the expression (12) to the last expression (13) and, as a result, after simplifications, we obtain operating hours (mileage) to the failure in the following form:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$T_o = \frac{\sqrt{\mu}}{V_t \sqrt{2\pi}} \exp(V_t^{-2}) 2\sqrt{\mu} \times \\ \times V_t \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp(-V_t^{-2}) = \mu. \quad (14)$$

Thus, in the DN-model of the scale parameter of failures distribution μ have physical meaning of the average operating hours (mileage) of car to the failure.

Using the results of the works [2, 4, 10] one can determine the statistical parameters of DN-model:

– operating hours (mileage) dispersion of the car t to the failure:

$$\sigma_t^2 = \sum_0^{\infty} (t - \mu)^2 f(t) dt, \quad (15)$$

– statistical moments of failures:

$$M_t = \mu; \quad \sigma_t^2 = \mu^2 V_t^2; \quad A_s = 3V_t; \quad E_x = 15V_t^2. \quad (16)$$

On the basis of the constructed model let us provide an example of the DN-distribution for statistics on failures of the freight cars (Fig. 1).

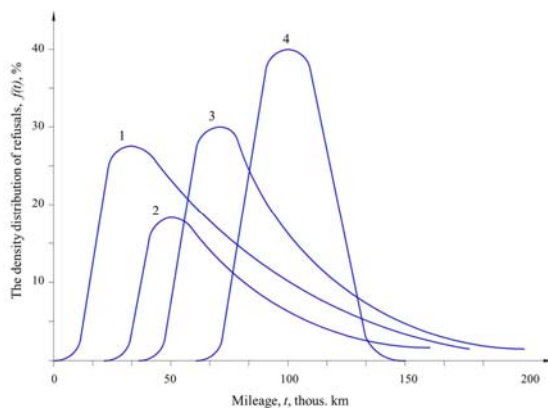


Fig. 1. DN-distribution of failures of structural elements of the freight cars at $\mu = \text{const}$ and $\mu = 100$ thous. km:

1 – body structure; 2 – bogies and spring suspension;
3 – braking equipment; 4 – wheel sets

Analyzing the main characteristics of the DN-distribution, the following facts should be noted:

– Skewness A_s and kurtosis E_x of the obtained distribution are positive, and the mathematical expectation M_t shifted to the right relative to the median, that is the DN-distribution density is asymmetric single-mode curve with extended right branch line (all the given curves 1-4 in the Fig. 1);

– at the fixed scale distribution parameter (expectation of operating hours (mileage) to the car failure $\mu = 100$ thous. km) with the shift of the form parameter V_t the maximum distribution density $f(t)$ is shifted to the right clockwise with the simultaneous decrease in the distribution amplitude (curves 1, 2, Fig. 1) and its subsequent increase (curves 3, 4, Fig. 1). At this, all the central statistical moments of distribution (dispersion, skewness and kurtosis) are decreased;

– at the fixed form parameter (variation coefficient V_t) with increasing in the scale parameter of distribution μ , i.e. with the distribution shift to the right clockwise, it is deformed in a way that the dispersion increases and the coefficients of skewness and kurtosis are constant. The example of the given case is shown in the Fig. 2.

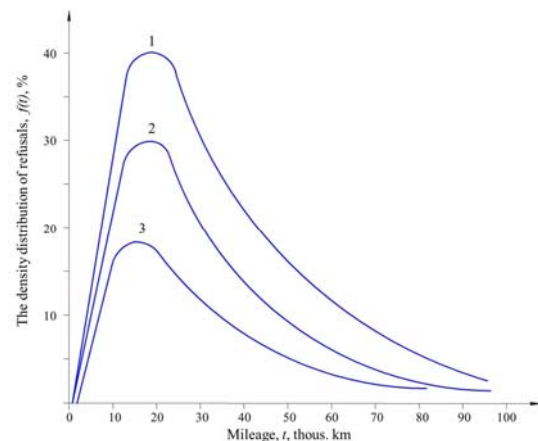


Fig. 2. DN-distribution of failures of structural elements of the freight cars at $V_t = \text{const}$ and $V_t = 1$:

1 – wheel sets; 2 – braking equipment;
3 – bogies and spring suspension

Originality and practical value

The methodology of reliability construction with the use of the probabilistic-physical model with the DN-distribution was further developed in the paper. The specific physical interpretation of the constants of DN-distribution of failures makes it possible to evaluate them according to the results of the study of certain parameters describing the technical condition of the car.

Based on the probabilistic-physical approach it was developed the algorithm and the sequence of description and determination of the car reliability for predicting certain quantitative indicators of the

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

reliability of investigated elements, parts and units of the car in general.

The research results make possible practical calculation of the quantitative indicators of reliability of the cars or their elements for future forecasting of the general reliability during operation.

Conclusions

The method of calculation based on the 6DN-distribution as the probabilistic-physical model is fundamentally different from all known rigorous probabilistic methods by the fact that it considers the continuous (continual) set of states of the elements, parts and systems of the car with continuous time. Undoubtedly, this is a high-quality representation of car elements behavior that consumes their resources over time – with operating hours increasing. Specific physical interpretation of the constants of probabilistic-physical models of failure distribution makes it possible to estimate them according to the research results of the determined parameters describing the technical condition of the car. If one can find the parameter that informs about the consumption of the car element resource, then after estimation of its change speed and knowing its limit value based on the constructed model of the freight car reliability involving the probabilistic-physical approach, one can predict the necessary quantitative reliability indicators of the investigated elements, parts and units and the car in general.

LIST OF REFERNCE LINKS

1. Бочаров, П. П. Теория вероятностей. Математическая статистика / П. П. Бочаров, А. В. Печинкин. – Москва : Физматлит, 2005. – 296 с.
2. Булинский, А. В. Теория случайных процессов / А. В. Булинский, А. Н. Ширяев. – Москва : Физматлит, 2005. – 408 с.
3. Грибов, В. М. Основы теории надежности авиационной техники : конспект лекций / В. М. Грибов, В. В. Козарук. – Киев : КМУГА, 1994. – 268 с.
4. Далецкий, С. В. Проектирование систем технического обслуживания и ремонта ВС ГА / С. В. Далецкий. – Москва : МАИ, 2001. – 245 с.
5. Мурадян, Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності // Вісн. НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технолог. системи та комплекси. – Харків, 2015. – Т. 52 (1161). – С. 127–130.
6. Мямлін, С. В. Застосування основних законів розподілу випадкових величин для визначення показників надійності вагонів / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян // 36. наук. пр. ДЕДУТ. Серія: «Трансп. системи і технології». – Київ, 2015. – Вип. 26–27. – С. 172–180.
7. Мямлін, С. В. Проблема визначення терміну «надійність». Методологія побудови та вивчення надійності вантажних вагонів / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, Д. М. Барановський // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 110–117. doi: 10.15802/stp-2015/57034.
8. Мямлін, С. В. Розробка конструкцій та машинобудівних технологій створення вантажних вагонів нового покоління // С. В. Мямлін // Вагонний парк. – 2014. – № 10. – С. 4–9.
9. Павлов, И. В. Статистические методы оценки характеристик надежности и эффективности сложных систем по результатам испытаний / И. В. Павлов. – Москва : Сов. радио, 1978. – 36 с.
10. Техническая эксплуатация авиационного оборудования : учебник / под ред. В. Г. Воробьева. – Москва : Транспорт, 1990. – 296 с.
11. Трощенко, В. Т. Роль науки в обеспечении надежности машин и сооружений / В. Т. Трощенко // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 1985. – № 7. – С. 3–5.
12. Устич, П. А. Надежность рельсового подвижного состава / П. А. Устич, В. А. Карпычев, М. Н. Овечников. – Москва : Вариант, 1999. – 412 с.
13. Хрусталева, В. В. Необходим инженерный анализ надежности сложных систем / В. В. Хрусталева // Стандарты и качество. – 1989. – № 3. – С. 17–19.
14. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie / S. Myamlin, L. P. Lingaitis, S. Dailydka [et al.] // Transport. – 2015. – Vol. 30. – Iss. 1. – P. 88–92. doi: 10.3846/16484142.2015.1020565.
15. 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.
16. Myamlin, S. V. The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing / S. V. Myamlin, D. M. Baranovskiy // Проблеми економіки транспорту : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 7. – С. 61–66.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Л. А. МУРАДЯН^{1*}

