



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



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 4(70)

.. 2017 ..

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

№ 4 (70) 2017

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

Дніпро

2017

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. Є., Босов А. А., Вакулєнко І. О., Власова Т. І., Волкова В. Є., Габринєць В. О., Гаврилюк В. І., Гєтьман 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., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган М. Б., Муха А. М., 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., Скалозуб В. В., Сніжко Л. О., Урсуляк Л. В., Шинкаренко В. І., 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, Рєспубліка Польща); Вайчунас Г. (Вільнюський технічний університет ім. Гєдимінаса, Литва); Васяк І. (Інститут електроенєргєтики Лодзинської політехніки, Рєспубліка Польща); Гусєв Б. В. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Долежел І. (Університет Західної Богємії, Чєська Рєспубліка); Зіммер К. (Інститут Електротєхніки Варшавської політехніки, Рєспубліка Польща); Куанишев Б. М. (Казахська академія транспорту і комунікацій, Рєспубліка Казахстан); Лінгайтіс В. Л. (Вільнюський технічний університет ім. Гєдимінаса, Литва); Манашкін Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковські А. (Сілезька політехніка, Рєспубліка Польща); Стржелицькі Р. (Гданська морська академія, Рєспубліка Польща); Тітова Т. С. (Пєтербурзький державний університет шляхів сполучення Імператора Олєксандра І, Російська Федерація); Худзікевич А. (Варшавський політехнічний університет, Рєспубліка Польща); Шєпонг Адам (Варшавський політехнічний університет, Рєспубліка Польща).

Журнал зарєєстровано Дєржавною рєєстраційною службою Міністерства юстиції України.
Свідєцтво про рєєстрацію KB № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.
Видання внесєно до Перєліку наукових фахових видань України наказом
Міністерства освїти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки).
Журнал зарєєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™
Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar,
Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.
Друкуєтьсє за рїшенням вченої ради університету від 15.06.2017 р., протокол № 11

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

Адреса засновника вул. Лазаряна, 2, кїм. 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 публікуєтьсє з 1936 р.:

- 1936–1993 рр. – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
- 1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
- 2003–2012 рр. – «Вїсник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
- з 2013 р. – «Наука та прогрєс транспорту. Вїсник 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

№ 4 (70) 2017

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

Днепро

2017

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., Головкова 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., Настечик М. П., Нетеса Н. И., Оковитый С. И., Очкасов А. Б., Петренко В. Д., Пичугов С. А., Пичурин В. В., Полишко Т. В., Радкевич А. В., Радченко Н. А., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Снежко Л. А., Урсуляк Л. В., Шинкаренко В. И., Штапенко Э. Ф., Эйтулис Г. Д., Яришкина Л. А.

ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

Журнал
зарегистрирован

Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г.
Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины приказом Министерства образования и науки Украины 29.12.2014 г. № 1528 (технические науки).
Журнал зарегистрирован: в международных каталогах периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометрических системах Google Scholar, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.
Печатается по решению ученого совета университета от 15.06.2017 г., протокол № 11

Издатель

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

Адрес
учредителя

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, Днипро, 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», (ISSN 1993-9175);
с 2013 г. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

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

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU

**VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACÌONAL'NOGO UNÌVERSITETU
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU**

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

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

Scientific journal

No. 4 (70) 2017

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

Dnipro

2017

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

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

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

EDITORIAL BOARD MEMBERS (UKRAINE):

Afanasov A. M., Bannikov D. O., Barash Yu. S., Biliaiev M. M., Bobrovskiy V. I., Bobyr D. V., Bodnar B. J., Bosov A. A., Crivchick G. G., Dotsenko O. M., Dudkina V. V., Eitutis H. D., Gabrync V. A., Gavrilyuk V. I., Getman G. K., Glavatskiy K. Ts., Hnennyi O. M., Golovkova L. S., Goncharov K. V., Gorobets V. L., Kapitsa M. I., Kazakevich M. I., Kopytko V. I., Kostin M. O., Krasnyuk A. V., Kravets V. V., Kurgan M. B., Kuznetsov V. G., Mukha A. M., 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., Shynkarenko V. I., Skalozub V. V., Snizhko L. O., Ursulyak L. V., Vakulenko I. O., Vlasova T. I., Volkova V. Ye., Yarishkina L. O., Zabludovskiy V. O., Zhukovysky 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); Kuanyshhev 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 15.06.2017, Protocol no. 11
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», (ISSN 1993-9175),
since 2013 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

UDC 656.256.3:621.316.91

K. I. YASHCHUK^{1*}

^{1*}Dep. «Automation, Remote Control and Communication», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 647 54 89, e-mail k.i.yaschuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-8606-5790

POTENTIALS RAILWISE PROPAGATION STUDY

Purpose. The article deals with conducting the study of the potentials and currents propagation along the rails to evaluate the potential difference and the current asymmetry in the rails that may have an impact on the work of railway automatics and supervisory systems. **Methodology.** To compass the purpose, the author applies methods of analysis and synthesis of track circuit electrical engineering calculations, mathematical modeling and methods of homogeneous and heterogeneous ladder circuits. **Findings.** The conducted theoretical studies indicate that in the mountainous sections of DC traction railways there are very high-level currents, whereby even at nominal asymmetry ratio the asymmetry current will be unacceptably high. The re-equipment of running line with the automatic blocking system with tonal rail circuits resulted in reduction of the number of impedance bonds, the equalizing functions of which required further advanced research, that allowed obtaining the potential railwise propagation curves when installing the impedance bonds every 6 and 5 km. The resulting potential difference was too high for railway automation systems, so the potential propagation study was conducted with impedance bonds placed every 3 and 3.5 km, which greatly improved the operation conditions of track circuits. **Originality.** The proposed method for calculating the propagation of potentials and currents in the rail network of DC traction line is characterized by the representation of the common ladder circuit of each rail as a series of T-shaped four-poles connected in cascade, taking into account the grounding of the contact-line supports on the nearer rail. It has allowed estimating the levels of asymmetry currents that branch into the equipment of track circuits and have a negative impact on their operation. **Practical value.** The obtained results can be used in designing and re-equipping the running lines with new railway automatics and supervisory systems, as well as for evaluating the influence of high asymmetry currents on the railway automation systems operation.

Keywords: traction currents; track circuits; impedance bond; asymmetry current; potentials propagation

Introduction

Traction current has a significant impact on the operation of automatic block systems (AB) [1]. There are rail sections where it reaches very high levels, resulting in melting of track choke cables. Such are the mountain sections of railways with electric drive of direct current. In this way, the problem of railwise propagation of potentials caused by traction current becomes actual, the study of which will allow to estimate the difference between the derived potentials and the negative impact on the equipment of the track circuits (TC), in particular, the tonal ones (TTC).

Purpose

The purpose of the work is to study the propagation of potentials along the rails in order to evaluate the impact of traction current on TTC operation. This will enable us to take a number of necessary technical measures to combat asymmetry, as well as to investigate their effectiveness in advance.

Methodology

As noted, high levels of traction currents are peculiar for mountain railways. This can be ex-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

plained by the presence of steep climbs, to overcome which the locomotive requires large traction effort, provided by 2-3 electric locomotives. The work examined the mountainous section with DC electric traction of Lavochne – Beskid – Skotar-skoje of Lviv Railways. As a result of the carried out researches it was established that traction currents reach 7000 A on this site and it is expedient to re-equip the section AB with 50 Hz frequency TC onto the ABTK system, which uses TTC without isolating joints [2], resulting in reduced number of impedance bonds (IB), as in fact, in the case of TTC, they are installed only for the potential alignment in the rails, while the IBs pass less current. This greatly facilitates the operation of the track circuits on the running line because the impedance bond is a weak point in the TC, especially in the presence of large traction currents [3].

If we take into account such an important parameter as the asymmetry ratio, then its limiting value according to the technical conditions is equal to $k_a = 0.12$. In this case, the difference in rail currents will be equal to $\Delta I = 432$ A. In practice, the asymmetry ratio can reach 0.2. As a result of the high traction currents flow, normal operation of IBs is violated due to their inadmissible heating and magnetization [4]. As a result of thermal overheating, IB may even break down. The common occurrence is the IB core saturation, resulting in a decrease in the IB input impedance to signal current, which may lead to the voltage reduction on the track receiver up to the voltage value of non-attraction of relay armature. Consequently, the asymmetry current increase can cause a parametric failure of the TC.

Since the rails are not isolated, part of the reverse traction current flows through the ground. This fact has a significant impact on a number of phenomena, in particular, the traction network resistance and TC operation [5]. The earth leakage current from rails depends on the potential difference between the rails and the ground and the resistance of the circuit through which this current flows. The circuit consists of two consecutive parts. The first part is the resistance of the transition point of the current from the rails to the sleepers and ballast; the second part is the resistance of the ground itself on the path of leakage current.

For the analysis of the spread of traction current along the rails, regardless of the train situation and

the section complexity, it is necessary to determine the load of the substations [6]. To simplify the calculation, we can accept some assumptions that will not make a tangible error. With good insulation of rails from the ground in the absence of earth leakage, the train loads can be distributed between substations in the usual way – inversely proportional to distances to the neighbouring substations (with constant area of the section of the overhead wires and the same voltage of traction substations). If the transition resistance from the rails to the ground will be minimal, then a significant part of the current will flow on the ground and, in the distribution of loads between the substations, one can neglect the resistance of the earth return [7] (rails shunted to earth), since it is much less than the resistance of the overhead wires. The latter will mostly determine the current distribution. It can be assumed that wandering currents do not significantly affect the current distribution between substations [8].

Before carrying out the research it is necessary to determine the load of the traction substations [9]. The current of the first substation – I_1 , the second one – I_3 , the current of the locomotive – I_2 . The distances from the substation to the locomotive are known. Then the load of the traction substations (their currents) can be found, based on the distances from the locomotive to each of the substations. Thus, the traction current of the first substation is determined by:

$$I_1 = \frac{l_2 - l_1}{l_2} \cdot I_2 = 4\,200 \text{ A. Traction current of the}$$

$$\text{second substation: } I_3 = \frac{l_1}{l_2} \cdot I_2 = 2\,800 \text{ A.}$$

Once the load of all substations has been determined, we can go to the calculation circuit. In the calculations the following resistances play a great role: r_t – resistance of 1 km of track, Ohm·km; r_T – transient resistance from rails to earth at a length of 1 km, Ohm/km; r_e – earth resistance.

If the resistances r_t and r_T are constant over the entire length, then we obtain a circuit with constant parameters, that is, a circuit line. When calculating such circuits, the superposition method can be used. In this case, a complex contour containing several substations and loads can be replaced with a number of contours, in each of which flows a

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

certain current. The calculation circuit contains one load when the earthing connector is infinitely distant. At the same time, all loads are considered in turn, taking into account the currents of substations.

The basis for analytical study of the distribution of constant voltages and currents along the rail line (RL), which is an electric long line, are differential equations of the Helmholtz type [10]. At the line input there is a source of reverse traction current leakage, herewith the expressions for the distribution of voltage and current along the line have the form, $\frac{dU}{dx} = Z_0 I$, $\frac{dI}{dx} = \varphi_0 U$. Solutions of these equations lead to the following equations:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} - \gamma^2 U = 0, \quad \frac{d^2 I}{dx^2} - \gamma^2 I = 0, \quad (1)$$

Where $\gamma_0 = \sqrt{R_0 \cdot Y_0} = \alpha$, (Np/km); α – RL propagation coefficient at constant current; R_0, Y_0 – specific rail resistance (Ohm/km) and isolation conductivity (Cm·km) of element of the line Δx .

Each track is replaced by two two-wire homogeneous ladder circuits (HLC) «rail-earth» [11] and is presented by T-shaped four-poles sequentially connected in a cascade (Fig. 1). The estimated area of the RL can be taken of any length, we conditionally take $l=3$ km, it will contain $N=6$ identical segments of the line of 0.5 km (the quantization scale can be varied, it is determined by the line simulation accuracy).

If we neglect the resistance of IB to direct current, then both of the HLCs of the line «rail – earth» are shorted, providing alignment of the potentials of both rails with each other.

During circuit design it is taken into account that the parameters of the equivalent network (C3 EN) of the lines can vary widely, and with the relatively low isolation resistance, the input/output resistance of HLC 1, 2 are equal to characteristic ones. Then, the traction current load of each line at the boundary of the block sections is the resistance of the IB half-coils (≈ 0.006 Ohm), indicating the operation of each of these HLC lines in the short-circuit mode (SC).

General solutions for equation (1) can be written for a symmetric four-pole in x coordinate system and in A-parameters. We consider the voltage U_{n+1} and current I_1 at HLC input ($x=l$) as given. Then the equation of the four-pole for the entire circuit can be written as follows:

$$\begin{aligned} U_2 &= U_1 \cdot \text{ch} \Gamma N - I_0 \cdot R_c \cdot \text{sh} \Gamma N; \\ I_2 &= -U_1 \cdot \frac{\text{sh} \Gamma N}{R_c} + I_1 \cdot \text{ch} \Gamma N. \end{aligned} \quad (2)$$

The equations (2) correspond to the equations of symmetrical four-poles in A-parameters, if adopted:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \text{ch} \Gamma N; A_{12} = R_c \cdot \text{sh} \Gamma N; \\ A_{21} &= \frac{\text{sh} \Gamma N}{R_c}; A_{22} = \text{ch} \Gamma N. \end{aligned}$$

For one link HLC can be recorded

$$\frac{U_{n+1}}{U_n} = e^\Gamma; \quad \frac{I_{n+1}}{I_n} = e^\Gamma,$$

Whence $\Gamma = \ln \left(\frac{U_{n+1}}{U_n} \right) = \ln \left(\frac{I_{n+1}}{I_n} \right)$ – transfer constant (weakening) of the link (in long lines it is the analogue of $\gamma \cdot l$), herewith

U_{n+1}, I_{n+1} – voltage and current at the input of $n+1$ -th link; U_n, I_n – voltage and current at the input of n -th link; $R_c = \sqrt{\frac{R_0}{Y_0}}$ – characteristic resistance of the line.

Permanent transfer of the entire HLC is characterized by the ratio of voltages at the beginning and at the end of the HLC:

$$\Gamma_c = \ln \left[\left(\frac{U_1}{U_{1.2}} \right) \left(\frac{U_{1.2}}{U_{2.3}} \right) \dots \left(\frac{U_{n-1}}{U_n} \right) \right],$$

where U_n, U_{n+1} – voltage at the input of the link N , counting from end to start; U_{n+1}, U_{n+2} – voltage at the input of the link $n+1$, counting from end to start.

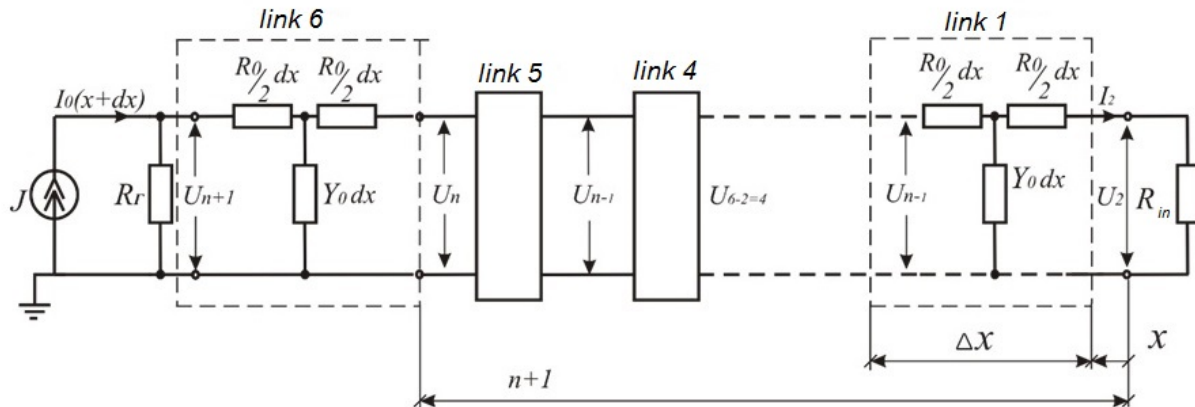


Fig. 1. Homogeneous circuit «rail-earth» with T-links

Consequently, the transfer constant $\Gamma_c = \Gamma \cdot N$. The calculated parameters of the T-shaped circuit «rail-earth» of the HLC-1 track are R_0 and Y_0 . The resistance of the rail loop to direct current is 0.1 Ohm/km (with copper rail bonds or steel duplicated ones) then the resistance of one rail is 0.05 Ohm/km. Herewith, the resistance of the rail of the (butting) link track consists of two components. As the practice of operation shows, both of these components are random variables and depend on a number of random factors such as ambient temperature, specific resistance of the steel, bond resistance, which depends on the quality of weld, the number of torn wire ropes, etc. The calculations adopt the regulatory values of the parameter R_0 . The rail insulation conductivity Y_0 is also a parameter that depends on many random factors: ballast material (crushed stone, sand), type of sleepers and term of their operation, humidity and ambient temperature, foreign impurities clogging the ballast section (mineral salts, coal, etc.). The operation experience shows that Y_0 can vary from 10 to 0.02 Cm · km.

When connecting any types of grounding devices to the rails in double rail track circuits, in order to prevent the shunting of the latter, all grounding devices must be connected to one rail line [12]. In the case of connection of grounding devices to the rail with two conductors, the distance between their connections should be minimal and should not exceed 200 mm. The last requirement is determined by the fact that the continuity fault of the rail line between the conductor connection points is not controlled. The connection of

grounding devices to one rail line of double rail circuits creates a transverse asymmetry of the rail line [13]. Parameters for calculating HLC-2 (of the second rail) are selected taking into account the ground of the contact line supports (3). Conductivity and resistance of general rail ground:

$$\begin{aligned} G_{02} &= Y_0 + Y_{sp}, \\ R_{32} &= \frac{R_i \cdot R_{sp}}{R_i + R_{sp}} \end{aligned} \quad (3)$$

where Y_{sp} , R_{sp} – conductivity and resistance of the support ground.

At the same time, the conductivity Y_0 during the year to a lesser extent depends on the temperature, since the depth of landing in the soil is more than 3 m. In the summer, the conductivity of the supports can reach 0.3–0.4 cm, due to unsatisfactory maintenance of the spark gaps IPM-62. Also, the analysis of operating experience and calculations shows that the most unfavourable period of the rail line operation is winter, because then the potentials and currents can reach the highest value.

Consequently, according to the proposed method, each rail is considered separately as an HLC consisting of a certain number of T-shaped four-poles. Output parameters of one of the HLC are selected taking into account the grounding of the contact line supports. The use of the given methodology resulted in writing the program in Maple programming environment [14, 15], which allows to obtain the diagrams of the propagation of currents and potentials along the rails.

Calculations are made for each of the rails separately by the four-pole method. The output poten-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

tial of one four-pole will be input for the next four-pole. While the greater the number of four-poles, the greater the accuracy of the data received.

The number of four-poles is given in the output data. The received curves of the propagation of currents and potentials along each of the rails give an opportunity to evaluate the asymmetry currents in the rails.

Findings

As can be seen from the obtained dependencies (Fig. 2, *a, b*), the potential levels for each of the rails will be different. Their difference will fall near the IBs, which align the potentials on the rails. It should be noted that the potential difference ($\Delta\varphi$) in the middle of the section between the IB connection and the train will be maximal [16].

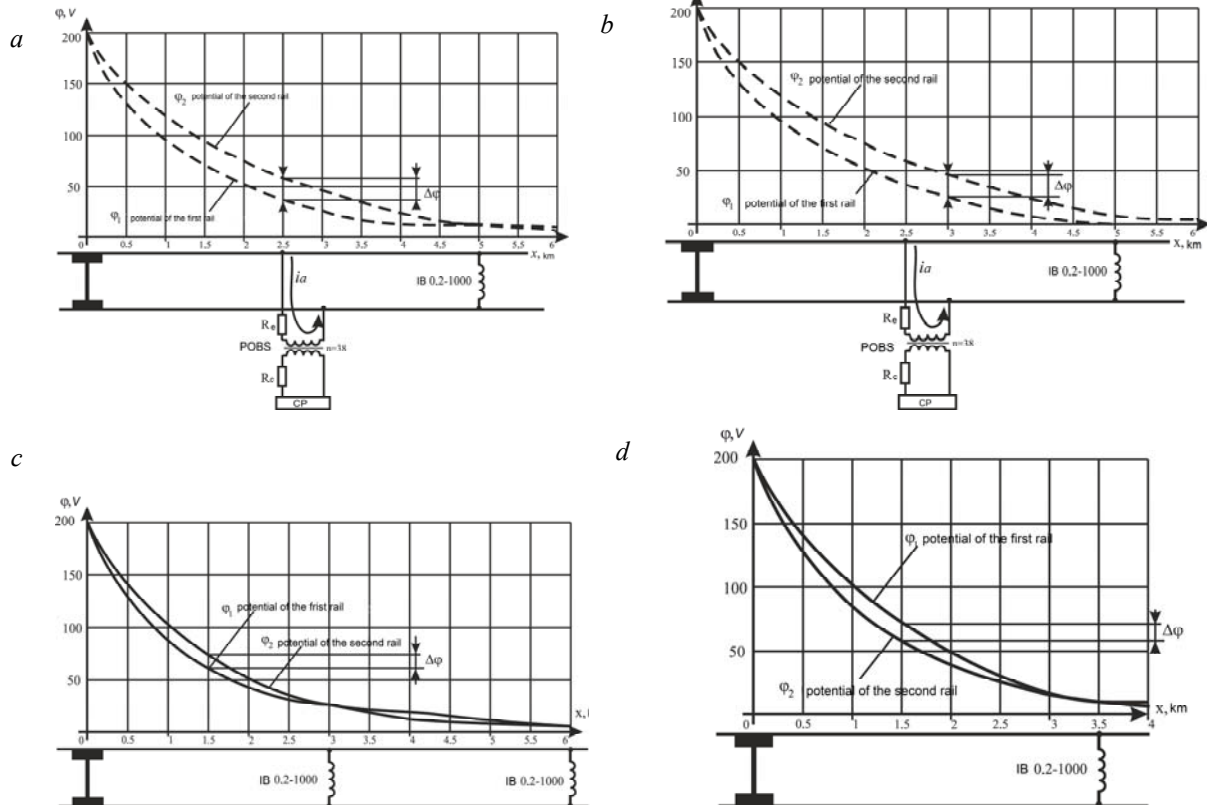


Fig. 2. Potentials railwise propagation with IB:
a – installed every 5 km; *b* – installed every 6 km;
c – installed every 3 km; *d* – installed every 3,5 km

For example, in Figure 2, *a*, which shows the potentials railwise propagation with IB installed every 5 km $\Delta\varphi = 34$ V. This indicator is quite high, since it will have a negative impact on the operation of RC equipment. When installing IB every 6 km (Fig. 2, *b*) $\Delta\varphi$ will be 37 V.

In order to reduce the potential difference, it was proposed to set equalizing IB with a smaller interval. Figures 2, *c, d* present the curves of potentials railwise propagation when IB installed every 3 km and 3.5 km, which show that at a distance of 1.5 km $\Delta\varphi$ will be maximum and will equal 14 V. This indicator is completely satisfactory for the

operation of railway automation devices [17].

Figure 3 shows the dependence of the potential difference from the IB installation interval. Curve 1 shows the change in the potential difference with IB installed every 5 km, curve 2 – with IB installed every 3 km. This graph confirms the expediency of the proposed reduction in the IB installation interval, because the maximum values $\Delta\varphi$ between the two curves vary significantly.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

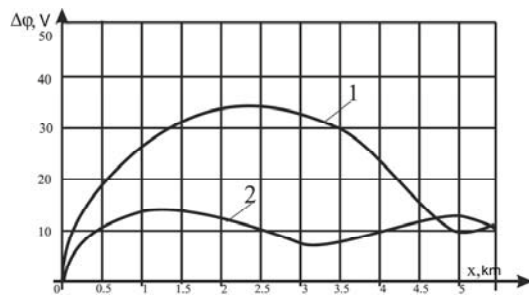


Fig. 3. Dependence of the potential difference from the IB installation interval

Originality and practical value

The proposed method for calculating the propagation of potentials and currents in the rail network of DC traction line is characterized by the representation of the common ladder circuit of each rail as four-poles, taking into account the grounding of the contact-line supports on the nearer rail. It has allowed estimating the levels of asymmetry currents that branch into the RC equipment. The obtained results can be used in designing and re-equipping the running lines with new railway automatics and supervisory systems (RAS), as well as for evaluating the influence of

high asymmetry currents on RAS systems operation.

Conclusions

The study of impact of high levels of traction currents on the equipment of AB systems was carried out. The method for calculating the propagation of potentials and currents along the rails for the railway sections with DC electric traction was improved. It consists in the study of propagation of φ of each individual rail, which is represented as HLC «rail-earth» and presented as a series of T-shaped four-poles connected in cascade, taking into account the grounding of the contact-line supports on the end rail.

The proposed method allowed carrying out the potentials railwise propagation study with IB installed every 6 and 5 km (Fig. 2, a, b). The potential difference was too large for uninterrupted functioning of RAS equipment. Therefore, it was proposed to shorten the IB installation interval to 3 and 3.5 km [18]. As shown in the received diagrams and in the resulting comparative graph in Figure 3, the proposed solution is appropriate.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – Москва : Транспорт, 1990. – 295 с.
2. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники / Г. И. Атабеков. – Москва : Энергия, 1978. – 591 с.
3. Гаврилюк, В. И. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи / В. И. Гаврилюк, В. И. Щека, В. В. Мелешко // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 7–15. doi: 10.15802/stp2015/55352.
4. Дыдышко, П. И. Земляное полотно железнодорожного пути : справочник / П. И. Дыдышко. – Москва : Интекст, 2014. – 416 с.
5. Дьяконов, В. П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах / В. П. Дьяконов. – Москва : ДМК Пресс, 2014. – 800 с.
6. Каганов, З. Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы / З. Г. Каганов. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 247 с.
7. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / К. Г. Марквардт. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с.
8. Разгонов, А. П. Дослідження роботи рейкових кіл та системи автоблокування на перевальних ділянках з крутим профілем / А. П. Разгонов, К. І. Яшук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 37. – С. 186–190.
9. Разгонов, А. П. Оцінка впливу асиметрії тягового струму на роботу перегінних рейкових кіл / А. П. Разгонов, К. І. Яшук // Безпека та електромагнітна сумісність на заліз. трансп. (S&EMC) : тези VII Міжнар. наук.-практ. конф. / Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2016. – С. 60.
10. Разгонов, А. П. Профилактическое обслуживание рельсовых цепей / А. П. Разгонов. – Москва : Транспорт, 1980. – 324 с.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

11. Щека, В. І. Дослідження впливу зворотного тягового струму на режими роботи тональних рейкових кіл / В. І. Щека, І. О. Романцев, К. І. Ящук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 24–28.
12. Щека, В. І. Дослідження механізмів впливу контактної мережі на рейкові кола / В. І. Щека // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 3 (57). – С. 27–35. doi: 10.15802/stp2015/46036.
13. Budnik, K. Potential of the electric flow field produced in the earth by stray currents from D.C. traction of complex geometry / K. Budnik, W. Machczyński, J. Szymenderski // Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering. – 2016. – No. 85. – P. 29–40.
14. Gander, W. Scientific Computing: An Introduction using Maple and MATLAB / W. Gander, M. J. Gander, F. Kwok. – Berlin : Springer-Verlag, 2014. – 905 p.
15. Lucca, G. Estimating stray currents interference from DC traction lines on buried pipelines by means a Monte Carlo algorithm / G. Lucca // Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 97. – Iss. 4. – P. 277–286. doi:10.1007/s00202-015-0333-6.
16. Mariscotti, A. Distribution of the traction return current in AC and DC electric railway systems / A. Mariscotti // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – Vol. 18. – Iss. 4. – P. 1422–1432. doi: 10.1109/tpwrd.2003.817786.
17. Modelling of earthing and return current systems of electric railways / A. Zynovchenko, G. George, S. Körner, A. Stephan // Elektrische Bahnen. – 2014. – No. Spec. 1. – P. 132–136.
18. Verbert, K. Fault diagnosis using spatial and temporal information with application to railway track circuits / K. Verbert, B. De Schutter, R. Babuška // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2016. – Vol. 56. – P. 200–211. doi: 10.1016/j.engappai.2016.08.016.

К. І. ЯЩУК^{1*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 647 54 89, ел. пошта k.i.yaschuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-8606-5790

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛІВ УЗДОВЖ РЕЙОК

Мета. У науковій роботі передбачається проведення дослідження розповсюдження потенціалів та струмів уздовж рейок із метою оцінки різниці потенціалів і струму асиметрії у рейках, які можуть здійснювати вплив на роботу систем залізничної автоматики та телемеханіки. **Методика.** Для досягнення поставленої мети застосовані методи аналізу та синтезу електротехнічних розрахунків схем рейкових кіл, математичного моделювання, методи однорідних та неоднорідних ланцюгових схем. **Результати.** Проведені теоретичні дослідження свідчать про те, що на гірських ділянках залізниць з електричною тягою постійного струму протікають струми дуже високих рівнів, за яких навіть при номінальному коефіцієнті асиметрії струм асиметрії буде недопустимо великим. У результаті переобладнання перегону системою автоблокування з тональними рейковими колами скоротилася кількість дросель-трансформаторів, вирівнюючи функції яких потребували подальшого досконалого дослідження. Були отримані епюри розповсюдження потенціалів уздовж рейок при встановленні вирівнюючих дросель-трансформаторів кожні 6 та 5 км. Отримані різниці потенціалів виявилися зависокими для роботи систем залізничної автоматики, тому було проведено дослідження розповсюдження потенціалів при інтервалі розташування дросель-трансформаторів кожні 3 та 3,5 км, що значно покращило умови роботи рейкових кіл. **Наукова новизна.** Запропонований метод розрахунку розповсюдження потенціалів та струмів у рейковій мережі перегону електричної тяги постійного струму відрізняється представленням загальної цепної схеми кожної рейки у вигляді послідовно з'єднаних в каскад Т-подібних чотириполюсників із урахуванням заземлення опор контактної мережі на ближню рейку. Це дозволило оцінити рівні струмів асиметрії, які відгалужуються в апаратуру рейкових кіл та здійснюють негативний вплив на їх роботу. **Практична значимість.** Отримані результати можуть використовуватися при проектуванні та переобладнанні перегонів новими системами залізничної автоматики та телемеханіки, а також для оцінки впливу високих струмів асиметрії на роботу систем залізничної автоматики.

Ключові слова: тягові струми; рейкові кола; дросель-трансформатор; струм асиметрії; розповсюдження потенціалів

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Е. И. ЯЩУК^{1*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (066) 647 54 89, эл. почта k.i.yaschuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-8606-5790

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ ВДОЛЬ РЕЛЬСОВ

Цель. В научной работе предполагается проведение исследования распространения потенциалов и токов вдоль рельсов с целью оценки разности потенциалов и тока асимметрии в рельсах, которые могут оказывать влияние на работу систем железнодорожной автоматики и телемеханики. **Методика.** Для достижения поставленной цели применены методы анализа и синтеза электротехнических расчетов схем рельсовых цепей, математического моделирования, методы однородных и неоднородных цепных схем. **Результаты.** Проведенные теоретические исследования свидетельствуют о том, что на горных участках железных дорог с электрической тягой постоянного тока протекают токи очень высоких уровней, при которых даже при номинальном коэффициенте асимметрии ток асимметрии будет недопустимо большим. В результате переоборудования перегона системой автоблокировки с тональными рельсовыми цепями сократилось количество дроссель-трансформаторов, выравнивающие функции которых требовали дальнейшего досконального исследования. Были получены эпюры распространения потенциалов вдоль рельсов при установке уравнивающих дроссель-трансформаторов каждые 6 и 5 км. Полученные разности потенциалов оказались слишком высокими для работы систем железнодорожной автоматики, поэтому было проведено исследование распространения потенциалов при интервале расположения дроссель-трансформаторов каждые 3 и 3,5 км, что значительно улучшило условия работы рельсовых цепей. **Научная новизна.** Предложенный метод расчета распространения потенциалов и токов в рельсовой сети перегона электрической тяги постоянного тока отличается представлением общей цепной схемы каждого рельса в виде последовательно соединенных в каскад Т-образных четырехполюсников с учетом заземления опор контактной сети на ближний рельс. Это позволило оценить уровни токов асимметрии, которые ответвляются в аппаратуру рельсовых цепей и оказывают негативное влияние на их работу. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут использоваться при проектировании и переоборудовании перегонов новыми системами железнодорожной автоматики и телемеханики, а также для оценки влияния высоких токов асимметрии на работу систем железнодорожной автоматики.

Ключевые слова: тяговые токи; рельсовые цепи; дроссель-трансформатор; ток асимметрии; распространение потенциалов

REFERENCES

1. Arkatov, V. S., Kravtsov, Y. A., & Stepenskiy, B. M. (1990). *Relsovyye tsepi. Analiz raboty i tekhnicheskoye obsluzhivaniye*. Moscow: Transport.
2. Atabekov, G. I. (1978). *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki*. Moscow: Energiya.
3. Havrilyuk, V. I., Shcheka, V. I., & Meleshko, V. V. (2015). Testing new types of rolling stock for electromagnetic compatibility with signaling and communication devices. *Science and Transport Progress*, 5 (59), 7-15. doi:10.15802/stp2015/55352
4. Dydyshko, P. I. (2014). *Zemlyanoye polотно zheleznodorozhnogo puti* [Manual]. Moscow: Intekst.
5. Dyakonov, V. P. (2014). *Maple 10/11/12/13/14 v matematicheskikh raschetakh*. Moscow: DMK Press.
6. Kaganov, Z. G. (1990). *Elektricheskiye tsepi s raspredelemnymi parametrami i tsepnyye skhemy*. Moscow: Energoatomizdat.
7. Markvardt, K. G. (1982). *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog* [Guide]. Moscow: Transport.
8. Razgonov, A. P., & Yaschuk, K. I. (2011). Analysis of track circuits work and automatic signaling on pass section with steep gradient. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 37, 186-190.
9. Razgonov, A. P., & Yaschuk, K. I. (2016). Otsinka vplyvu asymetrii tiahovoho strumu na robotu perehinnykh reikovykh kil. *Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference «Safety and Electromagnetic Compatibility on Railway Transport» (S&EMC)*, Rozluch, February 16-19, 2016. 60-61. Dnipro: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

10. Razgonov, A. P. (1980). *Profilakticheskoye obsluzhivaniye relsovykh tsepey*. Moscow: Transport.
11. Scheka, V. I., Romancev, I. O., & Jaschuk, E. I. (2012). The investigation of reverse traction current influence on tone track circuit modes. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 42, 24-28.
12. Shcheka, V. I. (2015). Impact mechanisms research in the contact network on rail track circuits. *Science and Transport Progress*, 3 (57), 27-35. doi:10.15802/stp2015/46036
13. Budnik, K., Machczyński, W., & Szymenderski, J. (2016). Potential of the electric flow field produced in the earth by stray currents from D.C. traction of complex geometry. *Poznan University of Technology Academic Journals Electrical Engineering*, 85, 29-40.
14. Gander, W., Gander, M. J., & Kwok, F. (2014). *Scientific Computing: An Introduction using Maple and MATLAB*. Berlin: Springer-Verlag.
15. Lucca, G. (2015). Estimating stray currents interference from DC traction lines on buried pipelines by means a Monte Carlo algorithm. *Electrical Engineering*, 97 (4), 277-286. doi:10.1007/s00202-015-0333-6
16. Mariscotti, A. (2003). Distribution of the traction return current in AC and DC electric railway systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18 (4), 1422-1432. doi:10.1109/tpwrd.2003.817786
17. Zynovchenko, A., George, G., Körner, S., & Stephan, A. (2014). Modelling of earthing and return current systems of electric railways. *Elektrische Bahnen, Special I*, 132-136.
18. Verbert, K., De Schutter, B., & Babuška, R. (2016). Fault diagnosis using spatial and temporal information with application to railway track circuits. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 56, 200-211. doi:10.1016/j.engappai.2016.08.016

Prof. A. P. Razghonov, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. O. I. Stasiuk, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published

Received: April 22, 2017

Accessed: July 20, 2017

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

UDC 502.3:504.5

L. V. AMELINA¹, M. M. BILIAIEV², P. B. MASHYKHINA³

¹Dep. «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 water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-8525-7096

²Dep. «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 water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

³Dep. «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 water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-3057-9204

REDUCING AMMONIA CONCENTRATIONS IN ATMOSPHERE AFTER ITS UNPLANNED RELEASE

Purpose. The aim of this work is development of numerical model, which allows to calculate the efficiency of neutralizer supply for reduction of air pollution in case of unplanned ammonia emission at the territory of ammonia pump station. The numerical model should allow fast calculating, taking into account the meteorological parameters and buildings situated near the source of toxic chemical emission and equipment for neutralizer supply.

Methodology. The developed model is based on the equation for potential flow and equation of pollutant dispersion. To simulate the chemical interaction between ammonia and neutralizer the stoichiometry equation is used. Equation of potential flow is used to compute flow pattern among buildings. To solve the equation for potential flow the Samarskii implicit difference scheme is used. The implicit change-triangle difference scheme is used to solve equation of mass transfer. While for the numerical integration the authors use the rectangular difference grid. Method of porosity technique («markers method») is applied to create the form of comprehensive computational region. Emission of ammonia is modeled using Delta function for point source. **Findings.** Developed numerical model belongs to the class of «diagnostic models». This model takes into account the main physical factors affecting the process of dispersion of ammonia and neutralizer in the atmosphere, as well as the influence of buildings on admixture dispersion. On the basis of the developed numerical models the authors carried out a computational experiment to estimate the efficiency of neutralizer supply for reduction of air pollution in case of unplanned ammonia release at ammonia pump station. **Originality.** Developed numerical model allows calculating the flow pattern among buildings and estimating the efficiency of neutralizer supply for reduction of air pollution in the case unplanned ammonia release. **Practical value.** Model allows performing fast calculations of the atmosphere pollution in the case of unplanned ammonia release

Keywords: air pollution; unplanned release; neutralizer supply; numerical modeling

Introduction

Unplanned ammonia release as a result of accident or terror act can cause harm for persons and intensive environment pollution [4, 6, 10, 12]. From the point view of industrial safety, in case of possible unplanned ammonia release we must solve two important problems. The first problem is prediction of possible contamination zones (their dimensions, intensity and development in time).

To solve the problem of air contamination in case of unplanned toxic chemicals release Gaussian plume model or some analytical models are widely used [2, 3, 10–13, 15]. These models allow quickly calculating zones of chemical contamination. These models are implemented in some codes, for example, ALOHA, CULLPUFF, etc.

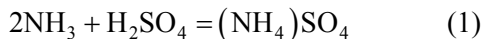
The second problem of unplanned ammonia release is protection environment from pollution and reducing negative influence of toxic chemical

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

after NH_3 emission. In this work we study the problem of neutralizer supply in to ammonia plume to reduce the intensity and dimensions of contamination zones.

Problem statement

We consider the unplanned ammonia release at ammonia pump station which is situated at ammonia pipeline Toliatti-Odessa. To reduce the negative effect on environment in this case we propose to supply neutralizer (NL) to the plume of toxic chemical. As the neutralizer the acid solution can be used. If, for example, we use H_2SO_4 solution, the process of chemical interaction «ammonia + neutralizer» can be described as follows



Application of neutralizer will cause NH_3 reduction in atmosphere. To supply NL into the plume of toxic chemical the special equipment will be used (Fig. 1).

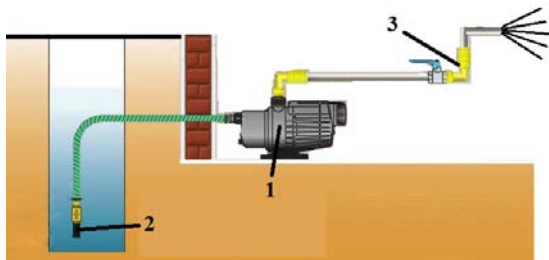


Fig. 1. Equipment for neutralizer supply:
1 – pump; 2 – vessel containing neutralizer;
3 – rotatable nozzle

But in case of NL supply we face some problems: what amount of neutralizer must be supplied, what will be the effect of the neutralization for different meteorological conditions, etc. To answer these questions and develop the effective strategy of neutralization we can't use physical experiment but only the mathematical one.

Purpose

The purpose of this paper is to develop a mathematical model for quick computing the process of chemical interaction «ammonia + neutralizer» in case of unplanned ammonia release at ammonia pump station.

Mathematical formulation

To simulate the ammonia and acid dispersion in atmosphere 2D transport model is used [5, 7]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (2)$$

where C is mean concentration of admixture (ammonia and H_2SO_4); u, v are the wind velocity components; σ is the parameter taking into account the process of pollutant washout and gravity fallout [5];

$\mu = (\mu_x, \mu_y)$ are the diffusion coefficients; Q is intensity of point source emission; $\delta(r - r_i)$ are Dirac delta function; $r_X = (x_i, y_i)$ are the coordinates of the point source.

We consider ammonia and NL dispersion among buildings it means that we must take into account influence of these obstacles on process of NH_3 and NL dispersion. To simulate the flow pattern in the case of the buildings at the territory of Pump Station the 2D model of potential flow is used [7]

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

where P is the potential of velocity.

The wind velocity components are calculated as follows:

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

Boundary conditions for modeling equations are discussed in [5, 7].

Numerical model

The computation of wind pattern and pollutant dispersion is carried out on rectangular grid. To create the form of buildings we use porosity technique or so called «markers method» [1, 7]. Markers are used to separate the computational cells where flow takes place from the cells which correspond to buildings. Description of the finite difference schemes, used by us, is discussed in [1,

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

7]. To solve equation (2) we used change–triangle difference scheme, while A. A. Samarskii's and implicit difference scheme was used for numerical integration of Eq. (3).

For coding of difference formulae, we used FORTRAN language.

Findings

Computational region is shown in Fig. 2 In this figure one can see position of unplanned ammonia release and position of NL supply equipment. It was supposed that ammonia release takes place at time $t=0$ and at time $t=15$ sec neutralizer supply starts.

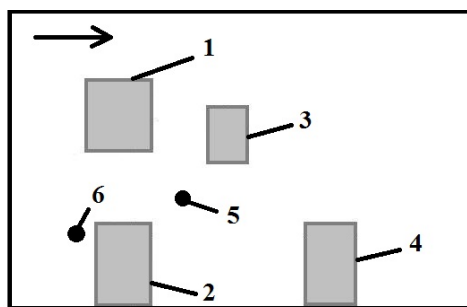


Fig. 2. Sketch of computational region (ammonia pump station):

1, 2, 3, 4 – buildings; 5 – position of neutralizer supply;
6 – position of ammonia release at the territory of pump station

Contaminated zone in case of neutralizer supply absence is shown in Fig. 3. We can see that contaminated zone covers all the territory of ammonia pump station.

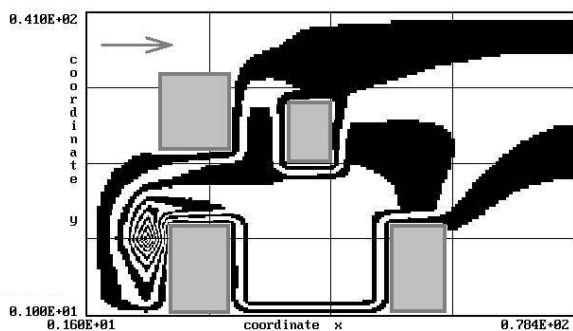


Fig. 3. Computed ammonia concentration, $t=35$ s (no neutralizer supply)

In Fig. 4 the contaminated zone in the case of neutralizer supply is shown.

As we can see from Fig. 4 neutralizer supply allows quickly reducing dimensions of contamination zone in atmosphere.

Worthy of note that computational time was 6 sec. It allows using the model for development of protection measures at chemically dangerous enterprises.

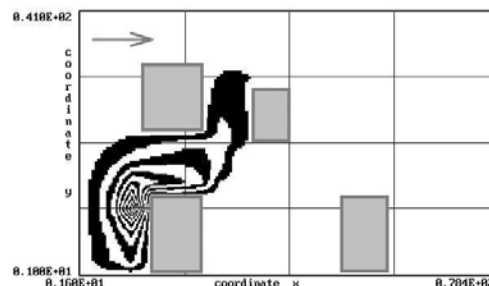


Fig. 4. Computed ammonia concentration, $t=28$ s (neutralizer supply)

Originality and practical value

Mathematical model has been developed to compute dispersion and chemical interaction between ammonia and neutralizer which is used to reduce ammonia concentration in atmosphere. The presented mathematical model is based on the application of the fundamental equations of aerodynamics and mass transfer.

The peculiarity of the developed model is the use of standard meteorological information and quick calculation of modeling process in comprehensive computational region.

Conclusions

Numerical model for estimating the efficiency of neutralizer supply to ammonia plume is proposed. Proposed numerical model allows to compute ammonia concentrations and neutralizer concentrations and chemical interaction between substances. The solution of the aerodynamic problem is based on the numerical integration of the equation for the velocity potential. The equation of mass transfer is used to calculate dispersion of ammonia and neutralizer dispersion in atmosphere. The mass transfer equation takes into account the convective and diffusive transport of admixture in atmosphere with account of buildings situated near the source of emission. Emission of ammonia and neutralizer is simulated by a point

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

source, which is modeled using the Dirac delta function.

Further improvement of the model should be carried out in the direction of creating a 3D nu-

merical model that takes into account the formation of vortices in the air flow.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беляев, Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы: монография / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 127 с.
2. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
3. Бруцкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруцкий. – Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
4. Заказнов, В. Ф. Распространение аммиака при разгерметизации аммиакопровода, емкостей / В. Ф. Заказнов, Л. А. Куршева // Исследования и разработки по созданию магистральных аммиакопроводов и складов жидкого аммиака : тр. ГИАП. – Москва, 1985. – С. 57.
5. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
6. Цыкало, А. Л. Испарение и рассеивание аммиака при его разливах и утечках. Серия: Азотная промышленность / А. Л. Цыкало, И. И. Стрижевский, А. Д. Баглет. – Москва : НИИТЭХИМ, 1982. – 48 с.
7. 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.
8. Biliaiev, M. M. Numeric Simulation of Air Pollution in Case of Unplanned Ammonia Release / M. M. Biliaiev, L. V. Amelina // Science and Transport Progress. – 2017. – Vol. 3 (96). – P. 7–14. doi: 10.15802/stp2017/104142.
9. Biliaiev, M. M. Numerical simulation of the atmosphere pollution after accident at the “Tolliaty-Odessa” ammonia pipe / M. M. Biliaiev, L. V. Amelina, M. M. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental security. – 2013. – P. 391–395. doi: 10.1007/978-94-007-5577-2_66.
10. Daly, A. Accident reconstruction and plume modeling of an unplanned ammonia release / A. Daly, P. Zanetti, M. Jennings // Air Pollution XX. WIT Transactions on Ecology and The Environment. – 2013. – Vol. 174. – P. 3–13. doi: 10.2495/AIR130011.
11. Dispersion Modeling of Hydrogen Sulfide at Cimarex Rands Butte Project Using ALOHA / Bureau of Land Management Pinedale Field Office, SWCA Environmental Consultants. – Wyoming, 2010. – 26 p.
12. Janos, T. Atmospheric spreading model for ammonia released from the poultry house [Electronic resource] / T. Janos. E. Gorliczay, J. Borbely // Ecotoxicologie, Zootechnie si Tehnologii de Industrie Alimentara. – 2016. – Vol. XV/B. – P. 331–337. – Available at: http://protmed.uoradea.ro/facultate/publicatii/ecotox_zootech_ind_alim/2016B/ipa/17%20Tamas_Janos.pdf. – Title from the screen. – Accessed : 30.05.2017.
13. Mellsen, S. B. A Fortran program for calculating chemical hazards using the NATO stanag 2103/ATP-45 algorithm [Electronic resource] / S. B. Mellsen // Suffield memorandum No. 1275. – Alberta : Defence Research Establishment Suffield, 1989. – 34 p. – Available at: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA214763>. – Title from the screen. – Accessed : 30.05.2017.
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes [Electronic resource] / O. Zavila, P. Dobeš, J. Dlabka, J. Bitta // Bezpecnostni vyzkum. The science for population protection. – 2015. – No. 2. – P. 1–9. – Available at: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/30/213.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 30.05.2017.
15. The Pentagon Shield field program: Toward critical infrastructure protection / T. Warner, P. Benda, S. Swerdlin [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2007. – Vol. 88. – Iss. 2. – P. 167–176. doi: 10.1175/BAMS-88-2-167.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Л. В. АМЕЛІНА¹, М. М. БІЛЯЄВ², П. Б. МАШИХІНА³

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 water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-8525-7096

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 water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

³*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 water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-3057-9204

ЗНИЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ АМІАКУ В АТМОСФЕРІ ПРИ ЙОГО РАПТОВІЙ ЕМІСІЇ

Мета. Метою даної роботи є побудова чисельної моделі, що дозволяє розраховувати ефективність застосування нейтралізатора для зниження концентрацій аміаку в атмосфері в разі його раптового викиду на території аміачної насосної станції. Властивостями розробленої моделі повинні бути можливість швидкого розрахунку, врахування метеорологічних параметрів та будівель, що розташовані поблизу джерела викиду аміаку та нейтралізатора. **Методика.** Розроблена модель базується на рівнянні для потенційного потоку та рівнянні дисперсії домішки в атмосфері. Для моделювання хімічної взаємодії аміаку з нейтралізатором використовується рівняння стехіометрії. Рівняння потенційного потоку застосовується для розрахунку швидкості вітру між будівлями. Для вирішення рівняння потенційної течії використовується неявна різницева схема Самарського, а для чисельного рішення рівняння масопереносу – поперемінно-трикутна різницева схема. Чисельне інтегрування здійснюється з використанням прямокутної різницевої сітки. Метод маркування («метод маркерів») вживається для створення вигляду розрахункової області. Емісія аміаку моделюється з використанням дельта функції Дірака для точкового джерела. **Результати.** Розроблена чисельна модель відноситься до класу «діагностичні моделі». Ця модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання аміаку та нейтралізатора, а також вплив будівель на дисперсію домішки. На основі розроблених чисельних моделей було проведено обчислювальний експеримент із оцінки ефективності застосування нейтралізатора для зниження концентрацій аміаку в атмосфері в разі його раптового викиду на аміачні насосні станції. **Наукова новизна.** Розроблена чисельна модель дозволяє розрахувати структуру потоку серед будівель та оцінити ефективність подачі нейтралізатора для зменшення забруднення повітря у разі незапланованого вивільнення аміаку. **Практична значимість.** Модель дозволяє швидко розраховувати ефективність подачі нейтралізатора для зниження негативного впливу емісії аміаку на людей та навколишнє середовище.