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта leon59@bk.ru, ORCID 0000-0003-1781-4580

ЙМОВІРНІСНО-ФІЗИЧНИЙ ПІДХІД ДЛЯ ОПИСАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАГОНІВ

Мета. У роботі передбачається на основі ймовірнісно-фізичного підходу розробити алгоритм і послідовність описання та визначення надійності вагонів для прогнозування окремих кількісних показників досліджуваних елементів, деталей та вузлів або вагона в цілому. **Методика.** Для розрахунку показників безвідмовності, довговічності й збережуваності вагонів застосовано ймовірнісно-фізичний метод, що враховує неминучі під час експлуатації вагонів витрати ресурсу. Методика встановлення кількісних показників надійності ґрунтується на вивченні фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей і параметрів різних елементів, із виявленням закономірностей процесів старіння елементів чи деталей (з часом чи напрацюванням) для визначення аналітичних залежностей зазначених процесів від показників надійності вагонів. **Результати.** На основі ймовірнісно-фізичного підходу розроблено модель для описання та визначення надійності вагонів. При цьому метод розрахунку на основі ймовірнісно-фізичної моделі принципово відрізняється від усіх відомих строгих ймовірнісних методів тим, що він розглядає неперервну множину станів елементів, деталей і систем вагона впродовж неперервного часу. При існуванні (чи можливості знаходження) інформаційного параметра про витрату ресурсу елемента вагона з оцінкою швидкості його зміни і, знаючи його граничне значення, на основі побудованої моделі надійності вагона із залученням ймовірнісно-фізичного підходу можна прогнозувати всі необхідні кількісні показники надійності досліджуваних елементів, деталей та вузлів або вагона в цілому. **Наукова новизна.** У роботі набула подальшого розвитку методологія побудови надійності вагонів із використанням ймовірнісно-фізичної моделі з DN-розподілом. Конкретна фізична інтерпретація констант DN-розподілу відмов дає можливість оцінити їх за результатами дослідження окремих параметрів, що характеризують технічний стан вагона. На основі ймовірнісно-фізичного підходу розроблено алгоритм і послідовність описання та визначення надійності вагонів для прогнозування окремих кількісних показників досліджуваних елементів, деталей та вузлів і вагона в цілому. **Практична значимість.** Результати роботи дозволяють практично розрахувати кількісні показники надійності вагонів чи їх окремих елементів для подальшого прогнозування загальної надійності під час експлуатації.

Ключові слова: ймовірнісно-фізичний підхід; надійність; технічний стан вагонів; модель відмов; напрацювання

Л. А. МУРАДЯН^{1*}

^{1*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, эл. почта leon59@bk.ru, ORCID 0000-0003-1781-4580

ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД ДЛЯ ОПИСАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ВАГОНОВ

Цель. В работе предполагается на основе вероятностно-физического подхода разработать алгоритм и последовательность описания и определения надежности вагонов для прогнозирования отдельных количественных показателей исследуемых элементов, деталей и узлов или вагона в целом. **Методика.** Для расчета показателей безотказности, долговечности и сохранности вагонов применен вероятностно-физический метод, учитывающий неизбежные при эксплуатации вагонов расходы ресурса. Методика установления количественных показателей надежности основывается на изучении физико-механических и физико-химических свойств и параметров различных элементов, с выявлением закономерностей процессов старения элементов или деталей (со временем или наработкой) для определения аналитических зависимостей указанных процессов от показателей надежности вагонов. **Результаты.** На основе вероятностно-физического подхода разра-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ботана модель для описання і определения надійності вагонів. При цьому метод розрахуна на основі ймовірно-фізическої моделі принципно відрізняється від всіх відомих строгих ймовірнісних методів тим, що він розглядає неперервне множество состояний елементів, деталей і систем вагона в течение неперервного времени. При существовании (или возможности нахождения) информационного параметра о расходе ресурса элемента вагона с оценкой скорости его изменения и, зная его предельное значение, на основе построенной модели надійності вагона с привлечением ймовірно-фізического підходу можна прогнозувати всі необхідні кількісні показники надійності досліджуваних елементів, деталей і вузлів вагона в цілому. **Научная новизна.** В роботі отримала дальніше розвиток методологія построения надійності вагонів с использованием вероятностно-фізическої моделі с DN-распределением. Конкретная физическая интерпретация констант DN-распределения отказов дает возможность оценить их по результатам исследования отдельных параметров, характеризующих техническое состояние вагона. На основе вероятностно-фізического підходу розроблено алгоритм і послідовність описання і определения надійності вагонів для прогнозування окремих кількісних показників досліджуваних елементів, деталей, вузлів і вагона в цілому. **Практическая значимость.** Результаты работы позволяют практически рассчитать количественные показатели надійності вагонів или их отдельных элементов для дальнейшего прогнозування общей надійності при експлуатації.

Ключевые слова: ймовірно-фізический підхід; надійність; технічне состояние вагонів; модель отказов; наработка

REFERENCES

1. Bocharov P.P., Pechinkin A.V. *Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika* [Theory of probability. Mathematical statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 296 p.
2. Bulinskiy A.V., Shiryayev A.N. *Teoriya sluchaynykh protsessov* [Theory of stochastic processes]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 408 p.
3. Gribov V.M., Kozaruk V.V. *Osnovy teorii nadezhnosti aviatsionnoy tekhniki* [Fundamentals of reliability theory of aviation engineering]. Kyiv, KIUCA Publ., 1994. 268 p.
4. Daletskiy S.V. *Proyektirovaniye sistem tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta VS GA* [Designing of systems of maintenance and repair of civil aircrafts]. Moscow, MAI Publ., 2001. 245 p.
5. Muradian L.A. Vidmovy ta bezvidmovnist vahoniv yak skladovi ekspluatatsiinoi nadiinosti [Failures and reliability of cars as components of operational reliability]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya: Mekhaniko-tekhnologichni systemy ta kompleksi* [Bulletin of National Technical University «Kharkiv Polytechnical Institute». Series: Mechanical-technological systems and complexes], 2015, issue 52 (1161), pp. 127-130.
6. Miamlin S.V., Muradian L.A. Zastosuvannya osnovnykh zakoniv rozpodilu vypadkovykh velychyn dlia vyznachennia pokaznykiv nadiinosti vahoniv [The application of the basic laws of distribution of random variables to determine the reliability indicators of cars]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnologichnoho universytetu transportu. Seriya: «Transportni systemy i tekhnologii»* [Proc. of State Economic-Technological University of Transport. Series: «Transport Systems and Technologies»], 2015, issue 26-27, pp. 172-180.
7. Miamlin S.V., Muradian L.A., Baranovskiy D.M. Problema vyznachennia terminu «nadiinist». Metodolohiia pobudovy ta vyvchennia nadiinosti vantazhnykh vahoniv [Problem of the definition the «reliability» term. Methodology of construction and study the reliability of freight cars]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 6 (60), pp. 110-117. doi: 10.15802/stp2015/57034.
8. Miamlin S.V. Rozrobka konstruksii ta mashynobudivnykh tekhnologii stvorennia vantazhnykh vahoniv novoho pokolinnia [Development of structures and engineering technologies of creating the new generation freight cars]. *Vahonnyi park – Car Fleet*, 2014, no.10, pp. 4-9.
9. Pavlov I.V. *Statisticheskiye metody otsenki kharakteristik nadezhnosti i effektivnosti slozhnykh sistem po rezul'tatam ispytaniy* [Statistical methods for evaluating the reliability and efficiency of complex systems according to the test results]. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1978. 36 p.
10. Vorobyev V.G. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya aviatsionnogo oborudovaniya* [Technical maintenance of aviation equipment]. Moscow, Transport Publ., 1990. 296 p.
11. Troshchenko V.T. Rol nauki v obespechenii nadezhnosti mashin i sooruzheniy [The role of science in ensuring the reliability of the machines and installations]. *Nadezhnost i dolgovechnost mashin i sooruzheniy – The Reliability and Durability of Machines and Structures*, 1985, no. 7, pp. 3-5.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