Ключові слова: забруднення атмосфери; викид аміаку; нейтралізація; чисельне моделювання

Л. В. АМЕЛИНА¹, Н. Н. БЕЛЯЕВ², П. Б. МАШИХИНА³

¹*Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-8525-7096

²*Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

³*Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-3057-9204

СНИЖЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ АММИАКА В АТМОСФЕРЕ ПРИ ЕГО ВНЕЗАПНОЙ ЭМИССИИ

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Цель. Целью данной работы является построение численной модели, которая позволяет рассчитывать эффективность применения нейтрализатора для снижения концентраций аммиака в атмосфере в случае его внезапного выброса на территории аммиачной насосной станции. Качествами построенной модели должны быть быстрый расчет, учет метеорологических параметров и зданий, что расположены вблизи источника выброса аммиака и нейтрализатора. **Методика.** Разработанная модель основана на уравнении для потенциального потока и уравнении дисперсии примеси в атмосфере. Для моделирования химического взаимодействия между аммиаком и нейтрализатором используется уравнение стехиометрии. Уравнение потенциального потока употребляется для расчета скорости ветра между зданиями. Для решения уравнения потенциального течения применяется неявная разностная схема Самарского. Для численного решения уравнения массопереноса используется попеременно-треугольная разностная схема, а для численного интегрирования – прямоугольная разностная сетка. Метод маркирования («метод маркеров») применяется для создания вида расчетной области. Эмиссия аммиака моделируется с использованием дельта функции Дирака для точечного источника. **Результаты.** Разработанная численная модель относится к классу «диагностические модели». Эта модель учитывает основные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания аммиака и нейтрализатора, а также влияние зданий на дисперсию примеси. На основе разработанных численных моделей был проведен вычислительный эксперимент по оценке эффективности применения нейтрализатора для снижения концентраций аммиака в атмосфере в случае его внезапного выброса на аммиачной насосной станции. **Научная новизна.** Разработанная численная модель позволяет рассчитать структуру потока между зданиями и оценить эффективность подачи нейтрализатора для снижения загрязнения воздуха в случае незапланированного выделения аммиака. **Практическая значимость.** Модель позволяет быстро рассчитывать эффективность подачи нейтрализатора для снижения негативного влияния эмиссии аммиака на людей и окружающую среду.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы; выброс аммиака; нейтрализация; численное моделирование

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Berlov, A. V., & Mashikhina, P. B. (2014). *Modelirovaniye nestatsionarnykh protsessov avaryynogo zagryazneniya atmosfery* [Monograph]. Dnipropetrovsk: Aktsent PP.
2. Berlyand, M. Y. (1985). *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery*. Leningrad: Gidrometeoizdat.
3. Bruyatskiy, Y. V. (2000). *Teoriya atmosfernoy diffuzii radioaktivnykh vybrosov*. Kyiv: Institut gidromekhaniki NAN Ukrainy.
4. Zakaznov, V. F., & Kursheva, L. A. (1985). Rasprostraneniye ammiaka pri razgermetizatsii ammiakoprovoda, emkostey. In *Issledovaniya i razrabotki po sozdaniyu magistralnykh ammiakoprovodov i skladov zhidkogo ammiaka*. Moscow: The State Research and Design Institute of the Nitric Industry and Organic Synthesis Products.
5. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka.
6. Tsykalo, A. L., Strizhevskiy, I. I., & Baglet, A. D. (1982). *Azotnaya promyshlennost: Ispareniye i rasseivaniye ammiaka pri ego razlivakh i utechkakh*. Moscow: NIITEKHIM.
7. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev M. M. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka.
8. Biliaiev, M. M. & Amelina, L.V. (2017). Numeric Simulation of Air Pollution in Case of Unplanned Ammonia Release. *Science and Transport Progress*, 3(96), 7-14. doi:10.15802/stp2017/104142
9. Biliaiev, M. M., Amelina, L.V., & Kharitonov, M. M. (2013). Numerical simulation of the atmosphere pollution after accident at the “Tolliaty-Odessa” ammonia pipe. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, 391-395. doi:10.1007/978-94-007-5577-2_66
10. Daly, A., Zanetti, P., & Jennings, M. (2013). Accident reconstruction and plume modeling of an unplanned ammonia release. *Air Pollution XXI. WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 174, 3-13. doi:10.2495/AIR130011
11. SWCA Environmental Consultants. (2010). *Dispersion Modeling of Hydrogen Sulfide at Cimarex Rands Butte Project Using ALOHA*. Wyoming.
12. Janos, T., Gorliczay, E., & Borbely, J. (2016). Atmospheric spreading model for ammonia released from the poultry house. *Ecotoxicologie, Zootehnie si Tehnologii de Industrie Alimentara, XV/B*, 331-337. Retrieved from http://protmed.uroadea.ro/facultate/publicatii/ecotox_zooteh_ind_alim/2016B/ipa/17%20Tamas_Janos.pdf
13. Mellsen, S. B. (1989). *A Fortran Program for Calculating Chemical Hazards Using the NATO Stanag 2103/ATP-45 Algorithm: Suffield memorandum 1275*. Alberta: Defence Research Establishment Suffield. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA214763>

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

14. Zavila, O., Dobeš, P., Dlabka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *Bezpečnostní výzkum*, 2. Retrieved from <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/30/213.pdf>
15. Warner, T., Benda, P., Swerdlin, S., Kniewel, J., Copeland, J., Crook, A., ..., & Weil, J. (2007). The Pentagon Shield Field Program: Toward Critical Infrastructure Protection. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(2), 167-176. doi:10.1175/BAMS-88-2-167

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

Received: March 31, 2017

Accessed: July 05, 2017

UDC 502.3:504.5:629.33

M. M. BILIAIEV^{1*}, O. S. SLAVINSKA^{2*}, R. V. KYRYCHENKO^{3*}

^{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 water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Dep. «Manufacturing and Property Management», National Transport University of Ukraine, Suvorov St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (044) 280 82 03, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-5163-5645

^{3*}Dep. «Manufacturing and Property Management», National Transport University of Ukraine, Suvorov St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (044) 280 82 03, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9918-3895

NUMERICAL SIMULATION OF POLLUTION DISPERSION IN URBAN STREET

Purpose. The scientific paper solves the question of 2D numerical model development, which allows quick computation of air pollution in streets from vehicles. The aim of the work is numerical model development that would enable to predict the level of air pollution by using protective barriers along the road. **Methodology.** The developed model is based on the equation of inviscid flow and equation of pollutant transfer. Potential equation is used to compute velocity field of air flow near road in the case of protection barriers application. To solve equation for potential flow implicit difference scheme of «conditional approximation» is used. The implicit change – triangle difference scheme is used to solve equation of convective – diffusive dispersion. Numerical integration is carried out using the rectangular difference grid. Method of porosity technique («markers method») is used to create the form of comprehensive computational region. Emission of toxic gases from vehicle is modeled using Delta function for point source. **Findings.** Authors developed 2D numerical model. It takes into account the main physical factors affecting the process of dispersion of pollutants in the atmosphere when emissions of vehicle including protection barriers near the road. On the basis of the developed numerical models a computational experiment was performed to estimate the level of air pollution in the street. **Originality.** A numerical model has been created. It makes it possible to calculate 2D aerodynamics of the wind flow in the presence of noises and the process of mass transfer of toxic gas emissions from the motorway. The model allows taking into account the presence of the car on the road, the form of a protective barrier, the presence of a curb. Calculations have been performed to determine the contamination zone formed at the protective barrier that is located at the motorway. **Practical value.** An effective numerical model that can be applied in the development of environmental protection measures for the operation of road transport in the city is considered. The developed model allows estimating sizes, the form and intensity of a zone of pollution at a motorway.

Keywords: air pollution; urban streets; pollution dispersion; numerical simulation

Introduction

Pollution from vehicles in urban streets is very intensive and can cause harm to humans. For this purpose, it is necessary to predict the level of pollution in streets. Physical modeling, in this case, is very expensive [8]. For quick prediction empirical models are used [1]. These models are convenient in practice, especially when we must run many «pilot» calculations. But these models do not take into account some important properties of pollutant dispersion process in streets. The main problem is that the process of air pollution in streets takes part in the region having comprehensive geometrical form (presence of buildings, different obstacles, etc). The alternative way is the numerical simulation of this process. Many authors

apply CFD simulation to solve the problem [1, 3, 6, 8–10]. As a rule, to obtain flow pattern in streets foreign authors use Navier – Stokes equations (this is the model of viscous fluid) coupled with turbulent models. Very often commercial codes are used for this purpose. Worthy of note, that application of Navier – Stokes equations needs application of very fine computational grid during the computational experiment to simulate in detail the process of vortexes formation and their dispersion and interaction in the region. Using the model of viscous fluid, we must use very fine grid inside the boundary layers. This is a real problem if we have big dimensions of the buildings, obstacles in streets. So, in case of Navier – Stokes equations application it is necessary to use powerful PC and every computational experiment consumes much

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

time. This is not convenient when we must run a lot of practical calculations considering different scenario of air pollution in streets and, especially, when we try to find the effective protection measures because in this case we must consider many alternative variants of protection. In this case it would be better to split the study in two steps. At the first step we may find the «satisfying» variant using numerical model which does not consume much time and not take into account some physical features of the process. After that, at the second step, we may use more powerful model to compute in detail the variant of protection which has been chosen. So, for quick calculations at the first step it is important to have CFD models which consume not much computational time but they allow to take into account such important features as obstacles, emission rate, etc.

Purpose

The purpose of this paper is development a numerical model for quick computing of the local air quality near roads.

Aerodynamic equation

To simulate the wind pattern near the road we use model of potential flow. In this case the governing equation is [5]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

where P is the potential of speed.

The wind velocity components are calculated as follows:

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

Boundary conditions equation (1) are discussed in [1]. To perform numerical integration of this equation rectangular grid was used.

To solve equation of potential flow (1) we used the difference scheme of «conditional approximation». In this case, first of all, we transformed Eq. 1 to equation having «evolution type» [5]

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

where η is «fictitious» time.

For $\eta \rightarrow \infty$ the solution of equation (2) tends to the solution of equation (1).

After approximation of Eq. 2, we split it in the sequence of two difference equations having implicit form [5]

$$\begin{aligned} \frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} &= \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right], \\ \frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} &= \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Unknown value of $P_{i,j}$ can be easily determined from each difference equation (3) using explicit formulae of «running calculation». As the «initial» condition for Eq. 2 we may use, for example, $P=0$ for $\eta=0$.

Pollutant Transport Equation

To simulate the pollutant dispersion near road equation of convective – diffusive transfer is used [1, 4, 7]

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

where C is mean concentration

$$C(x, y) = \frac{1}{W} \int_0^W C(x, y, z) dz.$$

W is width of the computational region; u, v are the wind velocity components; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ are the diffusion coefficients; Q_i is rate of emission; $\delta(x - x_i), \delta(y - y_i)$ – are Dirac delta function; t is time.

Initial and boundary conditions for Eq. 4 are described in [1, 4].

Before solving Eq. (2) we made it's physical splitting into the sequence of three equations. These are the following equations:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum Q_i(t) \delta(r - r_i),$$

where $\delta(r - r_i)$ is Dirac delta function;
 $r_i = (x_i, y_i)$ are the coordinates of the point source.

The first equation in (5) describes pollutant transfer along trajectories. The second equation in (5) describes the diffusive dispersion of pollutant. The third equation in (5) describes concentration change under the action of source Q .

To solve the first and the second equations in (5) the implicit change – triangle difference scheme was used [1]. To solve the third equation from (5) Euler method was used [5].

Numerical integration of difference equations is performed using rectangular grid. Values of P , C are determined in the centers of computational cells, values of u , v are determined at the sides of the computational cells. For coding difference equations, we used FORTRAN language.

Findings

Developed numerical model and code were used to compute CO concentrations near road which has barrier at the curb. Numerical simulation was performed for two scenarios. The first one is scenario where barrier has a form of vertical plate (Fig. 1). The second scenario is application of barrier which has additional «short wing» at the top (Fig. 2). «Body» of the vehicle is represented as rectangular. Its form and form of the curb, barrier is represented in numerical model using «markers» (porosity technique). Outlet opening of the vehicle is a passive source of emission. It means that we don't take into account speed of gases which move from it. Arrow indicates the wind direction.

Results of numerical simulations are shown in Fig. 3–5. Fig. 3, 4 represent CO concentration field near road. We can see that application of barrier with «short wing» allows to reduce the width of contaminated zone behind the barrier.

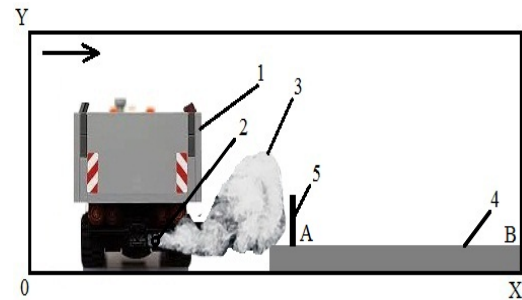


Fig. 1. Sketch of computational region (the first scenario): 1 – vehicle; 2 – source of emission (outlet opening); 3 – plume; 4 – curb; 5 – barrier

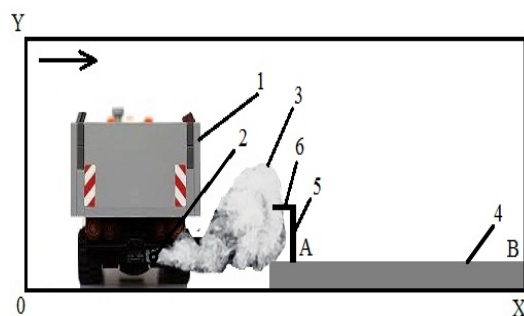


Fig. 2. Sketch of computational region (the second scenario):

1 – vehicle; 2 – source of emission (outlet opening); 3 – plume; 4 – curb; 5 – barrier; 6 – «short wing»

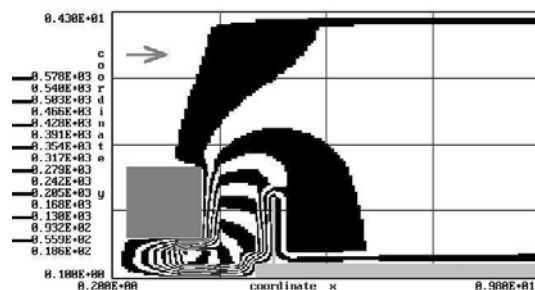


Fig. 3. Computed CO concentration (barrier without «wing»)

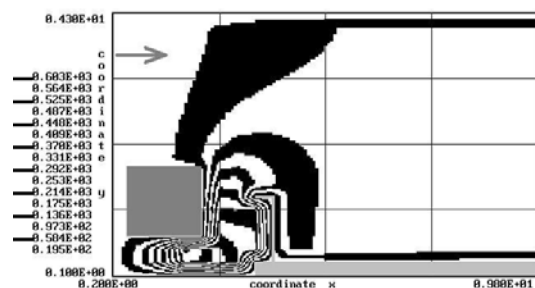


Fig. 4. Computed CO concentration (barrier with «short wing»)

In Table 1 we present computed CO concentration behind barriers at height $h=1,7$ m.

Table 1

Computed CO concentration at height $h=1.7$ m

Distance from barrier	Concentration (scenario: no wing)	Concentration (scenario: short wing)
0.6 m	1.01 mg/m ³	0.94 mg/m ³
1.0 m	0.95 mg/m ³	0.88 mg/m ³
1.4 m	0.89 mg/m ³	0.82 mg/m ³
1.8 m	0.85 mg/m ³	0.78 mg/m ³

As we can see from Table 1 application of barrier having «short wing» allows reduce CO concentrations near the road.

Worthy of note that computational time was about 5 sec. for each scenario. It allows to use the developed numerical model for practical application when series of computational experiments must be run.

Originality and practical value

A model has been developed to compute concentrations near roads. Numerical model is based on application of mass transfer equation and equation of potential flow.

The peculiarity of the developed model is the use quick calculation of contaminated zones and account of geometrical form of vehicle, curb, barriers near the road.

Conclusions

Numerical model for estimating the level of atmospheric air pollution near roads is proposed. Proposed numerical model allows to predict level of pollution with account of geometrical form of vehicle, curb, barriers near the road, intensity of emission rate. The solution of the aerodynamic problem is based on the numerical integration of equation for potential flow. This allows to perform quick calculation of wind pattern near road using PC which are available now in Ukraine. To predict toxic gases concentrations near road convective – diffusive equation is used. Numerical integration of this equation is performed using implicit difference scheme. Using the developed numerical model some numerical experiments were performed to study the influence of barrier form on intensity of local contamination near road.

Further improvement of the model should be carried out in the direction of creating a 3D numerical model.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беляев, Н. Н. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта на улицах городов : монография / Н. Н. Беляев, Т. И. Русакова, П. С. Кириченко. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 159 с.
2. Беляев, Н. Н. Прогноз загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта с учетом химической трансформации вредных веществ / Н. Н. Беляев, Е. С. Славинская, Р. В. Кириченко // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 3 (69). – С. 15–22. doi: 10.15802/stp2017/104549.
3. Беляев, Н. Н. CFD прогнозирование процесса загрязнения воздушной среды на улицах / Н. Н. Беляев, Т. И. Русакова // Екологія і природокористування : зб. наук. пр. Ін-ту проблем природокористування та екології НАН України. – Київ, 2013. – Вип. 17. – С. 188–194.
4. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
5. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
6. A new simplified NO/NO₂ conversion model under consideration of direct NO₂-emissions / I. Düring, W. Bächlin, M. Ketzel, A. Baum, U. Friedrich, S. Wurzel // Meteorologische Zeitschrift. – 2011. – Vol. 20. – Iss. 1. – P. 67–73. doi: 10.1127/0941-2948/2011/0491.
7. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 48–54. doi: 10.15802/stp2016/60953.
8. Nguyen, T. N. Numerical simulation of wind flow and pollution transport in urban street canyons / T. N. Nguyen, T. C. Nguyen, V. T. Nguyen // Advanced Science and Technology Letters. – 2015. – Vol. 120. – P. 770–777. doi: 10.14257/astl.2015.120.152.
9. Numerical simulations and wind tunnel studies of pollutant dispersion in the urban street canyons with different height arrangements / Ch.-H. Chang, J.-S. Lin, C.-M. Cheng, Y.-S. Hong // J. of Marine Science and technology. – 2013. – Vol. 21, No. 2. – P. 119–126.
10. Overman, H. T. J. Simulation model for NO_x distributions in a street canyon with air purifying pavement: master thesis / H. T. J. Overman ; University of Twente. – Enschede, Netherlands, 2009. – 69 p.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, О. С. СЛАВІНСЬКА^{2*}, Р. В. КИРИЧЕНКО^{3*}^{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 water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882^{2*}Каф. «Управління виробництвом та майном», Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-5163-5645^{3*}Каф. «Управління виробництвом та майном», Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9918-3895

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ НА МІСЬКІЙ ВУЛИЦІ

Мета. У науковій статті необхідно вирішити питання щодо розробки 2D чисельної моделі, яка дозволила б швидко розрахувати процес забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту. Передбачено також створити чисельну модель, що давала б можливість прогнозувати рівень забруднення атмосферного повітря при використанні захисних бар'єрів біля дороги. **Методика.** Використано розроблену модель, яка базується на рівнянні невязкої рідини та рівнянні масопереносу. Рівняння для потенціалу швидкості використовується для розрахунку поля швидкості повітряного потоку при експлуатації бар'єрів. При вирішенні рівняння для потенціалу швидкості задіяна неявна різницева схема «умовної апроксимації». Для чисельного рішення задачі масопереносу вживається неявна поперемінно-трикутна різницева схема. Чисельне інтегрування здійснюється на прямокутній різницевій сітці. Для формування складної форми розрахункової області використовуються маркери, а для моделювання джерела емісії – модель точкового джерела, яка формується за допомогою дельта-функції Дірака. **Результати.** Авторами розроблено 2D чисельну модель, яка враховує основні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання шкідливих речовин в атмосфері при викидах від автотранспорту з урахуванням розміщення захисних бар'єрів біля дороги. На основі побудованих чисельних моделей проведено обчислювальний експеримент із оцінки рівня забруднення повітряного середовища на вулиці. **Наукова новизна.** Створено чисельну модель, яка дозволяє розрахувати 2D аеродинаміку вітрового потоку в умовах наявності перешкод та процес масопереносу викидів токсичних газів від автотранспорту. Модель дозволяє враховувати наявність автомобіля на дорозі, форму захисного бар'єру, присутність бордюру. Виконано розрахунки по визначенню зони забруднення, що формується біля захисного бар'єру, розташованого біля автомагістралі. **Практична значимість.** Розглянута ефективна чисельна модель, яка може бути застосована при розробці заходів із охорони навколишнього середовища при експлуатації автомобільного транспорту в місті. Розроблена модель дозволяє оцінити розміри, форму та інтенсивність зони забруднення біля автомагістралі.

Ключові слова: забруднення атмосфери; міські вулиці; поширення забруднень; чисельне моделювання

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, О. С. СЛАВИНСКАЯ^{2*}, Р. В. КИРИЧЕНКО^{3*}^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882^{2*}Каф. «Управление производством и имуществом», Национальный транспортный университет, ул. Суворова, 1, Киев, Украина, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-5163-5645^{3*}Каф. «Управление производством и имуществом», Национальный транспортный университет, ул. Суворова, 1, Киев, Украина, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9918-3895

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ГОРОДСКОЙ УЛИЦЕ

Цель. В научной статье необходимо решить вопрос разработки 2D численной модели, которая позволила бы быстро рассчитать процесс загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта. Предполагается также создать численную модель, которая давала б возможность прогнозировать уровень загрязнения атмосферного воздуха при использовании защитных барьеров у дороги. **Методика.** Использо-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

вана розроблена модель, оснований на урівненні невязкой жидкости и урівненні масопереноса. Урівнення для потенціала швидкості використовується для розрахуноків поля швидкості повітряного потоку при експлуатації бар'єрів. При розв'язанні урівнення для потенціала швидкості застосована неявна різностна схема «умовної апроксимації». Для чисельного розв'язання задачі масопереноса використовується неявна поперемінно-трикутна різностна схема. Чисельне інтегрування здійснюється на прямокутній різностній сітці. Для формування складної форми розрахункової області застосовуються маркери. А для моделювання джерела емісії – модель точкового джерела, яка моделюється з допомогою дельта-функції Дірака. **Результати.** Авторами розроблена 2D чисельна модель, яка враховує основні фізичні фактори, впливаючі на процес розсіювання шкідливих речовин в атмосфері при викидах від автотранспорту з урахуванням розміщення захисних бар'єрів у дороги. На основі побудованих чисельних моделей проведено вичисельний експеримент по оцінці рівня забруднення повітряної середовища на вулиці. **Наукова новизна.** Створена чисельна модель, яка дозволяє розрахувати 2D аеродинаміку вітрового потоку в умовах наявності перешкод і процес масопереноса викидів токсичних газів від автотраси. Модель дозволяє враховувати наявність автомобіля на дорозі, форму захисного бар'єра, наявність бордюра. Виконані розрахунки по визначенню зони забруднення, формуючої у захисного бар'єра, який розташований у автомагістралі. **Практична значимість.** Розглянута ефективна чисельна модель, яка може бути застосована при розробці заходів по захисті навколишнього середовища при експлуатації автомобільного транспорту в місті. Розроблена модель дозволяє оцінити розміри, форму і інтенсивність зони забруднення у автомагістралі.

Ключові слова: забруднення атмосфери; міські вулиці; поширення забруднень; чисельне моделювання

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Rusakova, T. I., & Kirichenko, P. S. (2014). *Modelirovaniye zagryazneniya atmosferynoy vozduha vybrosami avtotransporta na ulicah gorodov* [Monograph]. Dnipropetrovsk: Aktsent PP.
2. Biliaiev, M. M., Slavinska, O. S., & Kyrychenko, R. V. (2017). Prediction of atmospheric air pollution by emissions of motor transport taking into account the chemical transformation of harmful substances. *Science and Transport Progress*, 3(69), 15-22. doi:10.15802/stp2017/104549
3. Biliaiev, M. M., & Rusakova, T. I. (2013). CFD prediction of air pollution in the streets. *Ecology and Nature Management*, 17, 188-194.
4. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka.
5. Samarskiy, A. A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem*. Moscow: Nauka.
6. Düring, I., Bächlin, W., Ketzel, M., Baum, A., Friedrich, U., & Wurzler, S. (2011). A new simplified NO/NO₂ conversion model under consideration of direct NO₂-emissions. *Meteorologische Zeitschrift*, 20 (1), 67-73. doi:10.1127/0941-2948/2011/0491
7. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. doi:10.15802/stp2016/60953
8. Nguyen, T. N., Nguyen, T. C., & Nguyen, V. T. (2015). Numerical simulation of wind flow and pollution transport in urban street canyons. *Advanced Science and Technology Letters*, 120, 770-777. doi:10.14257/asstl.2015.120.152
9. Chang, C.-H., Lin, J.-S., Cheng, C.-M., & Hong, Y.-S. (2013). Numerical simulations and wind tunnel studies of pollutant dispersion in the urban street canyons with different height arrangements. *Journal of Marine Science and Technology*, 21(2), 119-126.
10. Overman, H. T. J. (2009). *Simulation model for NO_x distributions in a street canyon with air purifying pavement*. (Master thesis). University Twente, Netherlands.

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

Received: April 10, 2017

Accessed: July 21, 2017

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

UDC 629.4.016.5:625.144

M. I. KAPITSA¹, D. V. BOBYR², A. Y. DESIAK^{3*}¹Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, St. Lazaryan, 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 33 19 61, e-mail m.i.kapitca@ua.fm, ORCID 0000-0002-3800-2920²Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Str. Lazaryan, 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 33 19 61, e-mail dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861^{3*}Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Str. Lazaryan, 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 33 19 61, e-mail andrey.desyak1992@gmail.com, ORCID 0000-0001-8650-5242

DETERMINING PERMISSIBLE SPEED OF TILTING TRAIN IN CURVED TRACK

Purpose. The main purpose of the article is to determine the permissible speed of the air-cushioned tilting train in curved track and to justify the expediency of operating this type of rolling stock on the railways of Ukraine to increase the speed, improve the passenger comfort and save the energy due to more uniform high-speed train driving. **Methodology.** The determination of the maximum permissible speed of the tilted train in curved track involves the use of methods of linear and vector algebra and empirical formulas for applied scientific and technical research. The calculation of the maximum speed is based on the principle of calculating centrifugal force for the velocities that meet the safety criteria of movement on the horizontal unbalanced acceleration in the stable radius curve. **Findings.** The results of the calculations showed that in the 1000 m radius curved track section, provided the passenger comfort, the maximum permissible speed of the train without forced tilt is 132 km/h, and with the forced tilt – 189 km/h. The velocity gain in the curve is about 30% and up to 10% on the section (depending on the number of curves). **Originality.** The method of determining the permissible speed of the tilted train in curved track is improved, which consists in determining the permissible centrifugal force acting on the train in the stable radius curve, taking into account the passenger comfort conditions. **Practical value.** This method allows accurately determining the permissible speed on the condition of passenger comfort in the curved section and the required additional tilt angle of the train, depending on the speed, curve radius and canting. Enhanced speed and comfort of passenger trains in the future will increase the demand for rail services among the population and strengthen the position of rail transport in Ukraine's transport system.

Keywords: high-speed transport; rolling stock; body tilt system; centrifugal force; resultant force; curve radius; canting

Introduction

Integration of Ukraine into the European community creates preconditions for a significant increase in passenger and freight transportation volumes. Under these conditions, the requirements for transport are essentially new. The radical measure to provide domestic and international passenger transportation is the creation of a high-speed railway network with access to the European network and CIS countries [7].

In order to solve the problem of introduction of high-speed trains in Ukraine, it is necessary to apply the systematic approach that includes the analysis of world experience, the study of the preconditions for organization of high-speed trains in Ukraine, ways of connecting the domestic railway network with the European one, designing of high-speed lines, which involves the development of requirements and standards for plan and longitudinal profile designing [5].

Another problem of the development of high-speed transport is that virtually all infrastructure

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

and rolling stock remained as inheritance since the Soviet era. Therefore, the entire railway industry of Ukraine is out-dated and needs a global upgrade, consisting of:

- reconstruction of the track and the contact network;
- modernization or renewal of the fleet of rolling stock;
- complete replacement of signalling, centralization and locking devices with more modern ones designed for high-speed traffic;
- replacement of the cargo and passenger train operation model.

If Ukraine aspires to integrate into the transport system of Europe, then the rail transport must meet the European standards in terms of comfort, reliability and security.

Such leading countries as Germany, France, Italy, Spain, China and Japan are actively using trains on air-cushioned suspension with body forced tilt in curves to improve the speed and comfort of passengers. This can significantly reduce the effect of centrifugal acceleration on passengers in curved track sections and rolling stock vibration at high speeds [13].

Problem statement

On the railway lines, the possibility of speed increasing in the track curved sections is limited by the effect of transverse centrifugal acceleration, acting on the rolling stock and passengers. It increases in proportion to the velocity squared and decreases in proportion to the curve radius. Also, centrifugal acceleration creates the force that pushes the rolling stock to the outer rail, which can lead to the derailment. Passengers and locomotive crew also experience the effect of centrifugal force, which tries to throw them away from the centre of the curve to the car side. This factor creates considerable discomfort during the trip. Partially, the action of the centrifugal force is reduced by increasing the canting in the track curved sections. In this case, some part of the centrifugal force acting on the passengers is compensated.

If one installs the rail lines in the curve in one level, then the centrifugal force, together with the crew weight, will form the resultant force that can go to the outer rail line. This force causes:

- increased wear of the lateral surface of the outer rail;
- rebounds of the external rail;
- unpleasant sensations of passengers due to unbalanced acceleration.

Maximum canting in Ukraine is 150 mm. By the permission of Ukrzaliznytsya, the maximum canting can amount to more than 150 mm, but this will lead to uneven wear of rails and discomfort of passengers at low speed [9].

However, the canting is not always enough to increase the speed in the curve. This is due to the fact that the canting is designed for the speed of freight trains, which, as a rule, move at speeds up to 80 km/h.

This problem is especially relevant for Ukraine, since for the introduction of high-speed traffic, the minimum radii of curves should be about 4 000–5 000 m, and on the railway lines of Ukraine there are curves with radii of about 500 m, which does not meet the requirements of high-speed railway lines. The increase of the curve radius is a complicated process, expensive and, to some extent, impossible, due to the densely populated settlements and rail infrastructure. Thus, the tilting rolling stock should solve the problem of the implementation of high-speed traffic on the territory of Ukraine. When using trains with such a system, the part of the centrifugal force is compensated.

Therefore, in this article, we strive to prove the expediency of operation of the high-speed rolling stock on the Ukrainian railway lines with the body tilt system in the curved track sections in order to increase the speed of passage of curves without profile reconstruction and change. It will also allow saving the energy through the steadier mode of train driving.

Analysis of researches and publications

In the works by Redchenko E. S. [10], Kurgan M. B. [6] and Zubko A. P. [1] the possibility of using the tilting rolling stock in Ukraine during the organization of high-speed traffic was already considered.

In order to determine the permissible speed of the train with the body forced tilt in the curve the work [10] proposes the following method.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

The vehicle moving in the curve is affected, in general, by two main forces: gravity and centrifugal force, which depends on the movement speed and the curve radius. All forces acting on the vehicle in the track curve are shown in Fig. 1

The centrifugal force is determined by the formula:

$$F_C = \frac{m \cdot V^2}{R}, \quad (1)$$

where m – rolling stock mass, kN; V – rolling stock speed in the curve, km/h; R – curve radius, m.

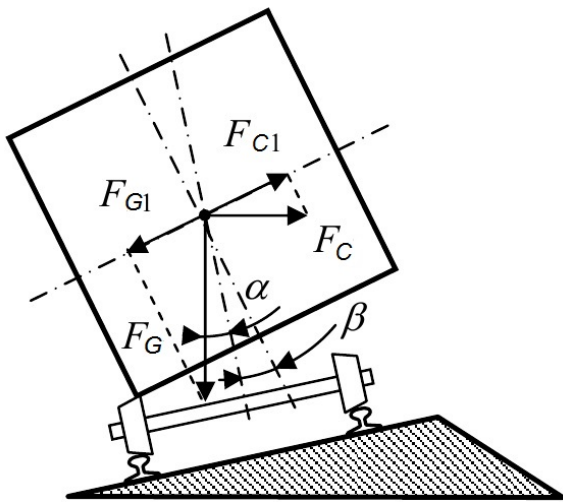


Fig. 1. Vehicle movement with additional tilt of the body in curve

To reduce the effect of centrifugal force in the curves, the outer rail is placed higher than the internal one by the value of cant h , m. Therefore, the track is inclined with respect to the horizon at the following angle:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{h}{2S}\right), \quad (2)$$

where $2S$ – track width, m.

Due to this, a part of the centrifugal force is compensated by the force of gravity, since in the floor plane of the car the projections of the foregoing forces are directed to the opposite sides.

Obviously, the result of the vectorial addition of these forces will be some unbalanced lateral force $F_U = F_{C1} + F_{G2}$.

To provide the greatest comfort for passengers,

the unbalanced lateral force should be equal to zero. The projection of the centrifugal force must be fully compensated by the gravity component:

$$\frac{mV^2}{R} \cos \alpha = mg \sin \alpha, \quad (3)$$

where g – free fall acceleration, m/s^2 .

The profile of the curves is constructed with a fixed optimal canting. But since trains move at different speeds, one should define «insufficient canting». The maximum canting is limited for reasons of preventing the rolling stock tipping into the curve when it stops or moves slowly and is equal to $h_{\max} = 0,15$ m.

Insufficient canting can be compensated by inclining the vehicle body with the help of additional force for the angle β , into such a position that the body would occupy during movement in the curve with the required canting of the outer rail, i.e. $h = h_U + h_{\max}$.

The condition for compensating the centrifugal force for tilting trains can be written as follows:

$$\frac{mV^2}{R} \cos(\alpha + \beta) = mg \sin(\alpha + \beta). \quad (4)$$

Consequently, the expression for the additional angle of the body tilt will be as follows:

$$\beta = \arctg\left(\frac{V^2}{R \cdot g}\right) - \alpha. \quad (5)$$

The disadvantage of this method is that the author [10] does not take into account the condition of passenger comfort on horizontal unbalanced acceleration, and the additional angle of the body tilt is determined with full compensation of the centrifugal force, i.e. the unbalanced acceleration in this case is equal to zero, and as it is known, the permissible unbalanced acceleration is $\alpha_U = 0.7$ m/s^2 .

The authors in [6] and [1] propose the method for determining the permissible speed of the tilting train in the curve, which is as follows.

In circular curves, the permissible speed of movement is determined by the safety criterion of movement on the horizontal unbalanced acceleration:

$$V = 3.6 \sqrt{R \left(\alpha_U + \frac{g}{S} \cdot h_e \right)}, \quad (6)$$

where h_e – estimated canting, mm; S – distance between the rail top axes, 1 600 mm.

In modern vehicles, which during curve passing have the body forced tilt into the middle of the curve at the angle γ , the permissible speed increases with the introduction of canting into the formula (6), which is an additional compensation for the unbalanced acceleration:

$$\Delta h = \frac{\pi \cdot S \cdot \sin \gamma}{180}. \quad (7)$$

Substituting formula (7) into formula (6), we obtain the permissible speed of the train with the forced tilt of the body in the curve:

$$V = 3.6 \sqrt{R \left(\alpha_U + \frac{g}{S} \cdot (h_e + \Delta h) \right)}. \quad (8)$$

The main disadvantage of this method is that the authors [1, 8] do not perform calculations to determine the additional angle of the train tilt γ during the curve passage, since the additional tilt angle depends on the curve radius, movement speed, canting and the maximum tilt angle achieved by the rolling stock.

Purpose

Justification of the expediency of operation of the air-cushioned rolling stock with tilt in curved sections on the railways of Ukraine for increased speed and comfort of passengers.

Methodology

The methodology for determining the maximum permissible speed of the tilted train in curved track involves the use of methods of linear and vector algebra and empirical formulas for applied scientific and technical research.

The calculation of the maximum speed of the tilted train in curved track is based on the principle of calculating centrifugal force for the velocities that meet the safety criteria of movement on the horizontal unbalanced acceleration in the stable radius curve.

Basic material

The modern high-speed trains have three main systems of body tilt in curves: passive, active and active-passive.

In passive tilt systems, the body is suspended like a pendulum with a centre of rotation above the body gravity centre. When moving in the curve, the centre of gravity under the action of centrifugal force is displaced externally, providing the required angle of the body tilt. The tilt angle of the passive system can be up to 3°–5°. In this case, a significant part of the centrifugal force is compensated, and the speed in the curves can be increased by 14% [8].

In active systems, the tilt of the body is performed with the help of special devices. Hydraulic, pneumatic, electro-hydraulic and electromechanical systems are used as a power-driven mechanism of the body forced tilt. In order to ensure correct operation of the system, the rolling stock is equipped with a number of sensors, which, depending on the speed, curve radius and canting, determine the optimal angle of the rolling stock tilt. Typically, the tilt angle of the active systems is 8°–10° [8], which makes it possible to increase the speed to 25–30 %.

The active-passive tilt system can work both as active and passive depending on the speed and the desired angle of the body tilt. If you need to turn the body to 3°–5° angle, then the system works as a passive one. If you need to set a larger angle, then the system starts to work as active. The advantage of the passive tilt system is that there is no need to spend energy for the body tilt and it has simple and reliable design. And the advantage of the active one is the greater maximum possible tilt angle [5, 14].

In this paper, the method for determining the permissible speed of movement in the curve with the body forced tilt is as follows:

- determination of the permissible speed of the train in the curve provided the passengers feel comfortable;
- determination of the forces acting on the train in the track curved section (centrifugal force and gravity);
- determination of the permissible centrifugal force in the curve subject to comfort;

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- determination of the resultant force for centrifugal and gravitational forces;
- determination of the angle of deflection of the resultant force vector at the permissible speeds from the vertical axis Oy ;
- determination of the angle of deflection of the resultant force vector from the vertical axis of the locomotive, which in turn is the desired angle of the body tilt in the curve;
- determination of the permissible angle of deflection of the resultant force vector from the vertical axis Oy with the body forced tilt;
- determination of the value of the resultant force and centrifugal force with the body forced tilt in the curve;
- definition of maximum speed with the maximum angle of the body tilt, which is provided by the rolling stock design;
- construction of the graph showing the dependence of the centrifugal force of the locomotive on the speed in the track curve, the limitation of the centrifugal force without body tilt, the limitation of the centrifugal force with body tilt and the limitation of the speed at the maximum angle of the body tilt.

Increasing the speed of movement requires much greater compliance with traffic safety criteria. This is especially true for the tilting rolling stock. In world practice, the following traffic safety criteria are used:

- vertical acceleration, which arises during the movement of the train in the curve section of the longitudinal track profile;
- longitudinal acceleration associated with the processes of braking and run-up;
- horizontal unbalanced acceleration, which arises during the movement in the track curve in plan;
- full acceleration, acting on the passenger;
- vertical acceleration occurring in the passenger car body, caused by fluctuations, and acting on a passenger;
- criterion of safety of movement on elastic edging of a rail.

The criterion that influences the safety of the passengers of the tilting train the most is the crite-

ri-
on of comfort, that is, the criterion of safety of movement on the horizontal unbalanced acceleration.

As already noted, the permissible speed of movement in the track curve in the condition of comfort of passengers and locomotive crew is determined by the largest value of unbalanced acceleration $\alpha_U = 0.7 \text{ m/s}^2$, which is specified on the railways of the CIS countries. In justified cases, in order to eliminate the speed limit on individual curves depending on the locomotive type, the transverse permissible unbalanced acceleration can be increased to 1 m/s^2 , but not long-term and not repeated. Permissible unbalanced acceleration for freight trains, provided that the outer or inner rail of the curve is not overloaded, is equal to $\pm 0.3 \text{ m/s}^2$ [3, 12].

Different authors offer different formulas for determining the permissible speed of movement in the curved track. From the considerable volume of literature, it is possible to define three most used empirical formulas for determining the permissible speed of passage of curves provided the comfort of passengers and locomotive crew. Formula (9) is given in [3], formula (10) in [11], and formula (11) in [2].

$$V_{perm} = \sqrt{R \cdot (0.08 \cdot h + 12,96 \cdot \alpha_U)} \quad (9)$$

$$V_{perm} = \sqrt{3.6^2 \cdot R \cdot \left(\frac{h}{21} \cdot g + \alpha_U \right)} \quad (10)$$

$$V_{perm} = 3.6 \sqrt{R \cdot (\alpha_U + 0,00613 \cdot h)} \quad (11)$$

According to the above formulas in Fig. 2 we constructed the graph of dependence of the permissible movement speed on the curve radius without body tilt for the following conditions: the canting $h = 50, h = 100$ and $h = 150 \text{ mm}$, the curve radius $R = 500 \dots 5000 \text{ m}$. Since the difference in the results obtained by formulas (9), (10) and (11) is less than one per cent, so it makes no sense to construct all three dependencies; it's enough to just construct the dependence by one of the formulas for three different cants.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

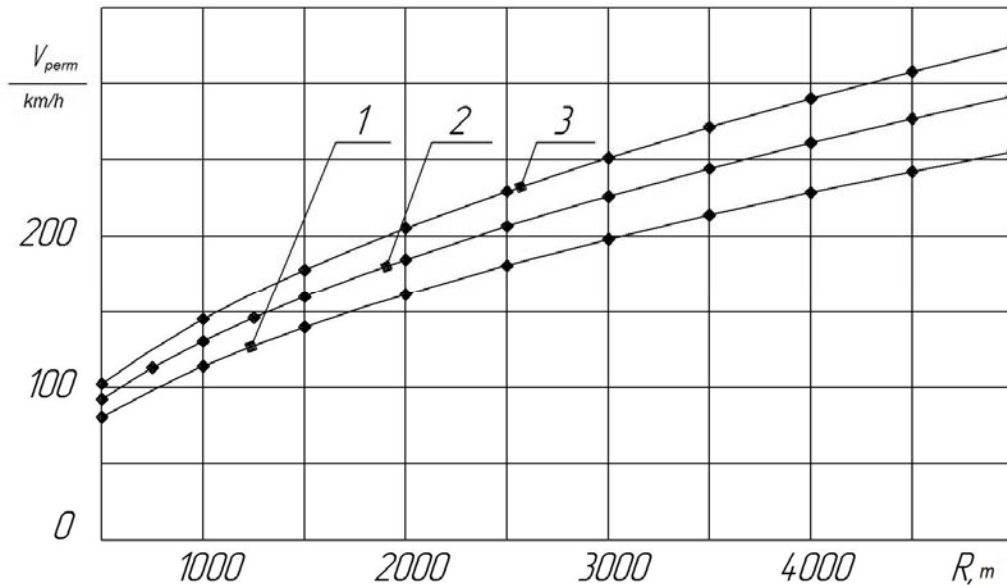


Fig. 2. Graph of the dependence of permissible movement speed on the curve radius:

1, 2, 3 – functions $V_{perm}(R)$ with cantingby $h = 50$, $h = 100$ and $h = 150$ mm, respectively

The vehicle moving in a curve, in general, is affected by two main forces: gravity and centrifugal force, which depends on the speed and radius of the curve. All forces acting on the locomotive in the curve are shown in Fig. 3. The result of the vector addition of centrifugal and gravitational forces is the resultant force.

For the calculation scheme of the forces acting, the centrifugal force F_C , acting on the rolling stock in the curve is determined by the formula (1), and the angle of canting α is determined by the formula (2).

Substituting in formula (1) the value of the maximum permissible speed under the condition of comfort, which is calculated by the formula (9), we obtain the maximum permissible centrifugal force acting on the rolling stock in the curved track.

The fig. 4 shows the graph of dependence of the centrifugal force on the curve radius at different speeds.

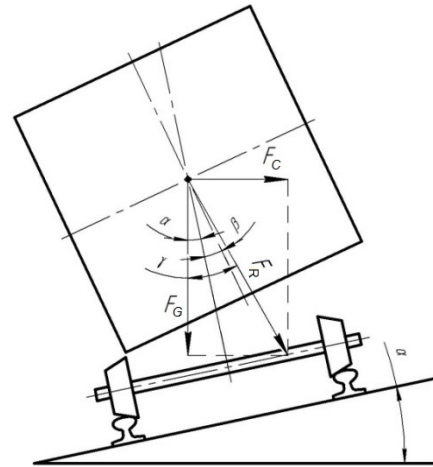


Fig. 3. Vehicle movement without body tilt in the curve:

 F_G – gravity force; F_C – centrifugal force; F_R – resultant force of gravity and centrifugal forces;

α – angle between the vector of the gravity force and the vertical axis of the rolling stock without body tilt and the angle of canting; β – additional angle of rolling stock tilt; γ – angle between the resultant force vector and the gravity force vector

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

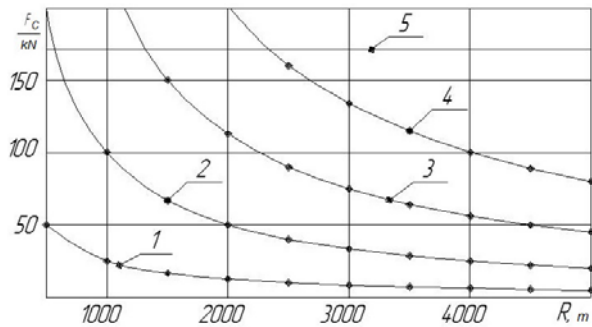


Fig. 4. Graph of dependence of the centrifugal force on the curve radius at different speeds:

1, 2, 3, 4 – functions $F_C(R)$ at speeds of 50, 100, 150 and 200 km/h respectively;
5 – limitation of centrifugal force

The resultant force from the centrifugal and gravitational forces is determined by the vector addition and will be equal to:

$$F_R = \sqrt{F_C^2 + F_G^2}. \quad (12)$$

The force of gravity acting on the rolling stock is determined by:

$$F_G = mg. \quad (13)$$

The basis of the method for determining the permissible speed of the tilting rolling stock is the definition of the maximum deflection angle of the resultant vector without and with body tilt, provided that the passengers feel comfortable. The deflection angle of the resultant vector without body tilt is equal to:

$$\gamma = \arctg\left(\frac{F_C}{F_G}\right). \quad (14)$$

For the greatest comfort of the passengers, the resultant vector should be perpendicular to the floor plane. Besides, this angle is an additional necessary angle for the body tilt in the curve and is determined by the formula:

$$\beta = \arctg\left(\frac{F_C}{F_G}\right) - \alpha. \quad (15)$$

After the substitution and transformation of formulas (14) and (15) we obtain:

$$\gamma = \arctg\left(\frac{V^2}{R \cdot g}\right). \quad (16)$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{V^2}{R \cdot g}\right) - \alpha. \quad (17)$$

It is seen that the formula for determining the additional angle of body tilt (17) coincided with the formula (5), which is calculated according to the method [1].

If we calculate the additional tilt angle by the formula (15), it is worth noting that the additional tilt angle can be not only positive, but also negative. The negative tilt angle is formed when the body is tilted in the direction opposite to the turn. This is necessary in the case when the train moves at a low speed in the curve with a sufficiently high canting.

The permissible tilt angle of the resultant vector to the vertical axis Oy with the body forced tilt is defined as the sum of the deflection angles of the resultant vector without body tilt and the required additional tilt angle:

$$\gamma_T = \gamma + \beta. \quad (18)$$

Now, the permissible resultant and centrifugal forces with the body forced tilt will equal respectively:

$$F_{R.T} = \frac{F_G}{\cos \gamma_T}. \quad (19)$$

$$F_{C.T} = \sqrt{F_{R.T}^2 - F_G^2}. \quad (20)$$

In order to determine the maximum permissible speed of the tilting train under the condition of maximum compensation of centrifugal force and subject to the horizontal unbalanced acceleration, it is necessary to solve the equation (17) in relation to the unknown velocity V , taking the tilt angle $\beta = 8^\circ$, since this tilt angle is the maximum permissible for this type of rolling stock.

The maximum speed of the tilting locomotive, provided that the resultant force is perpendicular to the car floor, is determined as:

$$V_{\max} = \sqrt{\operatorname{tg}(\alpha + \beta_T) \cdot 12.96 \cdot R \cdot g}. \quad (21)$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

The maximum speed of the tilting locomotive, provided that the resultant force has the maximum allowable tilt angle with the condition of comfort, will be determined by the formula:

$$V_{\max 2} = \sqrt{\operatorname{tg}(\gamma + \beta_T) \cdot 12.96 \cdot R \cdot g} . \quad (22)$$

Findings

The Figure 5 shows the constructed graph for determining the permissible speed of tilting train movement in the curve. The graph shows the centrifugal force acting on the rolling stock when speed increases and a number of limitations: curve 1 is the permissible centrifugal force without body tilt, curve 2 is the permissible centrifugal force with body tilt, curve 3 is the function $F_C(V)$ of centrifugal force from the speed acting on the train in the curve, curve 4 is the maximum speed limitation provided that the resultant vector is perpendicular to the body floor, curve 5 is the maximum

speed limitation with body tilt under the condition of passenger comfort. The graph is constructed for the following input data: train speed $V = 0 \dots 250$ km/h, curve radius $R = 1000$ m, canting $h = 100$ mm, maximum angle of rolling stock tilt $\beta = 8^\circ$. For comparison, Table 1 shows the results of calculations of the permissible speed of tilting train in the track curve according to the authors' methods [1, 6, 10] and the calculation method presented in this article.

As the graph shows, the maximum permissible speed of the train without body tilt is 132 km/h, and with body tilt – 189 km/h. The velocity gain in the curve $R = 1000$ m is 30 %. This result can be considered adequate, as it coincides with the results of calculations [1, 6].

Similar dependences can be constructed for other values of curves radii and canting.

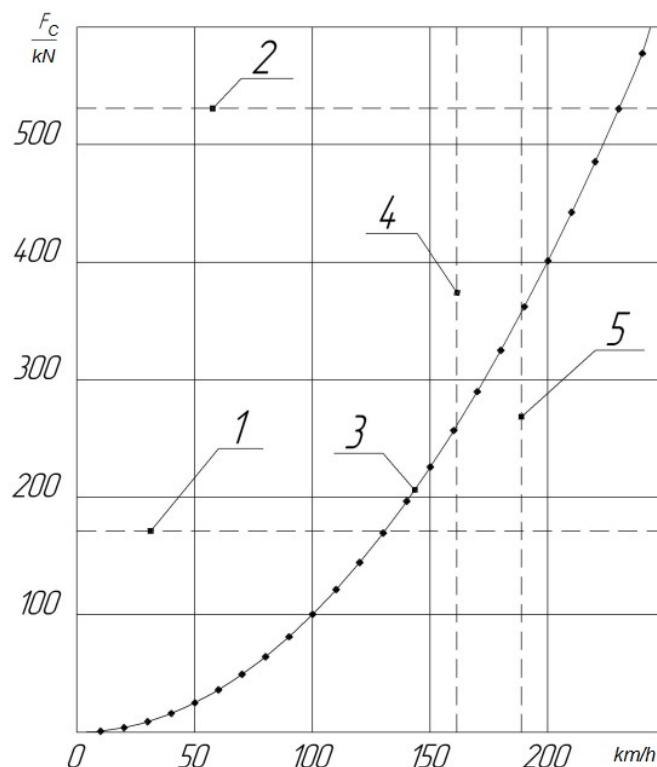


Fig. 5. Graph for determining the permissible speed of tilting train movement in the curve

Table 1

Results of calculations of the permissible train speed according to different methods

Method of calculating the permissible train speed in the curve	Speed of the train without body tilt, km/h	Speed of the train provided that the centrifugal force is fully compensated by body tilt, km / h	Speed of the train with body tilt under comfortable conditions, km / h
Methodology described in the article	130.7	161.4	188.7
Methodology of the authors [1, 6]	130.6	–	186.3
Methodology of the author [5]	–	161.4	–

Originality and practical value

The method for determining the permissible speed of movement and the additional angle of body tilt in the track curve of the tilting train is improved. It takes into account the comfort condition by the value of the horizontal unbalanced acceleration. This will allow more accurately determining the speed of movement of this type of rolling stock in the curved track section.

Conclusions

1. As demonstrated by the calculations made, the determining factors for the railways of Ukraine affecting the train speed are the curve radii and canting, which is designed for the movement of freight trains.

2. The results of calculations indicate that the maximum permissible speed of the train without body tilt in the curve $R=1000$ m is 132 km/h,

and with body tilt – 189 km/h. The velocity gain is 57 km/h.

3. Having analyzed all the factors affecting the movement speed and the obtained calculation results, it can be concluded that this type of rolling stock is expedient to be used on the railways of Ukraine. This is due to the fact that in Ukraine there are many curves of small radius that are inappropriate and to some extent impossible to increase.

4. Besides, due to more uniform maintenance of high-speed train driving, it is possible to achieve energy saving [4].

5. Putting into operation of the tilting rolling stock on the Ukrainian railways will allow getting the velocity gain of up to 30 % in the curve and up to 10 % in the section (depending on the number of curves). Increased speed of trains will considerably strengthen the position of railways in the transport system of Ukraine.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Аналіз можливості застосування в Україні рухомого складу з примусовим нахилом кузова вагонів при організації швидкісного руху / А. П. Зубко, І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 4. – С. 156–164.
2. Білий, В. І. Залізнична колія : навч. посіб. / В. І. Білий. – Донецьк, 2007. – 160 с.
3. Боднар, Б. Є. Теорія та конструкція локомотивів. Екіпажна частина : підруч. / Б. Є. Боднар, Є. Г. Нечаєв, Д. В. Бобир. – Дніпропетровськ : Ліра ЛТД, 2009. – 284 с.
4. Визначення енергозощаджуючих режимів розгону поїздів / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, А. М. Афанасов, Д. М. Кислий // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 40–52. doi: 10.15802/stp2015/55359.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

5. Єріцянь, Б. Х. Моделювання комбінованої системи нахилу кузова швидкісного рухомого складу залізничного транспорту / Б. Х. Єріцянь, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін // Вост.-Европ. журн. передових технологій. – 2016. – № 2 (9). – С. 4–17. doi: 10.15587/1729-4061.2016.66782.
6. Курган, М. Б. Організація швидкісного руху при застосуванні рухомого складу з примусовим нахилом кузова вагонів / М. Б. Курган, І. П. Корженевич, В. В. Арсонов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 11. – С. 50–59.
7. Курган, Н. Б. Предпосылки создания высокоскоростных магистралей в Украине / Н. Б. Курган // Українські залізниці. – 2015. – № 5/6 (23/24). – С. 16–21.
8. Ковалев, В. И. Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт / В. И. Ковалев. – Санкт-Петербург : Искусство России, 2001. – Т. 2. – 350 с.
9. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії. – Дніпропетровськ : Арт-Прес, 1999. – 44 с.
10. Редченко, Е. С. Определение величины и распределение центробежной силы для проведенных испытаний поездов с наклоняемыми кузовами на катковом стенде / Е. С. Редченко // Локомотив-информ. – 2008. – № 5. – С. 12–17.
11. Сокол, Э. Н. Сходы с рельсов и столкновения подвижного состава (Судебная экспертиза. Элементы теории и практики) : монография / Э. Н. Сокол. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Транспорт Украины, 2004. – 368 с.
12. On Influence of Design Parameters Of Mining Rail Transport On Safety Indicators [Electronic resource] / K. Ziborov, V. Protsiv, S. Fedoriachenko, I. Verner // Mechanics, Materials Science & Engineering J. – 2016. – Vol. 2 (1). – P. 63–70. – Available at: <http://mmse.xyz/en/on-influence-of-design-parameters-of-mining-rail-transport-on-safety-indicators/>. – Title from the screen. – Accessed : 19.06.2017.
13. Qi, Z. A three-dimensional coupled dynamics model of the air spring of a high-speed electric multiple unit train / Z. Qi, F. Li, D. Yu // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Part F : J. of Rail and Rapid Transit. – 2017. – Vol. 231. – Iss. 1. – P. 3–18. doi: 10.1177/0954409715620534.
14. Zhou, R. Robust system state estimation for active suspension control in high-speed tilting trains / R. Zhou, A. Zolotas, R. Goodall // Vehicle System Dynamics. – 2014. – Vol. 52. – Iss. sup1. – P. 355–369. doi: 10.1080/00423114.2014.901540.