12. Ustich P.A., Karpychev V.A., Ovechnikov M.N. *Nadezhnost relsovogo netyagovogo podvizhnogo sostava* [Reliability of the rail non-tractive rolling stock]. Moscow, IG Variant Publ., 1999. 412 p.
13. Khrustalev V.V. Neobkhodim inzhenernyy analiz nadezhnosti slozhnykh system [Engineering analysis of reliability of complex systems]. *Standarty i kachestvo – Standards and Quality*, 1989, no. 3, pp. 17-19.
14. Myamlin S., Lingaitis L.P., Dailydka S., Vaičiūnas G., Bogdevičius M., Bureika G. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie. *Transport*, 2015, vol. 30, issue 1, pp. 88-92. doi: 10.3846/16484142.2015.1020565.
15. 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.
16. Myamlin S.V., Baranovskiy D.M. The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing. *Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana «Problemy ekonomiky transportu»* [Proc. of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan «Problems of Transport Economics»], 2014, no. 7, pp. 61-66.

Prof. S. V. Myamlin, D. Sc. (Tech.) (Ukraine); Prof. I. E. Martynov, D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: July 04, 2016

Received: Sep. 30, 2016

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

UDC 624.191.3

V. D. PETRENKO^{1*}, O. L. TIUTKIN^{2*}, S. T. PROSKURNIA^{3*}

^{1*}Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail 1937@gmail.com, ORCID 0000-0002-5902-6155

^{2*}Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

^{3*}Main engineer of State Enterprise «Zachiddorvybuchprom», Ternopil, 46006, Gayova St., 47, e-mail zvubyxprom@ukr.com

FEATURES OF DRILLING-AND-BLASTING AT CONSTRUCTION OF BESKIDSKIY TUNNEL

Purpose. In this article it is necessary to analyze the possibility of developing technology and increasing its efficiency during the Beskidskiy tunnel construction in difficult engineering and geological conditions. **Methodology.** The authors have performed analysis of the technological level of mining and construction works, new technique, equipment and production. One of the important issues of blasting operation is to ensure the seismic safety, acting at a distance of 30 m in the axes of single-track tunnel, as the distance to it will be 20 m from the nearest charge in the laying tunnel. This problem was solved by applying the combined blasting of blast-hole charges with delay-action and long-delay ways. Herewith the total mass of charges in the stope was divided into three groups, in which the first group is exploded by short-delay firing with, and the second one is exploded by short-delay firing too with intervals of 200...400 ms, the third is exploded by long-delay blasting at intervals of 500...10000 ms. The combined blasting of short-delay charges and delay action ones let significantly reduce seismic action at a mass explosion of charges when driving of double-track railway tunnel of a large cross-section. **Findings.** The paper presents the developed technology model, describing dependence of the machines from engineering and geological conditions. The methodology of drilling and blasting works at the construction of the tunnel callote and stross as well as a technique of arrangement determination and intervals of shot-delay and delay blasting of blasthole explosive charges was developed. Maximum permissible concentration of gases and vapours at blasting was presented. The calculations showed that the maximum level of gas contamination of the working area in Beskidskiy tunnel is achieved at blast operations. In accordance with this ventilation of the tunnel when driving is carried out by independent systems with mechanical ventilation by blowing using mine fans of special mining enterprises. **Originality.** The developed seismically safety charge masses are based on the well-known state about antiseismic blasting regulations. **Practical value.** The authors proposed and grounded the efficient technology for reduction to practice of drilling and blasting works (with dividing of the tunnel cross-section into the calotte and stross during of the Beskydy high-mountain tunnel construction. The results of technological experiment are presented.

Keywords: drilling and blasting works; technology of high-mountain tunnel constructing; railway tunnel; blast seismic; shot-delay and delay charges

Introduction

In contemporary environment the construction of railway tunnels has found a widespread application in difficult engineering and geological condi-

tions. The most significant example of this building is the construction of basic Gotthard tunnel in the Alps, length of 57.3 km, completion is scheduled for 2016 [3]. A distinctive feature of tunneling

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

driving of such a type is the extensive use of tunnel boring machines in hard and strongest rocks.

However, drilling and blasting method for breaking rocks in the tunneling driving including the workings of large section can be successfully used in such conditions [14–16].

Purpose

In Ukraine, currently tunneling driving of Beskydskiy double-track tunnel in the Carpathians is being completed. It is under construction in order to increase rail logistics between Western and Eastern Europe with using tunnel. Its length is 1850 m. Alternation of rocks of different types and strength, including sandstone, siltstone and mudstone with Protodyakonov scale of hardness respectively 6...8, 4...6 and 2...3 occurs in geological structure on construction sites. Hydrogeological conditions are characterized by the expected inflow of water in the range of 5...10 m³/day. Tunneling driving of double-track railway tunnel is carried out with the division of the face on calotte and stross with the way of lower ledge using drilling-and-blasting operations (DBO) [8] in to “bricked-up windows” with movement overlapping of trains in the Beskydskiy acting tunnel, located 30 meters away from the tunnel under construction. Moreover, the existing single-track tunnel was built in 1886.

Drilling operations are carried out when driving with the help of a self-propelled double beam electro-hydraulic unit “Sandvik DT 820-C” from Finland. At this the diameter of holes is 45 mm, and their length is 1.5; 2.3; 2.8 m when calotte driving and 4.2...4.5 m in stross development. Correspondingly stope length, depending on the engineering and geological conditions when calotte driving is 1.25, 2.0 and 2.5 m, and stross one – 4.0...4.2 m.

Drilling of holes is produced by blowing with compressed air and water washing. Compressed air is supplied from the mobile compressor stations, located on near-entrance sites, and water via a pipeline that is laid as far as tunneling driving.

DBO nameplate is made at the stage of pre-production of works and refined accordingly to the results of at least three conducted test blastings [2, 11]. Breaking of rocks with blast-hole charges is provided to carry out using the method of successive contouring with mandatory application of de-

lay-action and long-delay blasting of blast-hole charges groups in the following order depending on the stope size, mentioned above: coal-cutting, contour-hole, under contour, contour, plantar and under-bottom. Deceleration time (interval between multiple-shot blasting) taking into account rock hardness is from 20 to 10000 ms.

For blasting, the following blasting explosives are applied: ammonite № 6 ZhV – for dry and flooded holes, Grammonit 79.21 – for dry holes, ammonal M5 – for dry and flooded holes, gremix – for dry and flooded holes. At this cartridges of 28.32 and 36 mm are used [9].

At complex blasting operating two ways of charges blasting are applied: non-electric and electric [9, 10]. The non-electric initiation system (NIS) «Impulse» is used at non-electrical method. It includes the UNS-SH and UNS-ShK devices, detonating cord (DC), a main waveguide, connecting tube and the starting device. Unlike traditional methods of initiating explosive charges BB, this system has an increased level of security, since, due to insensitivity and stray currents it allows carrying out drilling works without de-energizing of power equipment. In electric mode NIS system «Impulse», UNS-SH device, UNS-ShK, DC and two detonators, type ED-1-3-T are also applied.

Methodology

One of the important issues of blasting operation is to ensure the seismic safety, acting at a distance of 30 m in the axes of single-track tunnel, as the distance to it will be 20 m from the nearest charge in the laying tunnel [1, 4, 6, 7, 13].

Seismic safety charge masses for complex engineering structures, like undoubtedly Beskydskiy tunnel is, can be calculated by the formula according to the work [5],

$$Q_{s.s.} = (V_{cr} \times \varepsilon / Kg)^\beta \times r^3, \text{ kg},$$

where V_{cr} – permissible critical velocity fluctuations, is determined from table 80 [5] and equal to $V_{cr} = 20 \text{ sm/s}$; ε – coefficient depending on the conditions of work and the state of the engineering object is accepted within $\varepsilon = 1.5...3.0$; β – coefficient, which depends on the distance to the object, and equals to $\beta = 1.5...2.0$; Kg – coefficient depending on the geological and engineering condi-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

tions of works production and equals to $Kg = 200$; r – distance to the protected object, $r = 200$ m.

Taking $\varepsilon = 2$; $\beta = 2.5$; $Kg = 200$, as the result

$$Q_{s.s.} = (20 \times 2/200)^{2.5} \times 20^3 = 143.1 \text{ kg.}$$

Consequently, there is a certain limit upon seismic at conducting of blasting operations with a maximum total charge BB on the stope when calotte driving of 163.5 kg.

Findings

Solving this problem was carried out by applying the combined blasting of blast-hole charges with delay-action and long-delay ways (Fig. 1).

At this the total mass of charges in the stope was divided into three groups, in which the first group is exploded by short-delay firing with slow intervals of 20...200 ms, and the second one is exploded by short-delay firing too with intervals of 200...400 ms, the third is exploded by long-delay blasting at intervals of 500...10000 ms. The total mass of blast-hole charges, length of 1.3 m according to the 1st DBO nameplate is 57.75 kg, blast-hole charges, length of 2.3 m – the 2nd DBO nameplate – 124.3 kg, blast-hole charges, length of 2.3 m, the 3^d DBO nameplate – 163.5 kg. The total mass of the charges of the 1st group, length of 1.3 m is 19.5 kg (33.8 %), length of 2.3 m – 27.5 kg (22.1 %) and a length of 2.8 m – 33 kg (20.2 %). Also, the charges mass of the 2nd group, length of 1.3 m is 6.5 kg (11.2%), length of 2.3 m – 13.75 kg

(11.1 %), length of 2.8 m – 16.5 kg (10.1 %). For charges of the 3rd group, length of 1.3 m charges mass is 31.75 kg (55.0 %), length of 2.3 m – 83.05 kg (66.8 %) and a length of 2.8 m – 114 kg (69.7 %).

Thus, the maximum charges mass in groups are less than the maximum permissible under the terms of seismic safety.

As follows from the analysis of presented data in the first group of charges using short-delay blasting with intervals of 20...200 ms, wave interaction with the interference of longitudinal waves may occur. Charges blasting of the second group with an interval of 300...400 ms is performed after 100 and 200 ms. During this period a longitudinal wave from the charges blasting of the first group at its speed in rocks with a hardness coefficient $f = 2...8$, equal to 2500...4000 m/s, will cover the distance from the blasting site of 250...400 m, namely the interaction of the waves and their interference are completely excluded.

Long-delay blasting of charges in the third group with intervals of 500...10000 ms will be performed with a significant margin in time and distance from the previous short-delay one. As a result the interaction of longitudinal waves in the subsequent blasting is completely excluded, which was confirmed by measuring the vibration velocity of rock in active tunnel, which were equal to 0.13...0.15 m/s.

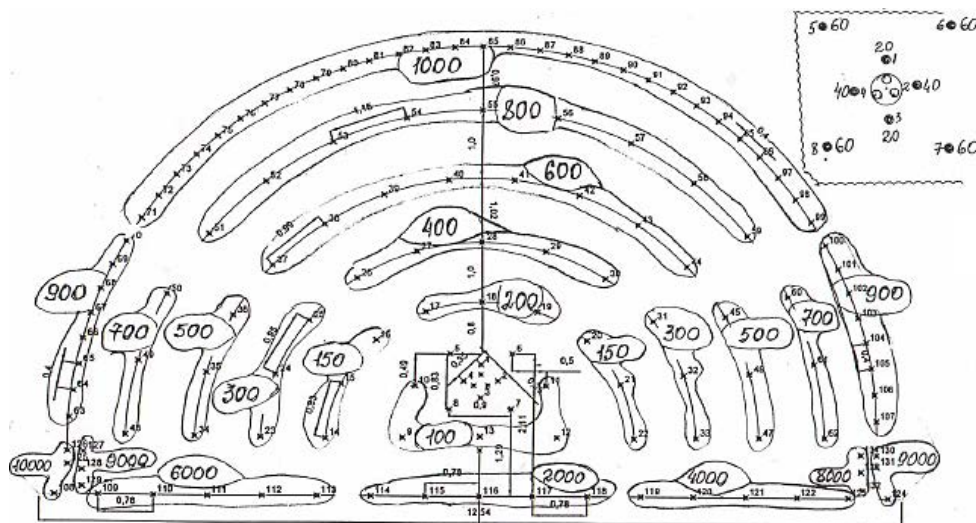


Fig. 1. Circuit of the disposition and connection of explosive charges

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Thus, the combined blasting of short-delay charges and delay action ones let significantly reduce seismic action at a mass explosion of charges when driving of double-track railway tunnel of a large cross-section.

Originality and practical value

The choice of a rational system of ventilation in face working is of great importance in these conditions. In accordance with current safety regulations [9] and classic work upon the tunnel ventilation [12] in workings, where people may be, the air must contain at least 20 % of oxygen (by volume) in its composition. Carbon dioxide content in the air of working at the places of operation should not exceed 0.5%, and in the working with a common upward current – 0.75 %. In addition the air in active underground workings must be free of harmful substances exceeding the maximum permissible concentration (MPC), indicated in Table 1.

In accordance with the Safety specifications the amount of air required for working ventilation, should be calculated upon the largest number of people employed at the same time in underground works, quantity of harmful gases, calculated on a notional carbon monoxide in blasting operations, upon harmful gases from arc welding operations, as well as of harmful substances released during

operation of machines and mechanisms with internal combustion engines.