М. І. КАПЦА¹, Д. В. БОБИРЬ², А. Є. ДЕСЯК^{3*}

¹Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (0562) 33 19 61, ел. пошта m.i.kapitsa@ua.fm, ORCID 0000-0002-3800-2920

²Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (0562) 33 19 61, ел. пошта dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861

^{3*}Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (0562) 33 19 61, ел. пошта andrey.desyak1992@gmail.com, ORCID 0000-0001-8650-5242

ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОЇ ШВИДКОСТІ РУХУ ПОЇЗДА З ПРИМУСОВИМ НАХИЛОМ КУЗОВА В КРИВИХ ДІЛЯНКАХ КОЛІЇ

Мета. Головною метою статті є визначення допустимої швидкості руху поїзда на пневматичному підвищенні з примусовим нахилом кузова в кривій ділянці колії та обґрунтування доцільності експлуатації даного типу рухомого складу на залізницях України. Це необхідно для збільшення швидкості руху, підвищення комфорту пасажирів та економії енергоресурсів за рахунок більш рівномірного швидкісного режиму ведення поїзда. **Методика.** Визначення максимальної допустимої швидкості руху поїзда в кривій з примусовим нахилом кузова передбачає застосування методів лінійної, векторної алгебри та емпіричних формул для прикладних науково-технічних досліджень. В основі розрахунку максимальної швидкості руху закладений принцип розрахунку відцентрової сили для швидкостей руху, які відповідають критеріям безпеки руху по горизонтальному незагашеному прискоренню в кривій сталого радіуса. **Результати.** Отримані розрахунки

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

показали, що в кривій ділянці колії радіусом 1 000 м, за умови комфортабельності пасажирів, максимальна допустима швидкість руху поїзда без примусового нахилу кузова складає 132 км/год, а з примусовим нахилом кузова – 189 км/год. Приріст швидкості в кривій дорівнює близько 30 %, та до 10 % – на ділянці (в залежності від кількості кривих). **Наукова новизна.** Авторами удосконалено метод визначення допустимої швидкості поїзда з примусовим нахилом кузова в кривій. Він полягає у визначенні допустимої відцентрової сили, яка діє на поїзд у кривій сталого радіуса з урахування умов комфортабельності пасажирів.

Практична значимість. Даний метод дозволяє досить точно визначити допустиму швидкість руху (за умови комфортабельності пасажирів) у кривій ділянці та необхідний додатковий кут нахилу поїзда в залежності від швидкості, радіуса кривої та підвищення зовнішньої рейки. Збільшення швидкості руху та комфорту пасажирських поїздів у майбутньому призведе до збільшення попиту на послуги залізничного транспорту серед населення та зміцнення позицій залізничного транспорту в транспортній системі України.

Ключові слова: високошвидкісний транспорт; рухомий склад; система нахилу кузова; відцентрова сила; рівнодіюча сила; радіус кривої; підвищення зовнішньої рейки

М. И. КАПИЦА¹, Д. В. БОБЫРЬ², А. Е. ДЕСЯК^{3*}

¹Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (0562) 33 19 61, эл. почта m.i.kapitsa@ua.fm, ORCID 0000-0002-3800-2920

²Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (0562) 33 19 61, эл. почта dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861

^{3*}Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (0562) 33 19 61, эл. почта andrey.desyak1992@gmail.com, ORCID 0000-0001-8650-5242

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ НАКЛОНОМ КУЗОВА В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ

Цель. Главной целью статьи является определение допустимой скорости движения поезда на пневматической подвеске с принудительным наклоном кузова в кривом участке пути и обоснование целесообразности эксплуатации данного типа подвижного состава на железных дорогах Украины для увеличения скорости движения, повышения комфорта пассажиров и экономии энергоресурсов за счет более равномерного скоростного режима ведения поезда. **Методика.** Определение максимальной допустимой скорости движения поезда в кривой с принудительным наклоном кузова предусматривает применение методов линейной, векторной алгебры и эмпирических формул для прикладных научно-технических исследований. В основе расчета максимальной скорости движения заложен принцип расчета центробежной силы для скоростей движения, которые соответствуют критериям безопасности движения по горизонтальному непотушенному ускорению в кривой постоянного радиуса. **Результаты.** Полученные расчеты показали, что в кривом участке пути радиусом 1 000 м, при условии комфортабельности пассажиров, максимальная допустимая скорость движения поезда без принудительного наклона кузова составляет 132 км/ч, а с принудительным наклоном кузова – 189 км/ч. Прирост скорости в кривой составляет около 30 %, и до 10 % – на участке (в зависимости от количества кривых). **Научная новизна.** Усовершенствован метод определения допустимой скорости поезда с принудительным наклоном кузова в кривой, который заключается в определении допустимой центробежной силы, действующей на поезд в кривой постоянного радиуса с учетом условий комфортабельности пассажиров. **Практическая значимость.** Данный метод позволяет достаточно точно определить допустимую скорость движения (по условию комфортабельности пассажиров) в кривой и необходимый дополнительный угол наклона поезда в зависимости от скорости, радиуса кривой и возвышения наружного рельса. Увеличение скорости движения и комфорта пассажирских поездов в будущем приведет к увеличению спроса на услуги железнодорожного транспорта среди населения и укрепит позиции железнодорожного транспорта в транспортной системе Украины.

Ключевые слова: высокоскоростной транспорт; подвижной состав; система наклона кузова; центробежная сила; равнодействующая сила; радиус кривой; возвышения наружного рельса

REFERENCES

1. Zubko, A. P., Korzhenevych, I. P., Kurhan, M. B., & Kurhan, D. M. (2004). The analysis of possibility of application in ukraine of the rolling stock with tilting body cars when organizing high-speed traffic. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 4, 156-164.
2. Bilyi, V. I. (2007). *Zaliznychna koliia* [Tutorial]. Donetsk: Donetsk Railway Transport Institute.
3. Bodnar, B. Y., Nechaiev, Y. H., & Bobyr, D. V. (2009). *Teoriia ta konstruktsiia lokomotyviv. Ekipazhna chastyna* [Manual]. Dnipropetrovsk: PP «Lira LTD».
4. Bodnar, B. Y., Kapitsa, M. I., Afanasov, A. M., & Kyslyi, D. N. (2015). Definition of energy saving acceleration modes of trains. *Science and Transport Progress*, 5 (59), 40-52. doi: 10.15802/stp2015/55359
5. Yeritsyan, B., Liubarskyi, B., & Iakunin, D. (2016). Simulation of combined body tilt system of high-speed railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9) (80), 4-17. doi:10.15587/1729-4061.2016.66782
6. Kurhan, M. B., Korzhenevych, I. P., & Arsonov, V. V. (2006). Organization of high-speed traffic with the use of rolling stock with a forced tilt body cars. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 11, 50-59.
7. Kurhan, M. B. (2015). Predposylki stvorennya vysokoskorostnykh magistralей v Ukraini. *Ukrainian Railways*, 5-6 (23-24), 16-21.
8. Kovalev, V. I. (2001). *Skorostnoy i vysokoskorostnoy zheleznodorizhnyy transport* (Vol. 2). Saint Petersburg.
9. Ukrzaliznytsia. (1999). *Pravyla vyznachennia pidvyshchennia zovnishnoi reiky i vstanovlennia dopustymykh shvydkostei v kryvykh diliankakh kolii*. Dnipropetrovsk: Art-Pres.
10. Redchenko, Y. S. (2008). Opredeleniye velichiny i raspredeleniye tsentrobezhnoy sily dlya provedeniy ispytaniy poyezdov s naklonyaemymi kuzovami na katkovom stende. *Lokomotyv-Inform*, 5, 12-17.
11. Sokol, E. N. (2004). *Skhodi s relsov i stolknoveniya podvizhnogo sostava (Sudebnaya ekspertiza. Elementy teorii i praktiki)* [Monograph] (2nd ed.). Kyiv: Transport Ukrainy.
12. Ziborov, K., Protsiv, V., Fedoriachenko, S., & Verner, I. (2016). On Influence of Design Parameters of Mining Rail Transport on Safety Indicators. *Mechanics, Materials Science & Engineering*, 2 (1), 63-70. Retrieved from <http://mmse.xyz/en/on-influence-of-design-parameters-of-mining-rail-transport-on-safety-indicators/>
13. Qi, Z., Li, F., & Yu, D. (2017). A three-dimensional coupled dynamics model of the air spring of a high-speed electric multiple unit train. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231 (1), 3-18.
14. Zhou, R., Zolotas, A., & Goodall, R. (2014). Robust system state estimation for active suspension control in high-speed tilting trains. *Vehicle System Dynamics*, 52 (1), 355-369. doi:10.1080/00423114.2014.901540

Prof. V. L. Gorobets, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. A. V. Sokhatskyi, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published

Received: March 31, 2017

Accessed: July 05, 2017

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 539.375:625.143

О. П. ДАЦИШИН¹, Г. П. МАРЧЕНКО^{2*}, А. Ю. ГЛАЗОВ³

¹Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, Львів, Україна, 79601, тел./факс +38 (032) 263 73 34, ел. пошта datsyshy@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0003-0364-148X

^{2*}Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, Львів, Україна, 79601, тел./факс +38 (032) 263 73 34, ел. пошта mhp@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0003-0767-4561

³Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, Львів, Україна, 79601, тел./факс +38 (032) 263 73 34, ел. пошта glazov@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0002-7664-4879

ПРО ПОВЕРХНЕВЕ РУЙНУВАННЯ ГОЛОВОК ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

Мета. Утворення тріщиноподібних дефектів у рейках залізничної колії є серйозною проблемою для інженерної практики через небезпеку створення аварійних ситуацій. Метою цієї роботи є теоретичне встановлення характеристичного кута поширення поверхневих тріщин у головках залізничних рейок, який є головним фактором у формуванні типових поверхневих контактно-втомних пошкоджень, таких як «пітинг», «риски», «нора» тощо. Необхідно також знайти умови для визначення цього кута. **Методика.** Дослідження проводили на основі методу сингулярних інтегральних рівнянь. Пошкоджену поверхневою тріщиною рейку моделювали як півплощину з крайовим розрізом, а дію колеса на рейку – як односпрямоване повторне поступальне переміщення уздовж краю півплощини з герцівськими контактними зусиллями, з дотичною складовою. Задачу визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень близько вершини тріщини в головці рейки звели до системи двох дійсних сингулярних інтегральних рівнянь, які розв'язали чисельно – методом механічних квадратур Гауса-Чебишова. Складність задачі полягає в тому, що межі ділянок контакту і розкриття берегів тріщини наперед невідомі та змінюються під час переміщення контактних зусиль. Ці межі визначали одночасно з розв'язанням інтегральних рівнянь задачі за додатковими умовами методом ітерацій. **Результати.** Теоретично встановлена наявність у головці рейки характеристичного кута поширення поверхневих тріщин за механізмом поперечного зсуву та записані умови для його визначення. Отримані результати добре узгоджуються з інженерними та експериментальними даними. **Наукова новизна.** Вперше теоретично знайдено величини характеристичного кута, під яким на початковій стадії поширюються зсувні поверхневі контактно-втомні тріщини в головці залізничної рейки від дії коліс. Також записано умови для визначення цього кута. **Практична значимість.** Отримані дані мають важливе значення для інженерної практики, оскільки виявляють природу поверхневих контактно-втомних дефектів рейок за різних умов експлуатації залізничної колії та дозволяють прогнозувати їх контактну міцність і довговічність.

Ключові слова: залізнична рейка; герцівське навантаження; тертя; зсувна тріщина; коефіцієнти інтенсивності напружень; характеристичний кут

Вступ

Під час експлуатації технічної пари «колесо-рейка» поверхні кочення залізничних рейок часто пошкоджуються тріщиноподібними дефектами (рис. 1). При цьому, як показує інженерна практика, на початковій стадії свого розвитку поверхневі макротріщини у головці рейки здебільш поширюються під кутом 10° – 40°

[5, 11, 13, 16] у напрямку переміщення рухомого складу. А при формуванні дефекту типу «нора» (див. рис. 1, б), крім лівої магістральної вітки, під малим кутом до поверхні кочення і з того ж самого місця додатково розвивається ще і його права вітка. Тому для оцінювання контактної міцності та довговічності пошкодженої рейки важливо визначити її напружено-деформований стан або ж коефіцієнти інтенсив-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

вності напружень (КІН) у вершинах тріщин – місцях виникнення найбільшої концентрації напружень і одночасно місцях подальшого руйнування матеріалу.

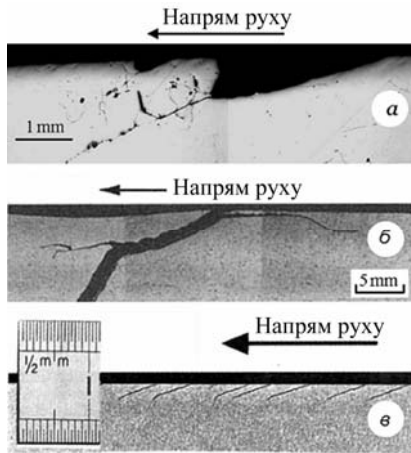


Рис. 1. Типові контактно-втомні поверхневі пошкодження в головці рейки:

a – пітінг [15],
b – «нора» [12], *c* – «риски» [10]

Fig. 1. Typical contact-fatigue surface damage in the rail head:

a – pitting [15],
b – «squat» [12], *c* – «checks» [10]

Актуальність роботи полягає в тому, що на сьогодні на Українських залізницях до 50 % випадків причиною заміни рейок є тріщиноподібні дефекти в головці, які формуються шляхом викришування та відшарування металу з поверхні кочення головки рейки [1]. Додамо також, що в роботі [4] виявлено велику вірогідність утворення таких дефектів контактно-втомного походження.

Для моделювання контактної взаємодії колеса з рейкою часто використовують двовимірну модельну схему, запропоновану Л. М. Кіром і М. Д. Брайантом [9], коли пошкоджене тріщиною тіло моделюють пружною півплощиною з крайовим розрізом, а дію контртіла – однонаправленим переміщенням герцівського (еліптичного) тиску вздовж краю півплощини з врахуванням сили тертя між колесом і рейкою. У роботах [3, 6, 8, 13] зроблено огляд літератури про визначення КІН у вершині тріщини за такого підходу. Подібну модельну схему застосували і в даній роботі, а для отримання числових результатів використали метод сингулярних інтегральних рівнянь (СІР) [2].

Мета

Метою статті є дослідження впливу рухомого контактного навантаження від дії коліс на поверхневі тріщини в головках залізничних рейок, зокрема, виявлення орієнтацій крайових тріщин, найсприятливіших для їх розвитку в зоні стиску, а також прогнозування їх поведінки.

Методика

Замість пошкодженої поверхневою тріщиноподібним дефектом залізничної рейки у двовимірному формуванні розглядаємо пружну півплощину з крайовою прямолінійною довільно орієнтованою тріщиною (рис. 2). Півплощину відносимо до системи координат xOy , вісь Ox якої збігається з краєм півплощини, а початок O – з гирлом тріщини. Саму тріщину відносимо до локальної системи координат $x_1O_1y_1$ з початком у гирлі. Контактний тиск колеса на рейку моделюємо однонаправленим повторним поступальним переміщенням уздовж краю півплощини (справа наліво) герцівських контактних зусиль з дотичною складовою:

$$s(x) = -(1 + if_s)p(x) = -p_0(1 + if_s)\sqrt{a^2 - (x - x_0)^2}/a, \quad |x - x_0| \leq a \quad (1)$$

де f_s – коефіцієнт тертя проковзування між тілами кочення, p_0 – максимальне значення контактної тиску, $2a$ – довжина ділянки контакту. Розташування ділянки контакту відносно гирла тріщини визначає параметр $\lambda = x_0/a$, відносну довжину тріщини – параметр $\varepsilon = l/a$, а її орієнтацію – кут β .

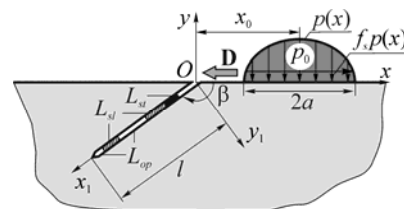


Рис. 2. Схема головки рейки з крайовою тріщиною під дією модельного контактної навантаження:

D – напрям руху контактної навантаження

Fig. 2. Scheme of rail head with an edge crack under action of model contact load:

D – direction of contact load motion

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Крайові умови задачі на межі півплощини матимуть вигляд:

$$\sigma_y(x, 0) - i\tau_{xy}(x, 0) = \begin{cases} s(x), & |x - x_0| \leq a \\ 0, & |x - x_0| > a \end{cases}. \quad (2)$$

Береги тріщини за певних розташувань герцівського навантаження (певних λ) можуть контактувати. Нижче розглянуто загальний випадок умов їх контакту, а саме: проковзування з тертям та можливістю защемлення або розкриття. Тоді граничні умови задачі на берегах тріщини будуть такими:

$$N^{\pm}(x_1) + iT^{\pm}(x_1) = 0, \quad x_1 \in L_{op}; \quad (3)$$

$$v^+(x_1) - v^-(x_1) = 0, \quad x_1 \in L_{sl}; \quad (4)$$

$$T^{\pm}(x_1) = f_c \operatorname{sign}[T^{\pm}(x_1)] |N^{\pm}(x_1)|, \quad x_1 \in L_{sl}; \quad (5)$$

$$u^+(x_1) - u^-(x_1) + i[v^+(x_1) - v^-(x_1)] = 0, \quad x_1 \in L_{st}; \quad (6)$$

$$N^+(x_1) - N^-(x_1) + i[T^+(x_1) - T^-(x_1)] = 0, \quad x_1 \in L_{st}. \quad (7)$$

При цьому на ділянках защемлення берегів тріщини виконується умова

$$|T^{\pm}(x_1)| < f_c |N^{\pm}(x_1)|, \quad x_1 \in L_{st}. \quad (8)$$

Тут контур L прямолінійної тріщини складається з сукупності ділянок L_{op} , на яких тріщина відкрита, ділянок L_{sl} , на яких береги тріщини проковзують, та ділянок L_{st} , де вони защемлені. Через f_c позначено коефіцієнт тертя між берегами тріщини, а через N і T , v і u – відповідно нормальні і дотичні складові зусиль на берегах тріщини та переміщень її берегів у локальній системі координат $x_1 O_1 y_1$. Верхні індекси «+» або «-» означають граничні значення величин за наближення зверху або знизу до контуру тріщини відповідно.

Задачу зводимо до розв'язування системи двох дійсних СІР відносно невідомих стрибків похідних від нормальних і дотичних зміщень [2]. Систему цих рівнянь розв'язуємо числовим методом механічних квадратур Гаусса-Чебишова і на основі цього розв'язку за відомою формулою знаходимо КІН K_I і K_{II} у вершині тріщини.

Складність задачі полягає в тому, що межі ділянок контакту і розкриття берегів тріщини наперед невідомі. Їх визначаємо одночасно з розв'язуванням інтегральних рівнянь задачі з додаткових умов рівності нулю нормальних контактних напружень у граничних точках, а границі зон защемлення і проковзування самих ділянок контакту встановлюємо на основі додаткової умови (8).

Вважаємо [3], що в загальному випадку під час переміщення контактної навантаження (коліс по рейці) поверхневі тріщини можуть розвиватися як за зсувним, так і за розривним механізмами, а саме: в зоні стискування шляхом поперечного зсуву, а в інших умовах – здебільш нормальним розривом. В умовах контактної втоми кочення зростання тріщини за зсувним і розривним механізмами контролюється КІН мішаного типу, які описуються такими співвідношеннями:

$$K_{II0} = \cos(\theta^*/2) [K_I \sin \theta^* + K_{II} (3 \cos \theta^* - 1)] / 2; \quad (9)$$

$$K_{I0} = \cos^3(\theta^*/2) [K_I - 3K_{II} \operatorname{tg}(\theta^*/2)]. \quad (10)$$

Кут початкового відхилення тріщини θ^* за руйнування зсувом визначається з рівняння

$$2K_{II} \operatorname{tg}^3(\theta^*/2) - 2K_I \operatorname{tg}^2(\theta^*/2) - 7K_{II} \operatorname{tg}(\theta^*/2) + K_I = 0, \quad (11)$$

а в разі руйнування розривом – за формулою

$$\theta^* = 2 \arctg \left[(K_I - \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}) / (4K_{II}) \right]. \quad (12)$$

Коли ж в умовах стискування $K_I = 0$, то згідно з (11) тріщина розвиватиметься за зсувним механізмом уздовж свого продовження ($\theta^* = 0$).

Числові результати та їх обговорення

Отримано числові розв'язки (значення КІН) сингулярних інтегральних рівнянь контактної задачі теорії пружності для півплощини з крайовою тріщиною, береги якої контактують під час переміщення герцівського навантаження (тиску) вздовж границі півплощини. Побудовано залежності розмаху КІН в циклі контакту ΔK_{II} (який контролює ріст тріщин за механіз-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

мом поперечного зсуву) від кута $\Delta K_{II} \beta$ – орієнтації крайової тріщини з урахуванням коефіцієнта тертя між колесом і рейкою f_s , коефіцієнта тертя між берегами тріщини f_c та відносної довжини тріщини $\varepsilon = l/a$ (рис. 3, 4). Розрахунки здійснювали для крайової довільно орієнтованої тріщини з відносними довжинами $\varepsilon = 0,1; 0,3; 0,5$, кут орієнтації β якої змінювали від 5°C до 175°C . Значення експлуатаційних параметрів для системи «колесо-рейка» обрали такі: коефіцієнт тертя проковзування в контакті кочення $f_s = 0; 0,1; 0,3$ та коефіцієнт тертя між берегами тріщини в рейці $f_c = 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7$.

Дослідження розмаху КІН ΔK_{II} провели за фіксованого коефіцієнта тертя між колесом і рейкою $f_s = 0,1$ для різних відносних довжин тріщини $\varepsilon = l/a$ (рис. 3), а також, коли зафіксовано відносну довжину тріщини $\varepsilon = 0,3$ – для різних коефіцієнтів тертя f_s між колесом і рейкою (рис. 4).

Спільною властивістю для кривих на графіках (див. рис. 3, 4) є наявність двох максимумів ΔK_{II} за кутів $\beta = \beta_1^*$ і $\beta = \beta_2^*$, які відповідають найсприятливішим орієнтаціям для росту зсувної тріщини, яка нахилена або в бік напрямку руху колеса (коли кут $\beta = \beta_2^* > \pi/2$ – пологий), або ж у напрямі, близькому до перпендикулярного (коли кут $\beta = \beta_1^* \leq \pi/2$). Як видно з рис. 3, зі збільшенням відносної довжини тріщини ε ($0 < \varepsilon \leq 0,5$) значення обох максимумів ΔK_{II} збільшуються. Очевидно, що при подальшому збільшенні величини ε наступить такий момент, коли і $|K_{II}|$ і максимуми ΔK_{II} будуть зменшуватися, оскільки вершина тріщини віддалятиметься від межі півплощини, де діє герцівське навантаження. Обидва максимуми ΔK_{II} суттєво збільшуються також зі збільшенням коефіцієнта тертя f_s в контакті кочення (див. рис. 4). Зокрема для кута $\beta = \beta_2^*$ при $\varepsilon = 0,3$ зі збільшенням коефіцієнта тертя f_s у контакті кочення від 0,1 до 0,3 величина $\Delta K_{II}(\beta_2^*)$ зростає в 2,5 рази для $f_c = 0,3$ і в 2,6 рази для $f_c = 0,5$. Це важливо знати, оскільки відомо [3], що кое-

фіцієнт тертя $f_s = 0,1$ відповідає тертю між колесом і рейкою за вологої погоди, а $f_s = 0,3$ – за сухої погоди. Отже, зміна погодних умов суттєво змінює величину розмаху ΔK_{II} для поверхневих тріщин у рейках.

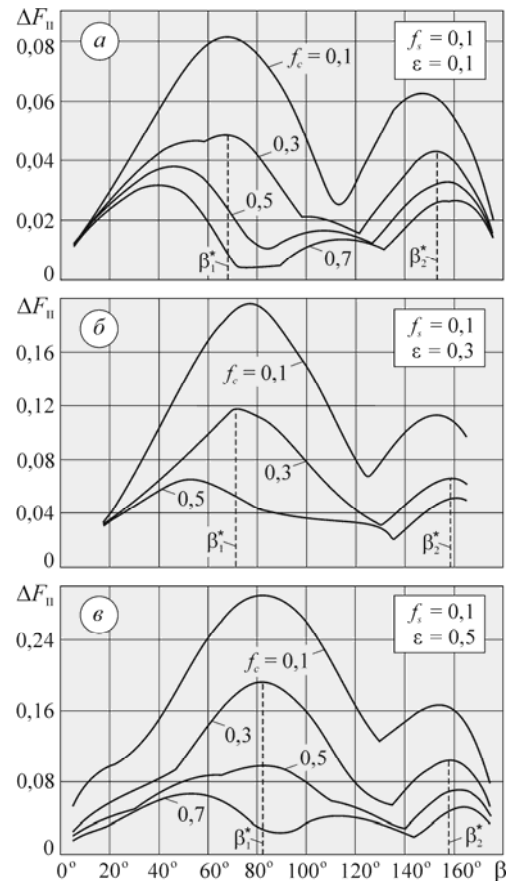


Рис. 3. Залежність нормованого розмаху КІН $\Delta F_{II} = \Delta K_{II} / (p_0 \sqrt{\pi a})$ від кута β орієнтації тріщини для різних її відносних довжин $\varepsilon = l/a$, $f_s = 0,1$: а – $\varepsilon = 0,1$; б – $\varepsilon = 0,3$; в – $\varepsilon = 0,5$

Fig. 3. Dependence of normalized range of SIF $\Delta F_{II} = \Delta K_{II} / (p_0 \sqrt{\pi a})$ on angle β of crack orientation for various relative lengths $\varepsilon = l/a$, $f_s = 0,1$: а – $\varepsilon = 0,1$; б – $\varepsilon = 0,3$; в – $\varepsilon = 0,5$

Залежності $\Delta K_{II}(\beta, f_s, f_c, \varepsilon)$ на рис. 3 і 4 свідчать, що суттєвий вплив на величину ΔK_{II} має також коефіцієнт тертя f_c між контактуючими берегами тріщини: зі збільшенням тертя між берегами ΔK_{II} значно зменшуються. Так, наприклад, якщо порівнювати значення максимумів ΔK_{II} при коефіцієнті тертя $f_c = 0,1$ з від-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

повідними значеннями, коли $f_c = 0,5$ (див. рис. 4, б; $f_s = 0,1$ і $\varepsilon = 0,3$) для обох кутів $\beta = \beta_1^*$ і $\beta = \beta_2^*$, то бачимо, що таке посилення тертя викликає зменшення $\Delta K_{II}(\beta_1^*)$ в 2,7 рази, а $\Delta K_{II}(\beta_2^*)$ в 2,2 рази. Таким чином, прогнозування експлуатаційного ресурсу (довговічності) рейки без урахування наявного тертя між берегами тріщини може бути помилковим [3].

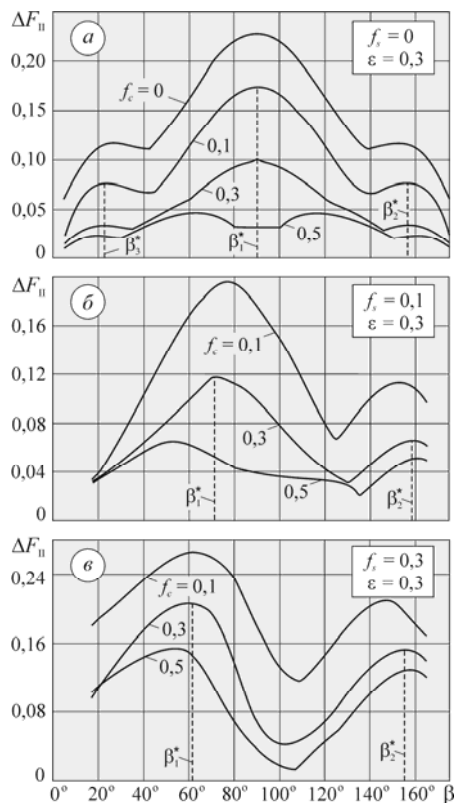


Рис. 4. Залежність нормованого розмаху КІН $\Delta F_{II} = \Delta K_{II} / (p_0 \sqrt{\pi a})$ від кута β орієнтації тріщини для різних коефіцієнтів тертя f_s між колесом і рейкою, $\varepsilon = l/a = 0,3$: а – $f_s = 0$; б – $f_s = 0,1$; в – $f_s = 0,3$

Fig. 4. Dependence of normalized range of SIF $\Delta F_{II} = \Delta K_{II} / (p_0 \sqrt{\pi a})$ on angle β of crack orientation for various friction coefficient f_s between wheel and rail, $\varepsilon = l/a = 0,3$: а – $f_s = 0$; б – $f_s = 0,1$; в – $f_s = 0,3$

І, на кінець, перейдемо до головного питання про виявлення кута, найсприятливішого для поширення зсувних поверхневих тріщин в головці рейки. Не дуже зрозуміло, яким буде цей кут: $\beta = \beta_1^*$ чи $\beta = \beta_2^*$. Так, зі збільшенням кое-

фіцієнта тертя f_s і зменшенням відносної довжини ε тріщини різниця між максимумами $\Delta K_{II}(\beta_1^*)$ і $\Delta K_{II}(\beta_2^*)$ суттєво зменшується. Важливим є і те, що кут β_2^* стабільніший (мало змінюється), ніж β_1^* по відношенню до зміни довжини тріщини, а також коефіцієнта тертя f_s між колесом та рейкою.

На перший погляд виглядає, що найсприятливішим кутом поширення зсувної тріщини є кут $\beta = \beta_1^*$. Але якщо до цих досліджень додатково провести розрахунок величини $\max K_{I0}$, який контролює ріст тріщини за розривним механізмом, то виявляється, що $\max K_{I0}(\beta_1^*) > \max K_{I0}(\beta_2^*)$ (табл. 1; $f_s = 0,3$; $\varepsilon = 0,5$). Крім того, значення величин $\max \Delta K_{II}$, що відповідають найсприятливішим для поширення тріщини за зсувним механізмом напрямкам (кути β_1^* і β_2^*), порівнювали з пороговими значеннями характеристик циклічної тріщиностійкості на поперечний зсув $K_{II,th} = 13,01 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$, а знайдені значення $\max K_{I0}$ – із пороговими (на розрив) $K_{I,th} = 4,3 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ для рейкових сталей [7].

Таблиця 1

Порівняння двох механізмів руйнування за критичних кутів β_k^* ($k = 1, 2$) орієнтації крайової тріщини; $f_s = 0,3$; $\varepsilon = 0,5$; $p_0 = 1100 \text{ МПа}$; $a = 7 \text{ мм}$

Table 1

Comparison of two mechanisms of destruction for critical angles β_k^* ($k = 1, 2$) of the orientation of the edge crack; $f_s = 0,3$; $\varepsilon = 0,5$; $p_0 = 1100 \text{ МПа}$; $a = 7 \text{ mm}$

f_c	k	β_k^*	$\max \Delta K_{II}$	$\max K_{I0}$
			$\text{МПа} \sqrt{\text{м}}$	
0,1	1	68°	55,45	9,30
	2	152°	39,35	8,23
0,3	1	66°	41,87	9,35
	2	160°	27,06	8,37
0,5	1	64°	28,62	9,41
	2	162°	21,98	8,08

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Як бачимо, тріщини, що найближчі до вертикальних (орієнтовані під кутами $\beta = \beta_1^*$), більш схильні розвиватися за розривним механізмом у порівнянні з пологими тріщинами ($\beta = \beta_2^*$) за даних значень параметрів ε , f_c , f_s і p_0 . Таким чином, напрям під кутом $\beta = \beta_2^* \approx 150^\circ \dots 160^\circ$ є сприятливішим для росту зсувної тріщини у порівнянні з напрямом під кутом $\beta = \beta_1^*$. Додамо також, що отримані результати добре узгоджуються з інженерними та експериментальними даними.

Отже, з урахуванням отриманих числових даних і вищенаведених міркувань, кут $\beta = \beta_2^*$ вважатимемо характеристичним і пропонуємо визначати цей кут, виходячи з таких умов:

$$\frac{\partial}{\partial \beta} [\Delta K_{II}(\beta, l, p_0, f_s, f_c)]_{\beta=\beta_k^*} = 0, \quad k = 1, 2; \quad (13)$$

$$\Delta K_{II}(\beta_2^*, l, p_0, f_s, f_c) > \Delta K_{II,th}; \quad (14)$$

$$\max K_{I\theta}(\beta_1^*, l, p_0, f_s) < \max K_{I\theta}(\beta_1^*, l, p_0, f_s); \quad (15)$$

$$\max K_{I\theta}(\beta_1^*, l, p_0, f_s) > \Delta K_{I,th}, \quad (16)$$

де параметри l, p_0, f_s і f_c – фіксовані. Аналіз таких контактно-втомних пошкоджень, як пітинг (див. рис. 1, а), ліва вітка «нори» (див. рис. 1, б), «риски» (див. рис. 1, в) показує, що ці пошкодження починаються власне із крайової тріщини, яка нахилена під характеристичним кутом.

Слід додати, що для окремого випадку коефіцієнта тертя в контактї між колесом і рейкою $f_s = 0$ крива $\Delta K_{II}(\beta)$ має ще один додатковий максимум, а отже, маємо ще один сприятливий напрям для поширення тріщини зсувом, коли $\beta = \beta_3^* = 15^\circ - 20^\circ$ (рис. 4, а). Тут висловимо припущення, що за $f_s = 0$ (наприклад, коли колеса вагонів котяться за інерцією) створюються умови для виникнення правої вітки пошкодження типу «нора» (див. рис. 1, б).

Наукова новизна та практична значимість

Вперше, на відміну від інших робіт, на основі отриманих числових даних теоретично встановлено величину характеристичного кута, під яким формуються на початковій стадії поверхневі контактно-втомні пошкодження в головці залізничної рейки від дії коліс. Отримані дані дозволяють прояснити природу поверхневих пошкоджень рейок за різних умов експлуатації залізничної колії.

Висновки

Теоретично встановлено наявність характеристичного кута поширення поверхневих тріщин в головці рейки за механізмом поперечного зсуву і записано умови для його визначення. Цей кут є базовим у формуванні типових поверхневих контактно-втомних пошкоджень, таких, як пітинг, «риски», ліва вітка «нори» тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Агарков, О. В. Аналіз проблематики утворення дефектів в рейках залізничної колії / О. В. Агарков // Вісн. нац. трансп. ун-ту : наук.-техн. зб. – Київ, 2013. – № 28. – С. 3–8.
- Вплив стискальних залишкових напружень на поширення зсувних поверхневих тріщин у залізничних рейках / О. П. Дацишин, Г. П. Марченко, А. Ю. Глазов, А. Б. Левус // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2015. – № 2. – С. 83–90.
- Дацишин, О. П. Довговічність і руйнування твердих тіл під час їх контактної циклічної взаємодії / О. П. Дацишин // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2005. – № 6. – С. 5–25.
- Йосифович, Р. М. Дослідження залишкового ресурсу дефектних рейок типу Р50 із випробуванням на циклічну витривалість // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 78–87. doi: 10.15802/stp2015/57027.
- 3D characterization of rolling contact fatigue crack networks / C. Jessop, J. Ahlstrom, L. Hammar [et al.] // Wear. – 2016. – Vol. 366–367. – P. 392–400. doi: 10.1016/j.wear.2016.06.027.
- Beghini, M. An application of the weight function technique to inclined surface cracks under rolling contact fatigue, assessment and parametric analysis / M. Beghini, C. Santus // Engineering Fracture Mechanics. – 2013. – Vol. 98. – P. 153–168. doi: 10.1016/j.engfracmech.2012.10.024.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

7. Datsyshyn, O. P. The model of the residual life time estimation of trybojoint elements by formation criteria of the typical contact fatigue damages / O. P. Datsyshyn, V. V. Panasyuk, A. Yu. Glazov // Intern. J. of Fatigue. – 2016. – Vol. 83, pt. 2. – P. 300–312. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2015.10.026.
8. Fletcher, D. I. Rail rolling contact fatigue dependence on friction, predicted using fracture mechanics with a three-dimensional boundary element model / D. I. Fletcher, L. Smith, A. Kapoor // Engineering Fracture Mechanics. – 2009. – Vol. 76. – Iss. 17. – P. 2612–2625. doi: 10.1016/j.engfracmech.2009.02.019.
9. Keer, L. M. A pitting model for rolling contact fatigue / L. M. Keer, M. D. Bryant // Transactions of the ASME : J. of Lubrication Technology. – 1983. – Vol. 105. – Iss. 2. – P. 198–205. doi: 10.1115/1.3254565.
10. Miller, K. J. Structural integrity – whose responsibility? / K. J. Miller // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part L : J. of Materials Design and Applications. – 2003. – Vol. 217. – Iss. 1. – P. 1–21. doi: 10.1243-/14644200360539391.
11. Modelling wear and rolling contact fatigue: Parametric study and experimental results / G. Trummer, C. Marté, S. Scheriau [et al.] // Wear. – 2016. – Vol. 366–367. – P. 71–77. doi: 10.1016/j.wear.-2016.04.024.
12. Murakami, Y. Mechanism of rolling contact fatigue and measurement of ΔK_{Ith} for steels / Y. Murakami, C. Sakae, S. Hamada // Engineering Against Fatigue : Proceedings of the Conference. – Rotterdam, 1999. – P. 473–485.
13. Ringsberg, J. W. On propagation of short rolling contact fatigue cracks / J. W. Ringsberg, A. Bergkvist // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 2003. – Vol. 26. – Iss. 10. – P. 969–983. doi: 10.1046/j.1460-2695.2003.00657.x.
14. Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions / L. Ma, C. G. He, X. J. Zhao [et al.] // Wear. – 2016. – Vol. 366–367. – P. 13–26. doi: 10.1016/j.wear.2016.04.028.
15. The competitive role of wear and RCF in a rail steel / G. Donzella, M. Faccoli, A. Ghidini [et al.] // Engineering Fracture Mechanics. – 2005. – Vol. 72. – Iss. 2. – P. 287–308. doi: 10.1016/j.-engfracmech.2004.04.011.
16. Zerbst, U. Damage tolerance investigations on rails / U. Zerbst, M. Schödel, R. Heyder // Engineering Fracture Mechanics. – 2009. – Vol. 76. – Iss. 17. – P. 2637–2653. doi: 10.1016/j.engfracmech.2008.-04.001.

А. П. ДАЦЫШИН¹, Г. П. МАРЧЕНКО^{2*}, А. Ю. ГЛАЗОВ³

¹Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, ул. Научная, 5, Львов, Україна, 79601, тел./факс +38 (032) 263 73 34, ел. пошта datsyshy@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0003-0364-148X

^{2*}Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, ул. Научная, 5, Львов, Україна, 79601, тел./факс +38 (032) 263 73 34, ел. пошта mhp@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0003-0767-4561

³Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, ул. Научная, 5, Львов, Україна, 79601, тел./факс +38 (032) 263 73 34, ел. пошта glazov@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0002-7664-4879

О ПОВЕРХНОСТНОМ РАЗРУШЕНИИ ГОЛОВОК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Цель. Образование трещиноподобных дефектов в рельсах железнодорожного пути является серьезной проблемой для инженерной практики из-за опасности создания аварийных ситуаций. Целью этой работы есть теоретическое установление характеристического угла распространения поверхностных трещин в головках железнодорожных рельсов, который является главным фактором в формировании типичных поверхностных контактно-усталостных повреждений, таких как «питтинг», «черточки», «нора» и т. п. Необходимо также найти условия для определения этого угла. **Методика.** Исследования проводили на основании метода сингулярных интегральных уравнений. Поврежденный поверхностной трещиной рельс моделировали как полуплоскость с краевым разрезом, а действие колеса на рельс – как однонаправленное повторное поступательное перемещение вдоль края полуплоскости с герцевскими контактными усилиями, с касательной составляющей. Задачу определения коэффициентов интенсивности напряжений вблизи вершины трещины в головке рельса свели к системе двух действительных сингулярных интегральных уравнений, которые решили численно – методом механических квадратур Гаусса-Чебышева. Сложность задачи состоит в том, что границы участков контакта и раскрытия берегов трещины заранее неизвестны и меняются во время перемещения модельных контактных усилий. Эти границы определяли одновременно с решением интегральных уравнений задачи по дополнительным условиям методом итераций. **Результаты.** Теоретически установлено нали-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

чие в головке рельса характеристического угла распространения поверхностных трещин по механизму поперечного сдвига и записаны условия для его определения. Полученные результаты хорошо согласуются с инженерными и экспериментальными данными. **Научная новизна.** Впервые теоретически найдены величины характеристического угла, под которым на начальной стадии распространяются поверхностные контактно-усталостные трещины в головке железнодорожного рельса от действия колес. Также записаны условия для определения этого угла. **Практическая значимость.** Полученные данные имеют важное значение для инженерной практики, поскольку выявляют природу поверхностных контактно-усталостных дефектов рельсов при разных условиях эксплуатации железнодорожного пути и позволяют прогнозировать их контактную прочность и долговечность.

Ключевые слова: железнодорожный рельс; герцевская нагрузка; трение; сдвиговая трещина; коэффициенты интенсивности напряжений; характеристический угол

O. P. DATSYSHYN¹, H. P. MARCHENKO^{2*}, A. Y. GLAZOV³

¹Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, 5, Lviv, Naukova St., Ukraine, 79601, tel./fax +38 (032) 263 73 34, e-mail datsyshy@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0003-0364-148X

^{2*}Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, 5, Lviv, Naukova St., Ukraine, 79601, tel./fax +38 (032) 263 73 34, e-mail mhp@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0003-0767-4561

³Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, 5, Lviv, Naukova St., Ukraine, 79601, tel./fax +38 (032) 263 73 34, e-mail glazov@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0002-7664-4879

ON SURFACE FRACTURE OF RAIL HEADS

Purpose. The formation of crack-like defects in rails of railway tracks is a serious problem for engineering practice because of the danger of creating emergency situations. The purpose of this work is to establish theoretically the characteristic angle of propagation of surface cracks in the rail heads of railway rails, which is basic in the formation of typical surface contact fatigue damages, such as pitting, «checks» and «squat». It is also necessary to find the conditions for determining this angle. **Methodology.** The investigations were carried out on the basis of the method of singular integral equations. The rail damaged by the surface crack was modeled with a half-plane with an edge cut, and the action of the wheel on the rail by unidirectional repeated translational movement along the edge of the half-plane of the Hertzian contact forces with the tangential component. The problem of determining the stress intensity factors in the vicinity of the crack tip in the rail head was reduced to a system of two real singular integral equations which were solved numerically by the Gauss-Chebyshev mechanical quadrature method. The complexity of the problem consists in the fact that the boundaries of the contact areas and the opening of the crack faces are unknown beforehand and they change when the model contact forces move. These boundaries were determined simultaneously with solving the integral equations of the problem from additional conditions by the iteration method. **Findings.** The presence of the characteristic angle of propagation of mode II surface cracks in the rail head has been established theoretically and the conditions for its determination have been put down. The results obtained are in good agreement with engineering and experimental data. **Originality.** For the first time, the values of the characteristic angle were theoretically determined, under which at the initial stage, the surface contact fatigue cracks propagate in the head of the railway rail under the action of the wheels. Conditions for determining this angle have been also put down. **Practical value.** The received data are of great importance for engineering practice, since they reveal the nature of surface contact fatigue defects under various operating conditions and allow to predict their contact strength and durability.

Keywords: railway rail; Hertzian load; friction; shear crack; stress intensity factors; characteristic angle

REFERENCES

1. Agarkov, O. V. (2013). The analysis of terms of rail crack creation. *Herald of National Transport University*, 28, 3-8.
2. Datsyshyn, O. P., Marchenko, H. P., Glazov, A. Y., & Levus, A. B. (2015). The effect of compressing residual stresses on the propagation of shear surface cracks in railway rails. *Physicochemical Mechanics of Materials*, 51(2), 83-90.
3. Datsyshyn, O. P. (2005). Durability and fracture of solids during their contact cyclical interaction. *Physicochemical Mechanics of Materials*, 6, 5-25.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

4. Yosyfovych, R. M. (2015). Residual resource study of defective rails for type P50 cycle test of endurance. *Science and Transport Progress*, 6(60), 78-87. doi:10.15802/stp2015/57027
5. Jessop, C., Ahlstrom, J., Hammar L., Faster S., & Danielsen, H. K. (2016). 3D characterization of rolling contact fatigue crack networks. *Wear*, 366-367, 392-400. doi:10.1016/j.wear.2016.06.027
6. Beghini, M., & Santus, C. (2013). An application of the weight function technique to inclined surface cracks under rolling contact fatigue, assessment and parametric analysis. *Engineering Fracture Mechanics*, 98, 153-168. doi:10.1016/j.engfracmech.2012.10.024
7. Datsyshyn, O. P., Panasyuk, V. V., & Glazov, A. Y. (2016). The model of the residual life time estimation of trybojoint elements by formation criteria of the typical contact fatigue damages. *International Journal of Fatigue*, 83(2), 300-312. doi:10.1016/j.ijfatigue.2015.10.026
8. Fletcher, D. I., Smith, L., & Kapoor, A. (2009). Rail rolling contact fatigue dependence on friction, predicted using fracture mechanics with a three-dimensional boundary element model. *Engineering Fracture Mechanics*, 76, 2612-2625. doi:10.1016/j.engfracmech.2009.02.019
9. Keer, L. M., & Bryant, M. D. (1983). A pitting model for rolling contact fatigue. *Transactions of the ASME: Journal of Lubrication Technology*, 7(2), 198-205. doi:10.1115/1.3254565
10. Miller, K. J. (2003). Structural integrity – whose responsibility? *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 217(1), 1-21. doi:10.1243/14644200360539391
11. Trummer, G., Marte, C., Scheriau, S., Dietmaier, P., Sommitsch, C., & Six, K. (2016). Modelling wear and rolling contact fatigue: Parametric study and experimental results. *Wear*, 366-367, 71-77. doi:10.1016/j.wear.2016.04.024
12. Murakami, Y., Sakae, C., & Hamada, S. (1999). Mechanism of rolling contact fatigue and measurement of ΔK_{Ith} for steels. *Engineering Against Fatigue*. (pp. 473-485). Rotterdam: A. A. Balkema.
13. Ringsberg, J. W., & Bergkvist, A. (2003). On propagation of short rolling contact fatigue cracks. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 26(10), 969-983. doi:10.1046/j.1460-2695.2003.00657.x
14. Ma, L., He, C. G., Zhao, X. J., Guo, J., Zhu, Y., Wang, W. J., & ... Jin, X. S. (2016). Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions. *Wear*, 366-367, 13-26. doi:10.1016/j.wear.2016.04.028
15. Donzella, G., Faccoli, M., Ghidini, A., Mazzu, A., & Roberti, R. (2005). The competitive role of wear and RCF in a rail steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 72(2), 287-308. doi:10.1016/j.engfracmech.2004.04.011
16. Zerbst, U., Schödel, M., & Heyder R. (2009). Damage tolerance investigations on rails. *Engineering Fracture Mechanics*, 76 (17), 2637-2653. doi:10.1016/j.engfracmech.2008.04.001

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. І. М. Дмитрахом (Україна);
д.т.н., проф. М. Б. Курганом (Україна)

Надійшла до редколегії: 06.04.2017

Прийнята до друку: 12.07.2017

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 004.822

Г. М. КОРОТЕНКО^{1*}, Л. М. КОРОТЕНКО^{2*}, А. Т. ХАРЬ^{3*}

^{1*}Каф. «Геоінформаційні системи», Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (050) 671 22 68,
эл. почта gkorotenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-3774-5260

^{2*}Каф. «Программное обеспечение компьютерных систем», Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (050) 985 61 99,
эл. почта leonid_korotenko@ukr.net, ORCID 0000-0002-2236-0205

^{3*}Каф. «Программное обеспечение компьютерных систем», Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (099) 777 05 75,
эл. почта alenah@ukr.net, ORCID 0000-0003-3176-7792

СОЗДАНИЕ ИТ-ОРИЕНТИРОВАННОГО ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ФРЕЙМВОРКА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ НА ОСНОВЕ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ

Цель. С учетом расширения сфер применения компьютеринга возникает необходимость выявления связей между постоянно зарождающимися требованиями к профессиональным компетентностям и новыми разделами знаний компьютеринга для совершенствования процесса формирования новых образовательных программ. **Методика.** Авторами предлагается подход, направленный на построение специализированных баз знаний, формируемых с использованием технологий искусственного интеллекта и ориентированных на работу с множеством разнородных ресурсов или источников данных по определенной образовательной тематике. Как инструмент, обеспечивающий формирование базовых онтологий, используется редактор онтологий Protégé 4.2. В качестве одного из модулей разработанной системы семантического анализа, обеспечивающего доступ к онтологии понятия и возможность ее обработки, должен использоваться Java-фреймворк Apache Jena, который формирует программную среду для работы с данными в форматах RDF, RDFS и OWL, а также поддерживает возможность формирования запросов к онтологии на языке SPARQL. Особенностью данного подхода является связывание информационных ресурсов трехплатформного представления дисциплинарной структуры в контексте выявления связей между профессиональными компетентностями. **Результаты.** Разработаны модель и структура ИТ-ориентированного онтологического фреймворка, предназначенного для обеспечения конвергенции компонентов трехплатформенной информационно-коммуникационной среды ВУЗа. Сформирована структура онтологии – основы базы знаний, описывающей ключевые особенности образовательных стандартов отрасли «Информационные технологии». **Научная новизна.** В рамках проектирования и формирования структуры отрасли дисциплины «Информационные технологии», в контексте компетентностного подхода к образованию, предлагается архитектура системы семантического анализа дескрипторов компетентностей, реализующая алгоритм интеграции онтологической и продукционной моделей представления знаний об исследуемой предметной области. **Практическая значимость.** Предлагаемый подход позволяет систематизировать контент, структуру и связи компонентов области информационных технологий для корректировки спектра формируемых компетентностей при разработке образовательных программ подготовки ИТ-специалистов в университете, с учетом расширения сфер применения компьютеринга.

Ключевые слова: компьютеринг; компетентности; информационные технологии; третья платформа; связи; онтология; дисциплинарная структура; дескриптор

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Введение

Нарастающие процессы глобализации и потребности в мобильности трудовых ресурсов, развитии всех форм обучения в течение жизни вызывают необходимость радикальных изменений в сфере высшего профессионального образования, направленных на удовлетворение требований компетентностного подхода при формировании образовательных программ [8].

Для достижения нового уровня и качества инженерного образования в работе [8] предлагается модель гармонизации комплексного взаимодействия трех составляющих: Инженерное образование – Наука – Промышленность.

На основе данного подхода авторами работы [1] сформирована модель мультидисциплинарного, мульти-технологического, отраслецентрического подхода по диверсификации междисциплинарных компетентностей, формирование которых призвано обеспечить инновационную компоненту в образовательном процессе.

Для области компьютеринга, сущность которого можно кратко сформулировать как «любая деятельность технической природы, которая применяет компьютеры», распространение информации о деятельности носит глобальный характер, поэтому внедрение унифицированных требований к интегральной компетентности [4] IT-специалистов в процессе соответствия профессиональных и образовательных стандартов уже много лет является актуальной задачей образования всех стран [5, 7].

В то же время необходимо принимать во внимание тот факт, что одним из основных факторов, существенно влияющих на процесс повышения качества образования, является ведущий технологический тренд развития IT-отрасли, известный под названием «Третья платформа» [13, 15], определяемый как конвергенция и взаимное усиление четырех взаимозависимых тенденций: социального взаимодействия, мобильности, облачных технологий и информации.

Цель

Целью данной работы является создание IT-ориентированного онтологического фреймворка для целей формирования образователь-

ных программ на основе компетентностей дисциплинарной структуры по разделам знаний компьютеринга, который включает в себя проектирование, разработку и создание аппаратных и программных систем; обработку, структурирование и управление различными видами информации; проведение научных исследований с использованием компьютеров; интеллектуальное управление компьютерными системами; создание и использование средств коммуникации и развлечений.

Методика

Постановка задачи. Развитие современных цифровых технологий и коммуникаций характеризуется стремительно растущим количеством подключаемых к Интернету мобильных устройств, а также разнообразных бытовых приборов, домашних систем и датчиков, взаимодействующих друг с другом посредством инфракрасных, беспроводных, силовых и слабых коммуникационных сетей, получивших название «Интернет-вещей» (Internet of Things -IoT). Рост объема данных, генерируемых различными устройствами, требует обеспечения удобного сетевого доступа по требованию к некоторому общему фонду конфигурируемых сетевых вычислительных ресурсов для обеспечения облачных вычислений (Cloud Computing), применяемых для решения комплексных аналитических задач с помощью технологий больших данных [18]. Под терминами «Большие данные», «Big Data» или просто «биг дата» скрывается огромный объем перманентно накапливающейся разнородной информации, настолько значительный, что его обработка стандартными программами представляется крайне сложной. Проблема хранения и обработки взаимопроникающих структурированных и неструктурированных разноформатных компонентов данных приводит к невозможности оперативного внесения семестровых корректировок в программы дисциплин и учебные планы области компьютерных наук. Данная ситуация усложняется расширением и усложнением внутреннего «наполнения» междисциплинарного технологического базиса преподаваемого контента, опирающегося на комплекс стремительно расширяющих свои границы базовых технологий: интернет- и веб-технологий, мультимедийных, сете-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

вых, беспроводных, облачных, мобильных, телекоммуникационных, офисных, корпоративных, защиты информации и данных, геоинформационных, дистанционного зондирования Земли, статистических, управления, технологий искусственного интеллекта, технологий программирования и др.

Решение задачи. Для решения данной проблемы предлагается подход, направленный на построение специализированных баз знаний, ориентированных на работу со множеством разнородных ресурсов (или источников данных) по определенной образовательной тематике, особенностью которого является связывание информационных ресурсов трехплатформного представления структуры дисциплины с постоянно прогрессирующими профессиональными требованиями к интегральной компетентности.

При этом следует отметить, что в современном, динамично развивающемся пространстве создания и применения все новых и новых цифровых технологий, наиболее активными организациями, постоянно расширяющими границы свода знаний (Body of Knowledge, BOK) о них, и, соответственно, компетентностей в данной области, являются организационные структуры США: Ассоциация вычислительной техники (Association for Computing Machinery, ACM) и Институт инженеров электротехники и электроники (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) [6, 9–11]. Согласно их дифференциации направлений подготовки, соотносящихся с характером деятельности IT-специалистов различных направлений, выделены следующие пять базовых профилей (называемых в документе CC 2005 [11] поддисциплинами): Компьютерные науки – Computer Science (CS), Компьютерная инженерия – Computer Engineering (CE), Программная инженерия – Software Engineering (SE), Информационные системы – Information Systems (IS), Информационные технологии – Information Technology (IT). Каждый из этих профилей призван объединить учебные курсы для подготовки студентов с целью приобретения ими соответствующих компетентностей в области компьютеринга [10].

Вместе с тем, уже в 2013 году, в документе CS2013 [12], разработанном вышеуказанными организациями, было показано, что развитие компьютерных наук потребовало введения

в BOK новых областей знаний (Knowledge Area, KA), повлекшие необходимость освоения учащимися новых требований и изменения некоторых старых компетентностей. Среди этих новых областей следует отметить следующие [12]: информационная безопасность и защита информации – Information Assurance and Security (IAS), сетевое оборудование и связь – Networking and Communication (NC), платформенно-ориентированная разработка – Platform-Based Development (PBD), параллельный и распределенный компьютеринг – Parallel and Distributed Computing (PD), основы разработки программного обеспечения – Software Development Fundamentals (SDF), основы функционирования систем – Systems Fundamentals (SF).

В то же время, одним из последних документов Кабинета Министров Украины [3], регламентирующим список специальностей области знаний 12 «Информационные технологии», представлен набор, не в полной мере соответствующий базовому профилю CC 2005 (рис. 1).

Кроме того, следует отметить разницу в толковании понятия компетентности разными организациями и многими авторитетными авторами [12]. Так, например, в совместном документе Департамента труда США (U.S. Department of Labor), ACM и IEEE в описании Модели компетентностей в Информационных технологиях (Information Technology Competency Model, ITCM) [14] в сферу компетентностей включены знания (knowledge), навыки (практические умения) (skills) и способности (abilities), как ключевые качества, необходимые специалистам для успешной работы в области применения компьютеринга и новых информационных технологий.

В Национальных рамках квалификаций Украины (НРКУ) компетентность / компетентности определяются как «способность лица к выполнению определенного вида деятельности, выражающееся через знание, понимание, умение, ценности и иные личные качества» [4].

Следовательно, наблюдается рассогласование представлений в первом и втором представлениях о компетентностях (рис. 2). В связи с вышеуказанными сложностями подход к решению сложной задачи учета взаимодействия и влияния связей между разными уровнями

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

компетентностей досліджувалася в роботі [16], где в качестве решения предлагалась методика выполнения многошаговой процедуры: 1) концептуализация; 2) планирование; 3) сбор данных; 4) анализ данных и создание каталога

компетентностей; 5) разработка образовательной программы на основе компетентностей и 6) разработка приложений и пилотных тестов [16].

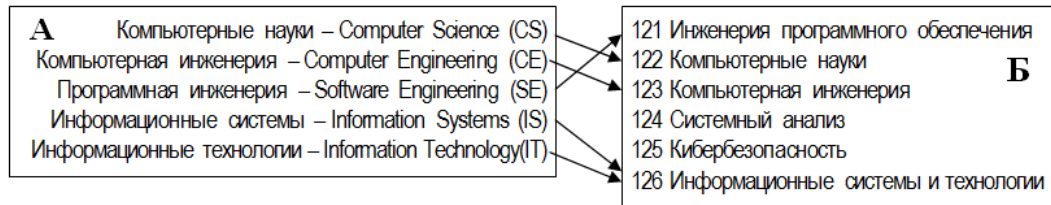


Рис. 1. Связь между базовыми профилями (дисциплинами) CC2005 (А) и специальностями области знаний 12 «Информационные технологии» (Б)

Fig. 1. Communication between the base profiles (disciplines) CC2005 (A) and the specialties of 12 «Information Technology» field of knowledge (B)



Рис. 2. Частичное соответствие компонентов компетентностей США и Украины

Fig. 2. Partial matching of the United States and Ukraine competencies components

Авторами данной работы для выявления связей между компонентами образовательного пространства предлагается подход, основанный на онтологии, применение которой позволяет обеспечить как сведение ресурсов в единое информационное пространство, так и организацию содержательного инструментария для удаленного доступа к ним [17]. Использование онтологии для построения логической модели представления знаний позволяет не только целостно представить такую трудноформализуемую предметную область как информационные технологии, но и обеспечить единое понимание терминов и понятий в данной поддисциплине, организовать и формализовать имеющиеся знания, реализовать функции справочного и обучающего инструмента.

Результаты

В рамках решаемой задачи онтологического анализа дескрипторов, характеризующих компетентности отрасли знаний «Информационные технологии», предлагается выполнить следующие

шаги [17, 2].

1. Осуществить построение OWL-онтологий выбранной проблемной области с помощью инструмента создания онтологий – редактора онтологий Protégé 4.2. Для проверки онтологий на согласованность необходимо использовать логическую машину вывода (т. н. резонер, reasoner – Pellet).

2. Выполнить составление набора продуктивных правил в формате языка правил семантического веба SWRL (Semantic Web Rule Language), включенных в файл онтологий проблемной области.

3. Спроектировать и разработать систему семантического анализа дескрипторов, реализующей алгоритм интеграции онтологической и продукционной моделей представления знаний об отрасли знаний «Информационные технологии». Разработанная онтология анализа дескрипторов компетентностей должна храниться совместно с набором SWRL-правил, которые играют роль драйвера в процессе логического вывода и непосредственно связаны с

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

предметной областью, описанной в онтологии – отрасли знаний «Информационные технологии». В качестве модуля разработанной системы семантического анализа, обеспечивающего доступ к онтологии и возможность ее обработки, должен использоваться Java-фреймворк Apache Jena, который формирует среду программ для работы с данными в форматах RDF, RDFS и OWL, а также поддерживает возможность формирования запросов к онтологии на языке SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language – язык запросов к данным, представленным по модели RDF, и протокол для передачи запросов и ответов на них). Архитектура предложенной системы онтологического анализа компетентностей представлена на рис. 3.

Ядром разработанной системы, обеспечивающим логический вывод, будет выступать

резонер Pellet, позволяющий обрабатывать знания в OWL-формате, основанном на дескрипционной логике. Процесс логического вывода, обеспечивающий выдачу пользователю экспертного заключения о компетентности по входным значениям ее дескрипторов, представленный в виде совокупности результатов обучения соответствующих дескрипторов: навыков, знаний, умений и способностей, осуществляется посредством выбора, удовлетворяющего условиям SWRL-правила, включенного в OWL-онтологию.

Входные данные, поступающие в систему онтологического анализа, должны быть унифицированы. Предлагается унификация посредством преобразования к виду RDF-троек.

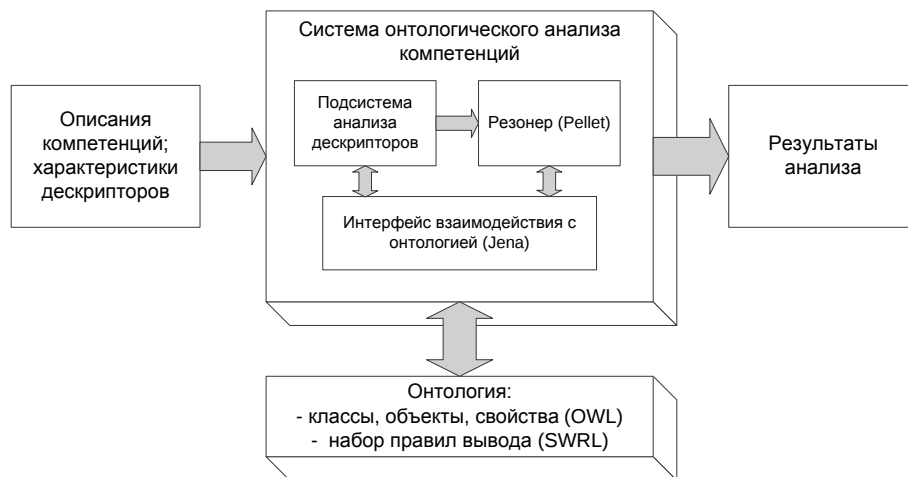


Рис. 3. Архитектура системы онтологического анализа компетентностей

Fig. 3. Architecture of the system for ontological analysis of competences

Входными данными системы будут являться:

1. Описание компетентности в виде совокупности значений дескрипторов. Результаты хранятся в виде RDF-троек (например, «Дескриптор» + «Вид» + «Содержание»). Данные значения хранятся в СУБД MySQL и соответствуют значениям объектов разработанной онтологии.

2. Данные, включающие основные характеристики дескрипторов рассматриваемых компетентностей. Данные также должны быть представлены в виде RDF-троек.

3. Экспертные OWL-онтологии, включающие формализованное описание проблемной области, а также набор SWRL-правил логического вывода рекомендаций по соответствию образовательного профиля и унификации компетентностей специалистов на национальном и мировом уровне.

В процессе логического вывода соответствующей рекомендации система должна попеременно обращаться к онтологии и к набору SWRL-правил, тем самым создавая определенную семантическую среду проведения анализа с привязкой к особенностям проблемной области, описанной в онтологии.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Визуалізація структури фрагмента онтології аналізу дескрипторів компетентностей в графічному представленні (виконана з допомогою плагіна OntoGrpf редактора онтологій Protégé 4.3) представлена на рис. 4.

Поскольку термини «знания» и «умения» используются для определения понятия «результаты обучения» в НРКУ [4] и понятий «компетентность» как в НРКУ, так и в ИТСМ, на приведенной схеме онтологии отражают одновременное представление навыков, умений и знаний, как в качестве дескрипторов компетентностей, так и в качестве результатов обучения. В то же время, понятия «знания» и «умения» могут служить связующим звеном между представлениями НРКУ и ИТСМ и уста-

навливать возможность для интероперабельности между результатами обучения и компетентностями.

Организация связей между основными классами онтологии выполнена посредством ассоциативных отношений, позволяющих понять характер взаимосвязи понятий, описывающих классы онтологии, с сущностями образовательного пространства в реальной жизни. Также, помимо ассоциативных отношений, при разработке онтологии компетентностей по отрасли знаний «Информационные технологии» использовались отношения вида «часть – целое» для определения отношения подклассов с их родительскими классами.

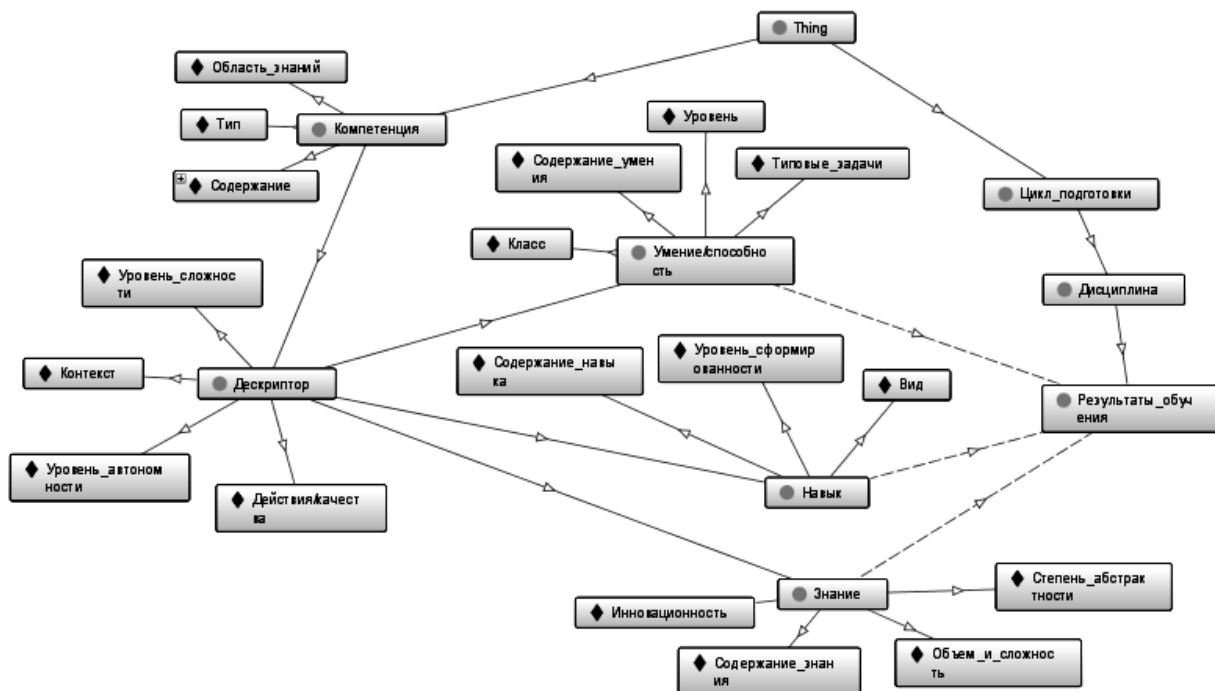


Рис. 4. Графічне представлення базових класів онтології

Fig. 4. Graph representations of base ontology classes

Научная новизна и практическая значимость

В ходе проведенного исследования были выявлены онтологические связи дескрипторов профессиональных компетентностей отрасли знаний «Информационные технологии»; предложена архитектура системы семантического анализа дескрипторов, реализующая алгоритм

интеграции онтологической и продуктивной моделей представления знаний об исследуемой предметной области.

Выводы

В рамках проектирования и формирования образовательных программ в контексте компетентностного подхода к образованию предлага-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ется многоуровневая агрегация компонентов онтологической модели представления знаний на всех этапах построения трехплатформенной информационно-коммуникационной среды ВУЗа на основе создания ИТ-ориентированного онтологического фреймворка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Диверсификация компетентностей современного студента с учетом расширения спектра применения технологий Big Data / Г. М. Коротенко, Л. М. Коротенко, И. М. Удовик, Н. Н. Самарец // Стр-во, материаловедение, машиностроение. Серия: Компьютерные системы и информ. технологии в образовании, науке и управлении : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепр, 2016. – Вып. 94. – С. 87–94.
2. Муромцев, Д. И. Онтологический инжиниринг знаний в системе Protégé [Электронный ресурс] : метод. пособие / Д. И. Муромцев. – Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2007. – 62 с. – Режим доступа: http://books.ifmo.ru/book/282/ontologicheskij_inzhiniring_znaniy_v_sisteme_PROT%C3%89G%C3%89.htm. – Загл. с экрана. – Проверено : 09.02.2017.
3. Про внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2015 р. № 266 [Электронный ресурс] : постанова Каб. Міністрів України від 1 лют. 2017 р. № 53. – Режим доступа: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/ru/53-2017-%D0%BF>. – Загл. с экрана. – Проверено : 10.02.2017.
4. Про затвердження Національної рамки кваліфікацій [Электронный ресурс] : постанова Каб. Міністрів України від 23 лист. 2011 р. № 1341. – Режим доступа: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1341-2011-%D0%BF>. – Загл. с экрана. – Проверено : 09.02.2017.
5. Разработка секторальных рамок квалификаций: методология и практика : монография / под общ. ред. Е. А. Митрофановой, В. Я. Афанасьева, С. В. Чернышенко ; Гос. ун-т управления. – Москва : Изд. дом ГУУ, 2015. – 234 с.
6. Рекомендации по преподаванию информатики в университетах : [пер. с англ.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербург. гос. ун-т, 2002. – 372 с.
7. Роль онтологій у проектуванні дисциплінарного освітнього простору ВНЗ відповідно до вимог Болонської конвенції / Б. С. Бусигін, В. О. Салов, Г. М. Коротенко [та ін.] // Науковий вісник НГУ. – 2007. – № 7. – С. 3–7.
8. Современное инженерное образование : учеб. пособие [Электронный ресурс] / А. И. Боровков, С. Ф. Бурдаков, О. И. Клявин [и др.]. – Санкт-Петербург : Изд-во политехн. ун-та, 2012. – 80 с. – Режим доступа: <http://www.csr-nw.ru/files/publications/zk5.pdf>. – Загл. с экрана. – Проверено : 10.07.2017.
9. Computing Curricula 2001 (CC 2001) [Электронный ресурс] : Final Report / The Joint Task Force on Computing Curricula, IEEE Computer Society, Association for Computing Machinery. – 2001. – Dec. 15. – 240 p. – Режим доступа: https://www.acm.org/education/curric_vols/cc2001.pdf. – Загл. с экрана. – Проверено : 09.02.2017.
10. Computing Curricula 2004 (CC 2004) [Электронный ресурс] / The Association for Computing (ACM), The Association for Information Systems (AIS), The Computer Society (IEEE-CS). – 48 p. – Режим доступа: http://www.acm.org/education/education/curric_vols/CE-Final-Report.pdf. – Загл. с экрана. – Проверено : 09.02.2017.
11. Computing Curriculum 2005 (CC 2005) [Электронный ресурс] : The Overview Report / Association for Computing Machinery (ACM), Association for Information Systems (AIS), Computer Society (IEEE-CS). – 2005. – Sept. 30. – 56 p. – Режим доступа: http://www.acm.org/education/curric_vols/CC2005-March06Final.pdf. – Загл. с экрана. – Проверено : 09.02.2017.
12. Computer Science Curricula 2013 (CS 2013). Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Science [Электронный ресурс] / Association for Computing Machinery (ACM), IEEE Computer Society. – 2013. – Dec. 20. – 518 p. – Режим доступа: <http://ai.stanford.edu/users/sahami/CS2013/final-draft/CS2013-final-report.pdf>. – Загл. с экрана. – Проверено : 09.02.2017. doi: 10.1145/2534860.
13. Gens, F. TOP 10 PREDICTIONS. IDC Predictions 2013: Competing on the 3 rd Platform [Электронный ресурс] / F. Gens. – Режим доступа: <https://abdullahnabulsi.files.wordpress.com/2013/01/i-d-c-p-r-e-d-i-c-t-i-o-n-s-2-0-1-3-c-o-m-p-e-t-i-n-g-o-n-t-h-e-3-r-d-p-l-a-t-f-o-r-m.pdf>. – Загл. с экрана. – Проверено : 26.11.2016.
14. Information Technology Competency Model of Core Learning Outcomes and Assessment for Associate-Degree Curriculum [Электронный ресурс] / E. K. Hawthorne, R. D. Campbell, C. Tang, C. S. Tucker, J. Nichols. – New York : The Association for Computing Machinery, 2014. – 97 p. – Режим доступа:

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- <http://csecc.acm.org/files/publications/ACMITCompetencyModel14October201420150114T180322.pdf>. – Загл. с екрана. – Проверено : 09.02.2017. doi: 10.1145/2686614.
15. Kwang, K. 'Third platform' shift triggers enterprise software evolution | ZDNet. ZDNet. Retrieved 2016-01-01 [Електронний ресурс] / K. Kwang. – Режим доступа: <http://www.zdnet.com/article/third-platform-shift-triggers-enterprise-software-evolution>. – Загл. с екрана. – Проверено : 26.11.2016.
 16. Nikolov, R. Competence based framework for curriculum development [Електронний ресурс] / R. Nikolov, E. Shoikova, E. Kovatcheva. – 2014. – 37 р. – Режим доступа: https://unesco.unibit.bg/sites/default/files/CBFramework_TEMPUS-PICTET_Nikolov-Shoikova-Kovatcheva.pdf. – Загл. с екрана. – Проверено : 09.02.2017.
 17. Staab, S. Handbook on Ontologies / S. Staab, R. Studer. – Berlin : Springer Science & Business Media, 2009. – 832 p. doi: 10.1007/978-3-540-92673-3.
 18. Wang, F.-S. Field Study of Patent Strategies from Patent Map on Big Data: An Empirical Case of Big Data Application Platform in Taiwan [Електронний ресурс] / F.-S. Wang. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/271838610_Field_Study_of_Patent_Strategies_from_Patent_Map_on_Big_Data_An_Empirical_Case_of_Big_Data_Application_Platform_in_Taiwan. – Загл. с екрана. – Проверено : 09.02.2017.

Г. М. КОРОТЕНКО^{1*}, Л. М. КОРОТЕНКО^{2*}, А. Т. ХАРЬ^{3*}

^{1*}Каф. «Геоінформаційні системи», Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (050) 671 22 68, ел. пошта gkorotenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3774-5260

^{2*}Каф. «Програмне забезпечення комп'ютерних систем», Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (050) 985 61 99, ел. пошта leonid_korotenko@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2236-0205

^{3*}Каф. «Програмне забезпечення комп'ютерних систем», Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (099) 777 05 75, ел. пошта alenah@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3176-7792

СТВОРЕННЯ ІТ-ОРІЄНТОВАНОГО ОНТОЛОГІЧНОГО ФРЕЙМВОРКУ ДЛЯ ЦІЛЕЙ ФОРМУВАННЯ ОСВІТНІХ ПРОГРАМ НА ОСНОВІ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ

Мета. З урахуванням розширення сфер застосування комп'ютерних технологій виникає необхідність виявлення зв'язків між професійними компетентностями, що постійно зароджуються, та новими розділами знань комп'ютерних технологій для вдосконалення процесу формування нових освітніх програм. **Методика.** Пропонується підхід, спрямований на побудову спеціалізованих баз знань, що формуються з використанням технологій штучного інтелекту та орієнтовані на роботу з безліччю різномірних ресурсів або джерел даних за певною освітньою тематикою. Як інструмент, що забезпечує формування базових онтологій, використовується редактор онтологій Protégé 4.2. Одним із модулів розробленої системи семантичного аналізу, що забезпечує доступ до онтології та дає можливість її обробки, повинен використовуватися Java-фреймворк Apache Jena, який формує програмне середовище для роботи з даними в форматах RDF, RDFS та OWL, а також підтримує можливість формування запитів до онтології на мові SPARQL. Особливістю даного підходу є зв'язування інформаційних ресурсів трьохплатформного уявлення дисциплінарної структури в контексті виявлення зв'язків поміж професійними компетентностями. **Результати.** Розроблено модель та структуру ІТ-орієнтованого онтологічного фреймворку, призначеного для забезпечення конвергенції компонентів трьохплатформного інформаційно-комунікаційного середовища ВНЗ. Сформована структура онтології – основи бази знань, яка описує ключові особливості освітніх стандартів галузі «Інформаційні технології». **Наукова новизна.** В рамках проектування та формування структури дисципліни галузі «Інформаційні технології», в контексті компетентного підходу до освіти, пропонується архітектура системи семантичного аналізу дескрипторів компетентностей, що реалізує алгоритм інтеграції онтологічної та продукційної моделей уявлення знань про досліджувану предметну область. **Практичне значення.** Пропонований підхід дозволяє систематизувати контент, структуру та зв'язки компонентів області інформаційних технологій для коригування спектру

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

формованих компетентностей при розробці освітніх програм підготовки ІТ-фахівців в університеті, з урахуванням розширення сфер застосування комп'ютерингу.

Ключові слова: комп'ютеринг; компетентності; інформаційні технології; третя платформа; зв'язки; онтологія; дисциплінарна структура; дескриптор

G. M. KOROTENKO^{1*}, L. M. KOROTENKO^{2*}, A. T. KHAR^{3*}

^{1*}Dep. «Geoinformation Systems», State Higher Educational Establishment «National Mining University», D. Yavornytskyi Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (050) 671 22 68, e-mail gkorotenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-3774-5260

^{2*}Dep. «Software Engineering», State Higher Educational Establishment «National Mining University», D. Yavornytskyi Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (050) 985 61 99, e-mail leonid_korotenko@ukr.net, ORCID 0000-0002-2236-0205

^{3*}Dep. «Software Engineering», State Higher Educational Establishment «National Mining University», D. Yavornytskyi Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (099) 777 05 75, e-mail alenah@ukr.net, ORCID 0000-0003-3176-7792

CREATION OF IT-ORIENTED ONTOLOGICAL FRAMEWORK FOR THE PURPOSE OF MAKING EDUCATIONAL PROGRAMS ON THE BASE OF COMPETENCIES

Purpose. Taking into account the expansion of computing application scopes there is a need to identify the links and features of the constantly emerging professional competencies of the new sections of computing knowledge to improve the process of forming new curricula. **Methodology.** Authors propose the new approach aimed to build specialized knowledge bases generated using artificial intelligence technology and focused on the use of multiple heterogeneous resources or data sources on specific educational topics is proposed. As a tool, ensuring the formation of the base ontology the Protégé 4.2 ontology editor is used. As one of the modules of the developed system of semantic analysis, which provides access to ontology and the possibility of its processing, the Apache Jena Java framework should be used, which forms the software environment for working with data in RDF, RDFS and OWL formats, and also supports the ability to form queries to Ontologies in the SPARQL language. The peculiarity of this approach is the binding of information resources of the three-platform presentation of the disciplinary structure in the context of identifying the links of professional competencies. **Findings.** The model and structure of the IT-oriented ontological framework designed to ensure the components convergence of the university three-platform information and communication environment are developed. The structure of the knowledge base ontology-basis, describing the main essence of the educational standards of the "Information Technologies" branch is formed. **Originality.** Within the framework of design and formation of the knowledge sector disciplinary structure "Information Technologies" in the context of the competence approach to education, the architecture of the competence descriptors of semantic analysis system is proposed. It implements the algorithm for integrating the ontological and product models of knowledge representation about the subject domain. **Practical value.** The proposed approach allows systematizing the content, structure and connections of the information technologies field components for adjusting the range of competences formed in the development of educational programs for training IT specialists at the University, taking into account the growth of the field of computing.

Keywords: computing; competency; information technologies; third platform; connections; ontology; disciplinary structure; descriptor

REFERENCES

1. Korotenko, G. M., Korotenko, L. M., Udovych, I. M., & Samarets, N. N. (2016). Diversification of competencies for the modern student subject to expansion of applications for big data technologies. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinistroyeniye. Seriya: kompyuternyye sistemy i informatsionnyye tekhnologii v obrazovanii, nauke i upravlenii*, 94, 87-94.
2. Muromtsev, D. I. (2007). *Ontologicheskii inzhiniring znaniy v sisteme Protégé: Metodicheskoye posobiye*. St. Petersburg: SPbSU ITMO. Retrieved from http://books.ifmo.ru/book/282/ontologicheskii_inzhiniring_znaniy_v_sisteme_PROT%C3%89G%C3%89.htm
3. The Cabinet of Ministers of Ukraine. (2017, February 1). *Resolution No. 53*. Retrieved from <http://www.kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=249722170>
4. The Cabinet of Ministers of Ukraine. (2011, November 23). *Resolution No. 1341 «Pro zatverdzhennia Natsionalnoi ramky kvalifikatsii»*. Retrieved from <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1341-2011-%D0%BF>

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

5. Mitrofanova, E. A., Afanasyeva, V. Y., & Chernyshenko, C. V. (2015). *Razrabotka sektoralnykh ramok kvalifikatsiy: metodologiya i praktika* [Monograph]. Moscow: SUM Publ.
6. *Rekomendatsii po prepodavaniiu informatiki v universitetakh*. (2002). (M.Y. Zverintseva, T.V. Zverintseva, N.Y. Kurochka, A.A. Simanovskiy, D.A. Shaporenkov, Trans.). St. Petersburg: St. Petersburg University. Retrieved from <http://se.math.spbu.ru/SE/cc2001r.pdf>
7. Busyhin, B. S., Salov, V. O., Korotenko, H. M., Korotenko, L. M., Kravchenko, V. V., & Spodynets, O. A. (2007). Rol ontolohii u proektuvanni dystsyplinarnoho osvithnoho prostoru VNZ vidpovidno do vymoh Bolonskoi konventsii. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 7, 3-7.
8. Borovkov, A. I., Burdakov, S. F., Klyavin, O. I., Melnikova, M. P., Palmov, V. A., & Silina, Y. N. (2012). *Sovremennoye inzhenernoye obrazovaniye*. St. Petersburg: Politechnical University. Retrieved from <http://www.csr-nw.ru/files/publications/zk5.pdf>
9. The Joint Task Force on Computing Curricula, IEEE Computer Society, Association for Computing Machinery. (2001, December 15). *Computing Curricula 2001. Computer Science: Final Report*. Retrieved from https://www.acm.org/education/curric_vols/cc2001.pdf
10. The Joint Task Force on Computing Curricula, IEEE Computer Society, Association for Computing Machinery. (2004, December 12). *Computing Curricula 2004. Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Engineering: Report*. Retrieved from http://www.acm.org/education/education/curric_vols/CE-Final-Report.pdf
11. The Association for Computing Machinery, The Association for Information Systems, The Computer Society. (2005, September 30). *Computing Curriculum 2005: The Overview Report*. Retrieved from http://www.acm.org/education/curric_vols/CC2005-March06Final.pdf
12. The Joint Task Force on Computing Curricula, Association for Computing Machinery, Computer Society. (2013, December 20). *Computer Science Curricula 2013 (CS 2013): Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Science*. doi: 10.1145/2534860
13. Gens, F. (2012, November). TOP 10 Predictions. IDC Predictions 2013: Competing on the 3 rd Platform. IDC, 1 (238044). Retrieved from <https://abdullahnabulsi.files.wordpress.com/2013/01/i-d-c-p-r-e-d-i-c-t-i-o-n-s-2-0-1-3-c-o-m-p-e-t-i-t-i-o-n-g-o-n-t-h-e-3-r-d-p-l-a-t-f-o-r-m.pdf>
14. Hawthorne, E. K., Campbell, R. D., Tang, C., Tucker, C. S., & Nichols, J. (2014). *Information Technology Competency Model of Core Learning Outcomes and Assessment for Associate-Degree Curriculum*. New York: The Association for Computing Machinery. Retrieved from <http://ccecc.acm.org/files/publications/ACMITCompetencyModel14October201420150114T180322.pdf>. doi:<http://dx.doi.org/10.1145/2686614>
15. Kwang, K. (2013, May 1). 'Third platform' shift triggers enterprise software evolution. ZDNet. Retrieved from <http://www.zdnet.com/article/third-platform-shift-triggers-enterprise-software-evolution>
16. Nikolov, R., Shoikova, E., & Kovatcheva, E. (2014). *Competence based framework for curriculum development*. Sofia: Za bukvi, O'pismeneh. Retrieved from https://unesco.unibit.bg/sites/default/files/CBFramework_TEMPUS-PICTET_Nikolov_Shoikova_Kovatcheva.pdf
17. Staab S., & Studer R. (2009). (eds.). *Handbook on Ontologies*. Berlin: Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-3-540-92673-3
18. Wang, F.-S. (2014). *Field Study of Patent Strategies from Patent Map on Big Data: An Empirical Case of Big Data Application Platform in Taiwan*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/271838610_Field_Study_of_Patent_Strategies_from_Patent_Map_on_Big_Data_An_Empirical_Case_of_Big_Data_Application_Platform_in_Taiwan

Статья рекомендована к публикации д.т.н., доц. В. И. Корниенко (Украина); научным комитетом X Международной научно-практической конференции «Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании-2016»

Поступила в редколлегию: 17.02.2017

Принята к печати: 10.05.2017

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК.669.15

В. В. НЕТРЕБКО^{1*}, И. П. ВОЛЧОК²

¹*Каф. «Оборудование и технология сварочного производства», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (050) 486 27 40, эл. почта olgavvn@ukr.net, ORCID 0000-0003-3283-0116

²Каф. «Композиционные и порошковые материалы и технологии», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 764 13 51, эл. почта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0003-1580-0556

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЧУГУНА НА МЕЖФАЗНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ CR ПОСЛЕ ОТЖИГА ПРИ 690 °C

Цель. В научной работе необходимо установить влияние химического состава Fe–C–Cr–Mn–Ni чугуна на содержание хрома в металлической основе, карбидах, а также коэффициент межфазного распределения хрома после отжига при 690 °C (K_{Cr}^{690}). **Методика.** Исследовали чугуны, содержащие 1,09–3,91 % C; 11,43–25,57 % Cr; 0,6–5,4 % Mn; 0,19–3,01 % Ni и 0,8–1,2 % Si. Анализ распределения хрома производили с использованием методов математической статистики. Чугун выплавляли в индукционной печи емкостью 60 кг. **Результаты.** Применение методов активного планирования эксперимента 2^{4+1} позволило установить регрессионные зависимости концентрации хрома в основе и карбидах, а также коэффициент его межфазного распределения от содержания в чугуне C, Cr, Mn и Ni. Хром после отжига преимущественно концентрировался в карбидах. Содержание хрома в основе изменялась от 3,94 % при 3,23 % C, 5,4 % Mn, 11,43 % Cr и 3,01 % Ni – до 17,43 % при 1,09 % C, 0,60 % Mn, 25,57 % Cr и 1,32 % Ni. Минимальное значение коэффициента распределения K_{Cr}^{690} составило 2,1 в чугуне состава 1,09 % C, 0,6 % Mn, 11,43 % Cr и 0,19 % Ni, а максимальное – 9,4 при 3,91 % C, 0,6 % Mn, 11,43 % Cr и 3,01 % Ni. Распределение хрома определялось количеством и типом образующихся карбидов. В процессе отжига состав карбидов формировался в результате конкурирования карбидообразующих элементов и замещения атомов железа и марганца атомами хрома. **Научная новизна.** Авторами получены регрессионные зависимости содержания хрома в основе, карбидах и коэффициент его межфазного распределения от химического состава Fe–C–Cr–Mn–Ni чугуна после отжига при 690 °C. **Практическая значимость.** Полученные зависимости позволяют прогнозировать содержание хрома в металлической основе и могут быть использованы при разработке новых составов износостойких чугунов, а также при выборе режимов термической обработки.

Ключевые слова: чугун; хром; распределение; карбид; металлическая основа

Введение

Применение комплексного легирования высокохромистых чугунов позволяет формировать в них структуры, состоящие из заданного типа карбидов и соответствующей металлической основы, что существенно повышает эксплуатационные свойства литых деталей [16–18, 20]. В период кристаллизации и охлаждения в этих чугунах образуются неравновесные структуры, вследствие чего при термической обработке содержание хрома в карбидах повышается, а в металлической основе – снижается [3, 5,

10, 11]. Особенно сильные изменения химического состава металлической основы протекают в локальных объемах возле карбидов [19]. Гомогенизация металлической основы затруднена из-за сильного легирования твердого раствора.

Высокохромистые чугуны, легированные марганцем и никелем, подвергаются отжигу для снятия напряжений или придания им необходимых свойств. По ГОСТ 7769–82 [4] рекомендуется для снижения твердости и улучшения обрабатываемости резанием отливок из высокохромистых чугунов проводить отжиг (высокого отпуска) при

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

963–1023 °K (690–750 °C) с выдержкой в течение 6–12 часов и последующим охлаждением с печью.

Перераспределение элементов между структурными составляющими в процессе отжига связано с формированием карбидов различных типов. Хром и марганец являются элементами, которые распределяются между карбидной фазой и металлической основой [3, 11, 15]. В легированных хромом чугунах введение марганца сопровождается перераспределением атомов хрома между матрицей и карбидами. Увеличение Mn, способствуя повышению концентрации хрома в карбидах, приводит к снижению его содержания в локальных объемах матрицы вблизи карбидов [19]. При концентрации хрома менее 12 % снижается коррозионная стойкость изделий [5, 6, 8, 13]. Поэтому возникает необходимость обеспечения заданной концентрации хрома в металлической основе, особенно, вблизи межфазных (карбид-матрица) границ.

Никель, способствуя образованию аустенита, снижает растворимость углерода, особенно при высоких температурах [6]. Одновременно с этим, атомы никеля практически отсутствуют в карбидной фазе, в основном легируя твердые растворы хромсодержащих сплавов [3, 11].

В работах [2, 7, 9] исследовалось распределение элементов в высокохромистых чугунах и их перераспределение при термической обработке, однако не было уделено должного внимания процессам, протекающим в околокарбидных зонах.

В процессе кристаллизации чугунов и охлаждении отливок в литейной форме образуются карбиды неравновесного состава, что связано с непрерывным охлаждением и неполным выравниванием состава фаз. В процессе отжига происходит перераспределение элементов между фазами с образованием более равновесных структур, обладающих минимумом свободной энергии при температуре обработки. Повышение содержания хрома стабилизирует карбиды. Особенностью процесса формирования карбидов в твердом состоянии является переменная растворимость в них хрома и марганца, зависящая от температуры [3, 5, 12].

Одним из основных видов термической обработки литья является отжиг. Его применяют для улучшения обрабатываемости отливок, эксплуатируемых в условиях коррозионного воздействия среды. В процессе отжига содержание хрома в карбидах повышается, а в локальных зонах

возле карбидов снижается [3, 11], что негативно влияет на коррозионную стойкость изделий.

Анализ работ [2, 7, 9, 13–15] свидетельствует о необходимости проведения дополнительного изучения межфазного распределения хрома в высокохромистых чугунах.

Цель

Цель работы – анализ влияния химического состава высокохромистых чугунов на межфазное распределение хрома в течение отжига при 690 °C.

Методика

Серию высокохромистых чугунов состава: 1,09–3,91 % C; 11,43–25,57 % Cr; 0,6–5,4 % Mn; 0,19–3,01 % Ni и 0,8–1,2 % Si выплавляли в индукционной печи с основной футеровкой емкостью 60 кг. Температура разлива чугуна составляла 1390–1410 °C. Образцы исследовались в литом состоянии и после отжига в течение 9 часов при 690 °C. Структурный анализ проводили с использованием методик количественной металлографии [1]. Химический состав металлической основы и карбидов определяли в локальных точках на микроскопе РЕМ 106И.

Для построения математической модели распределения хрома в системе Fe–C–Cr–Mn–Ni использовали метод активного планирования эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

Матрица планирования дробнофакторного эксперимента 2^{4-1}

Table 1

Matrix of fractional factorial experiment planning 2^{4-1}

Уровень варьирования факторов		Фактор, масс. %			
		C	Cr	Mn	Ni
Основной	0	2,5	18,5	3,0	1,6
Интервал	Δ	1,0	5,0	1,7	1,0
Звездное плечо	1,414 Δ	1,41	7,07	2,4	1,41
Верхние	+1	3,5	23,5	4,7	2,6
	+1,414	3,91	25,57	5,4	3,01
Нижние	–1	1,5	13,5	1,3	0,6
	–1,414	1,09	11,43	0,6	0,19

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

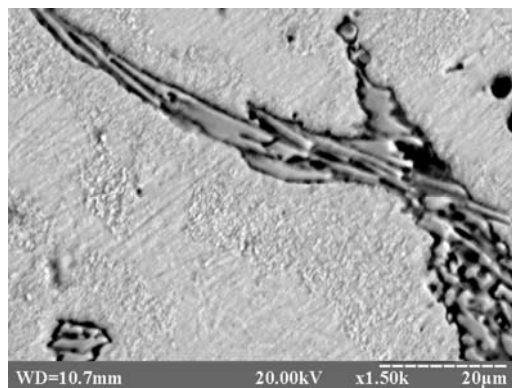
Коефіцієнт розподілення хрому (K_{Cr}^{690}) определяли як отношение содержания хрома в карбидах (Cr_k^{690}) к его содержанию в основе (Cr_o^{690}).

Результаты

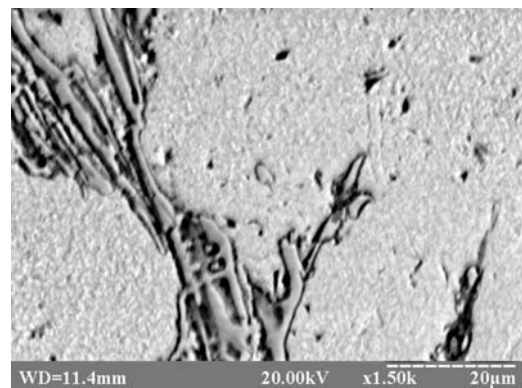
В процессе отжига при 690 °С $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращений не наблюдалось. Металлическая основа чугунов была ферритной, ферритоаустенитной и аустенитной (в зависимости от его состава). В течение выдержки при отжиге наблюдалось перераспределение химических элементов между карбидами и основой с образованием равновесных фаз.

Протекание диффузионных процессов обеспечивало снижение химической неоднородно-

сти чугуна. Как показали исследования, никель практически полностью отсутствовал в карбидах. Одновременно с этим, пропорционально увеличению содержания углерода в чугуне, возрастала концентрация никеля в основе, что, в свою очередь, оказывало влияние на распределение атомов марганца и хрому. Более того, формируемое структурное состояние металлической матрицы влияло на состояние межфазных границ. Так, в чугунах с ферритной основой наблюдалось значительное растравливание границ раздела фаз (рис. 1). В противоположность этому, в чугунах с аустенитной основой растравливание границ раздела фаз практически не обнаружено (рис. 2).



a – a



b – b

Рис. 1. Структуры чугунов с ферритной основой после травления:

a – 1,5 % C; 18,5 % Cr; 1,3 % Mn и 1,6 % Ni; б – 2,5 % C; 23,5 % Cr; 1,3 % Mn и 1,6 % Ni

Fig. 1. Structures of cast iron with ferritic base after etching:

a – 1,5% C; 18,5% Cr; 1,3% Mn и 1,6% Ni; б – 2,5% C; 23,5% Cr; 1,3% Mn и 1,6% Ni

В результате математической обработки экспериментальных данных получены регрессионные зависимости содержания хрому в

карбидах, основе, а также коэффициента его межфазного распределения от содержания в чугуне C, Cr, Mn и Ni:

$$Cr_k^{690} = 5,082C - 3,867Mn + 2,261Cr + 24,334Ni + 0,033Mn^2 - 2,696Ni^2 + 0,906CMn - 0,245CCr - 3,736C Ni + 0,106MnCr - 0,338MnNi - 0,314CrNi + 3,459 \quad (1)$$

$$Cr_o^{690} = -2,238C + 1,525Cr + 1,776Ni + 0,365C^2 - 0,022Cr^2 - 0,721Ni^2 - 0,041CCr + 0,116C Ni - 0,006MnCr - 5,224 \quad (2)$$

$$K_{Cr}^{690} = 3,078C + 0,108Mn + 0,026Cr + 3,029Ni - 0,306C^2 - 0,011CCr - 0,156MnNi - 0,110CrNi + 0,196(Cr/C) - 3,509 \quad (3)$$

Данные уравнения являются математически вероятностными (в соответствии с критериями Стюдента, Фишера и Кохрена). Мини-

мальные и максимальные значения полученных функций и соответствующие им составы представлены в табл. 2.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

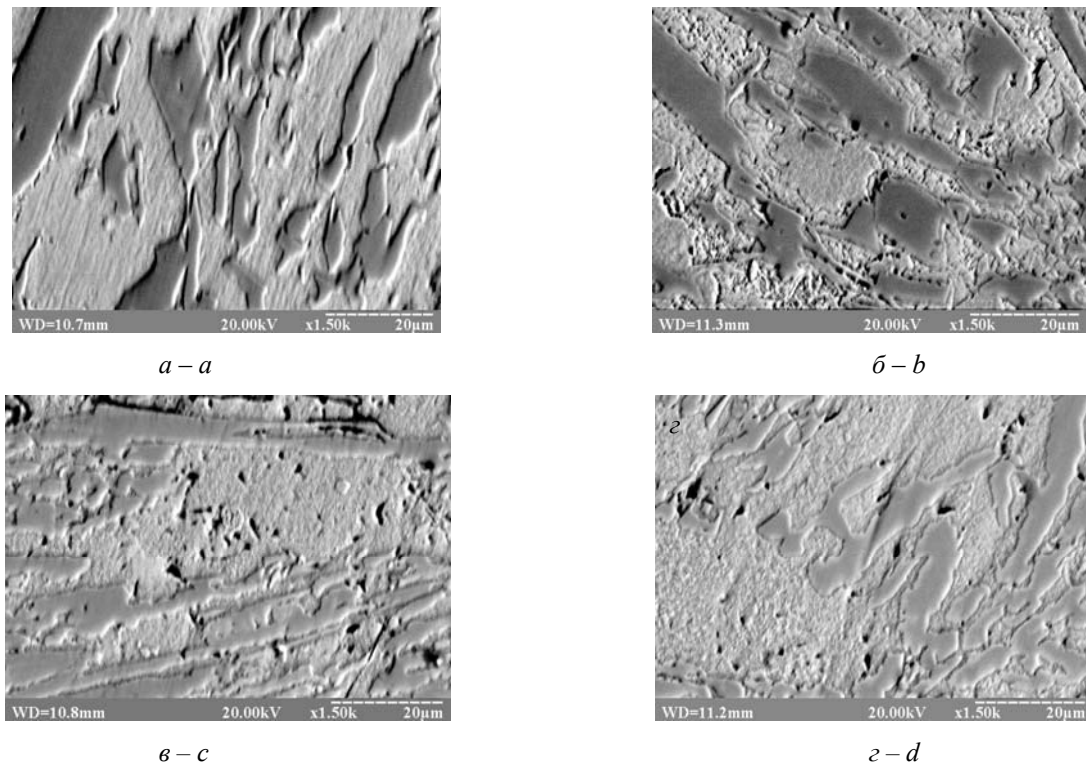


Рис. 2. Структуры чугунов с аустенитной основой после травления:

a – 3,5 % C; 18,5 % Cr; 5,4 % Mn и 2,6 % Ni; *б* – 3,5 % C; 18,5 % Cr; 5,4 % Mn и 0,2 % Ni;
в – 2,5 % C; 18,5 % Cr; 1,3 % Mn и 3,0 % Ni; *г* – 2,5 % C; 11,5 % Cr; 1,3 % Mn и 1,6 % Ni

Fig. 2. Structures of cast iron with austenitic base after etching:

a – 3,5% C; 18,5% Cr; 5,4% Mn и 2,6% Ni; *b* – 3,5% C; 18,5% Cr; 5,4% Mn и 0,2% Ni;
c – 2,5% C; 18,5% Cr; 1,3% Mn и 3,0% Ni; *d* – 2,5% C; 11,5% Cr; 1,3% Mn и 1,6% Ni

Таблица 2

Минимальные и максимальные значения
 функций: $Cr_{кар}^{690}$, $Cr_{осн}^{690}$ и KP_{Cr}^{690}

Table 2

Minimum and maximum values of functions:
 $Cr_{кар}^{690}$, $Cr_{осн}^{690}$ and KP_{Cr}^{690}

Функция	Уровень	Величина	Состав, масс. %			
			C	Mn	Cr	Ni
$Cr_{к}^{690}$	min	26,5	1,09	5,4	11,43	0,19
	max	73,3	1,09	0,60	25,57	2,22
$Cr_{о}^{690}$	min	3,9	3,23	5,4	11,43	3,01
	max	17,4	1,09	0,60	25,57	1,32
KP_{Cr}^{690}	min	2,1	1,09	0,60	11,43	0,19
	max	9,4	3,91	0,60	11,43	3,01

Анализ функции $Cr_{кар}^{690}$ показывает, что максимальное количество хрома в карбидах 73,3 % имело место при максимальном содержании в чугуне Cr, минимальном количестве C и Mn и 2,2 % Ni. При этом химическом составе, после отжига при 690 °C, в чугуне образовывались высокохромистые карбиды $Cr_{23}C_6$, содержащие минимальное количество углерода (5,5 %) и железа. Увеличение содержания никеля до 1,32 % не оказало существенного влияния на растворимость углерода в аустените, что позволило достигнуть максимальной концентрации хрома в металлической основе. При 2,2 % никеля наблюдали максимальное количество хрома в карбидах (см. табл. 2), что связано со снижением растворимости углерода в основе и трансформацией карбидной фазы в высоко-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

хромистые карбиды $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$. Это подтверждает ранее полученные результаты [10].

Минимальное содержание хрома в основе (см. табл. 2) наблюдали при минимальном количестве Cr в чугунах и максимальном количестве Mn и Ni при 3,2 % C. Повышение концентрации углерода свыше 3,2 % способствовало образованию карбидов Me_7C_3 , легированных хромом с большим содержанием углерода (8,8 %), что уменьшило количество карбидной фазы и незначительно повысило содержание хрома в основе.

Наименьшее значение коэффициента $\text{K}_{\text{Cr}}^{690}$ (2,1) установлено при минимальном содержании в чугунах C, Cr, Mn и Ni (см. табл. 2). В процессе отжига цементит трансформировался в карбиды Fe_7C_3 , содержащие большее количество хрома.

Максимальное значение коэффициента $\text{K}_{\text{Cr}}^{690}$ (9,4) наблюдали при максимальной концентрации углерода и никеля при минимальном количестве Mn и Cr, что связано с образованием большого количества карбидов Fe_7C_3 , стабилизированных хромом при отжиге, и значительным обеднением металлической основы на хром. Зависимости содержания хрома в карбидах от количества в чугунах C, Cr, Mn и Ni на разных уровнях плана представлены на рис. 3.

Увеличение содержания Mn и Ni в чугунах изменяло металлическую основу от ферритной до аустенитной. При формировании основы в виде аустенита растворимость углерода резко повышалась. Дальнейшее легирование чугуна марганцем способствовало возрастанию, а никелем – снижению растворимости углерода в аустенитной основе.

Как показано в [17], соотношение Cr / C определяет тип образующегося карбида. При снижении концентрации атомов активного углерода наблюдается образование низкоуглеродистых хромсодержащих карбидов Me_{23}C_6 (5,5 % C), которые в процессе отжига трансформируются в Me_7C_3 . При возрастании доли активного углерода происходит образование Me_3C (6,7 % C), Me_7C_3 (8,8 % C) и Me_3C_2 (12,5 % C) [10]. При 0,2 % Ni и 5,4 % Mn растворимость углерода в основе повысилась, а количество активного углерода снизилось. В целом, увеличение количества углерода в чугунах вызвало в процессе отжига образование

высокохромистых карбидов Cr_7C_3 (9,0 % C) и Cr_3C_2 (13,3 % C) (см. рис. 3).