The calculations showed that the maximum level of gas contamination of the working area in Beskidskiy tunnel is achieved at blasting operations, for which it is necessary to supply to the face of at least 165 m³/min of fresh air.

In accordance with this ventilation of the Beskidskiy tunnel when driving is carried out by independent systems with mechanical ventilation by blowing using mine the fans of “Donventilyator” enterprise. The main technical parameters of the fan are presented in Table 2.

Ventilation system operating principle is as follows. Airing face after blasting is carried out by air supply system from the Eastern portal with the help of an axial fan of the main airing, type IN-14-10D (Table 2) installed on near-entrance site. In the metal pipe with a diameter of 1600 mm made of sheet steel, thickness of 2 mm, fresh air is fed into the bottom-hole zone, which dilutes harmful gases and carries them over the working to the East portal. Along with plenum system also runs the local (near the face) exhaust system, which provides with CFT equipment (Kormann), dedusting exhaust air before its release to the general air flow that moves over the working from the face up to the portal. As advance of face the air supply pipeline, consisting of 4 m long pipes, is increased (built up) to provide effective ventilation.

Table 1

Maximum permissible concentrations of harmful substances

Gases and vapours	Chemical formula	Maximum permissible concentration	
		% at volume	mg/m ³
Carbonic oxide	CO	0,00240	20
Oxides of nitrogen in N ₂ O ₃ equivalent	–	0,00010	5
Sulfur dioxide	SO ₂	0,00035	10
Hydrogen sulfide	H ₂ S	0,00066	10
Acrolein	CH ₂ =CH=CH=O	0,00008	0,2
Formaldehyde	H ₂ C=O	0,00037	0,5
Hydrocarbons in carbon equivalent	–	–	300

Table 2

The main technical parameters of fans

№ п/п	Parameters of fans	FA-14-10D	VMEFA-12-110
1	Nominal impeller diameter, mm	1460	1200
2	Nominal feed, m ³ /s	35	32
3	Flow rate within the working zone, m ³ /s:		
	– minimum, no less	10	8
	– maximum, no more	50	42
4	Maximum efficiency	0,83	0,74
5	Nominal full pressure, Pa	4700	2600
6	Revolutions per minute	1500	1500
7	Fan weight, kg	3650	2310

Conclusions

Thus, the high-level scientific and technical preparation of operational materials upon technology penetration in the rocks in difficult engineering and geological conditions allows solving the problem of building the most complex railway artificial construction – Beskydskiy tunnel.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Артемов, В. А. Методические основы оценки сейсмического действия массовых взрывов по результатам анализа сейсмозрывных продольных и поверхностных волн / В. А. Артемов, Г. П. Парамонов, А. Н. Холодилов // Взрывное дело. – Москва, 2012. – № 108-65. – С. 287–295.
2. Безопасность буровзрывных работ в промышленности / под ред. Б. Н. Кутузова. – Москва : Недра, 1992. – 544 с.
3. В Швейцарии открыт самый длинный в мире железнодорожный тоннель: 57 км. [Electronic resource]. Available at: <https://geektimes.ru/post/276720/>. – Title from the screen. – Accessed : 20.09.2016.
4. ДСТУ 4704: 2008. Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки. – Київ : Держспоживстандарт України, 2009. – 11 с.
5. Кутузов, Б. Н. Разрушение горных пород взрывом : учеб. для вузов / Б. Н. Кутузов. – Москва : Изд-во МГИ, 1992. – 516 с.
6. Петренко, В. Д. Аналіз аварійних ситуацій в тунелях, що споруджуються вибуховим способом / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко,

- О. М. Кулаженко // Проблеми та перспективи розвитку заліз. трансп. : тези 76 Міжнар. наук.-техн. конф. / Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 184–185.
7. Петренко, В. Д. Зниження сейсмічної дії при підриванні короткоуповільнених та уповільнених зарядів / В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін, С. Т. Проскурня // Проблеми та перспективи розвитку заліз. трансп. : тези 76 Міжнар. наук.-техн. конф. / Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 192–194.
8. Петренко, В. Д. Розробка комплексу буровибухових робіт при проходці Бескідського тунелю / В. Д. Петренко, М. В. Герніч, В. В. Барашкін // Проблеми та перспективи розвитку заліз. трансп. : тези 76 Міжнар. наук.-техн. конф. / Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 286–287.
9. Полянкин, Г. Н. Буровзрывные работы в тоннелестроении : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Г. Н. Полянкин. – Москва : ГОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп.», 2007. – 375 с.
10. Способи ініціювання зарядів вибухових речовин : навч. посіб. / В. В. Соколев, А. В. Чернай, В. М. Чебенко, О. В. Скобенко. – Дніпропетровськ : ЛізуновПрес, 2013. – 88 с.
11. Справочник взрывника / Б. Н. Кутузов, В. М. Скоробогатов, И. Е. Ерофеев [и др.] / под общ. ред. Б. Н. Кутузова. – Москва : Недра, 1988. – 511 с.
12. Фомичев, В. И. Вентиляция тоннелей и подземных сооружений / В. И. Фомичев. – Ленинград : Стройиздат, Ленингр. отделение, 1991. – 200 с.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

13. Эстеров, Я. Х. Буровзрывные работы на транспортном строительстве : учеб. для техникумов / Я. Х. Эстеров, Е. Ю. Бродов, М. И. Иванаев. – Москва : Транспорт, 1983. – 328 с.
14. Boidy, E. Rock analysis of time-dependent behavior of a test gallery in claystone / E. Boidy, A. Bouvard, F. Pellet // Tunneling and Underground Space Technology. – 2002. – Vol. 17. – Iss. 4. – P. 415–424. doi: 10.1016/s0886-7798(02)00066-4.
15. Erion, P. Construction Time Analysis For Different Steps In Drill – And – Blast Method Of Hydro Power Tunnel Excavation / P. Erion, A. Algest // J. of Engineering Research and Applications. – Vol. 5. – Iss. 1 (Part 1). – 2015. – P. 95–101.
16. Patnik, K. K. Uncertainty analysis of tunnel squeezing for two tunnel cases from Nepal Himalaya / K. K. Patnik, B. Nirsan // Intern. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2007. – Vol. 44. – Iss. 1. – P. 67–76. doi: 10.1016/j.ijrms.2006.04.013.

В. Д. ПЕТРЕНКО^{1*}, О. Л. ТЮТЬКІН^{2*}, С. Т. ПРОСКУРНЯ^{3*}

^{1*}Каф. «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта 1937@gmail.com, ORCID 0000-0002-5902-6155

^{2*}Каф. «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

^{3*}Держ. підприємство «Західдорвухпром», вул. Гайова, 47, Тернопіль, 46006, ел. пошта zvubuxprom@ukr.com