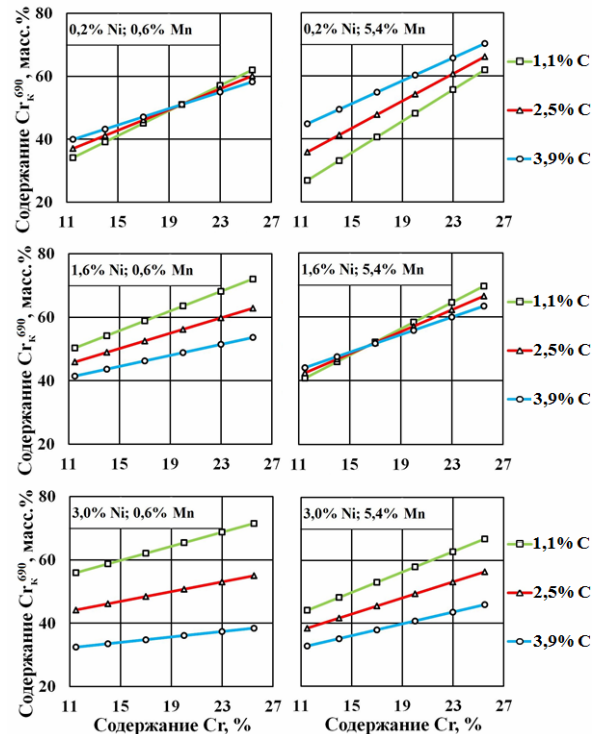


Рис. 3. Влияние C, Cr, Mn и Ni на содержание Cr_K^{690}

Fig. 3. Influence of C, Cr, Mn and Ni on the content Cr_K^{690}

В чугунах, содержащих 11,5 % Cr, 0,6 % Mn и 0,2 % Ni, после отжига наблюдались карбиды Me_3C и Me_7C_3 , стабилизированные хромом. Повышение содержания углерода в этом чугунах увеличило содержание хрома в карбидах (см. рис. 3) из-за увеличения доли карбидов Me_7C_3 в результате трансформации цементита, что согласуется с данными [3, 10, 11]. Легирование чугуна марганцем увеличивало растворимость углерода в основе и повышало концентрацию хрома в карбидах.

Рост содержания хрома в чугунах повышал его концентрацию в карбидах, а увеличение углерода снижало. Таким образом, процессы, протекающие в карбидной фазе, должны оказывать влияние и на содержание хрома в основе (рис. 4).

При увеличении содержания хрома в чугунах, формирование карбидов различных типов приводит к нарушению пропорционального прироста его концентрации в металлической основе.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

С повышением содержания углерода в чугунах наблюдается снижение концентрации Cr в его основе. Это связано с приростом при отжиге количества карбидов с высоким содержанием хрома, не зависимо от содержания марганца и никеля. Наиболее сильное влияние углерода на $Cr_{осн}^{690}$ проявлялось при увеличении его концентрации до 2,5 % (см. рис. 4).

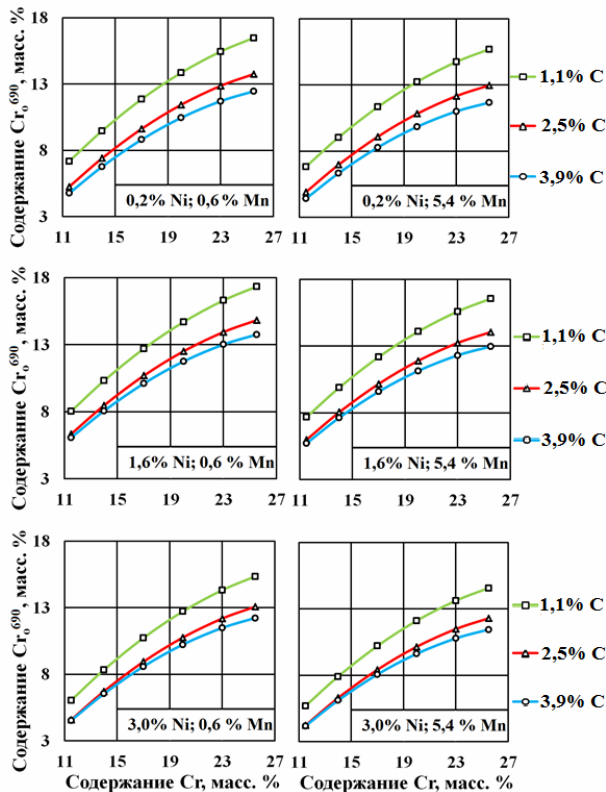


Рис. 4. Влияние C, Cr, Mn и Ni на содержание Cr_{690}

Fig. 4. Influence of C, Cr, Mn and Ni on the content Cr_{690}

Влияние никеля проявлялось в стабилизации им аустенита и изменении растворимости углерода в основе.

Специфическое влияние марганца на содержание хрома в карбидах и основе, после отжига чугуна, связано с двойственной природой марганца и его распределением между фазами. При низких концентрациях марганца до 1,0 % в высокохромистом чугунах Mn преимущественно сосредотачивается в металлической основе. Доля марганца в карбидах увеличивается при повышении содержания марганца в чугунах или снижении в нем количества хрома [3].

Совместное влияние C, Cr, Mn и Ni на коэффициент распределения хрома (KP_{Cr}^{690}) показано на рис. 5.

Влияние углерода на распределение хрома связано с изменением количества и типа образующихся карбидов. Хром, обладая большим сходством с углеродом, чем железо, марганец и никель, вступает с ним во взаимодействие, однако, в процессе охлаждения образуются неравновесные структуры. В процессе термической обработки наблюдалось формирование равновесных структур при используемой температуре отжига.

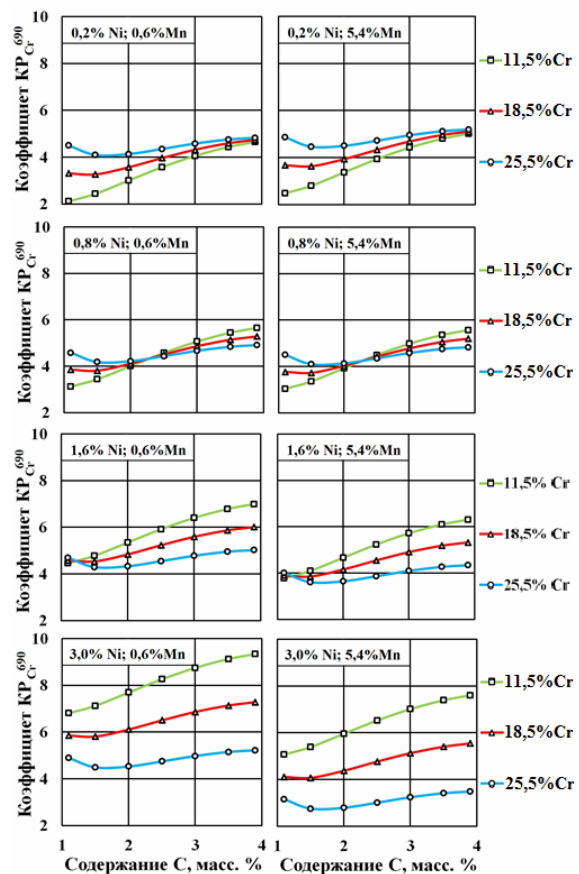


Рис. 5. Влияние C, Mn, Cr и Ni на межфазное распределение хрома – KP_{Cr}^{690}

Fig. 5. Influence of C, Mn, Cr and Ni on the interphase distribution of chromium – KP_{Cr}^{690}

В чугунах, содержащих 11,5 % Cr, 1,1 % C, 0,6 % Mn и 0,2 % Ni, образовывались карбиды Me_7C_3 . Рост содержания хрома в чугунах повышал его количество в карбидах и соответственно увеличивал значение KP_{Cr}^{690} (см. рис. 5). При увеличении содержания углерода в чугунах од-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

новременно протекали процессы увеличения количества карбидов и постепенного замещения карбидов Me_7C_3 карбидами цементитного типа. Преобладание процесса образования карбидов существенно снижало концентрацию хрома в основе и увеличивало значение KRCr^{690} , несмотря на то, что карбиды Me_3C содержали меньшее количество хрома, чем Me_7C_3 .

При содержании в чугуна хрома более 18,5 % процесс образования карбидов Me_3C не наблюдался. Увеличение количества карбидов Me_7C_3 , со значительно большей концентрацией хрома, чем в цементите, способствует обеднению металлической основы по хрому и повышает неравномерность его распределения (см. рис. 5).

Рост количества марганца в чугуна, с одной стороны, увеличивает растворимость углерода в основе и снижает количество карбидов. С другой стороны, вызывает повышение концентрации хрома в карбидах вследствие процессов замещения атомов марганца атомами хрома при формировании равновесных фаз с более низким уровнем свободной энергией. Так, при содержании 0,2 % Ni марганец практически не оказывал влияния на распределение хрома после отжига. Неравномерность распределения хрома в чугуна оставалась неизменной при содержании никеля вплоть до 1,6 % (см. рис. 5).

При 3,0 % Ni увеличение содержания марганца в чугуна снижало коэффициент KRCr^{690} , что связано с образованием устойчивого аустенита с высокой растворимостью углерода. Влияние марганца, способствуя растворимости углерода в основе, преобладало над качественно противоположным влиянием никеля.

Увеличение количество карбидов повышало концентрацию никеля в основе и неравномерность распределения хрома в основе. Особенно сильное влияние никеля проявлялось в чугунах, содержащих 11,5 % Cr. Прирост концентрации никеля в чугуна с 0,2 % до 3,0 % при содержании 1,1 % C повысил значение коэффициента KRCr^{690} с 2,1 до 6,8, а при 3,9 % C с 4,6 до 9,4 (см. рис. 5).

Анализ областей, содержащих различных уровень хрома в основе после отжига при 690 °C (рис. 6), позволил определить оптимальные составы чугунов для различных условий эксплуатации. Для изделий из чугуна, эксплуа-

тируемых в коррозионной среде, при содержании хрома в основе не менее 12 %, оптимальное содержание элементов должно составлять 1,0–1,6 % Ni, до 1,0 % Mn, до 2,5 % C при 19,5–25,5 % Cr (см. рис. 6).

Для изделий, эксплуатируемых в условиях абразивного изнашивания, химический состав регламентируется ГОСТ 7769-82 и составляет 2,4–3,6 % C, 1,5–2,5 % Mn и 19–25 % Cr. Твердость этого чугуна после его нормализации и низкого отпуска составляет 330–610 HB [4], а после отжига при 690 °C 41–54 HRC, что соответствует требованиям ГОСТ 7769-82. Содержание хрома в основе этого чугуна, после термической обработки, составляет 9,8–12,2 %, что не обеспечивает коррозионной стойкости.

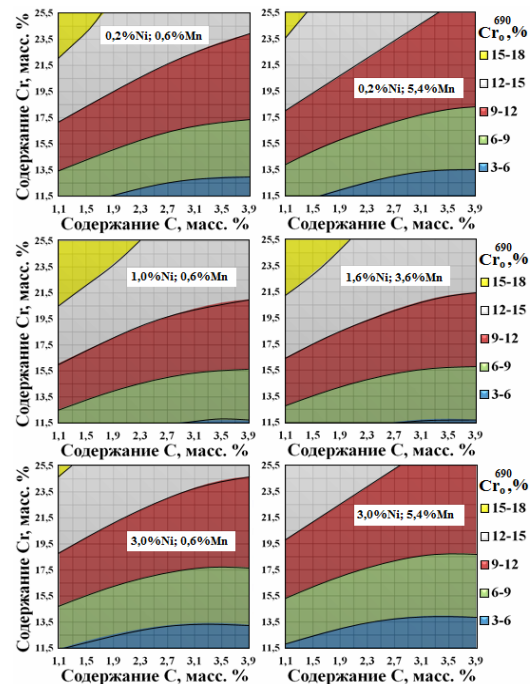


Рис. 6. Влияние C, Mn, Cr и Ni на содержание Cr_{690}

Fig. 6. Influence of C, Mn, Cr and Ni on the content Cr_{690}

Научная новизна и практическая значимость

Установлено, что основными факторами, определяющими величину коэффициента межфазного распределения хрома в системе Fe–C–Cr–Mn–Ni, являются: количественное содержание элементов и их взаимное воздействие на процессы карбидообразования.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Полученные регрессионные зависимости позволяют спрогнозировать содержание хрома в металлической основе и могут быть использованы при разработке новых составов чугунов и режимов их термической обработки.

Выводы

1. Характер влияния марганца на содержание хрома в металлической основе чугуна неоднозначен. Марганец, повышая концентрацию

хрома в карбидах, способствует его снижению в основе. Одновременно с этим, повышая растворимость углерода в металлической матрице, марганец содействует растворению в ней карбидов и увеличивает содержание хрома.

2. После отжига чугуна в течение 9 часов при 690 °С максимальная концентрация хрома в основе достигается при 1,3 % никеля, минимальных количествах углерода и марганца.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вакуленко, І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І. О. Вакуленко. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2010. – 124 с.
2. Влияние режимов термической обработки на перераспределение легирующих элементов в высокохромистом чугуне / В. З. Куцова, М. А. Ковзель, А. В. Кравченко, А. В. Животович // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2007. – № 3, ч. 2. – С. 33–51.
3. Волчок, И. П. Влияние легирования и термической обработки на распределение элементов и свойства высокохромистых чугунов / В. В. Нетребко, И. П. Волчок // *Науч. вестн. Донбас. гос. машиностр. акад.* : сб. науч. тр. / Донбас. гос. машиностр. акад. – Краматорск, 2015. – № 3 (18Е). – С. 52–59.
4. ГОСТ 7769-82. Чугун легированный для отливок со специальными свойствами. Марки. – Введ. 1983–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1982. – 15 с.
5. Гудремон, Э. Специальные стали / Э. Гудремон. – Москва : Металлургия, 1966. – Т. 1. – 736 с.
6. Гуляев, А. П. *Металловедение* / А. П. Гуляев. – Москва : Металлургия, 1978. – 648 с.
7. Куцова, В. З. Влияние температуры нагрева на формирование структуры, фазовый состав и свойства высокохромистых чугунов в исходном и термообработанном состоянии / В. З. Куцова, М. А. Ковзель, А. В. Кравченко // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2008. – № 1. – С. 35–50.
8. Малахов, А. И. Основы металловедения и теории коррозии / А. И. Малахов, А. П. Жуков. – Москва : Высш. шк., 1978. – 192 с.
9. Межфазное распределение химических элементов в комплексно-легированном белом чугуне / В. Г. Ефременко, А. П. Чейлях, Т. В. Козаревская, К. Шимидзу, Ю. Г. Чабак, А. В. Ефременко // *Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту. Серія: Технічні науки* : зб. наук. пр. / Приазов. держ. техн. ун-т. – Маріуполь, 2014. – Вип. 28. – С. 89–99.
10. Нетребко, В. В. К вопросу образования карбидов Fe₃C и Fe₇C₃ в высокохромистых чугунах / В. В. Нетребко // *Наука та прогрес транспорту*. – 2016. – № 3 (63). – С. 138–147. doi: 10.15802/stp2016/74736.
11. Нетребко, В. В. Особенности термической обработки высокохромистых чугунов легированных Mn и Ni / В. В. Нетребко, И. П. Волчок // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2016. – № 1. – С. 53–57.
12. Сильман, Г. И. Диаграмма состояния сплавов системы Fe–C–Mn и некоторые структурные эффекты в этой системе. Ч. 1. Межфазное распределение марганца / Г. И. Сильман // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2005. – № 2. – С. 11–15.
13. Структурно и неструктурно чувствительные свойства хромистых чугунов / А. А. Кириллов, В. Д. Белов, Е. В. Рожкова, А. Ю. Дядькова, И. Е. Зуев // *Черные металлы*. – 2007. – № 9 – С. 7–13.
14. Чабак, Ю. Г. Структурные изменения в комплекснолегированном белом чугуне при дестабилизирующем нагреве / Ю. Г. Чабак, В. Г. Ефременко, Р. Р. Станишевский // *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 38. – С. 229–232.
15. Чейлях, А. П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии / А. П. Чейлях. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2003. – 212 с.
16. Цыпин, И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства / И. И. Цыпин. – Москва : Металлургия, 1983. – 176 с.
17. Цыпин, И. И. Белые износостойкие чугуны – эволюция и перспективы / И. И. Цыпин // *Литейное пр-во*. – 2000. – № 9. – С. 15–16.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

18. Analysis of the Structure and Abrasive Wear Resistance of White Cast Iron With Precipitates of Carbides / D. Kopyciński, M. Kawalec, A. Szczęsny, R. Gilewski, S. Piasny // Archives of Metallurgy and Materials / Institute of metallurgy and materials science of Polish academy of sciences. – 2013. – Vol. 58. – Iss. 3. – P. 973–976. doi: 10.2478/amm-2013-0113.
19. Belikov, S. Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron / S. Belikov, I. Volchok, V. Netrebko // Archives of Metallurgy and Materials / Institute of metallurgy and materials science of Polish academy of sciences. – 2013. – Vol. 58. – Iss. 3. – P. 895–897. doi: 10.2478/amm-2013-0095.
20. Gierrek, A. Zeliwo stopowe jako tworzywo konstrukcyjne / A. Gierrek, L. Bajka. – Katowice : Slask, 1976. – 230 p.

В. В. НЕТРЕБКО^{1*}, І. П. ВОЛЧОК²

^{1*}Каф. «Обладнання та технологія зварювального виробництва», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (050) 486 27 40, ел. пошта olgavvn@ukr.net, ORCID 0000-0003-3283-0116

²Каф. «Композиційні і порошкові матеріали та технології», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 769 83 51, ел. пошта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0003-1580-0556

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЧАВУНУ НА РОЗПОДІЛ СР ПОМІЖ ФАЗАМИ ПІСЛЯ ВІДПАЛУ ПРИ 690 °С

Мета. У науковій роботі необхідно встановити вплив хімічного складу Fe–C–Cr–Ni–Mn чавуну на вміст хрому в металевій основі та карбідах, а також коефіцієнт розподілу хрому поміж фазами після відпалу при 690 °С (K_{Cr}^{690}). **Методика.** Досліджували чавуни, які містили 1,09–3,91 % С; 11,43–25,57 % Cr; 0,6–5,4 % Mn; 0,19–3,01 % Ni та 0,8–1,2 % Si. Аналіз розподілу хрому виконували з використанням методів математичної статистики. Чавун плавили в індукційній печі ємністю 60 кг. **Результати.** Використання методу активного планування експерименту з матрицею 2^{4+1} дозволило визначити регресійні залежності концентрації хрому в основі та карбідах, а також коефіцієнт його розподілу поміж фазами від вмісту в чавуні С, Cr, Mn та Ni. Хром після відпалу переважно концентрувався в карбідах. Вміст хрому в основі змінювався від 3,94 % при 3,23 % С, 5,4 % Mn, 11,43 % Cr та 3,01 % Ni – до 17,43 % при 1,09 % С, 0,60 % Mn, 25,57 % Cr та 1,32 % Ni. Найменше значення коефіцієнту розподілу K_{Cr}^{690} дорівнювало 2,1 в чавуні, який містив 1,09 % С, 0,6 % Mn, 11,43 % Cr та 0,19 % Ni, а найбільше – 9,4 при 3,91 % С, 0,6 % Mn, 11,43 % Cr та 3,01 % Ni. Розподіл хрому визначався кількістю та типом карбідів, що утворювались. Під час відпалу склад карбідів змінювався внаслідок конкурування елементів, що утворюють карбіди, і заміщенням атомів заліза та марганцю на атоми хрому. **Наукова новизна.** Авторами отримані регресивні залежності вмісту хрому в основі, карбідах та коефіцієнт його розподілу поміж фазами від хімічного складу Fe–C–Cr–Ni–Mn чавуну після відпалу при 690 °С. **Практична значимість.** Отримані залежності дозволяють прогнозувати вміст хрому в металевій основі та можуть бути використані при розробці нових складів зносостійких чавунів, а також при виборі режимів термічної обробки.

Ключові слова: чавун; хром; розподіл; карбід; металева основа

В. В. NETREBKO^{1*}, І. П. VOLCHOK²

^{1*}Dep. «Equipment and Technology of Welding Production», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (050) 486 27 40, e-mail olgavvn@ukr.net, ORCID 0000-0003-3283-0116

²Dep. «Composite and Powder Materials and Technologies», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 769 83 51, e-mail tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0003-1580-0556

INFLUENCE OF THE CAST IRON'S CHEMICAL COMPOSITION ON THE INTERPHASE DISTRIBUTION OF CR AFTER ANNEALING AT 690 °C

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Purpose. The article is aimed to determine effect of the chemical composition of Fe-C-Cr-Mn-Ni cast iron on the chromium content in the metallic base, carbides and the coefficient of interphase distribution of chromium after annealing at 690 ° C (KP_C690). **Methodology.** Cast irons containing 1.09–3.91% C; 11.43–25.57% Cr; 0.6–5.4% Mn; 0.19–3.01% Ni and 0.8–1.2% Si were investigated. The analysis of chromium distribution was carried out using mathematical statistics methods. Cast iron was melted in induction furnace with a capacity of 60 kg. **Findings.** The use of methods of active planning of the experiment 2⁴⁻¹ allowed us to establish regression dependencies of the chromium concentration in the base and carbides, as well as its interphase distribution coefficient on the C, Mn, Cr and Ni content in the cast iron. Chromium, after annealing, was mainly concentrated in carbides. The chromium content of the base varies from 3.94% at 3.23% C, 5.4% Mn, 11.43% Cr and 3.01% Ni to 17.43% at 1.09% C, 0.60% Mn, 25.57% Cr and 1.32% Ni. The minimum value of the distribution coefficient of CRC690 was 2.1 in cast iron, of composition 1.09% C, 0.6% Mn, 11.43% Cr and 0.19% Ni, maximum 9.4 at 3.91% C, 0, 6% Mn, 11.43% Cr and 3.01% Ni. The distribution of chromium was determined by the amount and type of carbides formed. During annealing, the carbides' composition was formed as a result of carbide-forming elements contention and replacement of iron and manganese atoms by chromium atoms. **Originality.** Authors obtained regression dependencies of the chromium content in the base, carbides and its interfacial distribution coefficient on the chemical composition of Fe-C-Cr-Mn-Ni cast iron after annealing at 690 ° C. **Practical value.** The obtained dependencies allow predicting the chromium content in the metallic base and may be used during the elaboration of the new wear resistant cast irons compositions, as well as in the choice of heat treatment regimes.

Keywords: cast iron; chromium; distribution; carbide; metallic base

REFERENCES

1. Vakulenko, I. O. (2010). *Strukturnyi analiz v materialoznavstvi*. Dnipropetrovsk: Makovetskyi.
2. Kutsova, V. Z., Kovzel, M. A., Kravchenko, A. V., & Zhivotovich, A. V. (2007). Vliyaniye rezhimov termicheskoy obrabotki na raspredeleniye legiruyshchekh elementov v vysokokhromistom chugune. *Metal Science and Heat Treatment*, 3 (2), 33-51.
3. Volchok, I. P., Netrebko, V. V. (2015). Effect of alloying and heat treatment on the distribution of the elements and properties of high chrome cast iron. *Scientific bulletin of DSEA*, 3 (18E), 52-59.
4. Alloy cast iron for castings of special properties. Grades, State Standard 7769-82 (1982).
5. Gudremont, E. (1966). *Spetsialnyye stali* (Vol. 1). Moscow: Metallurgiya.
6. Gulyaev, A. P. (1978). *Metallovedeniye*. Moscow: Metallurgiya.
7. Kutsova, V. Z., Kovzel, M. A., & Kravchenko, A. V. (2008). Vliyaniye temperatury nagreva na formirovaniye struktury, fazovyy sostav i svoystva vysokokhromistyykh chugunov v iskhodnom i termoobrabotannom sostoyanii. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 1, 35-50.
8. Malakhov, A. I., & Zhukov, A. P. (1978). *Osnovy metallovedeniya i teorii korrozii*. Moscow: Vysshaya shkola.
9. Efremenko, V. G., Cheiliakh, O. P., Kozarevskaya, T. V., Shimizu, K., Chabak, Y. G., & Efremenko, O. V. (2014). Phase chemical elements distribution in complex-alloyed white cast iron. *Reporter of the Priazovskiy state technical university. Section: Technical sciences*, 28, 89-99.
10. Netrebko, V. V. (2016). About the issue of carbides Fe₃C and Fe₇C₃ formation in high-chromium cast irons. *Science and Transport Progress*, 3 (63), 138-147. doi:10.15802/stp2016/74736
11. Netrebko, V. V., Volchok, I. P. (2016). Peculiarities of heat treatment of high-chromium cast irons alloyed by Mn and Ni. *Innovative materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 1, 53-57.
12. Silman, G. I. (2005). Diagramma sostoyaniya splavov sistemy Fe-C-Mn i nekotoryye strukturnyye efekty v etoy sisteme. Mezhfaznoye raspredeleniye margantsa. *Metal Science and Heat Treatment*, 2, 11-15.
13. Kirillov, A. A., Belov, V. D., Rozhko, Y. V., Diadkova, A. Y., & Zueva, I. E. (2007). Strukturno i nestrukturno chuvstvitelnyye svoystva khromistyykh chugunov. *Stahl und Eisen*, 9, 7-13.
14. Chabak, Y. G., Efremenko, V. G., & Stanishevskiy, R. R. (2011). Structure changes in the complex-alloyed white cast iron during destabilizing heating. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 38, 229-232.
15. Cheilyakh, A. P. (2003). *Ekonomnolegirovannyye metastabilnyye splavy i uprochnyayushchiye tekhnologii*. Kharkov: National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology.
16. Tsylin, I. I. (1983). *Belyye iznosostoykiye chuguny. Struktura i svoystva*. Moscow: Metallurgiya.
17. Tsylin, I. I. (2000). Belyye iznosostoykiye chuguny – evolyutsiya i perspektivy. *Foundry*, 9, 15-16.
18. Kopyciński, D., Kawalec, M., Szczesny, A., Gilewski, R., & Piasny, S. (2013). Analysis of the Structure and Abrasive Wear Resistance of White Cast Iron with Precipitates of Carbides. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58 (3), 973-976. doi:10.2478/amm-2013-0113

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

19. Belikov, S., Volchok, I., & Netrebko, V. (2013). Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58 (3), 895-897. doi:10.2478/amm-2013-0095
20. Gierek, A., & Bajka, L. (1976). *Zeliwo stopowe jako tworzywo konstrukcyjne*. Katowice: Slask Publ.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. И. А. Вакуленко (Украина); д.т.н., проф. А. А. Митяевым (Украина)

Поступила в редколлегию: 15.03.2017

Принята к печати: 12.07.2017

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.86/87(075.8)

В. Н. БОГОМАЗ^{1*}, Л. Н. БОНДАРЕНКО^{2*}, М. В. ОЧЕРЕТНЮК^{3*}, А. А. ТКАЧОВ^{4*}

^{1*}Каф. «Военная подготовка специалистов Государственной специальной службы транспорта», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, эл. почта wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

^{2*}Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, эл. почта bondarenko-l-m2015@yandex.ua, ORCID 0000-0002-2212-3058

^{3*}Каф. «Военная подготовка специалистов Государственной специальной службы транспорта», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, эл. почта atlebeba@gmail.com, ORCID 0000-0002-9032-8602

^{4*}Каф. «Военная подготовка специалистов Государственной специальной службы транспорта», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, эл. почта otkachov@i.ua, ORCID 0000-0002-1857-7567

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЖЕСТКОСТНЫМИ ПОТЕРЯМИ И ПОТЕРЯМИ В ПОДШИПНИКАХ КАНАТНЫХ БЛОКОВ

Цель. Для уточнения величин коэффициента полезного действия (КПД) канатных блоков необходимо определить коэффициент жесткости канатов блоков с учетом классификационной группы механизма и угла обхвата канатом блока. Предполагается использовать при этом хорошо опробованные значения коэффициентов полезного действия канатных блоков с учетом углов обхвата канатами блоков и аналитически найденные величины коэффициента трения подшипников качения, приведенных к цапфе. **Методика.** В работе используется аналитический метод определения коэффициента сопротивления подшипника блока при вращении его как внутренней, так и наружной обоймы, а также расчетная схема подшипника блока. **Результаты.** Для канатных блоков проведен анализ влияния способа смазки, режима работы механизма и угла обхвата канатом блока на потери в подшипниках. Приведены соответствующие сравнительные таблицы значений потерь. Анализ полученных результатов расчетов позволяет установить: 1) главным сопротивлением, влияющим на коэффициент полезного действия канатных блоков, является сопротивление в подшипниках; 2) второй по величине составляющей является жесткостные потери, зависящие от режима работы, угла обхвата канатом блока, вида смазки подшипника; 3) КПД блока при вращении внутренней обоймы выше, чем при вращении наружной примерно, на 3 % при густой смазке и режиме 1М; 4) при последовательном расположении узлов с подшипником качения необходимо стремиться к конструкции узла, в котором вращается внутренняя обойма; 5) при числе блоков до 5 можно пользоваться рекомендуемыми в литературе значениями подшипников блоков с ошибкой в величине КПД до 10 %. **Научная новизна.** Авторы получили значения сопротивлений в шариковых подшипниках канатных блоков и жесткостные потери, обусловленные обхватом блока канатом. Использовали при этом зависимости по определению коэффициента трения качения, полученные с применением аналитических зависимостей Герца по установлению контактных напряжений и деформаций, а также экспериментальных величин коэффициента трения качения для блоков. **Практическая значимость.** Полученные авторами значения сопротивлений могут быть использованы для уточненных расчетов механизмов машин.

Ключевые слова: блок; канат; потери; подшипник; жесткость

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Введение

Коэффициент жесткости ξ показывает, какую часть рабочего натяжения составляет сопротивление растяжению каната. Такой коэффициент входит в формулу, определяющую коэффициент полезного действия блока [10]:

$$\eta = \frac{1}{1 + C_{\bar{\sigma}}}, \quad (1.1)$$

где $C_{\bar{\sigma}}$ – коэффициент сопротивления блока,

$$C_{\bar{\sigma}} = \xi + 2\mu \frac{d_0}{D_{\bar{\sigma}}} \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (1.2)$$

где α – угол обхвата канатом блока в радианах; $D_{\bar{\sigma}}, d_0$ – диаметры блока и упора в сантиметрах; μ – коэффициент трения подшипника, приведенный к цапфе; ξ – коэффициент жесткости.

Коэффициент жесткости находится с использованием экспериментальных величин по формулам, приведенным в [10] и [3]:

$$\xi = 0,1 \frac{\alpha^2}{D_{\bar{\sigma}} - 10}; \quad \xi = 5 \left(\frac{d_0}{D_{\bar{\sigma}}} \right)^2. \quad (1.3)$$

Поскольку коэффициент полезного действия (КПД) блоков известен до третьего знака после запятой [15], то при известных уравнениях для определения коэффициента трения качения при линейном и точечном контактах можно определить и коэффициент жесткости

$$\xi = \frac{1}{\eta} - 2\mu \frac{d_0}{D_{\bar{\sigma}}} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (2)$$

Проблемы определения коэффициента жесткости каната блока и его влияния на общую величину коэффициента полезного действия блоков, а также задачи, связанные с ними, рассматривались в разной мере в работах разных авторов [1, 2, 4–7, 9, 11–14].

Цель

Определить коэффициент жесткости канатов блоков с учетом классификационной группы механизма и угла обхвата канатом блока,

используя хорошо опробованные значения коэффициентов полезного действия канатных блоков с учетом угла обхвата канатом блока и найденные аналитически величины коэффициента трения подшипников качения, приведенных к цапфе.

Методика

Многие авторы получили большое количество формул для определения сопротивлений движению, особенно качению. Но они обычно содержали величины, которые определялись экспериментально и часто требовали большего труда и времени, чем определение самого сопротивления.

Аналитические зависимости не могли быть получены до решения основных задач о контактных напряжениях и деформациях методами теории упругости Г. Герцем в 1881–1882 г.г. Только через 60 лет после исследований Герца Д. Табором [15] получены аналитические зависимости по определению коэффициентов трения качения при линейном и точечном контактах. Им установлены следующие зависимости для определения коэффициента трения качения:

– при линейном контакте:

$$k = \frac{2b}{3\pi} \alpha, \quad (3)$$

– при точечном контакте:

$$k = \frac{3b}{16} \alpha, \quad (4)$$

где b – полуширина пятна контакта, определяемая согласно теории Герца; α – коэффициент гистерезисных потерь.

Но поскольку коэффициент α имеет молекулярно-механическую природу, то определить его для практического использования вряд ли возможно. Как следствие, эти формулы не получили практического применения.

С использованием формул (3) и (4), хорошо опробованных величин коэффициента трения качения для крановых колес [1] найдены значения коэффициента α [2].

Аналогично формулам (3) и (4) эти формулы получены в виде:

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

$$k = \frac{2b}{3\pi} e^{-1,2R}, \quad (5)$$

$$k = \frac{3b}{16} e^{-0,2R}, \quad (6)$$

где R – радиус качения тела в метрах.

Естественно, эти формулы пригодны для металлов, а для других материалов требуют уточнений в величине α .

На рис. 1 приведена схема одного подшипника блока. Приложенная к блоку сила $Q = 2S$ через внутреннюю обойму передается шарикам, которые нагружаются неравномерно.

Наибольшую нагрузку воспринимает шарик с центром, расположенным на линии действия силы Q , а наименьшую – шарик с центром, расположенным на линии, перпендикулярной направлению силы Q . Нагрузку воспринимают только те шарiki, которые располагаются ниже горизонтального диаметра. Силы P_i , координированные углами γ_i относительно линии где действия силы Q , будем считать симметричными.

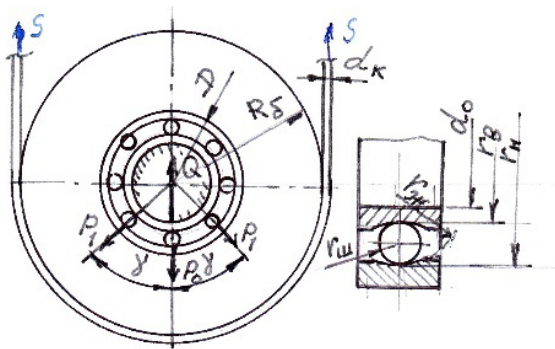


Рис. 1. Расчетная схема подшипника блока и принятые обозначения

Fig. 1. Calculation scheme of the bearing of the block and accepted designations

Нагрузка, приходящаяся на наиболее нагруженный шарик, находится по формуле из [3]:

$$P_0 = \frac{5Q}{Z}, \quad (7)$$

где $Z = \frac{2,9(D+d_0)}{(D-d_0)}$ – число шариков по условиям сборки.

На один боковой шарик действует сила

$$P_i = P_0 \cos^{3/2} \gamma_i. \quad (8)$$

Имея нагрузки на шарiki и принятые размеры, определим сопротивления качению двух различных типов шариков.

Рассмотрим движение наиболее нагруженного шарика по внутренней и наружной обоймам, определив сначала полуширину пятна контакта. При равенстве коэффициентов Пуассона для шариков обойм, равном 0,3, и равенстве модулей упругости полуширина пятна контакта [4]:

$$b_{ob} = 1,397 n_{bb} \sqrt[3]{\frac{P_0}{E} \frac{1}{2/r_{iu} - 1/r_{jc} + 1/r_g}}, \quad (9)$$

где n_{bb} – величина, зависящая от отношения коэффициентов уравнения эллипса касания.

$$\frac{A}{B} = \frac{\left(\frac{1}{r_{iu}} - \frac{1}{r_{jc}}\right)}{\left(\frac{1}{r_{iu}} + \frac{1}{r_g}\right)},$$

где r_{iu} – радиус шарика; r_{jc} – радиус желоба; r_g – радиус беговой дорожки внутренней обоймы, который определяется по формуле $r_g = r_0 + r_{iu}$.

При известной величине b_{ob} коэффициент трения качения выводится из формулы (6):

$$K_{ов} = \frac{3}{16} b_{ob} e^{-0,2r_{iu}}, \quad (10)$$

а сопротивление качению наиболее нагруженного шарика по внутренней обойме

$$W_{ов} = \frac{K_{ов} P_0}{r_{iu}}. \quad (11)$$

Полуширина пятна контакта наиболее нагруженного шарика с наружной обоймой

$$b_{он} = 1,397 n_{вн} \sqrt[3]{\frac{P_0}{E} \frac{1}{2/r_{iu} - 1/r_{jc} - 1/r_{iu}}}, \quad (12)$$

Рассмотрим подобную задачу для боковых шариков. В шарикоподшипниках блоков полиспастов число шариков 7 или 8 зависит от диаметров D и d_0 , поэтому боковых роликов два:

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

расположенных под углом $\gamma = 45^\circ$ при $Z = 8$ или $\gamma = 51,4^\circ$ при $Z = 7$. Поэтому сопротивление их качению по внутренней и наружной обоймам определяется по формулам (9) – (12) с удвоением сопротивления (11).

Для определения коэффициента трения подшипников блока, приведенных к цапфе при неподвижной наружной обойме, найдем работу сил трения качения по внутренней и наружной обоймам на расстоянии, равном длине беговой дорожки внутренней обоймы на одном ее повороте, т.е. $L = 2\pi r_g$.

$$A_g = [2(W_{ог} + W_{он}) + 4(W_{лг} + W_{лн})] 2\pi r_g.$$

Работа условной силы F_g , приложенной к радиусу цапфы, $A = 2\pi r_0 \mu Q$.

Приравняв работы, получим:

$$\mu_g = \frac{2r_g[W_{ог} + W_{он} + 2(W_{лг} + W_{лн})]}{r_0 Q}. \quad (13)$$

Рассмотрим случай, когда вращается наружная обойма подшипника.

Существенное отличие в работе блока этого исполнения состоит в том, что если в первом случае шарик за один оборот не доходил по наружной обойме расстояние $\Delta L = 2\pi(r_n - r_g)$, то в этом случае, на этом расстоянии, шарики будут скользить по внутренней обойме ввиду большего их сопротивления качению по наружной обойме, являющегося движущей силой скольжения.

По аналогии с первым случаем, но с учетом скольжения шариков, формула для определения приведенного к цапфе коэффициента сопротивления подшипника при вращении наружной обоймы имеет вид:

$$\mu_n = \frac{2r_g(W_{ог} + W_{он}) + 4r_n(W_{лн} + W_{лг})}{r_0 Q} + \frac{(r_n - r_g)\mu_{ск} Q}{r_0 Q}, \quad (14)$$

где $\mu_{ск}$ – коэффициент трения скольжения между шариками и обоймой.

Рассмотрим пример расчета μ_g и μ_n , определив затем КПД подшипника, сначала без учета жесткостных потерь [10]:

$$\eta_{g(n)} = \frac{1}{1 + 2\mu_{g(n)} \frac{d_0}{D_0} \sin \frac{\alpha}{z}}. \quad (15)$$

Результаты

Рассмотрим влияние классификационной группы механизма подъема на потери в подшипниках.

Максимальную нагрузку на один из двух подшипников примем равной $Q = 50$ кН, которой соответствует шариковый подшипник № 313 со статической нагрузкой $Q_{ст} = 5400$ кг массы, $D = 140$ и $d_0 = 65$ мм (рис. 1). Остальные данные примем следующими [4]: диаметр шариков (без округления до стандартных размеров) $d_{ш} = 0,3(D - d_0) = 22,5$ мм; радиус желоба беговых дорожек $r_{ж} = 0,515d_{ш} = 11,6$ мм; количество шариков $Z = \frac{2,9(D + d_0)}{(D - d_0)} = 8$ при угле между шариками $\gamma = 45^\circ$.

Нагрузка на наиболее загруженный шарик согласно формуле (7) составляет $P_0 = 30$ кН. На один боковой шарик согласно формуле (8) действует $P_1 = 23,8$ кН.

Коэффициенты трения качения наиболее загруженного шарика по внутренней и наружной обоймам составляют соответственно $K_{го} = 0,1127$ мм, $K_{но} = 0,140$ мм, а сопротивление качению одного шарика составит $W_{го} = 300,5$ Н; $W_{г1} = 360,5$ Н; $W_{но} = 373$ Н; $W_{н1} = 275$ Н.

Приведенный к оси блока коэффициент трения двух подшипников составляет (при $\alpha = 180^\circ$): при вращении наружной обоймы подшипников при жидкостной смазке $\mu_n = 0,946$ и при густой смазке $\mu_n = 0,1328$, при отсутствии смазки $\mu_n = 0,1953$. Отметим, что при вращении внутренней обоймы эта величина составит $\mu_g = 0,0480$.

Зависимость КПД блока (15) от режима работы механизма при густой и жидкостной (см. цифру в скобках) смазке приведена в табл. 1 (без учета жесткости каната).

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Коефіцієнти полезного действия блоков (КПД) в зависимости от угла обхвата канатом блока и вида смазки, без учета жесткостных потерь, приведены в табл. 2.

В табл. 3 приведены значения жесткостных потерь в зависимости от режима работы и вида

смазки подшипника при справочной величине $\eta = 0,980$.

Аналогично табл. 3 приведем коэффициент полезного действия блока при угле обхвата $\alpha = 180^\circ$ и густой смазке ($\xi = 0,1328$) – табл. 4.

Таблица 1

**Зависимость КПД блока от режима работы механизма при густой и жидкостной
(в скобках) смазке (без учета жесткости каната)**

Table 1

**Dependence of block efficiency on operation mode of the mechanism
at thick and liquid (in parentheses) lubrication
(without considering the rope rigidity)**

Режим работы	d_k	D_{σ}	$\frac{D_{\sigma}}{d_k}$	$\eta_{н(с)}$ при вращении	
				по наружной обойме	по внутренней обойме
1М	22,5	382,5	17	0,9568 (0,9689)	0,9840
2М, 3М	24,0	456,0	19	0,9635 (0,9737)	0,9865
4М	25,0	600,0	24	0,9720 (0,9800)	0,9897
5М, 6М	27,0	783,0	29	0,9785 (0,9845)	0,9920

Таблица 2

**Коеффициент полезного действия блоков в зависимости
от угла обхвата канатом блока и вида
смазки (без учета жесткостных потерь)**

Table 2

**Blocks efficiency depending on the wrapping angle of a block by a rope
and the type of lubrication without
considering the stiffening losses**

α°	$\eta_{н(14)}$		$\eta_{с(14)}$	Справочная вели- чина $\eta[1]$	$\frac{\eta_{с}}{\eta_{н}}$	$\frac{\eta}{\eta_{н}}$
	$\xi = 0,1328$	$\xi = 0,0946$	$\xi = 0,1328$		$\xi = 0,1328$	$\xi = 0,1328$
180	0,9720	0,9800	0,9897	0,980	1,018	1,008
90	0,9800	0,9857	0,9927	0,985	1,013	1,005
40	0,9891	0,9922	0,9960	0,987	1,007	0,998
15	0,9963	0,9973	0,9986	0,990	1,002	0,994

Таблица 3

Значения жесткостных потерь в зависимости от режима работы и вида смазки подшипника при справочной величине $\eta = 0,980$

Table 3

Values of the stiffness losses depending on the operation mode and the type of bearing lubrication at the reference value $\eta = 0,980$

Режим работы	ξ [1]	ξ [2]	ξ_n [1]	ξ_e [1]
1М	0,0349	0,029	0,0636(0,0513)	0,0307
2М, 3М	0,0277	0,020	0,0404(0,0347)	0,0277
4М	0,0197	0,017	0,0313(0,0282)	0,0244
5М, 6М	0,0144	0,0069	0,0241(0,023)	0,0218

Таблица 4

Коэффициент полезного действия блока при $\alpha = 180^\circ$ и густой смазке ($\xi = 0,1328$)

Table 4

Block efficiency at $\alpha = 180^\circ$ and thick lubrication ($\xi = 0,1328$)

Режим работы	η_n	η_e	$\eta[1]$	$\frac{\eta}{\eta_n}$
1М	0,8564	0,8607	0,8358	0,976
2М, 3М	0,8617	0,8674	0,8524	0,989
4М	0,8676	0,8750	0,8590	0,990
5М, 6М	0,8717	0,8774	0,8644	0,992

Научная новизна и практическая значимость

С помощью зависимостей по определению коэффициента трения качения, полученных с использованием аналитических зависимостей Герца по определению контактных напряжений и деформаций, а также экспериментальных величин коэффициента трения качения для крановых колес получены значения сопротивлений в шариковых подшипниках канатных блоков и жесткостные потери, обусловленные обхватом блока канатом.

Получение значения сопротивлений могут быть использованы для уточненных расчетов механизмов машин.

Выводы

Анализ полученных и существующих формул, результатов расчетов позволяет сделать следующие выводы и рекомендации:

– главным сопротивлением, влияющим на

КПД канатных блоков, является сопротивление в подшипниках (до 70 % при густой смазке и $\alpha = 180^\circ$) (до 100 %);

– второй по величине составляющей КПД блоков являются жесткостные потери, зависящие от режима работы, угла обхвата канатом блока, вида смазки подшипника (до 30 % при густой смазке и $\alpha = 180^\circ$);

– КПД блока при вращении внутренней обоймы выше, чем при вращении наружной (примерно на 3 % при густой смазке, режиме 1М и на 1,4 % при режиме 5М);

– при последовательном расположении узлов с подшипником качения необходимо стремиться к конструкции узла, в котором вращается внутренняя обойма (при $\alpha = 10$ и густой смазке разница в КПД примерно 25 %);

– при числе блоков до 5 можно пользоваться рекомендуемыми в литературе КПД подшипников блоков с погрешностью в величине КПД до 10 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вплив коефіцієнта тертя ковзання та кута обхвату колесом та стрічкою гальмівного шків на рівновагу важільної системи / В. М. Богомаз, М. Г. Брильова, Л. М. Бондаренко, К. Ц. Главацький // Вісн. нац. ун-ту водного госп-ва та природокористування. – Рівне : Вид-во НУВГП, 2015. – № 2. – С. 120–125.
2. Довбня, М. П. Теоретичне визначення сили ковзання при коченні / М. П. Довбня // Проблеми трибології. – 2002. – № 2. – С. 103–106.
3. Ковальский, Б. С. Потери на блоках канатных полиспастов / Б. С. Ковальский // Строительные и дорожные машины. – 1986. – № 8. – С. 34–37.
4. Кожевников, С. Н. Теория машин и механизмов / С. Н. Кожевников. – Москва : Машиностроение, 1969. – 584 с.
5. Механика. Сопротивление материалов (теория и практика) : учеб. пособие / О. М. Болтенкова, О. Ю. Давыдов, В. Г. Егоров, С. В. Ульшин. – Воронеж : Изд-во ВГУИТ, 2013. – 121 с.
6. Прикладная механика : учеб. пособие / Х. С. Гумерова, Н. П. Петухов, В. М. Котляр, С. Г. Сидорин. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2014. – 142 с.
7. Применение и прочность полимерных материалов при изготовлении и ремонте машин и оборудования / Б. А. Грязнов [и др.]. – Киев : Ин-т проблем прочности имени Г. С. Писаренко НАН Украины, 2013. – 296 с.
8. Синенко, Е. Г. Механика : учеб. пособие / Е. Г. Синенко, О. В. Конищева. – Красноярск : Изд-во СФУ, 2015. – 236 с.
9. Способ определения мощности привода механизма передвижения мостового крана при учете трения качения / В. М. Богомаз, Л. М. Бондаренко, К. Ц. Главацький, К. О. Сокол // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 123–131. doi: 10.15802/stp2015/55335.
10. Справочник по кранам : в 2 т / М. П. Александров, М. М. Гохберг, А. А. Ковин [и др.]. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – Т. 2. – 559 с.
11. Яковлев, С. А. Соотношения между показателями сопротивления качению и скольжению в узлах машин / С. А. Яковлев, Л. Н. Бондаренко // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини : зб. наук. пр. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ, 2003. – Вип. 62. – С. 88–92.
12. A general friction model of discrete interactions for tendon actuated dexterous manipulators / A. Gao, Y. Zou, Z. Wang, H. Liu // J. of Mechanisms and Robotics. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 041019. doi: 10.1115/1.4036719.
13. Makhkamov, K. Kh. Energy analysis of wear of sliding friction units / K. Kh. Makhkamov // J. of Friction and Wear. – 2017. – Vol. 38. – Iss. 2. – P. 168–172. doi: 0.3103/s1068366617020143.
14. Rahaman, M. L. Size effect on friction and wear mechanisms of bulk metallic glass / M. L. Rahaman, L. Zhang // Wear. – 2017. – Vol. 376–377. – P. 1522–1527. doi: 10.1016/j.wear.2017.01.068.
15. Tabor, D. The mechanism of rolling friction. II. The elastic range / D. Tabor // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1955. – Vol. 229. – Iss. 1177. – P. 198–220. doi: 10.1098/rspa.1955.0082.

В. М. БОГОМАЗ^{1*}, Л. М. БОНДАРЕНКО^{2*}, М. В. ОЧЕРЕТНЮК^{3*}, О. О. ТКАЧОВ^{4*}

^{1*}Каф. «Військова підготовка спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, ел. пошта wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

^{2*}Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта bondarenko-l-m2015@yandex.ua, ORCID 0000-0002-2212-3058

^{3*}Каф. «Військова підготовка спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, ел. пошта atleteba@gmail.com, ORCID 0000-0002-9032-8602

^{4*}Каф. «Військова підготовка спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, ел. пошта otkachov@i.ua, ORCID 0000-0002-1857-7567

СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ ЖОРСТКІСНИМИ ВТРАТАМИ ТА ВТРАТАМИ В ПІДШИПНИКАХ КАНАТНИХ БЛОКІВ

Мета. Для уточнення величин коефіцієнта корисної дії (ККД) канатних блоків необхідно визначити коефіцієнт жорсткості канатів блоків із урахуванням класифікаційної групи механізму та кута обхвату канатом блоку. Передбачається використовувати при цьому добре випробувані значення коефіцієнтів корисної дії канатних блоків із урахуванням кутів обхвату канатами блоків та аналітично знайдені величини коефіцієнта тертя підшипників кочення, наведених до цапфи. **Методика.** В роботі вживається аналітичний метод визначення коефіцієнта опору підшипника блоку при обертанні його як внутрішньої, так і зовнішньої обойми, а також розрахункова схема підшипника блоку. **Результати.** Для канатних блоків проведено аналіз впливу способу змазки, режиму роботи механізму та кута обхвату канатом на втрати в підшипниках. Наведено відповідні порівняльні таблиці значень втрат. Аналіз отриманих результатів розрахунків дозволяє встановити: 1) головним опором, який впливає на коефіцієнт корисної дії канатних блоків, є опір у підшипниках; 2) другою за величиною його складовою є жорсткісні втрати, що залежать від режиму роботи, кута обхвату канатом блоку, виду мастила підшипника; 3) ККД блоку при обертанні внутрішньої обойми вище, ніж при обертанні зовнішньої приблизно на 3 % при густому мастилі та режимі 1М; 4) при послідовному розташуванні вузлів із підшипником кочення необхідно прагнути до конструкції вузла, в якому обертається внутрішня обойма; 5) при числі блоків до 5 можна користуватися рекомендованими в літературі ККД підшипників блоків із помилкою в величині ККД до 10 %. **Наукова новизна.** Автори отримали значення опорів у кулькових підшипниках канатних блоків та жорсткісні втрати, зумовлені обхватом блоку канатом. Застосовували при цьому залежності для рішення коефіцієнта тертя кочення, отримані з використанням аналітичних залежностей Герца з визначення контактних напружень і деформацій, а також експериментальних величин коефіцієнта тертя кочення для блоків. **Практична значимість.** Застосування отриманих значень опорів можуть бути використані для уточнених розрахунків механізмів машин.

Ключові слова: блок; канат; втрати; підшипник; жорсткість

V. M. BOHOMAZ^{1*}, L. M. BONDARENKO^{2*}, M. V. OCHERETNIUK^{3*}, O. O. TKACHOV^{4*}

^{1*}Dep. «Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 19 09, e-mail wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

^{2*}Dep. «Applied Mechanics and Material Science», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail bondarenko-l-m2015@yandex.ua, ORCID 0000-0002-2212-3058

^{3*}Dep. «Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 19 09, e-mail atlebeba@gmail.com, ORCID 0000-0002-9032-8602

^{4*}Dep. «Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 19 09, e-mail otkachov@i.ua, ORCID 0000-0002-1857-7567

THE RELATIONSHIP BETWEEN STIFFNESS LOSSES AND LOSSES IN BEARINGS OF ROPE BLOCKS

Purpose. To determine the efficiency of rope blocks, it is necessary to determine the stiffness coefficient of the ropes of blocks, taking into account the classification group of the mechanism and the wrapping angle of a block by a rope. At this one should use well-tested values of the efficiency coefficients of the rope blocks, taking into account the wrapping angle of a block by a rope and the analytically found friction coefficients of the rolling bearings given to the trunnion. **Methodology.** The work presents the analytical method of determining the coefficient of bearing resistance of the block when it is rotated by both the inner and outer cages, as well as the design scheme of the bearing of the block. **Findings.** The analysis of the lubrication method effect, the operating mode of the mechanism and the wrapping angle of a block by a rope on losses in bearings was carried out for rope blocks. The corresponding comparative tables of losses are given. Analysis of the obtained calculation results allows us to establish: 1) the main resistance affecting the cable blocks efficiency is the resistance in bearings; 2) the second largest component is the stiffness losses, depending on the operating mode, the wrapping angle of a block by a rope, the type of bearing

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

lubrication; 3) the block efficiency when rotating the inner cage is higher than rotating the outer one by about 3% with thick lubrication and 1M mode; 4) in the sequential location of assemblies with a rolling bearing, it is necessary to strive for the design of the assembly in which the inner cage rotates; 5) with the number of blocks up to 5, one can use the recommended definitions of block bearings in the literature with an error in the efficiency value of up to 10%. **Originality.** The authors obtained values of resistances in the rolling bearings of the rope blocks and stiffness losses due to the girth of the block by the rope. In this case, dependences were used to determine the coefficient of rolling friction, obtained using the Hertz analytic dependences on determination of contact stresses and deformations, as well as the experimental values of the coefficient of rolling friction for the blocks. **Practical value.** The resistance values obtained by the authors can be used for refined calculations of the mechanisms of machines.

Key words: block; rope; losses; bearing; stiffness

REFERENCES

1. Bogomas, V. M., Briljova, M. G., Bondarenko, L. M., & Glavatskij, K. C. (2015). Vplyv koefitsiienta tertia kovzannia ta kuta obkhvatu kolodkoiu ta strichkoiu halmivnoho shkiva na rivnovahu vazhilnoi systemy. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering, Technical Sciences*, 2, 120-125.
2. Dovbnia, M. P. (2002). Teoretychne vyznachennia syly kovzannia pry kochenni. *Problems of Tribology*, 2, 103-106.
3. Kovalskiy, B. S. (1986). Poteri na blokakh kanatnykh polispastov. *Construction and Road Building Machines*, 8, 34-37.
4. Kozhevnikov, S. N. (1969). *Teoriya mashin i mekhanizmov*. Moscow: Mashinostroeniye.
5. Boltenkova, O. M., Davydov, O. Y., Yegorov, V. G., & Ulshin, S. V. (2013). *Mekhanika. Soprotivleniye materialov (teoriya i praktika)*. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies.
6. Gumerova, K. S., Petukhov, N. P., Kotlyar, V. M., & Sidorin S. G. (2014). *Prikladnaya mekhanika*. Kazan: Kazan National Research Technological University.
7. Gryaznov, B. A., Bukhtiyarov, V. K., Kakuevitskiy, V. A., Aronovich, D. A., & Nalimov, Y. S. (2013). *Primeneniye i prochnost polimernykh materialov pri izgotovlenii i remonte mashin i oborudovaniya*. B. A. Lyashenko (Ed.). Kyiv: G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine.
8. Sinenko, Y. G., & Konishcheva, O. V. (2015). *Mekhanika*. Krasnoyarsk: SibFU.
9. Bohomaz, V. M., Bondarenko, L. M., Hlavatskiy, K. T., & Sokol, K. O. (2015). Method of the drive power determination of the mechanisms of the bridge crane movement considering the rolling friction. *Science and Transport Progress*, 5 (59), 123-131. doi:10.15802/stp2015/55335
10. Aleksandrov, M. P., Gokhberg, M. M., Kovin, A. A., Kulkova, N. N., Mazover, I. S., Nevzorov, L. A., & ... Sokolov S.A. (1988). *Spravochnik po kranam* (Vol. 1-2). *Kharakteristiki i konstruktivnyye skhemy kranov. Kranovyye mekhanizmy, ikh detali i uzly. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya kranov* (Vol. 2). M. M. Gokhberg (Ed.). Moscow: Mashinostroeniye.
11. Yakovlev, S. A., Bondarenko, L. N. (2003). Sootnosheniya mezhdru pokazatelyami soprotivleniya kacheniyu i skolzheniyu v uzлах машин. *Mining, constructional, road and melioration machines*, 62, 88-92.
12. Gao, A., Yun, Z., Zhidong, W., & Hao, L. (2017). A general friction model of discrete interactions for tendon actuated dexterous manipulators. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 9 (4), 041019. doi:10.1115/1.4036719
13. Makhkamov, K. K. (2017). Energy analysis of wear of sliding friction units. *Journal of Friction and Wear*, 38 (2), 168-172. doi:0.3103/s1068366617020143
14. Rahaman, M. L., & Zhang, L. (2017). Size effect on friction and wear mechanisms of bulk metallic glass. *Wear*, 376-377, 1522-1527. doi:10.1016/j.wear.2017.01.068
15. Tabor D. (1955). The mechanism of rolling friction: The elastic range. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 229 (1177), 198-220. doi:10.1098/rspa.1955.0082

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. С. В. Ракишой (Украина); д.т.н., проф. В. Г. Заренбиным (Украина)

Поступила в редколлегию: 22.03.2017

Принята к печати: 06.07.2017

УДК 629.5.035.5

Ю. М. КОРОЛЬ^{1*}, О. Н. КОРНЕЛЮК²

^{1*}Каф. «Гидромеханика и гидротехника», Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, пр-т Героев Сталинграда, 9, Николаев, Украина, 54025, тел. +38 (066) 188 21 34, эл. почта y_korol@nuos.edu.ua, ORCID 0000-0001-6588-7798

²Каф. «Информационные технологии и физико-математические дисциплины», Херсонский филиал, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, пр-т Ушакова, 44, Херсон, Украина, 73000, тел. +38 (050) 503 42 30, эл. почта y_korol@nuos.edu.ua, ORCID 0000-0002-2444-1340

ВЛИЯНИЕ ЛОПАСТНЫХ И ПРОФИЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ

Цель. Для обоснования экспериментальных методов необходимо: 1) сформировать 3D-модели исследуемых гребных винтов; 2) изучить влияние профилировки лопасти гребного винта на его гидродинамические характеристики; 3) разработать методику задания оптимальных параметров проекта для моделирования работы гребного винта в свободной воде, которые в дальнейшем можно было бы рекомендовать при моделировании подобных задач в CFD-пакете Flow Vision. **Методика.** Разработана технология проектирования гребных винтов новых серий. Впервые предложена методика постановки проекта в среде CFD-пакета Flow Vision для исследования работы гребного винта в свободной воде. **Результаты.** На примере решения практической задачи по исследованию влияния профилировки лопасти на эффективность гребного винта обоснована целесообразность разработки предложенной методики постановки проекта для расчёта гребных винтов в CFD-пакете Flow Vision. Применение данной методики позволяет получить достоверные значения гидродинамических характеристик винта для построения кривых действия, а также сократить расчётное время. Такой подход даёт возможность оптимизировать процесс проектирования гребных винтов. **Научная новизна.** Путём проведения многочисленных экспериментов и на основании анализа полученных результатов было установлено, что именно профилировка гребного винта в большей степени влияет на его гидродинамические характеристики. Выбор и расчёт гребного винта для проектируемого судна происходит на ранних стадиях проектирования. Поэтому обоснование выбора той или иной геометрии винта является задачей актуальной. Предложена и обоснована методика задания параметров проекта для проведения численных экспериментов при изучении работы гребных винтов в свободной воде. Таким образом, можно проектировать не только серийные винты, но и винты новых серий, максимально сокращая расходы на проведение исследований наряду с достоверностью получаемых результатов расчёта. **Практическая значимость.** Авторами установлено, что влияние профилировки лопасти гребного винта на его гидродинамические характеристики больше, чем влияние других общих и лопастных характеристик. Разработанная методика постановки проекта для расчёта гребных винтов в CFD-пакете Flow Vision может быть использована при проектировании винтов как новых серий, так и уже существующих, а также в случае оптимизации формы гребного винта с целью обеспечения наибольшего коэффициента полезного действия (КПД). Применение методики позволит сократить время на проведение численного эксперимента за счёт сходимости решения через сравнительно небольшой отрезок времени.

Ключевые слова: численный эксперимент; профилировка лопасти гребного винта; CFD-пакет; несерийный гребной винт; 3D-модель гребного винта; высокая эффективность; гидродинамика

Введение

Одним из критериев эффективности гребного винта является значение его коэффициента полезного действия. Ввиду того, что до 60 % эксплуатационных затрат на морские перевозки приходится на топливо, следует отметить актуальность совершенствования формы гребных винтов как одного из направлений обеспечения

экономии дорогостоящего топлива во время эксплуатации судов.

При проектировании высокоэффективных гребных винтов необходимо учитывать влияние их геометрии и формы поверхности на гидродинамические характеристики [8, 10, 11]. По результатам исследований, описываемых в данной статье, и с учётом разработанной ме-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

тодики задания параметров проекта в CFD-пакете для моделирования работы гребных винтов в свободной воде, следует отметить, что основополагающим фактором, влияющим на гидродинамику винта, остаётся профилировка лопасти проектируемого гребного винта.

Цель

Целью данных исследований является обоснование при помощи теоретических и экспериментальных методов связи между лопастными и профильными характеристиками гребного винта на его гидродинамическими характеристиками. Для достижения цели в исследовании предусмотрено разработать методику постановки проекта в среде CFD-пакета Flow Vision для исследования работы гребного винта в свободной воде, изучить адекватность этой методики путём проведения численных экспериментов с винтами различной профилировки и оценки достоверности полученных результатов с помощью верификации.

Методика

На сегодняшний день основным способом получения оптимального решения задач проектирования судов и судовых движителей, в частности, является многовариантное проектирование, которое возможно только с использованием компьютерных технологий, что позволяет сократить количество модельных экспериментов в опытовых бассейнах [9]. В публикации [5] описана разработанная авторами схема проектирования эффективных гребных винтов. В рамках проектирования винтов по такой схеме проведены исследования влияния профилировки лопасти на коэффициент полезного действия гребного винта. Суть исследования состоит в построении кривых действия исследуемых гребных винтов путём проведения численных экспериментов и сравнения их данных между собой. Такой путь позволяет сделать выводы об их эффективности.

Таким образом, задача была разбита на следующие этапы:

1 этап. Выбор геометрических характеристик исследуемых винтов

К общим геометрическим параметрам относятся: диаметр гребного винта, шаговое отно-

шение, дисковое отношение, угол откидывания лопасти, число лопастей и другое. В качестве общих параметров для исследования гидродинамических характеристик гребного винта выбраны значения, указанные на рис. 1 (это строки 1–11).

Диаметр гребного винта, м	1.00
Шаговое отношение	1.00
Дисковое отношение	0.35
Относительная толщина лопасти на оси	0.045
Относительный диаметр ступицы	0.180
Угол откидки лопасти, град	0.000
Безразмерный радиус начала отгиба	1.00
Безразмерная величина отгиба	0.0
Число лопастей	4
Направление вращения (1-правое; -1-левое)	1
Тип контура (1-сабл., 2-усеч., 3-симметр.)	1
Тип профиля	6

Рис.1. Исходные данные для программы-генератора поверхности гребных винтов GSP3D, описанной в [4]

Fig.1. The initial data for the program-generator of the surface of propellers GSP3D, described in [4]

Следует отметить, что в качестве базового выбран четырёхлопастной гребной винт правого вращения с саблевидным типом контура.

II этап. Выбор профилировки лопастей

Лопастные параметры детально характеризуют форму лопасти винта и их, в свою очередь, можно разделить на две группы. К первой группе относятся параметры, определяющие форму контура лопасти и характеристики винтовой поверхности. А именно: $\bar{b}_{in}(\bar{r})$ – закон изменения безразмерной ординаты входящей кромки спрямленной лопасти вдоль радиуса; $\bar{c}_b(\bar{r})$ – закон изменения безразмерной длины хорды профиля вдоль радиуса; $\bar{P}_d(\bar{r})$ – закон изменения шагового отношения вдоль радиуса лопасти, а:

$$b_{in}(r) = c_{bm} \bar{b}_{in}(\bar{r}), \quad c_b(r) = c_{bm} \bar{c}_b(\bar{r}),$$

$$\frac{P}{D}(r) = \frac{P_c}{D} \bar{P}_d(\bar{r}), \quad \bar{r} = \frac{2r}{D},$$

где r – текущий радиус, c_{bm} – максимальная ширина (длина хорды) лопасти, $\frac{P_c}{D}$ – конструктивное шаговое отношение. Ко второй группе относятся параметры, определяющие форму профиля лопасти.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Лопасть винта имеет на каждом радиусе профильные сечения различной толщины, длины хорды и других профильных характеристик, в дальнейшем называемых профилировкой. Другими словами, речь идёт о параметрах, определяющих форму профиля лопасти. Количество, сущность и значения этих параметров зависят от типа профиля. Также известно, что чем больше средняя линия профиля отклоняется от нуля, тем винт становится более саблевидным.

При одинаковых общих геометрических параметрах исследовались винты с профилями (рис. 3):

- профиль серии «В»;
- саблевидный профиль, близкий к профилю серии В;
- NACA6556XX;
- NACA6633XX.

На рис. 2 представлены профили винтов, сформированных с помощью авторской программы FoilGen, которая позволяет с минимальным количеством исходных данных формировать профили различных серий гребных винтов.

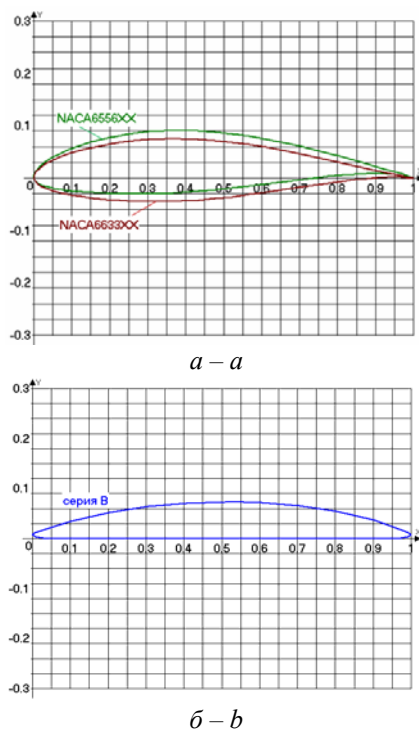


Рис. 2. Профили гребных винтов:
а – серии NACA6556XX, NACA6633XX; б – серия «В»

Fig. 2. Profiles of propellers:
а – series NACA6556XX, NACA6633XX; б – series В

III этап. Подготовка данных для построения поверхности моделей гребных винтов

Таким образом, путём изменения перед запуском программы GSP3D [4] номера профиля (строка 12 на рис. 1) были сформированы массивы координат поверхности гребных винтов для построения их 3D-моделей. Закон изменения максимальной толщины профиля вдоль радиуса для всех моделей винтов оставался одинаковым. Это связано с обеспечением прочности лопастей гребного винта.

IV этап. Создание 3D-моделей гребных винтов

Далее в CAD SolidWorks [1] на основе данных, подготовленных на этапе III, построены 3D-модели винтов, представленные на рис. 3.

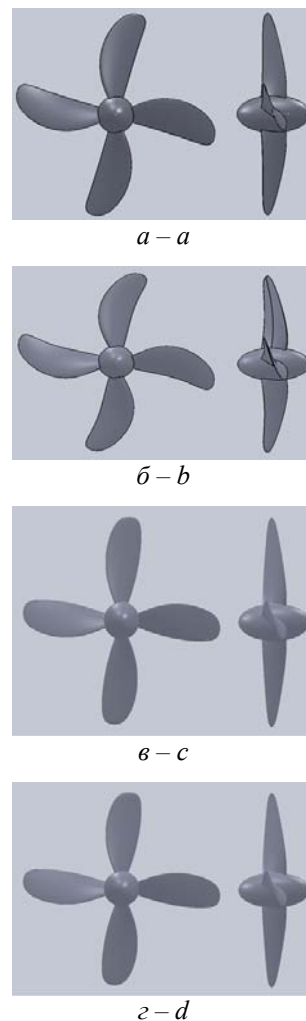


Рис. 3. 3D-модели винтов

Fig. 3. 3D models of screws

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

V этап. Расчёт гребных винтов в CFD-пакете Flow Vision

В CFD-пакете Flow Vision существует несколько способов задания расчётной области: 1) вставкой поверхности винта в бокс при помощи фильтра подвижного тела; 2) заданием бокса с вырезом внутри в форме поверхности винта; 3) использованием внешнего бокса со скользящей поверхностью [6, 7].

Отличные результаты были получены путём задания расчётной области третьим способом. При использовании внешнего бокса со скользящей поверхностью расчётная область в формате STL состоит из трёх областей, для двух из которых – рабочих, задаются граничные условия согласно рис. 4.

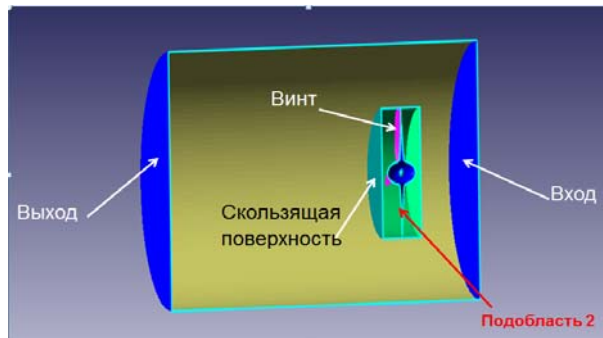


Рис. 4. Бокс с использованием граничного условия. Скользящая поверхность

Fig. 4. Box using the boundary condition. Sliding surface

В результате многочисленных экспериментов, опубликованных авторами ранее в [2, 3], при постановке проекта было принято решение задать следующие параметры:

- модель «Несжимаемая жидкость» с $k - \epsilon$ моделью турбулентности;
- локально измельчённую расчётную сетку 100/50/50;
- расчётный шаг по времени $\Delta t = 0,001$;
- слои визуализации: векторы по скорости; заливку по давлению, характеристики по давлению;
- скорость потока воды в зависимости от поступления J исследуемого гребного винта: 1 м/с, 4 м/с, 5 м/с;
- скорость вращения гребного винта (5 об/с);
- уровень адаптации сетки по поверхности у гребного винта – 2.

Результаты расчёта формируются в слое «Характеристики и давление» в виде файла с расширением *.glo, в котором содержатся значения сил и моментов, действующих на гребной винт при заданных значениях частоты n и скорости v_p на входе. Далее рассчитываются безразмерные характеристики $K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$,

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \text{ и } \eta_p = \frac{K_T J_p}{K_Q 2\pi}.$$

На рис. 5 представлены результаты таких расчётов для винта серии «В» – сплошные линии соответствуют модельному эксперименту, результаты которого опубликованы в [3], точки – численному эксперименту, приведенному в CFD-пакете Flow Vision.

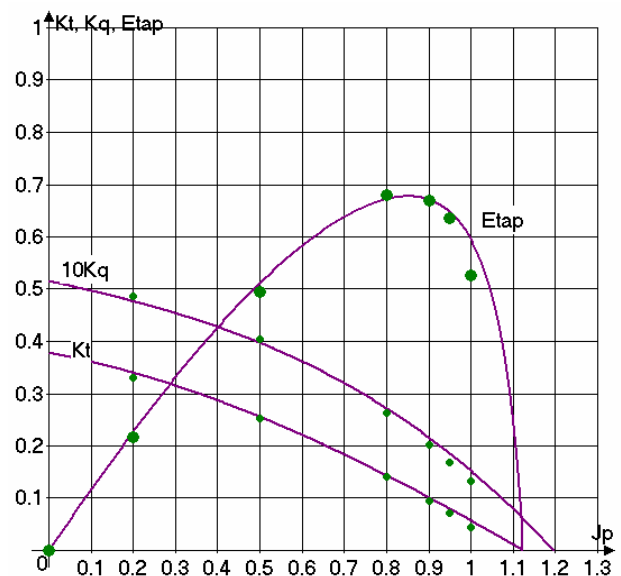


Рис. 5. Кривые действия гребного винта с профилем серии «В» (физический и численных экспериментов)

Fig. 5. Propeller action curves with profile «B» (physical and numerical experiments)

Результаты

В процессе верификации результатов численных экспериментов, проведённых в ходе исследования, использованы результаты модельных экспериментов, опубликованные ранее для гребных винтов серии «В». Абсолютно подобная 3D-модель такого винта была рассчитана в CFD-пакете Flow Vision. На рис. 5 сплош-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

ные линии соответствуют модельному эксперименту, точки – численному эксперименту, приведённому в CFD-пакете Flow Vision. Отсюда следует, что результаты численных экспериментов достоверные. Дальнейшие исследования проходили по двум направлениям:

А. Разработка методики постановки проекта для расчёта гребных винтов в CFD-пакете Flow Vision. Дело в том, что каждый CFD-пакет требует верификации и предварительного его освоения в силу его сложности. При задании одинаковой сетки для винтов с различной профилировкой наблюдалось снижение КПД при шаге больше 0,9. Разработанная методика позволяет максимально сократить время проведения численного эксперимента за счёт сходимости результатов уже на 200 итерации (рис. 6). Это достигнуто за счёт исследования влияния размерности сетки расчётной области и, как следствие, уменьшения количества расчётных ячеек до 300 000. Кроме того, экспериментально установлено влияние расчётного шага на результаты. Рекомендуется при шагах винта больше 0,95 увеличивать сетку на 20 % вдоль осей X, Y, Z соответственно. При этом расчётный шаг задаётся не как фиксированный, а путём задания числа Куранта, равного 0,5.

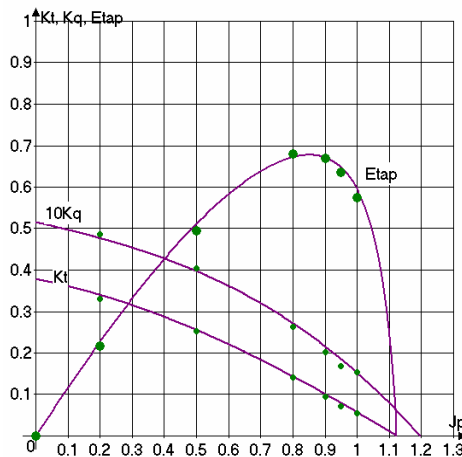


Рис. 6. Результат применения разработанной методики постановки проекта в CFD-пакете Flow Vision

Fig. 6. The result of the developed methods application of the project in CFD package Flow Vision

Производительность выполненных расчётов в CFD-пакете Flow Vision представлена в табл. 1.

Таблица 1

Производительность

Table 1

Productivity

Параметр	$J < 0,95$	$J \geq 0,95$
Время 1-й итерации	1,74 минуты	1,98 минуты
Количество расчётных ячеек	300 000	400 000
Сходимость расчёта/ Вре- мя расчёта	в среднем на 120 итераций / 209 минут	в среднем на 350 итераций / 691 минута

Б. Проведение численных экспериментов с винтами различной профилировки. Результаты расчёта представлены на рис. 7 в виде кривых действия гребных винтов. Исследования доказали влияние профилировки на гидродинамические характеристики винтов. Придание саблевидности профилю, близкому к серии «В», не привело к увеличению КПД гребного винта.

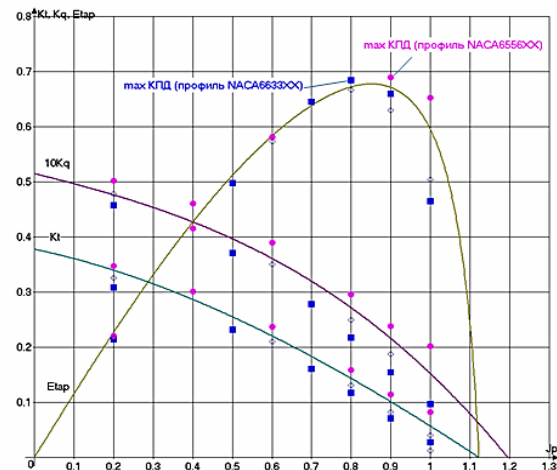


Рис. 7. Анализ результатов расчёта: точки в виде квадратов – профиль NACA6633XX, точки в виде кружков – профиль NACA6556XX, точки в виде ромбов – профиль саблевидный, близкий к серии «В»

Fig. 7. Analysis of calculation results: points in the form of squares – profile NACA6633XX, points in the form of circles – profile NACA6556XX, points in the form of rhombuses – the profile is saber-like, close to series «В»

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Результаты, полученные при исследовании винтов с другими профилями, говорят об их преимуществе в сравнении с профилем серии «В». КПД гребного винта серии NASA6556 при шаге 0,9 наибольший – на 2,7 % больше, чем у винта серии «В». В свою очередь КПД винта серии NASA6633 имеет максимальный КПД, на 0,7 % меньший, чем у серии NASA6556, однако при этом шаг его составляет 0,8. Этот шаг более приближен к реальным режимам работы гребного винта.

Научная новизна и практическая значимость

Путём проведения многочисленных экспериментов и на основании анализа полученных результатов было установлено, что именно профилировка гребного винта в большей степени влияет на его гидродинамические характеристики. Выбор и расчёт гребного винта для проектируемого судна происходит на ранних стадиях проектирования. Поэтому обоснование выбора той или иной геометрии винта является задачей актуальной. Разработанная методика постановки проекта для расчёта гребных винтов в CFD-пакете Flow Vision может быть использована при проектировании винтов как новых серий, так и уже существующих, а также в случае оптимизации формы гребного винта с целью обеспечения наибольшего КПД. Применение методики позволит сократить время на проведение численного эксперимента за счёт

получения решения через сравнительно небольшой отрезок времени.

Выводы

1. Очевидно, что гидродинамические характеристики гребных винтов, а именно: коэффициент упора $K_T\left(\frac{P}{D}, J_P\right)$ и коэффициент момента $K_Q\left(\frac{P}{D}, J_P\right)$ – явно зависят от шагового отношения $\frac{P}{D}$ и относительного шага $J_P = \frac{v_P}{nD}$ и неявно зависят от профилировки лопастей.

2. Установлено влияние профилировки лопастей на указанные характеристики K_T, K_Q .

3. Очевидно, что, действуя подобным образом, можно подбирать как тип профиля, так и зависимость его характеристик от радиуса лопасти, которые будут способствовать повышению КПД гребных винтов на расчетных режимах их работы.

4. Известны более двадцати серий гребных винтов, на основании которых проектируются новые. Однако, в эксплуатации, КПД гребных винтов, как правило, достигает не более 65 %. Таким образом, разработанная схема проектирования гребных винтов новых серий [5], а также разработанная методика постановки проекта для расчёта гребных винтов в CFD-пакете Flow Vision являются актуальными и имеют практическое значение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алямовский, А. А. Solid Works 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
2. Гидродинамический анализ судна в программном комплексе Flow Vision [Электронный ресурс] / А. А. Аксенов, В. В. Шмелев, А. В. Печенюк, Б. Н. Станков, В. Г. Пасечник // Rational Enterprise Management. – 2007. – № 3. – С. 64–67.
3. Корнелюк, О. Н. Расчёт гидродинамических характеристик гребного винта при работе в свободной воде в CFD-пакете Flow Vision / О. Н. Корнелюк // 36. наук. пр. / Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. – Миколаїв, 2016. – № 2. – С. 34–39. doi: 10.15589/jnn20160205.
4. Король, Ю. М. Автоматизированная генерация данных для построения твердотельных моделей гребных винтов / Ю. М. Король, О. Н. Рудько // 36. наук. пр. / Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. – Миколаїв, 2008. – № 1. – С. 56–61.
5. Новый метод проектирования высокоэффективных гребных винтов [Электронный ресурс] / Ю. М. Король, О. Н. Корнелюк // Инновации в судостроении и океанотехнике : материалы V междунар. науч.-техн. конф. – Николаев, 2014. – Режим доступа: http://portal.fke.utn.my/libraryfke/files/541_sazilabhintisalleh2010.pdf. – Загл. с экрана. – Проверено : 02.07.2017.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

6. Применение системы инженерного анализа FlowVision для решения прикладных задач гидродинамики судна [Электронный ресурс] / Б. Н. Станков, А. В. Печенюк // САПР и графика. – 2006. – № 11. – С. 50–56. – Режим доступа: <http://sapr.ru/article/16904>. – Загл. с экрана. – Проверено: 04.07.2017.
7. Чижиумов, С. Д. Основы гидродинамики : учеб. пособие / С. Д. Чижиумов. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КНАГТУ», 2007. – 106 с.
8. Application of Dynamic Mesh in Analysis of Propeller Hydrodynamic Characteristics / F. L. Wu, Y. L. Peng, Z. G. Zhang, G. D. Wang // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 212–213. – P. 1112–1118. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.212-213.1112.
9. Bulten, N. Optimum propeller design leads to higher ship efficiency [Электронный ресурс] / N. Bulten // Wärtsilä Technical Journal. – 2014. – 23 Oct. – Режим доступа: <https://www.wartsila.com/twentyfour7/in-detail/optimum-propeller-design-leads-to-higher-ship-efficiency>. – Загл. с экрана. – Проверено: 04.07.2017.
10. Ou, L. J. Influence Analysis of Blade Fracture on Hydrodynamic Performance of Ducted Propellers Based on CFD / L. J. Ou, D. Y. Li, W. Zhang // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 300–301. – P. 1071–1076. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.300-301.1071.
11. The Hydrodynamic Analysis of Propeller Based on ANSYS-CFX / D. Z. Wang, D. Wang, L. Mei, W. C. Shi // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 694–697. – P. 673–677. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.694-697.673.

Ю. М. КОРОЛЬ^{1*}, О. М. КОРНЕЛЮК²

^{1*}Каф. «Гідромеханіка та гідротехніка», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, пр-т Героїв Сталінграда, 9, Миколаїв, Україна, 54025, тел. +38 (066) 188 21 34, ел. пошта y_korol@nuos.edu.ua, ORCID 0000-0001-6588-7798

²Каф. «Інформаційні технології та фізико-математичні дисципліни», Херсонський філіал, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, пр-т Ушакова, 44, Херсон, Україна, 73000, тел. +38 (050) 503 42 30, ел. пошта do_life@rambler.ru, ORCID 0000-0002-2444-1340

ВПЛИВ ЛОПАТЕВИХ ТА ПРОФІЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ГІДРОДИНАМІЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ ГРЕБНИХ ГВИНТІВ

Мета. Для обґрунтування експериментальних методів необхідно: 1) сформувати 3D-моделі досліджуваних гребних гвинтів; 2) вивчити вплив профілювання лопаті гребного гвинта на його гідродинамічні характеристики; 3) розробити методику завдання оптимальних параметрів проекту для моделювання роботи гребного гвинта у вільній воді, які в подальшому можна було б рекомендувати при моделюванні подібних завдань в CFD-пакеті Flow Vision. **Методика.** Розроблено технологію проектування гребних гвинтів нових серій. Вперше запропонована методика постановки проекту в середовищі CFD-пакета Flow Vision для дослідження роботи гребного гвинта у вільній воді. **Результати.** На прикладі вирішення практичного завдання по дослідженню впливу профілювання лопаті на ефективність гребного гвинта обґрунтовано доцільність розробки запропонованої методики постановки проекту для розрахунку гребних гвинтів в CFD-пакеті Flow Vision. Застосування даної методики дозволяє отримати достовірні значення гідродинамічних характеристик гвинта для побудови кривих дії, а також скоротити розрахунковий час. Такий підхід дає можливість оптимізувати процес проектування гребних гвинтів. **Наукова новизна.** Шляхом проведення численних експериментів та на підставі аналізу отриманих результатів було встановлено, що саме профілювання гребного гвинта в більшій мірі впливає на його гідродинамічні характеристики. Вибір та розрахунок гребного гвинта для судна, що проектується, відбувається на ранніх стадіях проектування. Тому обґрунтування вибору тієї чи іншої геометрії гвинта є завданням актуальним. Запропоновано та обґрунтовано методику завдання параметрів проекту для проведення чисельних експериментів при вивченні роботи гребних гвинтів у вільній воді. Таким чином можна проектувати не тільки серійні гвинти, а й гвинти нових серій, максимально скорочуючи витрати на проведення досліджень, отримуючи при цьому достовірні результати розрахунку. **Практична значимість.** Авторами встановлено, що вплив профілювання лопаті гребного гвинта на його гідродинамічні характеристики більше, ніж вплив інших загальних і лопатевих характеристик. Розроблена методика постановки проекту для розрахунку гребних гвинтів у CFD-пакеті Flow Vision може бути використана при проектуванні гвинтів як нових серій, так і вже існуючих, а також у разі оптимізації форми гребного гвинта з метою забезпечення найбільшого коефіцієнту корисної дії (ККД). Застосування методики дозволить

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

скоротити час на проведення чисельного експерименту за рахунок збіжності рішення через порівняно невеликий відрізок часу.

Ключові слова: чисельний експеримент; профілювання лопаті гребного гвинта; CFD-пакет; несерійний гребний гвинт; 3D-модель гребного гвинта; висока ефективність; гідродинаміка

Y. M. KOROL^{1*}, O. M. KORNELYUK²

^{1*}Dep. «Hydromechanics and Hydraulic Engineering», Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Geroyev Stalingrada Av., 9, Nikolayev, Ukraine, 54025, tel. +38 (066) 188 21 34, e-mail y_korol@nuos.edu.ua, ORCID 0000-0001-6588-7798

²Dep «Information Technologies and Physical and Mathematical Disciplines», Kherson Branch, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ushakov Av., 44, Kherson, Ukraine, 73000, tel. +38 (050) 503 42 30, e-mail do_life@rambler.ru, ORCID 0000-0002-2444-1340

INFLUENCE OF BLADE AND PROFILE CHARACTERISTICS ON HYDRODYNAMIC EFFICIENCY OF MARINE PROPELLERS

Purpose. The study involves: 1) formation of 3D propeller models under study; 2) studying of the effect of profiling the blade of the propeller on its hydrodynamic characteristics; 3) development of a methodology for specifying optimal project parameters for modeling the operation of a propeller in free water, which in the future could be recommended when simulating similar tasks in the CFD package Flow Vision. **Methodology.** The technology of design of propellers of new series was developed. For the first time, the project methodology was proposed in the CFD package Flow Vision for studying the operation of a propeller in free water. **Findings.** On the example of solving a practical problem for studying the influence of blade profiling on the efficiency of a propeller, the expediency of developing the proposed methodology for setting a propeller design in the CFD package Flow Vision is justified. The using of this technique makes it possible to obtain reliable values of the propeller hydrodynamic characteristics for constructing its action curves, and also to reduce the estimated time. This approach makes it possible to optimize the process of designing propellers. **Originality.** Through numerous experiments and based on the analysis of the obtained results, it was found that the profiling of the propeller mainly affects its hydrodynamic characteristics. The choice and calculation of the propeller for the projected vessel occurs in the early stages of design. Therefore, the rationale for choosing one or another geometry of the marine propeller is a topical task. A method for specifying project parameters for conducting numerical experiments in studying the operation of propellers in free water was proposed and justified. Thus, it is possible to design not only the serial screws, but also the new series propellers, minimizing the costs of carrying out the research along with the reliability of the resulting calculation results. **Practical value.** Authors established that the influence of the propeller blade profiling on its hydrodynamic characteristics is greater than the influence of its other general and blade characteristics. The developed design methodology for the calculation of propellers in the CFD package Flow Vision can be used to design the marine propellers of both new series and existing ones, and also in the case of optimizing the shape of the propeller to ensure the greatest efficiency. The application of the technique will allow reducing the time for conducting a numerical experiment due to the convergence of the solution in a relatively short time.

Keywords: numerical experiment; profiling blade propeller; CFD package; non-serial propeller; 3D model of the marine propeller; high efficiency; hydrodynamic

REFERENCES

1. Alyamovskiy, A. A. (2008). Solid Works 2007/2008. Kompyuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike. St. Petersburg: BHV-Peterburg.
2. Aksenov, A. A., Shmelev, V. V., Pechenyuk, A. V., Stankov, B. N. & Pasechnik, V. G. (2007). Gidrodinamicheskii analiz sudna v programmnom komplekse Flow Vision. *Rational Enterprise Management*, 3, 64-67.
3. Kornelyuk, O. N. (2016). Calculation of the hydrodynamic characteristics of the screw propeller when working in the free water in CFD-package Flow Vision. *Collection of Scientific Publications NUS*, 2, 34-39. doi:10.15589/jnn20160205
4. Korol, Y. M., & Rudko, O. N. (2008). Avtomatizirovannaya generatsiya dannykh dlya postroyeniya tverdotelnykh modeley grebnykh vintov. *Collection of Scientific Publications NUS*, 1, 56-61.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

5. Korol, Y. M., & Kornelyuk, O. N. (2014). Novyy metod proyektirovaniya vysokoeffektivnykh grebnykh vintov. *Proceedings of the V International Conference on «Innovatsii v sudostroenii i okeanotekhnike», October 08-10, 2014, Nikolaev*. Retrieved from <https://www.usenix.org/system/files/conference/woot17/woot17-paper-bock.pdf>
6. Stankov, B. N., & Pechenyuk, A. V. (2006). Primeneniye sistemy inzhenerenogo analiza FlowVision dlya resheniya prikladnykh zadach gidrodinamiki sudna. *SAPR i grafika*, 11, 50-56. Retrieved from <http://sapr.ru/article/16904>
7. Chizhiumov, S. D. (2007). *Osnovy gidrodinamiki* [tutorial]. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-na-Amure State Technical University.
8. Wu, F. L., Peng, Y. L., Zhang, Z. G., & Wang, G. D. (2012). Application of Dynamic Mesh in Analysis of Propeller Hydrodynamic Characteristics. *Applied Mechanics and Materials*, 212-213, 1112-1118. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.212-213.1112
9. Bulten, N. (2014, October 23). Optimum propeller design leads to higher ship efficiency. *Wärtsilä Technical Journal*. Retrieved from <https://www.wartsila.com/twentyfour7/in-detail/optimum-propeller-design-leads-to-higher-ship-efficiency>
10. Ou, L. J., Li, D. Y., & Zhang, W. (2013). Influence Analysis of Blade Fracture on Hydrodynamic Performance of Ducted Propellers Based on CFD. *Applied Mechanics and Materials*, 300-301, 1071-1076. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.300-301.1071
11. Wang, D. Z., Wang, D., Mei, L., & Shi, W. C. (2013). The Hydrodynamic Analysis of Propeller Based on ANSYS-CFX. *Advanced Materials Research*, 694-697, 673-677. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.694-697.673

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А. В. Щедролосевым (Украина); к.физ.-мат.н., доц. Н. Л. Дон (Украина)

Поступила в редколлегию: 17.03.2017

Принята к печати: 14.06.2017

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 624.132.3

С. В. КРАВЕЦЬ¹, О. П. ПОСМІТЮХА^{2*}, В. М. СУПОНЄВ³¹Каф. «Будівельні, дорожні, меліоративні, сільськогосподарські машини і обладнання», Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Новака, 77, Рівне, Україна, 33028, тел. +38 (0362) 63 55 80, ел. пошта s.v.kravets@nuwm.edu.ua, ORCID 0000-0003-4063-1942^{2*}Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 150 95 00, ел. пошта AleksandrP@3g.ua, ORCID 0000-0002-9701-3873³Каф. «Будівельні і дорожні машини», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Тимурівців, 3, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 738 77 97, ел. пошта v-suponev@ukr.net, ORCID 0000-0001-7404-6691**ВИЗНАЧЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНОГО ТА ОПТИМАЛЬНОГО ДІАМЕТРІВ КОНІЧНО-ЦИЛІНДРИЧНОГО НАКОНЕЧНИКА З ВИСТУПАМИ ДЛЯ ПРОКОЛЮВАННЯ ҐРУНТУ**

Мета. Будівництво нових залізничних колій, об'єктів інфраструктури, ремонт та заміна існуючих підземних комунікацій пов'язані з розробкою горизонтальних порожнин у ґрунті безтраншейним способом. Статичний прокол ґрунту робочим органом із конусним наконечником є найбільш поширеним методом у практиці формування піонерної свердловини при безтраншейному прокладанні розподільних комунікацій. Однак, у процесі виконання проектних розрахунків отримання пілотної свердловини та подальшого її розширення до необхідних розмірів гостро стоїть питання способів розрахунків робочих зусиль. Існуючі методи спираються на емпіричні залежності та експериментальні коефіцієнти, що зменшують точність підрахунків та збільшують вартість робіт. Пропонується підвищити точність та спростити процес визначення зусиль проколювання ґрунту конічним наконечником статичним способом. **Методика.** В роботі пропонується визначення еквівалентного діаметра конічного наконечника, що зумовлений діаметром свердловини, та теоретичний спосіб розрахунку оптимальних параметрів ґрунтопроколюючої головки з використанням відомих параметрів: типу ґрунту та його вологості, що визначаються за Державними будівельними нормами (ДБН). **Результати.** Отримані теоретичні дослідження можуть бути використані з метою підвищення ефективності робочого обладнання для проколу ґрунту статичним методом при безтраншейному прокладанні підземних комунікацій. **Наукова новизна.** Авторами встановлена залежність еквівалентного діаметра основи конуса від діаметра циліндричної частини наконечника проколюючої головки, яка дозволяє усунути з процесу статичного проколювання сили тертя на бічній циліндричній поверхні наконечника. **Практична значимість.** Теоретичні розрахунки для визначення оптимальних діаметрів конічного наконечника з виступами для проколювання ґрунту дозволили встановити: якщо діаметр конуса більший максимально-граничного діаметра свердловини (ґрунтової порожнини), то лобовий опір конічно-циліндричного наконечника зростає інтенсивніше за опір циліндричної частини наконечника. Максимальне зниження зусиль проколювання має місце для ґрунтової порожнини, діаметр якої у 2 рази менший за максимальний граничний діаметр. При проведенні розрахунків із вибору розмірів робочих органів для проколювання ґрунту вихідними даними є тип ґрунту та його характеристики за ДБН, а також вологість ґрунту, визначена традиційними способами.

Ключові слова: теоретична модель; безтраншейна технологія; статичний прокол ґрунту; інженерні комунікації; проколююча головка; горизонтальна свердловина

Вступ

Загальна зношеність комунального господарства та збільшення енергоспоживання у великих містах змушують комунальників модернізувати свої старі мережі й створювати нові. Виконання монтажних робіт в умовах сучасно-

го мегаполісу вимагає широкого використання безтраншейних технологій, які широко представлені на ринку послуг. Основним недоліком цих технологій є їхня вартість, що впливає з високої вартості бурового обладнання та собівартості виконання робіт. З різноманіття представлених на ринку методів отримання техно-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

логічних порожнин у ґрунті найбільш простим та дешевим є статичний прокол. Його використовують для безтраншейного прокладання розподільних інженерних мереж під дорогами або іншими завадами руху на трасі. Для створення горизонтальних свердловин широко використовується метод статичного проколу ґрунту. Простота обладнання, мінімальні експлуатаційні витрати та простота експлуатації сприяють швидкому поширенню даного методу. Метод полягає в силовому проникненні крізь ґрунт проколюючого робочого органу, параметри якого визначають його опір, який, у свою чергу, впливає на параметри приводу силової установки. Таким чином, визначення еквівалентного діаметра конічного наконечника за діаметром свердловини та отримання теоретичного способу розрахунку оптимальних параметрів ґрунтопроколюючої головки є актуальною задачею.

Мета

Метою роботи є теоретичне визначення еквівалентного діаметра конічного наконечника залежно від діаметра свердловини та способу розрахунку оптимальних параметрів ґрунтопроколюючої головки.

Методика

Загальні закономірності процесів проколу ґрунту та формування горизонтально спрямованої свердловин викладені в роботах [4, 6, 11]. Результати досліджень впливу конструктивних параметрів конусного робочого органу на процес проколу ґрунту та пошук раціонального кута конуса викладено в роботах [3, 7, 10, 12, 13, 14, 17–20, 22]. Зміни якостей ґрунту в навколишньому просторі свердловини під час статичного проколу ґрунту та їх вплив на процеси формування лідерної свердловини та її розширення були розглянуті в роботах [2, 11, 15, 16, 21]. Досліджень з визначення еквівалентного діаметра конічно-циліндричного наконечника залежно від діаметра свердловини та теоретичний спосіб розрахунку оптимальних параметрів ґрунтопроколюючої головки не виявлено.

Очевидно, що сумарний опір проколюванню складається з опорів конічної і циліндричної

частин наконечника. Згідно з попередньої роботою авторів [9] теоретично визначений опір заглибленню конічно-циліндричного наконечника в ґрунт дорівнює:

$$P_{\Sigma} = \frac{\pi E_{cp} D^2}{8} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) + 0,1 \pi \lambda f D \sigma_1 + \pi f D (l_u - 0,2) q_z, \quad (1)$$

де $E_{cp} = \frac{(1 + \omega) \rho_{me}}{c_k \cdot \rho_{np}}$ – компресійний модуль де-

формації ґрунту; ω – природна вологість ґрунту; ρ_{me} – щільність твердого ґрунту (щільність ґрунту за умови, що в ньому відсутні пори); ρ_{np} – щільність ґрунту в природному стані; c_k – коефіцієнт компресії ґрунту; D – діаметр конусного наконечника; f – коефіцієнт тертя ґрунту по конусу; 2β – кут при вершині конуса; $\lambda = \frac{D_p}{D}$ – відношення діаметра зони пружно-

пластичних деформацій D_p до діаметра основи конусного наконечника D [10]; σ_1 – напруження на границі пружної і пластичної зон, яке визначено було С. В. Кравцем та В. В. Кованько [3]; l_u – довжина циліндричної частини проколюючої головки; q_z – залишковий тиск ґрунту на циліндричну частину наконечника.

Залежність сумарного опору заглибленню від діаметра наконечника на глибині 1,5 м при $l_u = 0,5$ м та $q_z = 0,025$ МПа приведена на рис. 1.

Щоб усунути з процесу статичного проколювання сили тертя на бічні циліндричні поверхні наконечника, необхідно діаметр головної конічної частини D_k виконати більшим за діаметр циліндричної D_u частини проколюючої головки. Визначимо еквівалентний діаметр конічної частини D_e з умови рівності опорів для випадків:

- 1) $D_k > D_u$ – відсутні сили тертя на бічній поверхні наконечника;
- 2) $D_k = D_u = D_e$ – присутні сили тертя на бічній поверхні наконечника.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

У першому випадку ($D_k > D_u$) опір проколюванню P_{np} дорівнює:

$$P_{np} = \frac{8\pi E_{cp}}{D^2} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) \int_0^{D/2} x^3 dx = \frac{\pi E_{cp} D^2}{8} (1 + f \operatorname{ctg} \beta); \quad (2)$$

$$\vec{P}_{np} = \frac{\pi E_{cp} D_e^2}{8} (1 + f \operatorname{ctg} \beta), \quad (3)$$

де D_e – еквівалентний діаметр.

У другому випадку ($D_k = D_u = D_e$) сумарний опір проколюванню обчислюється за формулою (1),

де $\lambda = \frac{D_p}{D_e(D)}$ – відношення діаметра зони

пружно-пластичних деформацій до еквівалентного діаметра (діаметра конусного наконечника) [1].

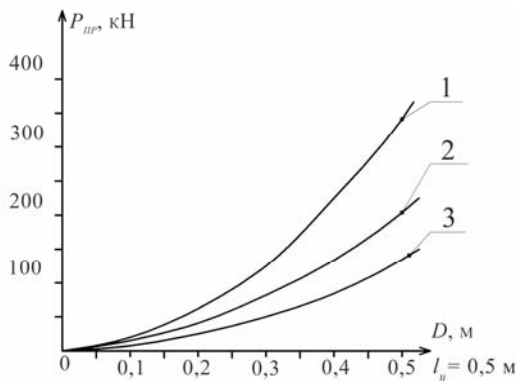


Рис. 1. Графіки залежності сумарного опору переміщенню конічно-циліндричного наконечника від діаметра на глибині 1,5 м: 1 – твердого супіску; 2 – напівтвердого суглинку; 3 – тугопластичної глини

Fig. 1. Dependency graph of the total resistance to the displacement of a cone-cylinder tip on a diameter at 1.5 m depth: 1 – sandy clay; 2 – semi-solid loam; 3 – stiff clay

З умови рівності $\vec{P}_{np} = P_{\Sigma}$ визначимо еквівалентний за опором діаметр D_e :

$$D_e = D \sqrt{1 + 8f \frac{0,1\lambda\sigma_1 + (l_u - 0,2)q_3}{DE_{cp}(1 + \operatorname{ctg} \beta)}}. \quad (4)$$

Залежність еквівалентного діаметра основи конуса від діаметра циліндричної частини наконечника при $l_u = 0,5$ м та $q_3 = 0,025$ МПа для різних ґрунтів показана на рис. 2.

Якщо діаметр конусної частини наконечника $D \leq D_k \leq D_e$, то опір проколюванню буде знижений (у відсотках) за наступною залежністю:

$$\Delta P_{np} = \frac{P_{\Sigma} - \vec{P}_{npD_k}}{P_{\Sigma}} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{\vec{P}_{npD_k}}{P_{\Sigma}} \right) \cdot 100\%. \quad (5)$$

Визначимо мінімальний діаметр $D_k^{\min}$, який усуває дію пружних деформацій на циліндричну частину наконечника:

$$D_k^{\min} = D + \Delta D. \quad (6)$$

На границі пружної і пластичної зони діє закон Гука [1, с. 247–250]:

$$\sigma_1 = E_V \varepsilon, \quad (7)$$

де E_V – модуль пружності при об'ємному стисканні ґрунту (модуль об'ємної деформації); ε – відносна деформація ($\varepsilon = \frac{\Delta D}{D}$).

Модуль об'ємної деформації визначається через компресійний модуль ґрунту E_{cp} [1]:

$$E_V = \frac{(1 + \omega)\rho_{m6}}{3c_k \rho_{np}} (1 + 2\zeta), \quad (8)$$

де ζ – коефіцієнт бічного тиску визначається за формулою Г. І. Покровського [4, 11]:

$$\zeta = 1 - 0,74 \operatorname{tg} \varphi_0 - 1,52 c / q_{kp}, \quad (9)$$

де φ_0 – кут внутрішнього тертя ґрунту; c – коефіцієнт зчеплення ґрунту; q_{kp} – критичний тиск ґрунту за несучою спроможністю.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Тоді

$$\Delta D = \frac{\sigma_1}{E_V} D. \quad (10)$$

Для твердого супіску $\Delta D = \frac{0,08}{0,95} D = 0,084D$

(при $E_V = 0,95$, $h = 1,5$ м).

Для напівтвердого суглинку

$$\Delta D = \frac{0,14}{0,64} D = 0,22D \quad (\text{при } E_V = 0,64,$$

$h = 1,5$ м).

Для тугопластичної глини $\Delta D = \frac{0,148}{0,477} D = 0,31D$ (при $E_V = 0,477$, $h = 1,5$ м).

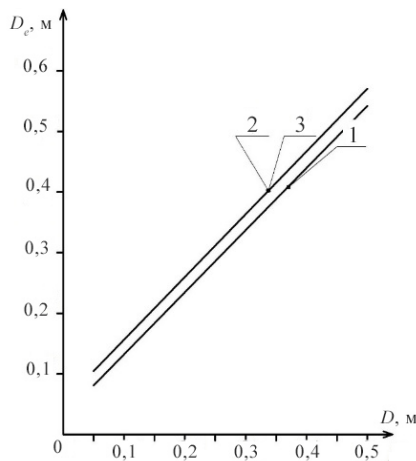


Рис. 2. Графіки залежності еквівалентного діаметра конічного наконечника від діаметра свердловини: 1 – для твердого супіску; 2, 3 – для напівтвердого суглинку і тугопластичної глини

Fig. 2. Dependency graph of the equivalent diameter of the conical tip on the hole diameter: 1 – sandy clay; 2, 3 – semi-solid loam and stiff clay

Таким чином,

$$D_{\kappa}^{\min} = D + \frac{\sigma_1}{E_V} D = D \left(1 + \frac{\sigma_1}{E_V} \right). \quad (11)$$

Якщо проколювання здійснюється на глибині $h = 1,5$ м, то для твердого супіску $D_{\kappa}^{\min} = 1,08D$, для напівтвердого суглинку $D_{\kappa}^{\min} = 1,22D$, для тугопластичної глини

$D_{\kappa}^{\min} = 1,31D$. Якщо $D_{\kappa} > D_{\kappa}^{\min}$, ґрунт на границі пружної і пластичної зон деформується за рахунок пружно-пластичних зсувів (руйнується).