ОСОБЛИВОСТІ КОМПЛЕКСУ БУРОВИБУХОВИХ РОБІТ ПРИ БУДІВНИЦТВІ БЕСКИДСЬКОГО ТУНЕЛЮ

Мета. В статті необхідно проаналізувати можливість розробки технології проведення буровибухових робіт та підвищення її ефективності при будівництві Бескидського тунелю в складних інженерно-геологічних умовах. **Методика.** Автори виконали аналіз технічного рівня гірських і будівельних робіт, нової техніки, обладнання та виробництва. Використовувалось запропоноване забезпечення системою безпеки тунелю, який експлуатується (враховуючи, що відстань до нього 20 м від найближчого заряду в споруджаному тунелі). Для цього була запропонована система комбінованого вибуху шпурових зарядів короткоуповільненим і уповільненим способами. Враховано, що загальна маса зарядів у заходці була розділена на три групи, в яких перша і друга групи підриваються короткоуповільнено, з інтервалами уповільнення 20...200 мс та 200...400 мс відповідно, і третя – уповільнено, з інтервалами 500...10 000 мс. Застосування цієї системи істотно знизило сейсмічну дію масового вибуху зарядів при проходці двоколіїного залізничного тунелю великого поперечного перетину. **Результати.** В статті представлена розроблена технологічна модель, що описує залежність техніки від інженерних та геологічних умов. Була розроблена методологія проведення буровибухових робіт при будівництві калоти і штроби, а також техніка визначення та улаштування інтервалів короткоуповільненого і уповільненого підривання шпурових зарядів вибухових речовин. Представлена максимально допустима концентрація газів і парів при вибуху. Розрахунки показали, що максимальний рівень забруднення газами робочої зони в Бескидському тунелі досягається при вибухових процесах. Відповідно до цього, при вентиляції тунелю, коли проходка виконується по незалежним системам із механічною вентиляцією шляхом дуття, використовують шахтні вентилятори спеціалізованих гірських підприємств. **Наукова новизна.** Розроблені сейсмобезпечні зарядні маси базуються на добре відомому положенні про антисейсмічне підривання. **Практична значимість.** Авторами запропонована та обґрунтована ефективна технологія проведення буровибухових робіт (із розділенням поперечного перерізу тунелю на калоту і штроби) при прокладанні високогірного Бескидського тунелю. Представлені результати технологічних експериментів.

Ключові слова: буровибухові роботи; технологія проходки високогірного тунелю; залізничний тунель; вибухова сейсміка; короткоуповільнені та уповільнені заряди

В. Д. ПЕТРЕНКО^{1*}, А. Л. ТЮТЬКИН^{2*}, С. Т. ПРОСКУРНЯ^{3*}

^{1*}Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, эл. почта 1937@gmail.com, ORCID 0000-0002-5902-6155

^{2*}Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, эл. почта tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

^{3*}Гос. предприятие «Западдорзврывпром», ул. Гаевая, 47, Тернополь, 46006, эл. почта zvubyxprom@ukr.com

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСА БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ БЕСКИДСКОГО ТОННЕЛЯ

Цель. В статье необходимо проанализировать возможность разработки технологии и повышения ее эффективности при строительстве Бескидского тоннеля в сложных инженерно-геологических условиях. **Методика.** Авторы выполнили анализ технического уровня горных и строительных работ, новой техники, оборудования и производства. Использовалось предлагаемое обеспечение системой безопасности тоннеля, который эксплуатируется (учитывая, что расстояние до него 20 м от ближайшего заряда в строящемся тоннеле). Для этого была предложена система комбинированного взрыва зарядов короткозамедленным и замедленным способами. Учтено, что общая масса зарядов в заходке была разделена на три группы, в которых первая и вторая группы подрываются короткозамедленно с интервалами замедления 20...200 мс и 200...400 мс соответственно, и третья – замедленно, с интервалами 500...10000 мс. Применение этой системы существенно снизило сейсмическое воздействие массового взрыва зарядов при проходке двухпутного железнодорожного тоннеля большого поперечного сечения. **Результаты.** В статье представлена разработанная технологическая модель, описывающая зависимость техники от инженерных и геологических условий. Разработана методология проведения буровых и взрывных работ при строительстве каллоты и штроссы тоннеля, а также техника определения расстановки и интервалов короткозамедленного и замедленного взрывания шпуровых зарядов взрывных веществ. Представлена максимально допустимая концентрация газов и паров при взрыве. Расчеты показали, что максимальный уровень загрязнения газами рабочей зоны в Бескидском тоннеле достигается при взрывных процессах. Соответственно этому, вентиляция тоннеля, когда проходка выполняется по независимым системам с механической вентиляцией путем продувки, выполняется с использованием шахтных вентиляторов специализированных горных предприятий. **Научная новизна.** Разработанные сейсмотехнические зарядные массы основаны на хорошо известном положении об антисейсмическом взрывании. **Практическая значимость.** Авторами предложена и обоснована эффективная технология внедрения в практику буровзрывных работ (с разделением поперечного сечения тоннеля на калотту и штроссу) при прокладывании высокогорного Бескидского тоннеля. Представлены результаты технологических экспериментов.

Ключевые слова: буровзрывные работы; технология проходки высокогорного тоннеля; железнодорожный тоннель; взрывная сейсмика; короткозамедленные и замедленные заряды

REFERENCES

1. Artemov V.A., Paramonov G.P., Kholodilov A.N. Metodicheskiye osnovy otsenki seysmicheskogo deystviya massovykh vzryvov po rezultatam analiza seysmovzryvnykh prodolnykh i poverkhnostnykh voln [Methodical foundations of seismic action estimation of mass explosions upon the analysis results of seismic explosion longitudinal and surface waves]. *Vzryvnoye delo – Blasting Work*, 2012, no. 108-65, pp. 287-295.
2. Kutuzov B.N. *Bezopastnost burovzryvnykh rabot v promyshlennosti* [Drilling-and-blasting safety in industry]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 544 p.
3. *V Shveysarii otkryt samyy dlinnyy v mire zheleznodorozhnyy tonnel: 57 km* (The world's longest railway tunnel has been opened in Switzerland: 57 km.). Available at: <https://geektimes.ru/post/276720/> (Accessed 20 September 2016).
4. *DSTU 4704: 2008. Provedennia promyslovykh vybukhiv. Normy seismichnoi bezpeky* [State Standard 4704: 2008. Conducting of industrial explosions. The norms of seismic security]. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy Publ., 2009. 11 p.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

5. Kutuzov B.N. *Razrusheniye gornykh porod vzryvom* [Destruction of rocks by explosion]. Moscow, MGI Publ., 1992. 516 p.
6. Petrenko V.D., Huzchenko V.T., Kulazhenko O.M. Analiz avariinykh sytuatsii v tuneliakh, shcho sporudzhuiutsia vybukhovym sposobom [Analysis of accidents in tunnels, constructed by an explosive way]. *Tezy 76 Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu»* [Proc. of 76th Sci. and Technical Conference «Problems and prospects of railway transport development»]. Dnipropetrovsk, 2016, pp. 184-185.
7. Petrenko V.D., Tiutkin O.L., Proskurnia S.T. Znyzhennia seismichnoi dii pry pidryvanni korotkoupovilnennykh ta upovilnennykh zariadiv [Reducing seismic action at blasting of short delayed and delayed charges]. *Tezy 76 Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu»* [Proc. of 76th Sci. and Technical Conference «Problems and prospects of railway transport development»]. Dnipropetrovsk, 2016, pp. 192-194.
8. Petrenko V.D., Hernich M.V., Barashkin V.V. Rozrobka kompleksu burovybukhovyykh robit pry prokhodtsi Beskidskoho tuneliu [Development of drilling and blasting works while driving the Beskydskiy tunnel]. *Tezy 76 Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu»* [Proc. of 75th Sci. and Practical Conference «Problems and prospects of railway transport development»]. Dnipropetrovsk, 2015, pp. 286-287.
9. Polyankin G.N. *Burovzryvnyye raboty v tonnelestroyenii* [Drilling and blasting works in tunnel construction.]. Moscow, GOU «Uchebno-metodicheskiiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2007. 375 p.
10. Soboliev V.V., Chernai A.V., Chebenko V.M., Skobenko O.V. *Sposoby initsiuvannia zariadiv vybukhovyykh rehovyn* [Methods for initiating explosive charges]. Dnipropetrovsk, LizunovPres Publ., 2013. 88 p.
11. Kutuzov B.N., Skorobogatov V.M., Yerofeyev I.Ye. *Spravochnik vzryvnika* [Handbook of the shot-firer]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 511 p.
12. Fomichev V.I. *Ventilyatsiya tonneley i podzemnykh sooruzheniy* [Ventilation of tunnels and underground structures]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1991. 200 p.
13. Esterov Ya.Kh., Brodov Ye.Yu., Ivanayev M.I. *Burovzryvnyye raboty na transportnom stroitelstve* [Drilling-and-blasting works on the transport construction]. Moscow, Transport Publ., 1983. 328 p.
14. Boidy E., Bouvard A., Pellet F. Rock analysis of time-dependent behavior of a test gallery in claystone. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2002, vol. 17, issue 4, pp. 415-424. doi: 10.1016/s0886-7798(02)00066-4.
15. Erion P., Algest A. Construction Time Analysis For Different Steps In Drill – And – Blast Method Of Hydro Power Tunnel Excavation. *Journal of Engineering Research and Applications*, 2015, vol. 5, issue 1 (Part 1), pp. 95-101.
16. Patnik K.K., Nirsan B. Uncertainty analysis of tunnel squeezing for two tunnel cases from Nepal Himalaya. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, vol. 44, issue 1, pp. 67-76. doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.04.013.

Prof. M. I. Netesa, Dr. Sc. (Tech.) (Ukraine); Prof. E. I. Efremov, Dr. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Received: March 22, 2016

Accepted: July 20, 2016

ЗМІСТ

ПАМ'ЯТНІ ДАТИ

С. В. МЯМЛІН

ВЧЕНИЙ-ДИНАМІК І ДИНАМІЧНА ЛЮДИНА.

ДО 80-РІЧЧЯ ПРОФЕСОРА ВІКТОРА ДАНИЛОВИЧА ДАНОВИЧА.....7

С. В. МЯМЛІН, С. С. ДОВГАНЮК

ІНЖЕНЕР, МЕХАНІК, ВЧЕНИЙ.

ДО 80-РІЧЧЯ З ДНЯ НАРОДЖЕННЯ ПРОФЕСОРА САВЧУКА ОРЕСТА МАКАРОВИЧА..... 12

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

М. ФРАНЕКОВА, П. ЛЮЛЕЙ

МОДЕЛЮВАННЯ ПРИСТРОЇВ ЗВ'ЯЗКУ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ БЕЗПЕКУ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ..... 15

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

М. М. БІЛЯЄВ, М. О. ОЛАДІНО

МОДЕЛІ ОЦІНКИ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ

ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ СИПУЧИХ ВАНТАЖІВ..... 22

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

І. О. ЄЛОВИЙ, Є. М. ПОТИЛКІН

РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ІНТЕРВАЛІВ ДЛЯ ВИБОРУ РЕЖИМІВ ВЗАЄМОДІЇ

СТАНЦІЙ ТА КОЛІЙ НЕЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ..... 30

І. В. ЖУКОВИЦЬКИЙ, І. А. КЛЮШНИК

ВИКОРИСТАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ

ВАЛА ГІДРАВЛІЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ ТЕПЛОВОЗА..... 43

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Л. В. ДУБИНЕЦЬ, О. Л. МАРЕНИЧ, О. Ю. БАЛІЙЧУК, А. С. КОРТОГУЗ

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В ЛОКОМОТИВНИХ ДЕПО

ПРИСТРОЇВ ІЗ НЕРЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ..... 54

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

М. А. АРБУЗОВ, О. М. ПАТЛАСОВ, С. О. ТОКАРЄВ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОЛІЇ

ТА РУХОМОГО СКЛАДУ В МЕЖАХ З'ЇЗДУ..... 64

Е. І. ДАНІЛЕНКО

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ЖОРСТКОСТІ ТА ПРУЖНОСТІ РЕЙКОВОЇ НИТКИ

ПРИ КРУЧЕННІ ПІД ДІЄЮ ВЕРТИКАЛЬНИХ І ГОРИЗОНТАЛЬНИХ СИЛ..... 79

С. Т. ДЖАББАРОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ТИСКУ

ПРИ ПРОХОДЖЕННІ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ПОЇЗДА..... 92

Д. М. КУРГАН

ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ ХВИЛЬОВОЇ МОДЕЛІ

ПОШИРЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У ЗАЛІЗНИЧНІЙ КОЛІЇ..... 101

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

С. С. БЕЛІМЕНКО, В. О. ІЩЕНКО, В. О. ГАБРИНЕЦЬ

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У ТВЕРДОТІЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРАХ..... 114

В. І. ШИНКАРЕНКО, О. І. САБЛІН, О. П. ІВАНОВ

КОНСТРУКТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОНИ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ

ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ..... 125

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

О. А. ГАЙВОРОНСЬКИЙ УМОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВІДНОВЛЕНИХ НАПЛАВЛЕННЯМ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС	136
--	-----

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Р. КРАЙС, В. С. ЛІСНИЧИЙ ВИКОРИСТАННЯ ШЕСТИГРАННИХ СУЦІЛЬНОМЕТАЛЕВИХ САМОСТОПОРНИХ FS-ГАЙОК У РУХОМОМУ СКЛАДІ ЗАЛІЗНИЦЬ ШИРИНИ КОЛІЇ 1520 ММ.....	152
--	-----

Л. А. МУРАДЯН ЙМОВІРНІСНО-ФІЗИЧНИЙ ПІДХІД ДЛЯ ОПИСАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАГОНІВ	168
---	-----

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

В. Д. ПЕТРЕНКО, О. Л. ТЮТЬКІН, С. Т. ПРОСКУРНЯ ОСОБЛИВОСТІ КОМПЛЕКСУ БУРОВИБУХОВИХ РОБІТ ПРИ БУДІВНИЦТВІ БЕСКИДСЬКОГО ТУНЕЛЮ.....	178
--	-----

СОДЕРЖАНИЕ

ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

С. В. МЯМЛИН

УЧЕНЫЙ-ДИНАМИК И ДИНАМИЧНЫЙ ЧЕЛОВЕК.

К 80-ЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА ВИКТОРА ДАНИЛОВИЧА ДАНОВИЧА7

С. В. МЯМЛИН, С. С. ДОВГАНЮК

ИНЖЕНЕР, МЕХАНИК, УЧЕНЫЙ.