Зниження опору проколюванню при мінімальному діаметрі $D_{\kappa}^{\min}$ для різних ґрунтів приведено на рис. 3

Результати

З рис. 3 видно, що максимальне зниження опору проколюванню має місце: для твердого супіску при діаметрах $D = 0,2 \dots 0,25$ м, для напівтвердого суглинку при діаметрах $D = 0,13 \dots 0,17$ м, для тугопластичної глини при діаметрах $D = 0,10 \dots 0,12$ м. Тому ефективність застосування конусних наконечників з виступами залежить від типу ґрунту, його консистенції, вологості і діаметра проколювання D . Визначимо цей діаметр:

$$\frac{\partial \Delta P_{np}}{\partial D} = 0. \quad (12)$$

Звідки оптимальний діаметр

$$D_{opt} = 4 \frac{0,1 f \lambda \sigma_1 + f(l_y - 0,2) q_3}{\left[\left(1 + \frac{\sigma_1}{E_V} \right)^2 - 1 \right] E_{cp} (1 + f \text{ctg} \beta)}. \quad (13)$$

Визначимо максимальний граничний діаметр свердловини (ґрунтової порожнини) $D_{\max}$, при якому конічно-циліндричний наконечник з боковими виступами $D_{\kappa} > D$ вже не дозволяє знизити зусилля проколюванню. Для цього прирівняємо зусилля проколювання наконечником з виступами ($D_{\kappa}^{\min} > D$) і без виступів ($D_{\kappa} = D$):

$$\begin{aligned} \frac{\pi D^2 \left(1 + \frac{\sigma_1}{E_V} \right)^2 E_{cp}}{8} (1 + f \text{ctg} \beta) = \\ = \frac{\pi D^2}{8} E_{cp} (1 + f \text{ctg} \beta) + \\ + 0,1 \pi D f \sigma_1 + \pi D f (l_y - 0,2) q_3. \quad (14) \end{aligned}$$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

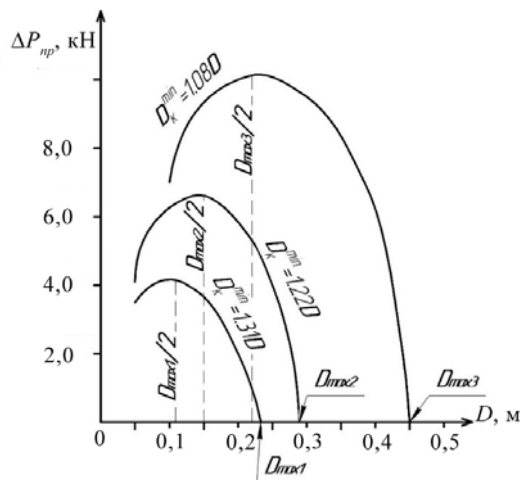


Рис. 3. Графіки залежності зниження опору проколюванню конусного наконечника з виступами від діаметра свердловини: 1 – для твердого супіску; 2 – для напівтвердого суглинку; 3 – для тугопластичної глини.

Fig. 3. Dependency graph the reduction of the resistance to broaching of the conical tip with spurs on the hole diameter: 1 – sandy clay; 2 – semi-solid loam; 3 – stiff clay

Звідки

$$D_{\max} = 8f \times \frac{0,1\lambda\sigma_1 + (l_c - 0,2)q_3}{\left[\left(1 + \frac{\sigma_1}{E_{\nu}} \right)^2 - 1 \right] E_{sp} (1 + f \operatorname{ctg} \beta)}. \quad (15)$$

Тобто

$$D_{\text{onm}} = \frac{D_{\max}}{2}. \quad (16)$$

Розрахунками визначено: для твердого супіску $D_{\max} \geq 0,444$ м; для напівтвердого суглинку $D_{\max} \geq 0,295$ м; для тугопластичної глини $D_{\max} \geq 0,236$ м. Це означає, що для $D > D_{\max}$ лобовий опір конічно-циліндричного наконечника з діаметром в основі конуса $D_{\kappa}^{\min} > D_{\max}$ зростає інтенсивніше за опір циліндричної частини наконечника. Максимальне зниження зу-

силля проколювання має місце для ґрунтової порожнини діаметр якої у 2 рази менший за максимальний граничний діаметр $D_{\max}$. Якщо діаметр ґрунтового отвору більший за $D_{\max}$, то необхідно утворювати не способом проколу, а способом протискування.

Наукова новизна та практична значимість

Установлена залежність еквівалентного діаметра основи конуса від діаметра циліндричної частини наконечника проколюючої головки, яка дозволяє уникнути в процесі статичного проколювання сил тертя на бічній циліндричній поверхні наконечника. Так, наприклад, при діаметрі циліндричної частини 0,3 м – діаметр основи конуса повинен бути: для твердого супіску – 0,32 м; для напівтвердого суглинку і тугопластичної глини 0,37 – 0,39 м.

Результати отриманих теоретичних досліджень можуть бути використані для підвищення ефективності робочого обладнання для проколу ґрунту статичним методом при безтраншейному прокладанні підземних комунікацій.

Висновок

Отримані теоретичні розрахунки для визначення оптимальних діаметрів конічного наконечника з виступами для проколювання ґрунту дозволили встановити, що якщо діаметр конуса більше максимального граничного діаметра свердловини (ґрунтової порожнини), то лобовий опір конічно-циліндричного наконечника зростає інтенсивніше за опір циліндричної частини наконечника і тоді ґрунтову порожнину необхідно утворювати способом протискування. Максимальне зниження зусилля проколювання має місце для ґрунтової порожнини, діаметр якої у 2 рази менший за максимальний граничний діаметр.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабич, Є. М. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти : підручник / С. М. Бабич, Ю. О. Крусь. – Рівне : Вид-во РДТУ, 2001. – 367 с.
2. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов : учеб. пособие для строит. вузов / С. С. Вялов. – Москва : Высш. шк., 1978. – 447 с.
3. Высокопроизводительные гидropневматические ударные машины для прокладки инженерных коммуникаций / Д. Н. Ешуткин, Ю. П. Смирнов, В. И. Цой, В. Л. Исаев ; под ред. Д. Н. Ешуткина. – Москва : Стройиздат, 1990. – 176 с.
4. Гольдштейн, М. Н. Механические свойства грунтов: напряженно-деформированные характеристики грунтов / М. Н. Гольдштейн. – Москва : Стройиздат, 1979. – 304 с.
5. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування [Електронний ресурс]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 161 с. – Режим доступу: http://dbn.at.ua/load/normativy/dbn/dbn_v21_10_2009/1-1-0-319. – Назва з екрана. – Перевірено : 19.07.2017.
6. Дьяков, В. П. Усилие вертикального резания почвы / В. П. Дьяков // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 1987. – № 4. – С. 34–36.
7. Земсков, В. М. Анализ исследования лобового сопротивления при бестраншейной прокладке трубопроводов методом прокола / В. М. Земсков, А. В. Судаков // Изв. ТулГУ. Серия: «Подъемно-транспортные машины и оборудование» : сб. науч. тр. – Тула, 2005. – Вып. 6. – С. 35–38.
8. Кованько, В. В. Прокладання лінійно-протяжних об'єктів на новій технічній основі / В. В. Кованько, О. В. Кованько // Вісн. інженерної акад. України. – 2008. – № 3/4. – С. 158–162.
9. Кравець, С. В. Аналітичний спосіб визначення опору занурення конусного наконечника в ґрунт / С. В. Кравець, О. П. Посмітюха, В. Н. Супонев // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование : сб. науч. тр. / Приднепров. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепро, 2017. – Вып. 103. – С. 91–98.
10. Кравець, С. В. Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземно рухомих пристроїв : монографія / С. В. Кравець, В. В. Кованько, О. П. Лук'янчук. – Рівне : НУВГП, 2015. – 319 с.
11. Кравець, С. В. Теорія руйнування робочих середовищ : навч. посіб. / С. В. Кравець. – Рівне : НУВГП, 2008. – 124 с.
12. Михельсон, И. С. Определение напряжений в грунте при внедрении рабочего инструмента бестраншейной прокладывающей машины / И. С. Михельсон // Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та. – Саратов, 2011. – Вып. 1. – С. 80–84.
13. Полтавцев, И. С. Специальные землеройные машины и механизмы для городского строительства / И. С. Полтавцев, В. Б. Орлов, И. Ф. Ляхович. – Киев : Будівельник, 1977. – 136 с.
14. Ромакин, Н. Е. Усилие внедрения и оптимальный угол заострения рабочего наконечника при статическом проколе грунта / Н. Е. Ромакин, Н. В. Малкова // Строительные и дорожные машины. – 2006. – № 10. – С. 35–37.
15. Рубинштейн, А. Л. Грунтоведение, основания и фундаменты : учеб. пособие для вузов / А. Л. Рубинштейн. – Москва : Сельхозгиз, 1961. – 312 с.
16. Супонев, В. Н. Исследование процесса изменения состояния грунта вокруг горизонтальной скважины после её формирования методом статического прокола грунта / В. Н. Супонев, С. Л. Хачатурян, В. И. Олексин // Вестн. Харьков. нац. автомоб.-дор. ун-та : сб. науч. тр. / Харьков. нац. автомоб.-дор. ун-т, Сев.-Вост. науч. центр трансп. акад. Украины. – Харьков, 2016. – Вып. 73. – С. 196–202.
17. Тимошенко, В. К. Определение формы наконечника, обеспечивающей минимальное усилие прокола / В. К. Тимошенко // Строительство трубопроводов. – 1969. – № 3. – С. 18–20.
18. Allouche, E. N. State-Of-The-Art-Review Of No-Dig Technologies for New Installations / E. N. Allouche, S. T. Ariaratnam // Pipelines Division Specialty Conference (04.08–07.08.2002). – Cleveland, Ohio, United States, 2002. doi: 10.1061/40641(2002)55.
19. Cohen, A. Developing a Successful Specification for Horizontal Directional Drilling / A. Cohen, S. T. Ariaratnam // Pipelines 2017: Planning and Design (06.08–09.08.2017). – Phoenix, Arizona, 2017. – P. 553–563. doi: 10.1061/9780784480878.050.
20. ICTPP 2009: Advances and Experiences with Pipelines and Trenchless Technology for Water, Sewer, Gas, and Oil Applications / Edited by Mohammad Najafi and Baosong Ma. – Shanghai, China, 2009. – 2137 p.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

21. Najafi, M. Trenchless Technology: Planning, Equipment, and Methods / Mohammad Najafi. – [s. l.], 2012. – 608 p.
22. Trenchless technology underground pipes / by Zhao Jun Ling Bian. – Machinery Industry Press. – [s. l.], 2014.

С. В. КРАВЕЦЬ¹, А. П. ПОСМИТЮХА^{2*}, В. Н. СУПОНЕВ³

¹Каф. «Строительные, дорожные, мелиоративные, сельскохозяйственные машины и оборудование», Национальный университет водного хозяйства и природопользования, ул. Новака, 77, Ровно, Украина, 33028, тел. +38 (0362) 63 55 80, эл. почта s.v.kravets@nuwm.edu.ua, ORCID 0000-0003-4063-1942

^{2*}Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. + 38 (066) 150 95 00, эл. почта AleksandrP@3g.ua, ORCID 0000-0002-9701-3873

³Каф. «Строительные и дорожные машины», Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Тимуровцев, 3, Харьков, Украина, 61002, тел. + 38 (057) 738 77 97, эл. почта v-suponev@ukr.net, ORCID 0000-0001-7404-6691

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО И ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРОВ КОНИЧЕСКИ-ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО НАКОНЕЧНИКА С ВЫСТУПАМИ ДЛЯ ПРОКАЛЫВАНИЯ ПОЧВЫ

Цель. Строительство новых железнодорожных путей, объектов инфраструктуры, ремонт и замена существующих подземных коммуникаций связаны с разработкой горизонтальных полостей в почве бестраншейным способом. Статичный прокол почвы рабочим органом с конусным наконечником является наиболее распространенным методом в практике формирования лидерной скважины при бестраншейной прокладке распределительных коммуникаций. Однако, в процессе выполнения проектных расчетов получения пилотной скважины и дальнейшего ее расширения к необходимым размерам остро стоит вопрос способов расчетов рабочих усилий. Существующие методики базируются на эмпирических зависимостях и экспериментальных коэффициентах, которые уменьшают точность подсчетов и увеличивают стоимость работ. Предлагается повысить точность и упростить процесс определения усилия прокалывания почвы коническим наконечником статичным способом **Методика.** В работе предлагается определение эквивалентного диаметра конического наконечника, который обусловлен диаметром скважины, и теоретический способ расчета оптимальных параметров грунтопрокалывающей головки с использованием известных параметров: типа почвы и ее влажности, которые определяются Державними будівельними нормами (ДБН). **Результаты.** Полученные теоретические исследования могут быть использованы с целью повышения эффективности рабочего оборудования для прокола почвы статичным методом при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций. **Научная новизна.** Авторами установлена зависимость эквивалентного диаметра основы конуса от диаметра цилиндрической части наконечника прокалывающей головки, которая позволяет устранить из процесса статичного прокалывания силы трения на боковой цилиндрической поверхности наконечника. **Практическая значимость.** Теоретические расчеты для определения оптимальных диаметров конического наконечника с выступами для прокалывания почвы позволили установить, что если диаметр конуса больше максимально-предельного диаметра скважины (грунтовой полости), то лобовое сопротивление коническо-цилиндрического наконечника растет интенсивнее сопротивления цилиндрической части наконечника. Максимальное снижение усилия прокалывания имеет место для грунтовой полости, диаметр которой в 2 раза меньше максимально-предельного диаметра. При проведении расчетов по выбору размеров рабочих органов для прокалывания почвы исходными данными являются тип почвы и его характеристики по ДБН, а также влажность почвы, определенная традиционными способами.

Ключевые слова: теоретическая модель; бестраншейная технология; статический прокол почвы; инженерные коммуникации; прокалывающая головка; горизонтальная скважина

S. V. KRAVETS¹, O. P. POSMITJUKHA^{2*}, V. M. SUPONYEV³¹Dep. «Building, Road, Reclamation, Agricultural Machinery and Equipment», National University of Water and Environmental Engineering, Nowak St., 77, Rivne, Ukraine, 33028, tel. +38 (0362) 63 55 80, e-mail s.v.kravets@nuwm.edu.ua, ORCID 0000-0003-4063-1942^{2*}Dep. «Applied Mechanics and Material Science», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (066) 150 95 00, e-mail AleksandrP@3g.ua, ORCID 0000-0002-9701-3873³Dep. «Build and Travelling Machines», Kharkiv National Automobile and Highway University, Tymurivtsi St., 3, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 738 77 97, e-mail v-suponev@ukr.net, ORCID 0000-0001-7404-6691

DETERMINING OF THE EQUIVALENT AND OPTIMUM DIAMETERS OF CONE-CYLINDER TIP WITH SOIL BROACHING SPURS

Purpose. Building of new railway tracks and facilities, repair and replacement of existent underground utilities and communications is related to the receipt of horizontal cavities in soil by trenchless method. A static soil broaching with a working body with cone tip is the most widespread method in practice of forming a pilot hole at the trenchless laying of distributive communications. However, in the process of implementation of project calculations, receipt of pilot hole and subsequent expansion to the necessary sizes, there is a question of workings effort calculation methods. Existent methods are based on empiric dependences and experimental coefficients which diminish exactness of calculations and increase the cost of works. **Methodology.** The work proposes the dependence for determination of equivalent diameter of cone tip depending on the hole diameter and theoretical method for calculation of optimum parameters of soil broaching head using the well-known parameters: type of soil and its humidity, that determined by the State Construction Regulations (DBN). **Findings.** The results of the theoretical studies can be used to increase the efficiency of the working equipment for soil broaching by static method during trenchless laying of underground utilities and communications. **Originality.** The authors establish the dependence of the equivalent diameter of the cone base on the diameter of the cylindrical part of the broaching head, which allows for removal of the frictional force from the static broaching on the lateral cylindrical surface of the tip. **Practical value.** The obtained theoretical calculations for determining the optimal diameters of the cone tip with soil broaching spurs made it possible to establish that if the diameter of the cone is greater than the maximum diameter of the hole (soil cavity), then the frontal resistance of the cone-cylinder tip increases more intensively than the resistance of the cylindrical part of the tip. The maximum reduction in the broaching force takes place for a soil cavity whose diameter is 2 times smaller than the maximum limit diameter. When conducting the calculations regarding the choice of the size of working bodies for soil broaching, the source data include the type of soil, and its characteristics by DBN, as well as the moisture content of the soil determined by traditional methods.

Keywords: analytical model; trenchless technology; static soil broaching; utilities and communications; broaching head; horizontal holes

REFERENCES

1. Babych, Y. M., & Krus, Y. O. (2001). *Mekhanika gruntiv, osnovy ta fundamenty* [Manual]. Rivne: National University of Water and Environmental Engineering.
2. Vyalov, S. S. (1978). *Reologicheskiye osnovy mekhaniki gruntov* [Manual for build institutes of higher]. Moscow: Vysshaya shkola.
3. Yeshutkin, D. N., Smirnov, Y. P., Tsoy, V. I., & Isaev, V. L. (1990). *Vysokoproizvoditelnyye gidropnevmaticheskiye udarnyye mashiny dlya prokladki inzhenernykh kommunikatsiy*. Moscow: Stroizdat.
4. Goldshteyn, M. N. (1979). *Mekhanicheskiye svoystva gruntov: napryazhenno-deformirovannyye kharakteristiki gruntov*. Moscow: Stroizdat.
5. Osnovy ta fundamenty sporud. Osnovni polozhennia proektuvannia, DBN V.2.1-10-2009 (2009). Retrieved from http://dbn.at.ua/load/normativy/dbn/dbn_v21_10_2009/1-1-0-319
6. Dyakov, V. P. (1987). Usiliye vertikalnogo rezaniya pochvy. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*, 4, 34-36.
7. Zemskov, V. M., & Sudakov, A. V. (2005). Analiz issledovaniya lobovogo soprotivleniya pri bestransheynoy prokladke truboprovodov metodom prokola. *Izvestiya TulGU, Seriya Podemno-transportnyye mashiny i oborudovaniye*, 6, 35-38.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

8. Kovanko, V. V., & Kovanko, O. V. (2008). Prokladannia liniino-protiazhnykh ob'ektiv na novii tekhnichnii osnovi. *Bulletin of Engineering Academy of Ukraine*, 158 (3-4), 158-162.
9. Kravets, S. V., Posmitjukha, O. P., & Suponyev, V. M. (2017). Analytical method for determining resistance immersing tapered tip in soil. *Construction, Material Science, Mechanical Engineering. Series Lifting-transport, construction and road mashines and equipment*, 103, 91-98.
10. Kravets, S. V., Kovanko, V. V., & Lukianchuk, O. P. (2015). *Naukovi osnovy stvorennia zemleryino-yarusnykh mashyn i pidzemno rukhomykh prystroiv* [Monograph]. Rivne: National University of Water and Environmental Engineering.
11. Kravets, S. V. (2008). *Teoriia ruinuвання robochykh seredovysch*. Rivne: National University of Water and Environmental Engineering.
12. Mikhelson, I. S. (2011). The definition of pressure in the ground at introduction of trenchless pinning machine working tool. *Vestnik Saratov State Technical University*, 1 (52), 80-83.
13. Poltavtsev, I. S., Orlov, V. B., & Lyakhovich, I. F. (1977). *Spetsialnyye zemleroynyye mashyny i mekhanizmy dlya gorodskogo stroitelstva*. Kyiv: Budivelnik.
14. Romakin, N. Y., & Malkova, N. V. (2006). Usiliye vnedreniya i optimalnyy uгол zaostreniya rabochego nakonechnika pri staticheskom prokole grunta. *Construction and Road Building Machines*, 10, 35-37.
15. Rubinshteyn, A. L. (1961). *Gruntovedeniye, osnovaniya i fundamenti*. Moscow: Selkhozgiz.
16. Suponev, V. N., Oleksin, V. I., & Khachatryan S. L. (2016). Investigation of changes in the state of ground around the horizontal well while it is being made using the method of static puncture. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 73, 196-202.
17. Timoshenko, V. K. (1969). Opredeleniye formy nakonechnika, obespechivayushchey minimalnoye usiliye prokola. *Stroitelstvo truboprovodov*, 3, 18-20.
18. Allouche, E. N., & Ariaratnam, S. T. (2002). State-Of-The-Art-Review Of No-Dig Technologies for New Installations. *Proceedings of the Pipelines Division Specialty Conference 2002*. doi:10.1061/40641(2002)55
19. Cohen, A., & Ariaratnam, S. T. (2017). Developing a Successful Specification for Horizontal Directional Drilling. *Proceedings of the Pipelines 2017*, 553-563. doi:10.1061/9780784480878.050
20. Najafi, M., & Ma, B. (Eds.). (2009). *ICTPP 2009: Advances and Experiences with Pipelines and Trenchless Technology for Water, Sewer, Gas, and Oil Applications*. American Society of Civil Engineers.
21. Najafi, M. (2012). *Trenchless Technology: Planning, Equipment, and Methods* (1st ed.). New York: McGraw Hill Professional.
22. Bian, Z. J. L. (2014). *Trenchless Technology Underground Pipes* (Chinese Ed.). Machinery Industry Press.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. С. В. Ракшею (Україна);
к.т.н., доц. І. А. Куликом (Україна)

Надійшла до редколегії: 17.03.2017

Прийнята до друку: 22.06.2017

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.923:629.4.027.4

Р. П. ПОГРЕБНЯК^{1*}

^{1*}Каф. «Прикладна механіка», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, 49005,
тел. +038 (056) 743 32 76, +38 (095) 499 75 54, ел. пошта pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

ПРУЖНА НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА РУХУ СУПОРТА КАРУСЕЛЬНОГО ВЕРСТАТА ДЛЯ ОБРОБКИ СУЦІЛЬНОКАТАНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

Мета. У роботі передбачається визначити умови утворення динамічної погрішності контурної механічної обробки різанням поверхні гребеня реального залізничного колеса чашковим різцем та запропонувати способи її зменшення. **Методика.** Задача вирішувалася шляхом створення нелінійної динамічної розрахункової пружної моделі з подальшим моделюванням її навантаження зовнішніми силовими факторами, значення яких були отримані аналітичними та експериментальними методами. Розрахункова схема зрівноваженого супорта являє собою нелінійну двомасову систему, динамічна модель повзуна – одномасова, з одним ступенем волі. В основу математичного опису технологічних навантажень покладені результати заводських експериментів, а також аналітичні узагальнення, отримані методом зіставлення декількох схем формоутворення гребеня колеса. Аналітичне визначення складових сили різання враховує зміни кінематичних параметрів режиму різання при обробці профілю фасонним інструментом. **Результати.** При обробці гребеня колеса радіальна й осьова складові сили різання, що навантажують супорт і повзун верстата, знакозмінні. Існують умови, при яких у приводі подачі супорта й повзуна розкриваються зазори, причому це можливо за будь-якої геометрії профілю колеса. Особливості навантаження супорта й повзуна, що формують гребінь реального колеса (з бігармонійним припуском), ведуть до виникнення ділянок обробки, на яких відбувається багаторазове розкриття зазорів у передачах приводів подач та збільшується помилка формоутворення. Динамічна система приводу повзуна досить жорстка та високочастотна і чутлива до наявності зазорів. **Наукова новизна.** Автором створені пружні нелінійні динамічні моделі супорта і повзуна. Складені у відповідності моделі, вирішені рівняння руху мас та навантаження зв'язків. З'ясовані умови стійкого руху. **Практична значимість.** Моделюванням визначені якісні й кількісні умови, при яких нестійкий рух супорта та повзуна з перекладанням зазорів не відбувається: для цього рекомендовано змінити вагу противаги.

Ключові слова: залізничне колесо; верстати для обробки залізничних коліс; динамічні навантаження; динамічна точність; зазори; коливання

Вступ

Технологія виробництва залізничних коліс гарячою прокаткою не дозволяє одержати виріб достатньої точності й шорсткості поверхні безпосередньо з прокатного стану, а зовнішні шари прокатаного обіду знеуглецьовані і насичені неметалічними включеннями. Тому механічній обробці прокатаної заготовки обов'язково підлягає поверхня катання, гребінь, обід із внутрішньої й зовнішньої сторони колеса, а також, розточується отвір у маточині, при цьому собівартість механічної обробки складає більш ніж 50 %. Операційна технологія механічної обробки на кожному підприємстві індивідуальна, враховує можливості встановленого устаткування та технічні вимоги до отриманої продукції. Крім того, технологія ця різна для обробки

різних коліс у рамках одного підприємства. Зрозуміло, фінішна обробка термічно обробленого колеса дозволяє усунути геометричних похибок форми й розмірів, але скорочує продуктивність верстатів і значно збільшує витрату різального інструменту. Твердість готового колеса постійно росте й досягає вже величини 400 НВ, тому для чистової механічної обробки загартованих коліс необхідні спеціальні верстати й інструмент. Колеса швидкісного рухливого складу або колеса з особливими вимогами після термообробки начисто обточуються по всій поверхні.

Основу технологічного потоку масової механічної обробки становлять спеціальні колесотокарні верстати карусельного типу. В основному застосовують важкі одне- або двостоечні карусельні верстати із двома- чотирма супор-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

тами, які оснащені електрокопіювальними пристроями або ПЧПК та зрівноваженими важкими боковими супортами

Найбільш сучасні верстати виробляють провідні європейські компанії: «Hegenscheidt – MDF» (Німеччина), «Kreven», «Dorries Scharmann» (Великобританія), «Седин» (Росія), «Rafamet» (Польща), «Morando», «Mario Carnaghi» (Італія), «Sculfort» (Франція), «TOSHULIN» (Чехія), «BOST» (Іспанія).

Одним з найважливіших показників динамічної якості верстатів є точність обробки, що визначається відносним зсувом інструмента й деталі по нормалі до обробленої поверхні. Точність переміщення супорта характеризується величиною помилки або відхиленням дійсної координати робочого органа верстата від заданої. У важконавантажених верстатах вирішальний вплив на точність обробки складають динамічні й пружні похибки. «При обробці фасонних поверхонь змінної кривизни домінуюча складова динамічної похибки копіювання викликається відносним зсувом щупа й інструмента в площині профілюючого руху» [5, стор. 117].

Основні роботи з динаміки металорізальних верстатів В. А. Кудінова, В. С. Gegg, В. Э. Пуща, С. М. Кожевникова, С. С. Кедрова, С. Brecher та ін. у значній мірі присвячені визначенню й оцінці динамічної точності обробки. Питання динамічної точності формоутворення фасонних поверхонь освітлені в роботах українських вчених В. К. Кулика, Ю. В. Петракова, В. Н. Попова, М. Л. Орликова, В. Б. Струтинського та ін. Удосконалювалися методики розрахунків верстатів на змушені коливання при обробці фасонних поверхонь [3, 8, 9, 13]. Ці методики загального характеру розроблялися для універсальних верстатів із широким діапазоном забезпечення режимів обробки й без обліку специфіки навантаження, яка властива спеціальним верстатам.

У роботі [4] виконаний аналіз нестійкості гальмування врівноваженого супорта, коли час гальмування механічної системи більше часу гальмування приводу, що при наявності зазору приводить до довільного позиціонування супорта в його зоні. У режимі обробки деталі відрив супорта від тягнучого органа знижує точність одержуваного розміру. Питанням моделювання нелінійних рівнянь динаміки металорізальних

верстатів, у тому числі в режимі нестационарного навантаження, присвячені роботи [3, 6–9, 11, 12].

Проблема. В умовах виробництва на металургійному підприємстві та яскраво вираженої нестационарності динамічного навантаження при обробці окремих ділянок колеса нерідко спостерігаються значні відхилення геометрії отриманої поверхні від заданої, відзначені також «врізи» в поверхню гребеня, що призводить до відбраковування коліс і повторному переточуванню. Такого роду помилки копіювання обумовлені низькою динамічною точністю переміщення та позиціонування супорта і повзуна верстата. Нераціональність схеми обробки проявляється в тому, що складові сили різання супортів спрямовані на відрив колеса від планшайби й супортів від напрямних. Ця обставина істотно впливає на утворення підвищених зазорів і значно знижує стійкість напрямних і ходових гвинтів. Однієї з головних причин невисокої точності обробки є недостатній облік специфічних особливостей динамічних процесів при формоутворенні профілю за обрабною схемою обробки.

Мета

Під дією сил різання вимушені коливання створюють інструмент і щуп, які закріплені на одному супорті. Пружна деформація супорта впливає на взаємне розташування щупа і копіра: при досягненні величини більшої, чим зона нечутливості щупа (адаптера) подається помилковий сигнал на переміщення супорта, що й викликає похибку. Тому абсолютна деформація супорта визначає динамічну похибку копіювання. Визначенню умов утворення динамічної похибки обробки поверхні гребеня реального залізничного колеса й способів її зменшення присвячене нижченаведене дослідження.

Методика

Рішення поставленого завдання здійснюється за допомогою аналізу рівнянь руху методами інженерної динаміки машин і імітаційного моделювання приводу подач супорта верстата, що обробляє фасонну поверхню гребеня залізничного колеса.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Результати

На рис. 1 представлена динамічна модель зрівноваженого бічного супорта колесообробного верстата. Супорт (m_1+m_3) і повзун m_3 переміщуються під дією погодженого кінематичного збурювання $\xi_y(\tau)$ і $\xi_x(\tau)$. Супорт зрівноважений через канат c_2 противагою m_2 ; c_1 і c_3 відповідно наведені жорсткості ланцюгів подачі супорта й повзуна. Кінематичне збурювання передається на супорт і повзун через самогальмівні передачі «гвинт-гайка ковзання» з наведеними зазорами Δx і Δy . Розрахункова схема врівноваженого супорта являє собою нелінійну двомасову систему, Динамічна модель повзуна – одномасова з одним ступенем вільності.

Після виділення коливальної складової переміщення заміною змінних: $x_1=X_1-\xi_x$, $x_2=X_2-\xi_x$, $y=Y-\xi_y$, де $\xi_x=S_x\cdot\tau$, $\xi_y=S_y\cdot\tau$, – рух маси супорта (m_1+m_3) і противаги m_2 опишеться системою нелінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} x_1''(m_1+m_3) + c_1\gamma_x x_1 + k_{x1}x_1' + c_2(x_1-x_2) + \\ + k_{x2}(x_1'-x_2') = -1,1P_x(\tau) - F_x(\tau) \\ x_2''m_2 + c_2(x_2-x_1) + k_{x2}(x_2'-x_1') = -M_T/r. \end{aligned}$$

Рівняння руху повзуна:

$$y''m_3 + c_3\gamma_y y + k_y y' = -1,1P_y(\tau) - F_y(\tau).$$

Тут: S_x , S_y – стала швидкість подачі в режимі обробки; k_{x1} , k_y , k_{x2} – коефіцієнти непружного опору в приводі, напрямних в канаті вузла зрівноважування; γ_x і γ_y – коефіцієнти нелінійної характеристики зв'язків (зазор); P_x , P_y , F_x , F_y – складові сили різання та сили тертя в напрямних ковзання; M_T/r – сила тертя в системі відхиляючих блоків, r – радіус підшипника блоку.

В основу математичного опису технологічних навантажень покладені результати заводських експериментів, спостережень за поведінкою супортів, а також аналітичні узагальнення, отримані в результаті зіставлення декількох схем формоутворення гребеня колеса. Аналітичне визначення складових сили різання виконано з урахуванням зміни кінематичних параметрів режиму різання при фасонній обробці профілю фасонним інструментом [14] (все у кН):

$$P_z(x) = 4,24 t_n(x)^{1,04} S_k(x)^{0,9} V(x)^{-0,1},$$

$$P_x(x) = \frac{1,78 t_n(x)^{1,12} S_k(x)^{-0,07} V(x)^{-0,18}}{\sin \Delta_0(x)} \times \sin(\Delta_0(x) + \alpha(x)),$$

$$P_y(x) = \frac{1,78 t_n(x)^{1,12} S_k(x)^{-0,07} V(x)^{-0,18}}{\sin \Delta_0(x)} \times \cos(\Delta_0(x) + \alpha(x)).$$

$$t_n(x) = \frac{t(x)[2(R-r) + t(x)]}{2R},$$

$$S_k(x) = \frac{R-r+0,5t(x)}{R} S;$$

$$V(x) = 0,001 \pi [D + 2y(x)] n;$$

$$\operatorname{tg} \alpha(x) = \frac{x_0 - x}{\sqrt{R_0^2 - (x_0 - x)^2}}.$$

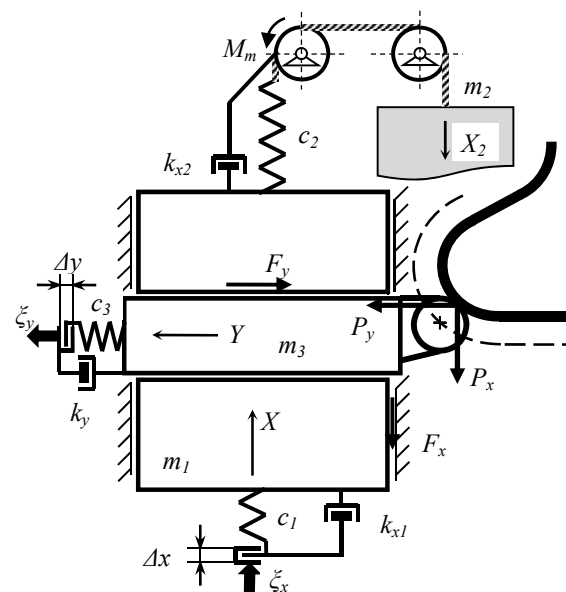


Рис. 1. Динамічна модель супортів колесообробних верстатів ($m_1=1716$ кг; $m_2=2050$ кг; $m_3=500$ кг; $c_1=174 \cdot 10^6$ Н/м; $c_2=4,27 \cdot 10^6$ Н/м; $c_3=570 \cdot 10^6$ Н/м; $k_{x1}=k_y=201400$ кг/с; $k_{x2}=7800$ кг/с; $\Delta x=\Delta y=0,150$ мм)

Fig. 1. Dynamical model of the supports of wheel processing machines ($m_1=1716$ kg; $m_2=2050$ kg; $m_3=500$ kg; $c_1=174 \cdot 10^6$ N/m; $c_2=4.27 \cdot 10^6$ N/m; $c_3=570 \cdot 10^6$ N/m; $k_{x1}=k_y=201400$ kg/s; $k_{x2}=7800$ kg/s; $\Delta x=\Delta y=0.150$ mm)

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Тут позначено: t_n – наведена глибина різання, мм; S_k – подача на криволінійній опуклій радіусній ділянці профілю, об/хв; V – швидкість різання, м/хв; Δ_0 – кут напрямку сходу стружки; α – кут нахилу дотичній до профілю (еквідистанти); t – глибина різання, мм; R – радіус кола еквідистанти, що описує профіль, мм; r – радіус інструмента, мм; D – діаметр колеса, м; y – ріст висоти гребеня по середній величині припуску, м; n – частота обертання планшайби, об/хв; x_0, y_0 – координати центра кола еквідистанти, що описує профіль; R_o – її радіус.

Сили тертя і опору пересуванню задаються статичними та визначають за залежними:

$$F_y(X_1, \tau) = [P_z(X_1, \tau) + |P_x(X_1, \tau)| + m_3 g] f;$$

$$F_x(X_1, \tau) = [P_z(X_1, \tau) + |P_y(X_1, \tau)|] f + \Delta G;$$

$$\Delta G = (m_1 + m_3 - m_2) g.$$

Моделювання навантаження верстата при обробці профілю за ДСТУ ГОСТ 10761:2016 [4] здійснювалось засобами MathCad.

Головна складова сили різання P_z зростає та набуває максимуму в галтелі переходу із гребеня до поверхні кочення колеса, а при обробці відновлених наплавленням залізничних коліс припуск на обробку повинен бути ще збільшений на 1 мм [2].

Складові P_y і P_x (рис. 2) визначають навантаженість повзуна й супорта відповідно верстата. Рух супорта на ділянці після вершини гребеня відбувається під дією постійно зменшуваної складової P_x , а за умови $-P_x = F_x$ (наприкінці обробки) створюються умови для розкриття зазору. Дотримання цієї умови залежить від геометрії профілю, стабільності сили тертя, величини й характеру зміни припуску. Рух супорта не реверсивний, але складова P_x наприкінці обробки змінює знак, що при значній її величині приводить до розкриття зазору. Рух повзуна на первісному етапі обробки відбувається під дією поступово зменшуваної сили P_y , а після зміни знака складової рух без розкриття зазору в передачі «гвинт-гайка» здійснюється доти, поки P_y не перевершить силу F_y тертя на основній і бічній напрямних повзуна.

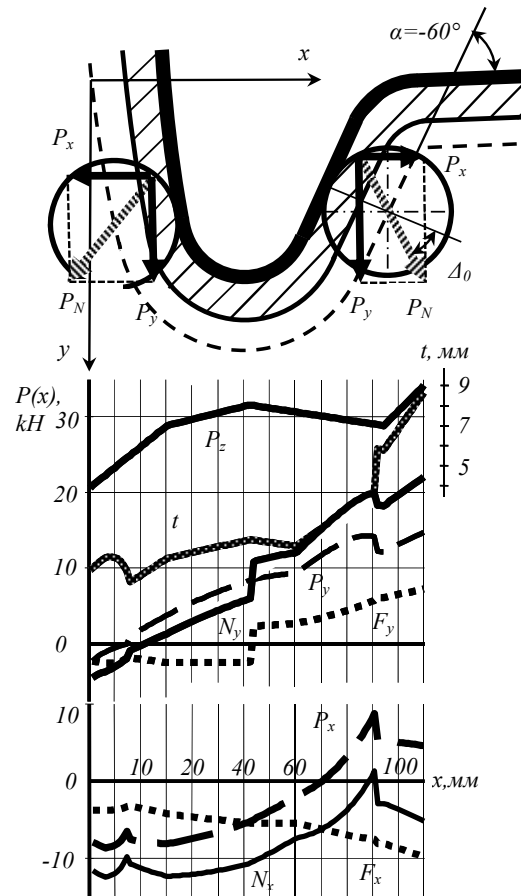


Рис. 2. Розрахункова схема (а) і графіки (б, в) зміни складових сили різання й сил тертя при обробці фасонної поверхні гребеня колеса за ДСТУ ГОСТ 10761:2016 в положенні «гребнем донизу»

Fig. 2. Calculation scheme (a) and graphs (b, c) of the force components of the cutting and friction forces when processing the profiled surface of the wheel flange according to the State Standard 10761: 2016 in the position «flange down»

Несприятливий характер зміни складових P_x і P_y додатково погіршується змінністю припуску, що спричинений ексцентриситетом установки «колеса – заготовки» на планшайбі ($t_1=0-1,5$ мм), а також наявністю огранювання колеса ($t_2=1,3-1,6$ мм) [9]. З урахуванням ексцентриситету установки глибина різання змінюється за залежністю:

$$t = t_0 + t_1 \sin(\omega \tau) + t_2 \sin(3\omega \tau + \varphi),$$

де t_0 – середня глибина різання відрізка профілю; t_2 – амплітуда хвилеутворювання (огранювання); ω – частота обертання планшайби, c^{-1} ;

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

τ – поточний час, с; φ – фазовий зсув між ексцентриситетом і хвилеутворюванням. Обидві гармонійні складові складаються на поверхні колеса, і коливання припуску носить бігармонічний характер.

На рис. 3, а представлений фрагмент моделювання пружного переміщення супорта (m_1+m_3) на ділянці, де створюються умови розкриття зазору в приводі подачі. Спостерігається значний ріст амплітуди коливального переміщення супорта з періодичністю, що втричі перевищує зворотну. За даних умов амплітуда незатухаючих коливань перевищує налаштування зони нечутливості адаптера, і система керування дає команди на вмикання або вимкнення подачі за цією координатою із частотою вибірки зазору. У результаті на поверхні гребеня залізничного колеса з'являються «врізи» й опуклості, що викликає необхідне переточування колеса.

При русі повзуна m_3 у приводі його подачі також виникають умови для формування зазору (рис. 3, б) і відбувається це до реверса подачі.

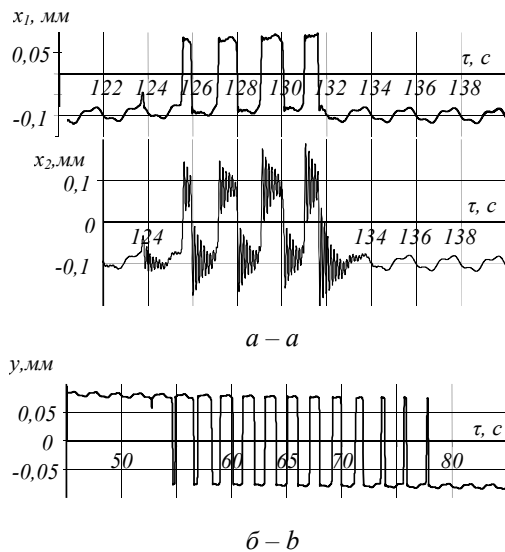


Рис. 3. Нестійкий рух:

а – супорта та противаги на ділянці розкриття зазору в приводі вертикальної подачі; б – повзуна на ділянці розкриття зазору в приводі горизонтальної подачі ($t_1=0,5$ мм; $t_2=1,5$ мм; $\varphi=\pi/3$ р)

Fig. 3. Unstable motion:

а – of support and counterweight in the section for opening the gap in the vertical drive; б – of slide at the section of the gap opening in the drive of horizontal feed ($t_1=0.5$ mm, $t_2=1.5$ mm, $\varphi=\pi/3$ r)

На ділянці профілю, де створюються умови для рівності $-P_y=F_y$, відбувається вибірка зазору в передачі, а змінний характер сил різання і тертя робить вибірку зазору багаторазовою й швидко збільшує зазор. Динамічна система приводу повзуна досить жорстка та високочастотна, тому чутлива до вибірки зазору. Режим нестійкого руху з періодичною вибіркою зазору при русі супорта можна вимкнути, якщо зменшити вагу противаги m_2 для того, щоб збільшити силу F_x . Це трохи збільшить статичне навантаження на ходовий гвинт, але забезпечить у нереверсивній за цією координатою передачі однобічне розташування зазору й тим самим вимкнуть його вибірку.

На рис. 4, а представлений результат моделювання руху супорта зі зменшеною до необхідного масою противаги. Як видно, нестійкий режим руху з розкриттям зазору в приводі відсутній. Вимкнути вибірку зазору в реверсивному приводі руху повзуна неможливо, для забезпечення достатньої точності одержуваного профілю передачу «гвинт – гайка» і напрямні ковзання повзуна необхідно оснастити пристроєм постійної вибірки зазору або його регулюванням до величини, що не перевищує налаштування зони нечутливості адаптера.

На рис. 4, б представлений результат моделювання проходження зони вибірки зазору при зменшеній його величині.

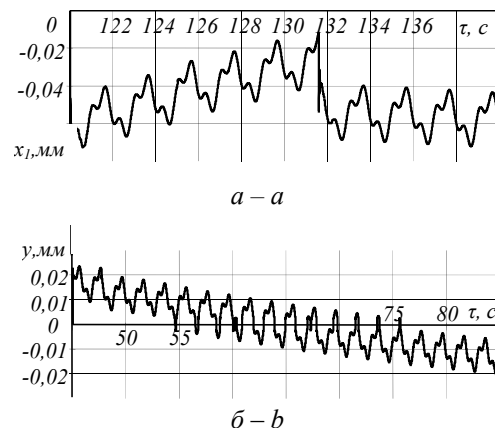


Рис. 4. Сстійкий рух:

а – супорта зі зменшеною масою противаги в приводі вертикальної подачі; б – повзуна зі зменшеним зазором у приводі горизонтальної подачі

Fig. 4. Stable motion:

а – of the support with a reduced weight of counterweight in the drive of vertical feed; б – of slide with reduced gap in the drive of horizontal feed

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Наукова новизна та практична значимість

Створені пружні нелінійні динамічні моделі супорта і повзуна. Складені, відповідно, моделі, і вирішені рівняння руху мас та навантаження зв'язків.

Моделюванням визначені якісні й кількісні умови, при яких нестійкий рух супорта і повзуна з перекладанням зазорів не відбувається. Рекомендовано змінити масу противаги.

Висновки

При обробці гребеня колеса радіальна й осьова складові сили різання, що навантажують супорт і повзун верстата, знакозмінні.

Існують умови, при яких у приводі подачі супорта й повзуна розкриваються зазори, причому це можливо при будь-якій геометрії профілю колеса.

Особливості навантаження супорта й повзуна, що формують гребінь реального (з бігармонічним припуском) колеса ведуть до виникнення ділянок обробки, на яких відбувається багаторазове розкриття зазорів у передачах приводів подач і збільшується помилка формотворення.

Визначені якісні та кількісні умови при обробці різних профілів колеса, за якими нестійкий рух з перекладанням зазорів в приводах супорта та повзуна не відбувається.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Васильев, Г. Н. Автоматизация проектирования металлорежущих станков / Г. Н. Васильев. – Москва : Машиностроение, 1987. – 280 с.
2. Гайворонський, О. А. Умови забезпечення якості відновлених наплавленням залізничних коліс / О. А. Гайворонський // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 5 (65). – С. 136–151. doi: 10.15802/stp2016/84078.
3. ДСТУ ГОСТ 10761:2016. Колеса суцільнокатані. Технічні умови. – На заміну ГОСТ 10761-2004 та ГОСТ 9036-88. – Чинний від 2016–09–01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2016. – 15с.
4. Кедров, С. С. Колебания металлорежущих станков / С. С. Кедров. – Москва : Машиностроение, 1978. – 199 с.
5. Кулик, В. К. Прогрессивные процессы обработки фасонных поверхностей / В. К. Кулик, Ю. В. Петраков, В. В. Иотов. – Київ : Техніка, 1987. – 176 с.
6. Левин, А. И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков / А. И. Левин. – Москва : Машиностроение, 1978. – 184 с.
7. Петраков, Ю. В. Контурная обработка фасонных поверхностей деталей / Ю. В. Петраков, И. Г. Федоренко // Металлорежущие станки : респ. межвед. науч.-техн. сб. – Киев, 1984. – Вып. 12. – С. 39–42.
8. Петраков, Ю. В. Моделирование гашения колебаний при токарной обработке / Ю. В. Петраков // Вісн. нац. техн. ун-ту України «Київський політехнічний інститут». Серія: Машинобудування : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». – Київ, 2016. – № 2. – С. 119–124.
9. Погребняк, Р. П. Экспериментальное исследование формы прокатанной заготовки железнодорожного колеса / Р. П. Погребняк // Производство проката. – 2012. – № 2. – С. 29–33.
10. Струтинський, В. Б. Вібраційні процеси механічної обробки : монографія / В. Б. Струтинський, І. В. Перфілов // Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». – Київ, 2015. – 579 с.
11. Струтинський, В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки / В. Б. Струтинський. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 612 с.
12. Gegg, B. C. Machine Tool Vibrations and Cutting Dynamics/ B. C. Gegg, C. S. Suh, A. Luo. – New York : Springer, 2011. – 179 p. doi: 10.1007/978-1-4419-9801-9.
13. Multipoint Constraints for Modeling of Machine Tool Dynamics / C. Brecher, M. Fey, C. Tenbrock, M. Daniels // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2016. – Vol. 138 (5). – P. 117–124. doi: 10.1115/1.4031771.
14. Pogrebnyak, R. Load and shaping precision of a complex railroad-wheel surface / R. Pogrebnyak // Russian engineering research. – New York : Allerton Press, Inc., 2012. – T. 32, No. 4. – P. 407–411. doi: 10.3103/S1068798X12040211.

Р. П. ПОГРЕБНЯК^{1*}

^{1*}Каф. «Прикладная механика», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, Украина, 49005, тел. +038 (056) 743 32 76, +38 (095) 499 75 54, эл. почта pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

УПРУГАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ СУППОРТОВ КАРУСЕЛЬНОГО СТАНКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

Цель. В работе предполагается определить условия образования динамической погрешности контурной механической обработки резанием поверхности гребня реального железнодорожного колеса чашечным резцом и предложить способы ее уменьшения. **Методика.** Задача решалась путем создания нелинейной динамической расчетной упругой модели с последующим моделированием ее нагружения внешними силовыми факторами, значение которых были получены аналитическим и экспериментальным методами. Расчетная схема уравновешенного суппорта представляет собой нелинейную двухмассовую систему, динамическая модель ползуна – одномассовая, с одной степенью свободы. В основу математического описания технологических нагрузок положены результаты заводских тестов, а также аналитические обобщения, полученные методом сопоставления нескольких схем формообразования гребня колеса. Аналитическое определение составляющих силы резания учитывает изменения кинематических параметров режима резания при обработке профиля фасонным инструментом. **Результаты.** При обработке гребня колеса радиальная и осевая составляющие силы резания, нагружающие суппорт и ползун станка, знакопеременны. Существуют условия, при которых в приводе подачи суппорта и ползуна раскрываются зазоры, причем это возможно при любой геометрии профиля колеса. Особенности нагрузки суппорта и ползуна, формирующие гребень реального колеса (с бигармоническим припуском), ведут к возникновению участков обработки, на которых происходит многократное раскрытие зазоров в передачах приводов подач и увеличивается ошибка формообразования. **Научная новизна.** Автором созданы упругие нелинейные динамические модели суппорта и ползуна. Составлены в соответствии модели, решены уравнения движения масс и нагружения связей. Определены условия устойчивого движения. **Практическая значимость.** Моделированием определены качественные и количественные условия, при которых неустойчивое движение суппорта и ползуна с переключением зазоров не происходит: для этого рекомендуется изменить вес противовеса.

Ключевые слова: железнодорожное колесо; станки для обработки железнодорожных колес; динамические нагрузки; динамическая точность; зазоры; колебания

R. P. POGREBNIYAK^{1*}

^{1*}Dep. «Applied Mechanics», National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +038 (056) 743 32 76, +38 (095) 499 75 54, e-mail pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

ELASTIC NONLINEAR DYNAMICS OF MOTION OF SLIDE OF VERTICAL TURNING MACHINE FOR WORKING OF SOLID-ROLLED RAILWAY WHEELS

Purpose. The article is aimed to determine the conditions of a dynamic error formation of contour machine cutting of surface of the real railway wheel flange by the cup-tip tool and propose the ways of reducing the errors. **Methodology.** The problem was solved by the creation of dynamic nonlinear and elastic calculation model with further modeling of its loading by the external force factors. The values of forces were obtained by analytical and experimental methods. The calculation scheme of the equilibrium support is a nonlinear two-mass system, a dynamic model of slide - single-mass with one degree of freedom. The basis of the mathematical description of technological loads is the results of factory experiments, as well as analytical generalizations obtained as a result of the comparison of several schemes of the formation of the wheel flange. Analytical determination of the components of the cutting force takes into account the changes in the kinematic parameters of the cutting mode when the

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

profiling is done using a shaped tool. **Findings.** During processing of the wheel flange the radial and axial components of the cutting forces that load slide and slide-block of machine are alternating. There are conditions in drive of slide and slide-block when the gaps appear, and it is possible at any profile geometry of the wheel. The peculiarities of loading of the slide and slide-block forming a flange (with biharmonic allowance) cause the occurrence of the processing areas where the gaps increase many times in drives of mechanical transmissions and error of forms increases. The dynamic system of the drive is quite tough and high-frequency and it is sensitive to the presence of gaps. **Originality.** The author created elastic nonlinear dynamic models of support and slide. In accordance with the model it is written and solved equations of motion of the masses and loading of the connections. The conditions of the stable motion were found. **Practical value.** It is determined by modeling the qualitative and quantitative terms of stable motion without gaps. It is recommended to change the weight of counterweight.