К 80-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ПРОФЕССОРА САВЧУКА ОРЕСТА МАКАРОВИЧА 12

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

М. ФРАНЕКОВА, П. ЛЮЛЕЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СВЯЗИ,

ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ БЕЗОПАСНОСТЬ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ 15

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

Н. Н. БЕЛЯЕВ, М. О. ОЛАДИПО

МОДЕЛИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ 22

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

И. А. ЕЛОВОЙ, Е. Н. ПОТЫЛКИН

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ДЛЯ ВЫБОРА РЕЖИМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

СТАНЦИЙ И ПУТЕЙ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ 30

И. В. ЖУКОВИЦКИЙ, И. А. КЛЮШНИК

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ

ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОВОЗА 43

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ

Л. В. ДУБИНЕЦ, О. Л. МАРЕНИЧ, А. Ю. БАЛИЙЧУК, А. С. КОРТОГУЗ

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЛОКОМОТИВНОМ ДЕПО

УСТРОЙСТВ С НЕРЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ 54

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ

М. А. АРБУЗОВ, А. М. ПАТЛАСОВ, С. А. ТОКАРЕВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУТИ

И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ПРЕДЕЛАХ СЪЕЗДА 64

Э. И. ДАНИЛЕНКО

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕСТКОСТИ И УПРУГОСТИ РЕЛЬСОВОЙ НИТИ

ПРИ КРУЧЕНИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СИЛ 79

С. Т. ДЖАББАРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОЕЗДА 92

Д. Н. КУРГАН

ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ВОЛНОВОЙ МОДЕЛИ

РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПУТИ 101

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С. С. БЕЛИМЕНКО, В. А. ИЩЕНКО, В. А. ГАБРИНЕЦ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ

В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРАХ 114

В. И. ШИНКАРЕНКО, О. И. САБЛИН, А. П. ИВАНОВ

КОНСТРУКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

РЕКУПЕРАЦИИ ТЯГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА 125

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А. А. ГАЙВОРОНСКИЙ

УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА

ВОССТАНОВЛЕННЫХ НАПЛАВКОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС 136

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

Р. КРАЙС, В. С. ЛЕСНИЧИЙ

ПРИМЕНЕНИЕ ШЕСТИГРАННЫХ ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ САМОСТОПОРЯЩИХСЯ FS-ГАЕК

НА ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ КОЛЕИ 1520 ММ..... 152

Л. А. МУРАДЯН

ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД ДЛЯ ОПИСАНИЯ

И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ВАГОНОВ 168

ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

В. Д. ПЕТРЕНКО, А. Л. ТЮТЬКИН, С. Т. ПРОСКУРНЯ

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСА БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ

ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ БЕСКИДСКОГО ТОННЕЛЯ 178

CONTENTS

MEMORABLE DATES

S. V. MYAMLIN

ENERGETIC SCIENTIST AND DYNAMIC PERSON.

TO THE 80TH ANNIVERSARY OF PROFESSOR VIKTOR DANILOVICH DANOVICH BIRTH7

S. V. MYAMLIN, S. S. DOVHANIUK

ENGINEER, MECHANIC, SCIENTIST.

THE 80TH ANNIVERSARY OF PROFESSOR SAVCHUK OREST MAKAROVYCH BIRTH12

TRANSPORT AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

M. FRANEKOWA, P. LÜLEY

MODELLING OF SAFETY-RELATED COMMUNICATIONS FOR RAILWAY APPLICATIONS15

TRANSPORT ECOLOGY

M. M. BILIAIEV, M. O. OLADIPO

THE ASSESSMENT MODELS OF AIR POLLUTION DURING TRANSPORTATION OF BULK CARGO22

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

I. A. YELOVOY, YE. N. POTYLKIN

CALCULATION OF OPTIMAL INTERVALS TO CHOOSE THE MODES

OF INTERACTION BETWEEN STATIONS AND NON-PUBLIC TRACKS30

I. V. ZHUKOVYTSKYI, I. A. KLIUSHNYK

USE OF MICROCONTROLLER FOR MEASURING SHAFT SPEED

OF DIESEL LOCOMOTIVE HYDRAULIC TRANSMISSION43

ELECTRIC TRANSPORT

L. V. DUBYNETS, O. L. MARENYCH, O. YU. BALIICHUK, A. S. KORTOHUS

ENERGY SAVING DURING OPERATION OF EQUIPMENT

WITH NON-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE IN LOCOMOTIVE DEPOT54

RAILWAY TRACK

M. A. ARBUZOV, O. M. PATLASOV, S. O. TOKARIEV

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF INTERACTION

OF TRACK AND ROLLING STOCK ON CROSSOVERS64

E. I. DANILENKO

CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF STIFFNESS AND ELASTICITY OF RAIL THREADS

WHEN TORSION UNDER COMBINED ACTION OF VERTICAL AND HORIZONTAL FORCES79

S. T. DJABBAROV

INVESTIGATION OF AERODYNAMIC PRESSURE DURING THE HIGH-SPEED TRAIN PASSAGE92

D. M. KURHAN

THE BASIS OF MATHEMATICAL DESCRIPTION FOR WAVE MODEL

OF STRESSES PROPAGATION IN RAILWAY TRACK101

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING

S. S. BELIMENKO, V. O. ISHCENKO, V. O. GABRINETS

MODELING OF TEMPERATURE FIELDS IN A SOLID HEAT ACCUMULATORS114

V. I. SHYNKARENKO, O. I. SABLIN, O. P. IVANOV

CONSTRUCTIVE MODELLING FOR ZONE OF RECOVERY ENERGY

DISTRIBUTION OF DC TRACTION125

MATERIAL SCIENCE

O. A. HAIVORONSKYI

TERMS OF ENSURING QUALITY OF THE RAILWAY WHEELS BUILT UP BY WELDING136

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

R. KREIS, V. S. LISNYCHYI

APPLICABILITY OF FS-ALL-METAL SELF-LOCK NUTS
FOR RAILWAY ROLLING STOCK OF 1520 MM GAUGE152

L. A. MURADIAN

PROBABILISTIC-PHYSICAL APPROACH TO DESCRIBE
AND DETERMINE THE RELIABILITY OF CARS.....168

TRANSPORT CONSTRUCTION

V. D. PETRENKO, O. L. TIUTKIN, S. T. PROSKURNIA

FEATURES OF DRILLING-AND-BLASTING AT CONSTRUCTION OF BESKIDSKIY TUNNEL178

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_P_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_P_vidomosti.doc.
- **Третій** – рецензія (відсканована). Назва файлу – Ivanov_P_recenziia.jpg.
- **Четвертий** – Експертний висновок (відсканований, складається у вільній формі). Назва файлу – Ivanov_P_vysnovok.jpg.
- **П'ятий** – Ліцензійний договір (відсканований). Назва файлу – Ivanov_P_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/>

Для нотаток

.

Наукове видання

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

№ 5 (65) 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. 22,32. Тираж 300 пр. Зам. № .

**Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Адреса дільниці оперативної поліграфії:

вул. Лазаряна, 2, кім. 1201, м. Дніпро, 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)**

№ 5 (65) 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. 22,32. Тираж 300 экз. Зак. № .

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна**

Адрес редакции, издателя:

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Днипро, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Адрес участка оперативной полиграфии:

ул. Лазаряна, 2, ком. 1201, г. Днипро, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 47-19-66, факс: +38 (056) 47-19-83



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU. VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO
UNİVERSİTETU ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

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

No. 5 (65) 2016

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – А. І. Myrhorodska
Computer makeup – Л. А. Kobuliya
Redaction – О. М. Vrublevska

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 22,32. Circulation 300. Order no .

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

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Address of small offset printing office

Lazaryan St., 2, r. 1201, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 47-19-66, *Fax:* +38 (056) 47-19-83



СУЧАСНІ ЗАКЛАДИ ОСВІТИ - 2016
Сьома Міжнародна виставка

CERTIFICATE

**якості наукових публікацій
УДОСТОЄНИЙ**

**Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Міністерство освіти і науки України
Інститут модернізації змісту освіти

Директор

Н. Врткина

Підставляє
показники наукометричної
базис даних Scopus
за 2015 рік



Національна академія
педагогічних наук України

Президент

В. Кремень

Асоціація користувачів
Української науково-освітньої
телекомунікаційної мережі «Уран»

Ю. Якоменко



Україна, м. Київ



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

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2016. 5(65). 1-192