Keywords: railway wheel; railway wheel processing machines; dynamic loading; dynamic precision; gaps; vibrations

REFERENCES

1. Vasilev, G. N. (1987). *Avtomatizatsiya proyektirovaniya metallovezhushchikh stankov*. Moscow: Mashinostroyeniye.
2. Haivoronskyi, O. A. (2016). Terms of ensuring quality of the railway wheels built up by welding. *Science and Transport Progress*, 5(65), 136-151. doi:10.15802/stp2016/84078
3. Kolesa sutsilnokatani. Tekhnichni umovy, DSTU HOST 10761:2016 (2016).
4. Kedrov, S. S. (1978). *Kolebaniya metallovezhushchikh stankov*. Moscow: Mashinostroyeniye.
5. Kulik, V. K., Petrakov, Y. V., & Iotov, V. V. (1987). *Progressivnyye protsessy obrabotki fazonnykh poverkhnostey*. Kyiv: Tekhnika.
6. Levin, A. I. (1978). *Matematicheskoye modelirovaniye v issledovaniyakh i proyektirovanii stankov*. Moscow: Mashinostroyeniye.
7. Petrakov, Y. V., & Fedorenko, I. G. (1984). Konturnaya obrabotka fazonnykh poverkhnostey detaley. *Metallovezhushchiye stanki*, 12, 39-42.
8. Petrakov, Y. (2016). Simulation of chatter suppression for lathe machining. *Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*, 2(77), 119-124.
9. Pogrebnyak, R. P. (2012). Experimental investigation of rolled blank shape for railway wheel. *Proizvodstvo prokata*, 2, 29-33.
10. Strutynskyi, V. B., & Perfilov, I. V. (2015). *Vibratsiini protsesy mekhanichnoi obrobky* [Monograph]. Kyiv: National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute».
11. Strutynskyi, V. B. (2001). *Matematychnye modeliuvannia protsesiv ta system mekhaniky*. Zhytomyr: Zhytomyr Institute of Engineering and Technology.
12. Gegg, B. C., Suh, C. S., & Luo, A. C. J. (2011). Machine Tool Vibrations and Cutting Dynamics. New York: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-1-4419-9801-9
13. Brecher, C., Fey, M., Tenbrock, C., & Daniels, M. (2016). Multipoint Constraints for Modeling of Machine Tool Dynamics. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(5), 117-124. doi:10.1115/1.4031771
14. Pogrebnyak, R. P. (2012). Load and shaping precision of a complex railroad-wheel surface. *Russian engineering research*, 32(4), 407-411. doi:10.3103/S1068798X12040211

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. С. В. Ракшею (Україна); д.т.н., проф. І. В. Добровим (Україна)

Надійшла до редколегії: 17.03.2017

Прийнята до друку: 22.06.2017

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

UDC 629.4.048.7

E. V. BILOSHYTSKYI^{1*}

WAYS TO MANAGE HEATING INERTIA

^{1*}Project Design and Technological Bureau, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 371 51 12, e-mail beloshickij@rambler.ru, ORCID 0000-0002-2424-8479

Purpose. The research paper proposes to estimate the effect of heat inertia of the water heating system, in transient operation modes, on the temperature condition in the passenger car, as well as to offer technical solutions intended to reduce the heating system inertia effect and to maintain a stable temperature condition in the passenger car premises in transitional modes of the heating system. **Methodology.** The author developed the method for controlling the heat transfer of heating system pipes with the help of regulating casings. To control the heating system and the heat transfer of heating pipes, two types of temperature control sensors were used in the passenger car: certain sensors interacted with regulatory casings, while the others interacted with high-voltage tubular heating element control devices. To assess the efficiency of heat interchange regulation of heating pipes and the heating system control, with installed regulating casings, the operation of the heating system with regulating casings and two types of sensors was mathematically modelled. Mathematical modelling used the experimental test data. The results of experimental tests and mathematical modelling were compared. **Findings.** Currently in operated passenger cars, control of heating appliances is not constructively provided. Automatic maintenance of the set temperature in a passenger car is limited to switching on and off of high-voltage tubular heating elements. The use of regulating casings on heating pipes allows reducing the effects of heat inertia and maintaining stable thermal conditions in a passenger car, using the heating system as a heat accumulator, and also provides the opportunity to realize an individual control of air temperature in the compartment. **Originality.** For the first time, the paper studied the alternative ways of regulating the temperature condition in a passenger car. Using of the heating system as a heat accumulator. **Practical value.** The regulation of the heat transfers of the heating pipes by regulating casings allows reducing the effect of thermal inertia of the heating system on the temperature condition in a passenger car, implementing individual adjustment of air temperature in a compartment within 40% of the power of the heating pipe section, using the heating system as a heat accumulator.

Keywords: heating of passenger cars; free convection; heat transfer; heat accumulator

Introduction

During operation, it is practically impossible to maintain the required heat transfer fluid temperature in the passenger car boiler. This is due to the shutdown of high-voltage electric heating tubes of the heating system. The reasons for the shutdown are different during moving and standing with subsequent heating, resulting in transient heating modes that cause temperature fluctuations in passenger cars. This process is compounded by the fact that during moving and standing of a passenger car the required heating capacity of the heating

system is different, the higher the speed of the car, the more the required heating capacity of the heating system increases, this is confirmed by the results of the study [4], Fig. 1.

Transitional modes are compounded by the large heat inertia of the heating system. The installed high-voltage heating tubes also have heat inertia, which also affects the inertia of the heating system. The installed sensors for monitoring the temperature in the car have no correction for the inertia of the heating system.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

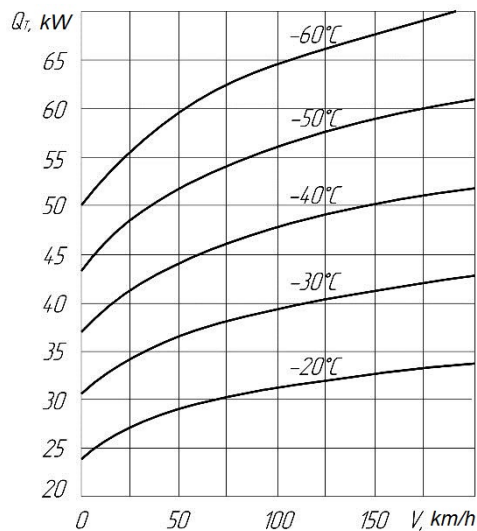


Fig. 1. Required heating capacity of the passenger car heating system in relation to traffic at various outdoor temperatures

Since 2004, all types of cars are equipped with air-conditioning units [2]. The water heating system with smooth regulation of the boiler's heat output in the range of loads from «0» to 48.0 kW is proposed. For this purpose, the boiler is equipped with three groups of electric heating: I group – 24.0 kW, 3 kV, II group – 12.0 kW, 3 kV, III group – 12.0 kW, 380 V. The third group of the boiler is connected to the air conditioner converter circuit through the appropriate switching devices. The converter provides for smooth regulation of the output power from «0» to P_{nom} (12 ÷ 17 kW). Therefore, the III group of the boiler will have smooth power regulation from «0» to $P_{nom} = 12$ kW. As a result, the entire range of heat output of the boiler will be with smooth regulation.

The disadvantage of the proposed system is that the system can work qualitatively when heating the boiler only with electricity.

The work [2] considers the water heating system with smooth regulation of heating output of heating pipes at boiler combined heating. The system is designed for smooth regulation and stabilization of the heat transfer fluid temperature at the inlet to the heating devices, respectively, at transient and steady-state modes, stabilizing the air temperatures inside the car during cycling of high-voltage heating groups of the boiler, and also when the boiler is operated with solid fuel.

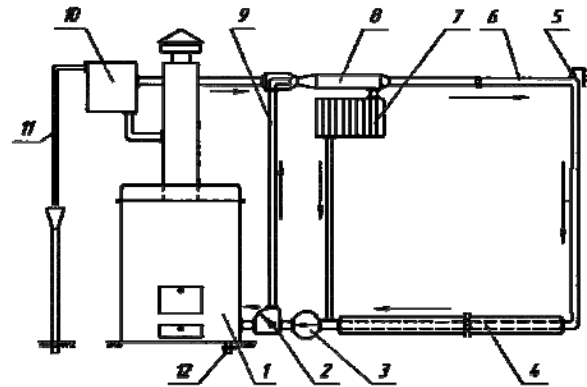


Fig. 2. Layout of water heating with separation of flows: 1 – boiler; 2 – divider; 3 – circulating pump; 4 – heating pipes; 5 – air line; 6 – feeding pipe; 7 – air heater; 8 – mixer; 9 – bypass pipe; 10 – expander; 11 – overflow pipe; 12 – drain plug

The principle of operation of the system, whose layout is shown in Fig. 2, consists in the separation of the heat transfer fluid flow at the inlet to the boiler into two adjustable parts by the divider 2 with an electric drive. One part of the flow returns to the boiler 1, and the second one through the bypass pipe 9, passing the boiler, goes to the mixer 8. The movement of the heat transfer fluid through the system is carried out by a circulation pump 3. Depending on the required heating output of the system, a heat transfer fluid with the required temperature is fed into the heating devices through the mixer 8. In this case, there is no need for strict maintenance of any value of the heat transfer fluid temperature at the outlet from the boiler.

This system can only work when the circulation pump is on, which reduces its reliability.

The work [8] proposes to use the heating system as a cold and heat accumulator; the selection of accumulated, cold or heat is assumed only through the water heater, without additional conversion of the heating system. Using a heating system as a cold accumulator is possible, but as a heat accumulator without additional conversion is impossible, since the heating system will work in the usual heating mode. The publication of specialists [1] is devoted to the interaction of heating and ventilation systems; the work proposes to automate the operation of the water heater to maintain the set temperature, the outer air heated in the heater and fed by the ventilation system. Improvement of the operation of refrigerating

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

equipment of passenger cars in transitional modes was considered in [11].

The study [14] is aimed at reducing the energy costs of modern light rail system Luas operating in Dublin, Ireland, through the optimization of the heating and ventilation system. The work [12] studied the Swiss railroad vehicles of Swiss Rhaetian Railway (RhB). The research is aimed at improving the energy efficiency of life-support systems for railway vehicles, by reducing the consumption of outside air by way of controlling CO₂ content in the air. The publications [5, 9, 13] are devoted to the improvement of air conditioning systems of modern passenger cars. Problems of increasing the comfort of passenger transportation are also examined in the scientific works of other researchers [7, 10], but they consider other aspects of comfort, which are associated more with the improvement of the dynamic characteristics of passenger rolling stock.

Proceeding from the foregoing, it follows that along with comparatively large volumes of research on improving the design of passenger car heating systems [1, 2, 4, 8, 11, 12, 14], the tasks of ensuring the maintenance of a stable temperature condition in passenger premises are practically not considered and require more effective solutions. Therefore, the direction of research related to improving the efficiency of the operation of heating units for passenger cars is an urgent scientific and applied task.

Purpose

The purpose of this study is to develop technical solutions to improve the design of the water heating system, in order to ensure a stable temperature condition in the passenger car premises in transitional modes of the heating system

Methodology

To carry out the research it was necessary to solve the following tasks:

- Analyse the shared participation of convective and radiant heat exchange on the surface of heating pipes;
- Evaluate the heat transfer efficiency of heating pipes, when installing the regulating casing.

On the heating pipe surface there is the

convective heat exchange with the internal air and the radiant heat exchange with the walls and internal equipment of the car. The intensity of such heat exchange is estimated by the heat transfer coefficient α , W/(m²·K), [6]:

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_c \quad (1)$$

where α_r – radiant heat-transfer coefficient, W/(m²·K); α_c – convection coefficient, W/(m²·K).

For different bodies the radiation factor is different [3]. Its value is determined by the nature of the body, its surface state and temperature. This law establishes the dependence of the density E_0 of the body integral radiation flux on its temperature. For an absolutely blackbody:

$$E_0 = \sigma_0 T^4, \quad (2)$$

where σ_0 – Stefan-Boltzmann constant $\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²·K).

In technical calculations, this law is applied in the more convenient form:

$$E_o = c_o \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (3)$$

where c_o – blackbody coefficient.

$$c_o = \sigma_0 \cdot 10^{-8} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}).$$

Consequently, the radiation energy of the absolutely black body is proportional to the fourth power of the absolute temperature.

This law can be applied to real bodies. In this case, it takes the form:

$$E = c \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (4)$$

Here c is the radiation factor of various bodies. It varies from 0 to 5.67.

Comparing the flux density of the body's self-radiation with the radiation flux density of an absolutely black body at the same temperature, we obtain another characteristic of the body, which is called the emissivity factor ε .

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$\varepsilon = \frac{E}{E_o} = \frac{c}{c_o}. \quad (5)$$

The value of ε varies from 0 to 1, which is convenient.

In this case we have for a real body:

$$E = \varepsilon E_o = \varepsilon c_o \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (6)$$

The flux of radiant heat exchange between two grey surfaces in an enclosed space, when one of the surfaces with the area F_2 flows around the other with the area F_1 , is calculated by the formula:

$$Q = \varepsilon_n c_o F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (7)$$

Where the expression:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{F_2}{F_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right)}, \quad (8)$$

is called the reduced blackbody emissivity factor.

With regard to heating pipes:

F_1 – surface of the surrounding object (i.e., surface of the walls and the internal equipment of the car);
 F_2 – surface of heating pipes.

If we consider the last formula (8) with respect to the heat transfer on the unit of the heat-sensing wall surface, the specific heat flux of the radiation will be:

$$q_r = \varepsilon_n c_o \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (9)$$

Taking into account that the specific heat flux by convection is determined by the formula:

$$q_c = \alpha_c (t_p - t_n), \quad (10)$$

where t_p – pipe temperature, °C; t_a – air temperature, °C,

And the total heat flux q , by convection and radiation is as follows:

$$q = q_r + q_c. \quad (11)$$

Taking into account the expression (11), we obtain a formula for calculating the radiation heat transfer coefficient:

$$\alpha_r = 0.04 \varepsilon_n c_o \left(\frac{T_m}{100} \right)^3. \quad (12)$$

In formula (12) $T_m = 0.5 \cdot (T_1 + T_2)$ is the average temperature of bodies exchanging radiant heat.

With respect to the heat exchange between the heating pipes and air in the car, index 1 refers to the surface of the pipes, index 2 refers to the car inner equipment surrounding the pipe.

To determine the convective heat transfer coefficient, we use the criteria for the dependence of the Nusselt number N_u on the Grashof number G_r and the Prandtl number P_r :

$$N_u = c(G_r \cdot P_r)^n. \quad (13)$$

Having determined N_u , we calculate the value of the convective heat transfer coefficient:

$$\alpha_c = \frac{Nu\lambda}{d}, \quad (14)$$

where λ – air thermal conductivity coefficient, W/(m² · K); d – determining dimension, here the pipe diameter, m.

The value of the coefficients c and n , as well as the product G_r and P_r in the formula (13) is determined by the data of the table given in [3].

Having determined the value of heat transfer coefficient α , we calculate the heat transfer of the heating pipes Q_T , W;

$$Q_T = \alpha F (t_a - t_n). \quad (15)$$

Calculations of the heat transfer fluid temperature at various points along the pipe are made using the formula:

$$t = t_n + (t^0 - t_n) e^{-\alpha l}. \quad (16)$$

Let us analyse the share of convective heat transfer on the heating pipes of the heating system, the calculation results are summarized in Table 1.

Table 1

Heat transfer of the radiator from horizontal metal pipes at free convection

Initial data		Notation	Values	Units
1	Radiator pipe diameter	$D =$	76	mm
2	Radiator length (one pipe)	$L =$	22	m
3	Number of pipes in radiator	$N =$	2	pcs.
4	Water temperature at the beginning of the pipe	$t_n =$	85	°C
5	Water temperature at the end of the pipe	$t_0 =$	65	°C
6	Indoor air temperature	$t_a =$	22	°C
7	Type of pipe outer surface	Grey paint		
8	The Stefan-Boltzmann constant	$C_0 =$	5.67	W/(m ² ·K ⁴)
9	Acceleration of gravity	$g =$	9.80665	m/c ²
10	Emissivity factor of pipe surface	$e =$	0.900	–
11	Average temperature of pipe walls	$t_{cm} =$	75.0	°C
12	Temperature drop	$dt =$	53.0	°C
13	Air volume expansion coefficient	$b =$	0.00339	1/K
14	Kinematic viscosity of air	$n =$	0.0000133	m ² /c
15	Prandtl number	$P_r =$	0.7035	–
16	Air thermal conductivity	$\lambda =$	0.026119	W/(m·K)
17	Radiator surface area	$A =$	10.5055	m ²
18	Heat flux	$Q_u =$	3 536	W
19	Radiation heat transfer coefficient	$\alpha_u =$	6.4	W/(m ² ·K)
20	Grashof number	$G_r =$	3314599.8	–
21	Nusselt number	$N_u =$	19.5387	–
22	<u>Convective heat flow</u>	$Q_c =$	3477	W
23	Convective heat transfer coefficient	$\alpha_c =$	6.2	W/(m ² ·K)
24	Full power of radiator heat flow	$Q_T =$	7.013	kW
			6.030	kcal /h
25	Radiator heat transfer coefficient	$k \approx \alpha =$	12.6	W/(m ² ·K)
			10.8	kcal /(h·m ² ·K)

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

As can be seen from the calculation results in Table 1, the share of convective heat transfer is 46÷40% of the total heat transfer, the variations depend on dt of the temperature drop.

Free (natural) motion arises under the action of heat exchange near the surface due to the difference in the densities of air layers having different temperatures: lighter heated layers are forced upward by heavier cold layers.

In view of the foregoing, it can be proposed to control the heat transfer of heating pipes due to free convection, reducing or increasing the degree of convective heat transfer on the surface of the heating pipes. This can be achieved by installing regulating casings on the heating pipes. The closed space is formed with holes for convective heat transfer, while the area of the holes for convective heat transfer must be adjustable, which will allow increasing or decreasing the degree of convective heat transfer on the surface of the heating pipes.

Direct regulators can be used for automatic regulation. The principle of operation of a direct-acting thermostat is based on the phenomenon of liquid volume change due its temperature change. That will allow to more accurately react to changes in air temperature in the car, increasing or decreasing the degree of convective heat transfer on the heating pipes, thereby controlling the heat transfer of the heating pipes.

In this case, two types of air temperature sensors will be installed in the car, some will interact with the regulating casings, and others will interact with the control devices of the high-voltage tubular heating elements. The interaction between sensors for monitoring the air temperature in the car should be as follows: the high-voltage tubular heating elements can be switched off only after full closing of the regulating casings holes; they can be switched on only after full opening of the regulating casings holes. The principle of the system operation: when the car air temperature increases to 20 °C, the area of the holes on the regulating casings becomes smaller, and with an increase in the car air temperature their area decreases; when the car air temperature reaches 22 °C, the holes are completely closed, only then the sensors of high-voltage tubular heating element control devices are activated, and the heating elements can only be switched on when the regulating casings holes are

fully open. Thus, the heating system will accumulate thermal energy and will function as a heat accumulator. This gives advantages: the accumulated heat in the heating system will always be available almost instantly, when opening the holes, i.e. increasing the free convection increases the pipe heat transfer. Thus, it will be possible to maintain a stable temperature condition in cars, as well as to adjust individually the air temperature in the compartment.

To assess the efficiency of heat transfer regulation of heating pipes, with installed regulating casings, the operation of the heating system with regulating casings was mathematically modelled. During mathematical modelling we used the formulas (1), (12), (14)–(16), the car air temperature can be determined by the formula:

$$t_I = \frac{Q_T - Q_F + Q_V + \alpha_1 F_1 t_1 + \alpha_2 F_2 t_2 + c_p G_O t_O}{\alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + c_p G_O}, \quad (17)$$

where Q_F – heat loss through the car windows; Q_V – heat emission of the fan; Q_T – heating capacity of heating pipes; α_1, α_2 – heat transfer coefficients respectively on the inner surfaces of the enclosing structures of the body and the internal equipment of the car; F_1, F_2 – inner surface of the enclosing structures and the surface of the internal equipment; t_1 – average temperature of inner surfaces of enclosing structures; t_2 – average temperature of the surfaces of the internal equipment.

Mathematical modelling was carried out for the all-metal passenger car of model 61–826 built by the Tver Carriage Works (TVZ). We used the initial data given in [2] in Fig. 12. Graphs of temperatures of the heat transfer fluid and air, namely: 1- t_{out} , 2- t_{in} – temperature of the heat transfer fluid at the input and output of the boiler; 7- t_O – outdoor air temperature, 5- t_I – indoor air temperature of the car, 8 – switching on of high-voltage tubular heating elements. The initial data are summarized in Table 2.

The results of mathematical modelling are shown in Fig. 3.

Table 2

Initial date											
T, h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$t_{in}, ^\circ C$	45	65	91	63	56	87	60	45	55	65	55
$t_{out}, ^\circ C$	32	42	63	44	32	62	53	32	39	45	37
$t_i, ^\circ C$	20	18	24	24	17	24	24	22	20	23	22
$t_o, ^\circ C$	-12	-14	-11	-19	-18	-17	-9	-12	-9	-6	-3

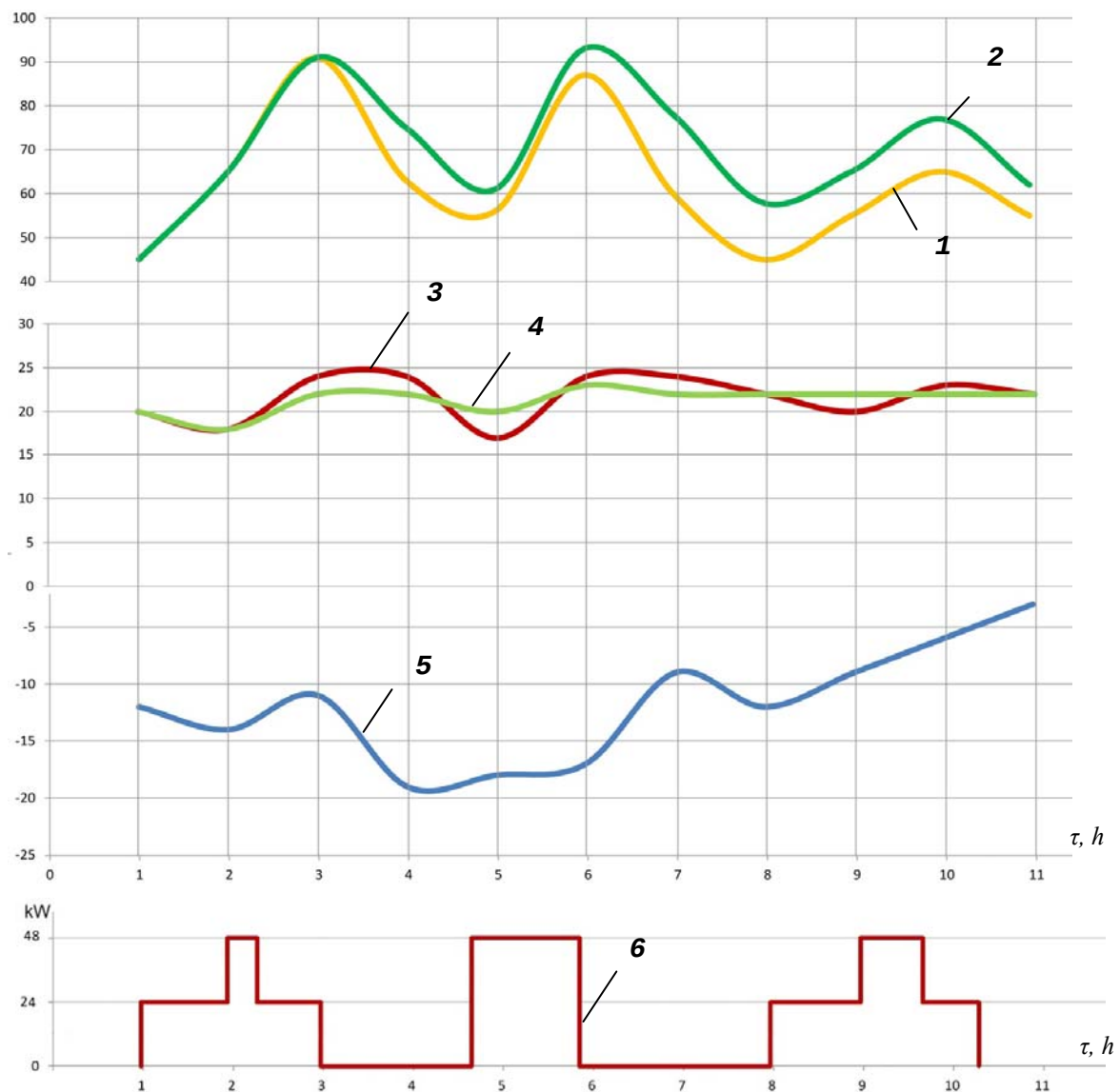


Fig. 3. Diagrams of air and water temperature in boiler, switching on and off of high-voltage tubular heating elements:

1 – water temperature in boiler, 2 – water temperature in boiler with regulating casings, 3 – air temperature in a car, 4 – air temperature in a car with regulating casings, 5 – outdoor air temperature, 6 – switching on of high-voltage tubular heating elements

Findings

As follows from the data of the diagram 3 shown in Fig. 3, fluctuations in the car air temperature within the limits of $17 \div 25$ °C are caused by the switching off of high-voltage tubular heating elements, drop of the outdoor air temperature, thermal inertia of the internal equipment of the car, and thermal inertia of the heating system. The process of differences occurs as follows: when the car air temperature drops to 18 °C, the control equipment switches on the high-voltage tubular heating elements; during the time of overcoming the inertia (heating) of the heating system, the car heat loss continues and the car temperature drops; when the system is heated the air temperature rises; upon reaching 22 °C, the control equipment switches off the high-voltage tubular heating elements, but in view of the large heating system inertia, the car air continues to heat up to equality between the car heat loss and thermal output of heating tubes, whereby the car air temperature ranged between $17 \div 25$ °C.

When using the regulating casings of heating pipes (diagram 4, Fig. 3), the car air temperature fluctuated within $20 \div 23$ °C. This is due to the fact that when the air temperature in the car reached 22 °C, the regulating casings decreased the heat transfer of the heating pipes, when the car air temperature was below 22 °C, the heat transfer of the heating pipes increased, resulting in reduced effect of thermal inertia of the heating system. Comparing the diagrams 1 and 2 in Fig. 3 of water temperature in boiler, it can be seen that with regulating casings, diagram 2, the water temperature in boiler is higher than that without the regulating casings, diagram 1, under the same conditions of the system heating and the car heat loss. This leads to the conclusion that the heating system, while performing their functions, can act as a heat accumulator.

The use of regulating casings on heating pipes allows reducing the effects of heat inertia and maintaining stable thermal conditions in a passenger car, using the heating system as a heat accumulator, and also provides the opportunity to realize an individual control of air temperature in the compartment.

Originality and practical value

For the first time, the paper studied the alternative ways of regulating the temperature condition in a passenger car. Using of the heating system as a heat accumulator. The regulation of the heat transfer of the heating pipes by regulating casings allows reducing the effect of thermal inertia of the heating system on the temperature condition in a passenger car, implementing individual adjustment of air temperature in a compartment within 40% of the power of the heating pipe section.

Conclusions

Analysis of the study, control of the heating system inertia in the passenger cars, made it possible to single out one of the problems in the operation of the heating system, the unstable temperature condition caused by the large thermal inertia of the heating system.

Currently in operated passenger cars, control of heating appliances is not constructively provided. The heating pipe performance can be controlled only by the temperature of the heat transfer fluid in the heating system, into which the heating pipes enter as a heater. Automatic maintenance of the set temperature in a passenger car is limited to switching on and off of high-voltage tubular heating elements.

The paper proposes and examines the issue of automatic maintaining a stable temperature condition in a passenger car by installing regulating casings on heating pipes. The mode of operation and interaction of air temperature sensors in the car is proposed.

This method of pipe heat transfer regulation will allow reducing the effect of thermal inertia of the heating system on the temperature condition in a passenger car, implementing individual adjustment of air temperature in a compartment within 40% of the power of heating pipes passing through the compartment. Using a heating system as a heat accumulator will allow a maintaining a regulated temperature condition in the car for the longer period, for example, at the marshalling or turnaround stations. The operating mode and interaction of sensors for monitoring the car air temperature will allow maintaining a stable temperature condition in the car.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

In addition, the results of research can be used to modernize heating units in the cars of the not only for the construction of new cars, but also to operating park, in depot conditions.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Белошицкий, Э. В. Повышение эффективности отопительно-вентиляционных систем / Э. В. Белошицкий, Ю. В. Кебал // Вагонный парк. – 2017. – № 1. – С. 32–35.
2. Жариков, В. А. Климатические системы пассажирских вагонов / В. А. Жариков. – Москва : Трансинфо, 2006. – 135 с.
3. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэл. – Москва : Мир, 1975. – 935 с.
4. Китаев, Б. Н. Повышение эффективности теплообменных процессов в пассажирских вагонах / Б. Н. Китаев, В. А. Жариков. – Москва : Транспорт, 1995. – 53 с.
5. Кукса, Ю. Я. Перспективы модернизации пассажирских вагонов при проведении капитально-восстановительного ремонта / Ю. Я. Кукса, П. М. Мустафа, И. Ю. Хоменко // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 2. – С. 28–30.
6. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Москва : Энергия, 1977. – 344 с.
7. Мямлин, С. В. Новые технологии в проектировании дизель-поездов / С. В. Мямлин, А. В. Кивишева // Локомотив-інформ. – 2013. – № 11. – С. 4–5.
8. Пат. 61021 Україна, МПК В 61 D 27/00. Застосування системи опалення пасажирського вагона з водоповітряним калорифером, розташованим у напірному повітропроводі, як акумулятора холоду (тепла) / Хоменко Ірина Юріївна ; заявник та патентовласник Хоменко Ірина Юріївна. – № u201013475 ; заявл. 15.11.2010 ; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13. – 2 с.
9. Попередні випробування систем життєзабезпечення пасажирського плацкартного вагона, дообладнаного системою кондиціонування / О. Г. Дуганов, В. Т. Вислогузов, Ю. В. Кебал [та ін.] // Інтеграція України в междунар. трансп. систему : тез. І Междунар. науч.-практ. конф. (21.05–22.05.2009) / М-во трансп. і зв'язи України, Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2009. – С. 22–23.
10. Приходько, В. И. Научные основы создания пассажирских вагонов для скоростных перевозок : монография / В. И. Приходько, С. В. Мямлин. – Днепропетровск : Маковецкий, 2011. – 355 с.
11. Хоменко, І. Ю. Удосконалення системи енергетичного та холодильного обладнання пасажирських вагонів при капітальних ремонтах : дис. ... канд. тех. наук : 05.22.07 / Хоменко Ірина Юріївна ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – 125 с.
12. Energy efficiency of railway vehicles / N. Vetterli, U.-P. Menti, F. Sidler, E. Thaler, G. Zweife // CISBAT 2015 : International Scientific Conference (9.09–11.09.2015). – Lausanne, Switzerland, 2015. – P. 955–960.
13. Khomenko, I. Yu. Mathematical modeling of unsteady heat exchange in a passenger car / I. Yu. Khomenko // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 6 (48). – С. 147–155. doi: 10.15802/stp/2013/19762.
14. Sweeney, E. Modification of Luas heating and ventilation systems to reduce energy consumption [Електронний ресурс] / E. Sweeney, J. Brunton // Conference papers (5–6th September) / Dublin Institute of Technology. – Dublin, 2013. – Режим доступа: <http://arrow.dit.ie/engschmecccon/62/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 03.06.2017.

Е. В. БІЛОШИЦЬКИЙ^{1*}

^{1*}Проектно-конструкторське технологічне бюро, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 371 51 12, ел. пошта beloshickij@rambler.ru, ORCID 0000-0002-2424-8479

СПОСОБИ УПРАВЛІННЯ ІНЕРТНІСТЮ ОПАЛЕННЯ

Мета. У науковій роботі передбачається оцінити вплив теплової інертності водяної системи опалення (при перехідних режимах роботи) на температурний режим у пасажирському вагоні. А також запропонувати технічні рішення, спрямовані на зниження впливу теплової інертності системи опалення та підтримання сталого температурного режиму в приміщеннях вагона на перехідних режимах системи опалення. **Методика.** Розроблено спосіб керування тепловіддачею обігрівальних труб системи опалення за допомогою регулюючих кожухів. Для управління системою опалення та тепловіддачею обігрівальних труб використані

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

два типи датчиків контролю температури повітря в вагоні: одні взаємодіяли з регулюючими кожухами, а інші – з приладами автоматики управління (нагрівальними високовольтними ТЕНами). Для оцінки ефективності регулювання тепловіддачі опалювальних труб та управління системою опалення з встановленими регулюючими кожухами математично змодельована робота системи опалення з регулювальними кожухами, з використанням двох типів датчиків. Для математичного моделювання використані дані експериментальних випробувань. Проведено порівняння результатів експериментальних випробувань та математичного моделювання. **Результати.** На даний час в експлуатованих пасажирських вагонах управління приладами опалення конструктивно не передбачено. Автоматична підтримка заданої температури в пасажирському вагоні зводиться до включення і виключення високовольтних ТЕНів. Застосування регулюючих кожухів обігрівальних труб дозволяє знизити вплив теплової інертності опалення для підтримки стійкого теплового режиму в пасажирському вагоні, використовувати систему опалення як тепловий акумулятор, а також дає можливість реалізувати індивідуальне регулювання температури повітря в купе. **Наукова новизна.** Автор вперше досліджені альтернативні способи регулювання температурного режиму в вагоні. Використані системи опалення як акумулятори тепла. **Практична значимість.** Стабілізація тепловіддачі опалювальних труб регулюючими кожухами дозволяє знизити вплив теплової інертності системи опалення на температурний режим повітря в вагоні, реалізувати індивідуальне регулювання температури повітря в купе в межах 40 % від потужності ділянки обігрівальних труб, а також використовувати систему опалення як акумулятор тепла.

Ключові слова: опалення пасажирських вагонів; природна конвекція; тепловіддача; акумулятор тепла

Є. В. БЕЛОШИЦКИЙ^{1*}

^{1*}Проектно-конструкторское технологическое бюро, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 371 51 12, эл. почта beloshickij@rambler.ru, ORCID 0000-0002-2424-8479

СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНЕРТНОСТЬЮ ОТОПЛЕНИЯ

Цель. В научной работе предполагается оценить влияние тепловой инертности водяной системы отопления (при переходных режимах работы) на температурный режим в пассажирском вагоне. А также необходимо предложить технические решения, направленные на снижение влияния тепловой инертности системы отопления и поддержание устойчивого температурного режима в помещениях вагона на переходных режимах системы отопления. **Методика.** Разработан способ управления теплоотдачей обогревательных труб системы отопления с помощью регулирующих кожухов. Для управления системой отопления и теплоотдачей обогревательных труб использованы два типа датчиков контроля температуры воздуха в вагоне: одни взаимодействовали с регулируемыми кожухами, а другие – с приборами автоматики управления (нагревательными высоковольтными ТЭНами). Для оценки эффективности регулирования теплоотдачи отопительных труб и управления системой отопления с установленными регулируемыми кожухами математически смоделирована работа системы отопления с регулируемыми кожухами, с использованием двух типов датчиков. Для математического моделирования использованы данные экспериментальных испытаний. Проведено сравнение результатов экспериментальных испытаний и математического моделирования. **Результаты.** В настоящее время в эксплуатируемых пассажирских вагонах управление приборами отопления конструктивно не предусмотрено. Автоматическое поддержание заданной температуры в пассажирском вагоне сводится к включению и выключению высоковольтных ТЭНов. Применение регулирующих кожухов обогревательных труб позволяет снизить влияние тепловой инертности отопления для поддержания устойчивого теплового режима в пассажирском вагоне, использовать систему отопления как тепловой аккумулятор, а также дает возможность реализовать индивидуальное регулирование температуры воздуха в купе. **Научная новизна.** Автор впервые исследованы альтернативные способы регулирования температурного режима в вагоне. Использованы системы отопления как аккумулятор тепла. **Практическая значимость.** Стабилизация теплоотдачи обогревательных труб регулируемыми кожухами позволяет снизить влияние тепловой инертности системы отопления на температурный режим воздуха в вагоне, реализовать индивидуальное корректирование температуры воздуха в купе в пределах 40 % от мощности участка обогревательных труб, а также использовать систему отопления как аккумулятор тепла.

Ключевые слова: отопление пассажирских вагонов; естественная конвекция; теплоотдача; аккумулятор тепла

REFERENCES

1. Biloshytskyi, E. V., & Kebal, Y. V. (2017). Povysheniye effektivnosti otopitelno-ventilyatsionnykh sistem. *Car Fleet*, 1, 32-35.
2. Zharikov, V. A. (2006). *Klimaticheskiye sistemy passazhirskikh vagonov*. Moscow: Transinfo.
3. Siegel, R., & Howell, J. (1975). *Thermal radiation heat transfer*. Moscow: Mir.
4. Kitaev, B. N., & Zharikov, V. A. (1995). *Povysheniye effektivnosti teploobmennyykh protsessov ekspluatatsii vagonov v passazhirskikh vagonakh*. Moscow: Transport.
5. Kuksa, J. Y., Mustafa, P. M., & Khomenko, I. Y. (2010). Perspektivy modernizatsii passazhirskikh vagonov pri provedenii kapitalno-vosstanovitel'nogo remonta. *Railway Transport of Ukraine*, 2, 28-30.
6. Mikheev, M. A., & Mikheeva, I. M. (1977). *Osnovy Teploperedachi*. Moscow: Energy.
7. Myamlin, S. V., & Kivisheva A. V. (2013). Novyye tekhnologii v proyektirovanii dizel-poyezdov. *Lokomotyv-Inform*, 11, 4-5.
8. Khomenko, I. Y. (2011). *UA Patent No. 61021*. Ukrainian Intellectual Property Institute (UKRPATENT). Retrieved from <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=161080>
9. Duhanov, O. H., Vyslohuzyov, V. T., Kebal, Y. V., Furmanova, A. V., Khomenko, I. Y., Shapoval, A. V., ... Rechkalov, S. D. (2009). Poperedni vyprobuвання system zhyttiezabezpechennia pasazhyrskoho platskartnoho vahona, doobladanoho systemoiu kondytsionuvannya. *Proceedings of the 1st International Conference Integration of Ukraine into the International Transport Network, May 21-22, 2009, Dnipropetrovsk*. 22-23. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.
10. Prikhodko, V. I., & Myamlin, S. V. (2011). *Nauchnyye osnovy sozdaniya passazhirskikh vagonov dlya skorostnykh perevozok* [Monograph]. Dnipropetrovsk: Makovetsky.
11. Khomenko, I. Y. (2014). *Power Supply and Air Conditioner Systems of Passenger Cars Improvement During the Thorough Overhaul* (PhD thesis). Available from Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipropetrovsk.
12. Vetterli, N., Menti, U.-P., Sidler, F., Thaler, E., & Zweife, G. (2015). Energy efficiency of railway vehicles. *Proceedings of the International Scientific Conference CISBAT 2015, September 9-11, 2015, Lausanne, Switzerland*. 955-960. Retrieved from https://infoscience.epfl.ch/record/213444/files/9_VETTERLI.pdf
13. Khomenko, I. Y. (2013). Mathematical modeling of unsteady heat exchange in a passenger car. *Science and Transport Progress*, 6 (48), 147-155. doi:10.15802/stp2013/19762
14. Sweeney E., & Brunton J. (2013). Modification of Luas heating and ventilation systems to reduce energy consumption. *Irish Transport Research Network Conference, Trinity College Dublin, Dublin, Ireland, 5-6 September, 2013*. Retrieved from <http://arrow.dit.ie/engschmecon/62/>

Prof. V. L. Gorobets, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. O. O. Beihul, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published

Received: March 31, 2017

Accessed: July 05, 2017

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463

О. В. ФОМІН^{1*}, О. М. ГОРОБЧЕНКО², Н. С. КОЧЕШКОВА³, В. В. КОВАЛЕНКО⁴

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний економіко-технологічний університет транспорту, вул. І. Огієнка, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (067) 813 97 88, ел. пошта fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946

²Каф. «Експлуатація та ремонт рухомого складу», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. + 38 (050) 972 04 71, ел. пошта superteacher@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9868-3852

³Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний економіко-технологічний університет транспорту, вул. І. Огієнка, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (095) 272 36 82, ел. пошта Kocheshkova_N@bigmir.net, ORCID 0000-0003-1838-5167

⁴Каф. «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини», Східноукраїнський національний університет імені В. Даля, пр-т Центральний, 59-а, Сєвєродонецьк, Україна, 93400, тел. +38 (095) 142 90 74, ел. пошта kkaterina@ukr.net, ORCID 0000-0003-1706-2710

ТЕОРЕТИЧНИЙ БАЗИС ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ НЕСУЧИХ СИСТЕМ ВАГОНІВ

Мета. В статті потрібно розглянути систематизоване та структуроване представлення теоретичних основ оптимізаційного проектування вагонних складових та практичних засобів його реалізації. **Методика.** Проведене дослідження, аналіз та узагальнення базуються на результатах вивчення відомих робіт із теми, власних розробок авторів, математичному обґрунтуванні та комп'ютерному моделюванні. При розрахунках складових рухомого складу використані сучасні загальноприйняті методики. **Результати.** Систематизовано та узагальнено комплекс методологічних заходів оптимізаційного проектування вантажних вагонів та їх складових, проаналізовано особливості кожного окремого його етапу та умови застосування. Представлено розроблену математичну модель для формалізації процедури впровадження різних складових, яка враховує всі розрахункові випадки життєвого циклу вагону, а також може бути застосована для інших об'єктів транспорту з урахуванням їх власних режимів експлуатації. Показана можливість генерування (розробки) варіантів рівномірного виконання вагонних складових за мінімальних значень матеріалоємності з використанням методу пошуку та реалізації раціональних показників міцності в конструкціях. Розроблено методи пошуку оптимальних рішень, що з достовірною точністю дозволяють визначати шукані характеристики складових конструкцій. Представлена варіативність підходів значно розширює програмно-розрахункову базу проектувальника та збільшує потенціал синтезу та аналізу вагонних конструкцій. **Наукова новизна.** Представлено запропоновані авторами методологічні основи проектування вагонних складових за оптимальними структурно-параметричними виконаннями, що базуються на результатах ретельного дослідження особливостей експлуатації та сучасних можливостях обчислювальної техніки. **Практична значимість.** Доцільність та ефективність використання розробленого авторами науково-практичного інструментарію підтверджені позитивними результатами його застосування при створенні напіввагонів універсальних 12-9904 і 12-9904-01 та глибокої модернізації існуючих конструкцій вантажних вагонів, а саме напіввагонів 12-9745, вагонів-хоперів 20-9749.

Ключові слова: аналіз та синтез вагонних конструкцій; оптимальні рішення; математичне моделювання; визначення та реалізація резервів міцності

Вступ

Залізничний транспорт є масовим видом транспорту як України, так і більшості країн СНД та ЄС. Він відіграє вирішальну роль у забезпеченні внутрішніх та міждержавних транспортних потреб вантажо- та пасажирообороту. Тому до залізничного транспорту висуваються

високі вимоги з ефективності та надійності його функціонування, які безпосередньо залежать від технічного рівня рухомого складу, який знаходиться в експлуатації. Станом на початок 2017 року зношеність парку ПАТ «Укрзалізниця» становить 91 %, що створює складну ситуацію на ринку транспортних послуг України [1, 8, 10, 11, 13]. При цьому переважну біль-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

шість рухомого складу ПАТ «Укрзалізниця» складає парк вантажних вагонів. Для збільшення конкурентоспроможності останнього, в основних положеннях Комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України на 2008–2020 роки (затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14 жовтня 2008 року за № 1259) визначена необхідність підвищення його системної ефективності шляхом глибокої модернізації існуючих моделей та виготовлення зразків нового покоління. Одним з перспективних шляхів виходу з критичної ситуації, що сформувалася на залізницях України, є розробка принципово нових конструкторських рішень, за рахунок яких вагони будуть відповідати сучасним технічним та економічним вимогам учасників їх життєвого циклу. Досягти зазначеного можливо лише за умови оптимізації складових вантажних вагонів.

Відсутність створених та реалізованих концептуально нових інженерних технологій в конструкціях вантажних вагонів знижує ефективність залізничних перевезень за рахунок необґрунтовано тривалих термінів доставки вантажів, високої власної маси поїзду (який являється транспортним баластом), високого опору руху, що має своїм наслідком підвищені затрати на тягу поїздів, великого зношення коліс вагонів, колії тощо [1, 4–6].

Впровадження нових або суттєве вдосконалення існуючих складових (модулів) вантажних вагонів дозволить системно підвищити ефективність вантажоперевезень залізничним транспортом, що для учасників життєвого циклу вантажних вагонів буде гарантувати зниження зношуваності залізничної колії, покращення взаємодії вагонів та колії, зниження металоємності вагонів та підвищення їх конкурентоспроможності, зменшення термінів окупності початкових капіталовкладень та підвищення рентабельності роботи, її доходності тощо. Комплекс даних факторів дозволить підвищити щільність, обсяги перевезень та швидкості руху, що матиме позитивний економічний ефект не лише для залізничного транспорту, але й економіки України в цілому.

Мета

Метою роботи є узагальнене представлення теоретичних основ оптимізаційного проектування вагонних складових та практичних засобів його реалізації.

Методика

Для визначення складових вантажного вагона, за рахунок удосконалення яких доцільно покращувати його техніко-економічні та експлуатаційні показники, існують два принципові наукові підходи. Перший підхід орієнтовано на проведення пошукових досліджень, які спрямовані на відшукування таких виконань та характеристик матеріалів, які при меншій матеріалоемності та собівартості виготовлення складових забезпечать характеристики міцності не нижчі ніж у вже існуючого виконання – вагона-аналога. Другий підхід є більш перспективним, оскільки направлений на визначення та ефективне використання розрахункових резервів міцності (визначаються як співвідношення отриманих максимальних експлуатаційних характеристик міцності з їх допустимими значеннями [2, 3, 10]) з відповідним зниженням енерго- та матеріаловитрат на виготовлення та ремонти досліджуваної складової. Для реалізації другого напрямку необхідно мультирежимно (з урахуванням всіх можливих штатних та аварійних ситуацій на етапах життєвого циклу вагона) досліджувати роботу кожного елементу в складі вагона-аналога щодо сприйняття експлуатаційних навантажень, які виникають, з метою виявлення розрахункових резервів міцності. Зазначене на сучасному рівні доцільно здійснювати шляхом дослідження відповідної адекватної розрахункової скінченно-елементної моделі вагона. При виявленні розрахункових резервів міцності конструкції розраховуються раціональні показники міцності (на наступних етапах проектування використовуються як обмеження), які з урахуванням яких проводяться роботи, визначають за допомогою першого підходу. Розробка процедури визначення запасів несучої здатності загальних конструкцій вагонів та їх складових ґрунтується на принципі, що запас міцності загальних конструкцій/вузлів визначається мінімальним запасом міцності їх складових.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Для формалізації процедури впровадження різних профілів як складових несучих систем вантажних вагонів [9] доцільно використовувати розроблену математичну модель (за правилом відбору), особливістю якої є орієнтація на комплексне вдосконалення конструкції шляхом модернізації її окремих складових за критерієм мінімальної матеріалоємності (як визначального техніко-економічного показника):

$$\left\{ \begin{array}{l} ЦФ: \\ m = f(n_1, n_2 \dots n_k) \rightarrow \min \\ ОДР: \\ [\sigma]^i \geq \sigma_{\text{експл}}^i = f(n_1, n_2 \dots n_k); \quad i = I, II, III \\ [\sigma]^{\text{удар}} \geq \sigma^{\text{удар}} = f(n_1, n_2 \dots n_k); \\ [N_y] \geq N_y^{\text{експл}} = f(n_1, n_2 \dots n_k); \\ [N] \geq N^{\text{експл}} = f(n_1, n_2 \dots n_k); \\ ОМР: \\ n_{I \min} \geq n_I \geq n_{I \max}; \quad I = [1, k], \end{array} \right. \quad (1)$$

де цільова функція (ЦФ) m – матеріалоємність впроваджуваного елемента – головний критерій оптимізації, який залежить від змінюваних геометричних параметрів $(n_1, n_2, \dots, n_k)$, де k змінюється від його конструктивних особливостей та відшукується в області допустимих рішень (ОДР), що виділяється з області можливих рішень (ОМР) наступними функціональними обмеженнями:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\sigma]^i \geq \sigma_{\text{експл}}^i = f(n_1, n_2 \dots n_k); \quad i = I, II, III \\ [\sigma]^{\text{удар}} \geq \sigma^{\text{удар}} = f(n_1, n_2 \dots n_k); \\ [N_y] \geq N_y^{\text{експл}} = f(n_1, n_2 \dots n_k); \\ [N] \geq N^{\text{експл}} = f(n_1, n_2 \dots n_k), \end{array} \right. \quad (2)$$

за міцністю за першим $([\sigma]^I)$, другим $([\sigma]^{II})$ та третім $([\sigma]^{III})$ розрахунковими режимами, у випадку удару $[\sigma]^{\text{удар}}$ відповідно з [2, 3, 10], а також обмеженнями з: жорсткості $[f]$, стійкості $[N_y]$ і втомній міцності $[N]$, кожне з яких також залежить від варіювання змінюваних геометри-

чних параметрів $(n_1, n_2, \dots, n_k)$. При цьому область можливих рішень формується варіантами змінюваних параметрів $(n_1, n_2, \dots, n_k)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{1 \min} \geq n_1 \geq n_{1 \max}; \\ n_{2 \min} \geq n_2 \geq n_{2 \max}; \dots \\ n_{k \min} \geq n_k \geq n_{k \max}, \end{array} \right. \quad (3)$$

обмеження якої визначаються конструктивними чи експлуатаційними особливостями впроваджуваної вагонної складової.

У процесі проектування несучих складових вантажних вагонів доцільно в якості функціональні обмеження використовувати моменти опору відповідних перерізів $[W_X]$, $[W_Y]$, $[W_Z]$.

У загальному плані процедуру оптимізаційного проектування вагонних складових можна представити у вигляді блок-схеми, наведено як на рис. 1.

Одним із ключових моментів запропонованого методологічного комплексу є визначення розрахункових резервів міцності. У загальному випадку відповідна процедура складається з 4-х основних етапів (рис. 2). Так, на першому етапі передбачається проведення експлуатаційних випробувань досліджуваної конструкції вагонів з метою визначення дійсних значень механічних напружень у контрольних точках, а також розробка розрахункової скінчено-елементної моделі, комп'ютерне моделювання всіх важливих для дослідження експлуатаційних режимів роботи вантажного вагону. На наступному етапі проводиться відбір несучих елементів для дослідження та їх розбиття на окремі частини. Розмір частин (їх кількість) обирається залежно від необхідної глибини проробки конструкції: чим менші їх розміри – тим вища точність результату. Другий етап присвячений визначенню початкових (закладених при проектуванні) запасів міцності на окремих ділянках конструкції, після чого шляхом зіставлення обирається найменше з них, що дає можливість визначити початкові запаси міцності досліджуваної конструкції в цілому.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

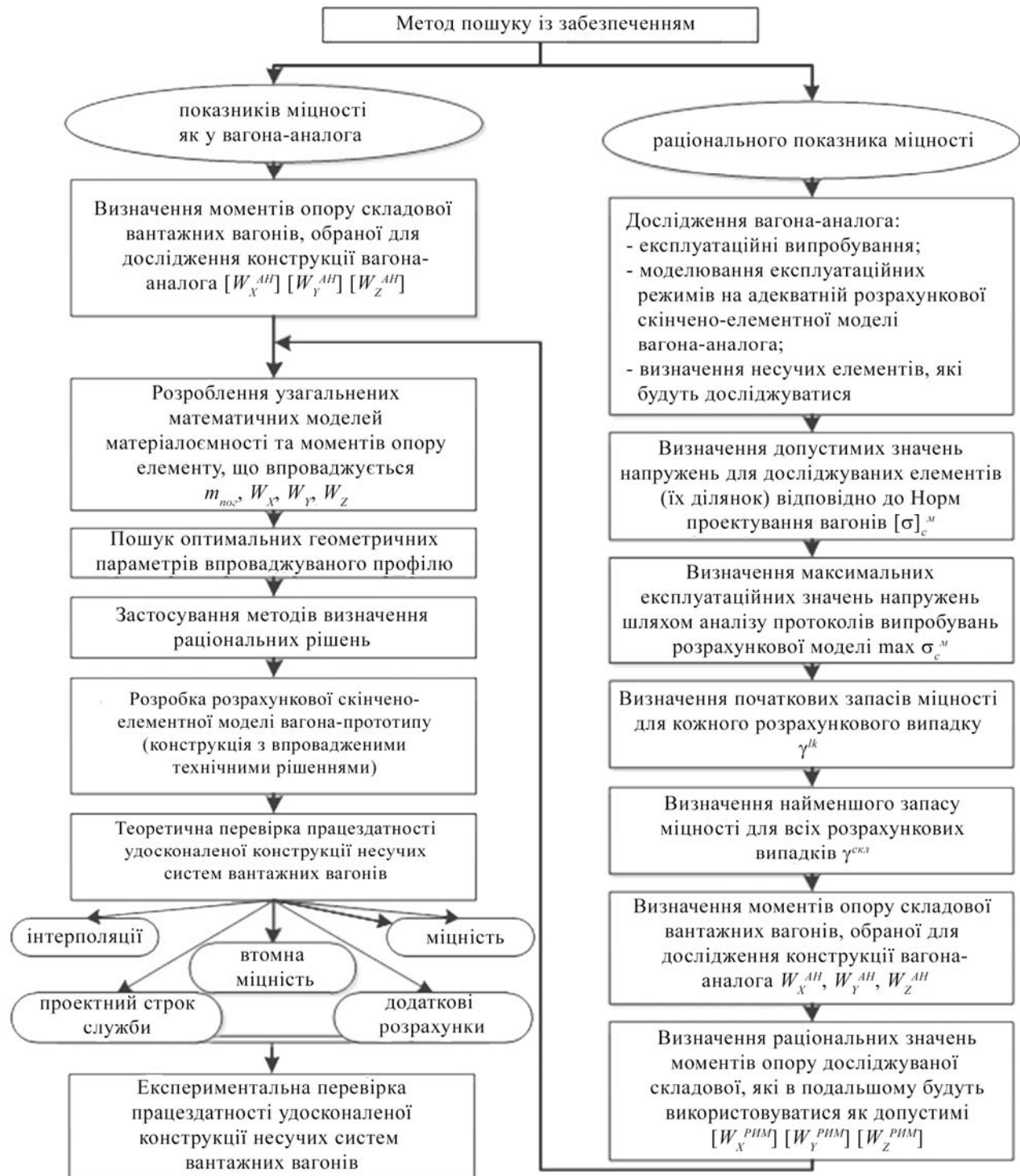


Рис. 1. Блок-схема процедури впровадження профілів у несучі системи вантажних вагонів

Fig. 1. Diagram of the introduction of profile in the carrier system of a freight car

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

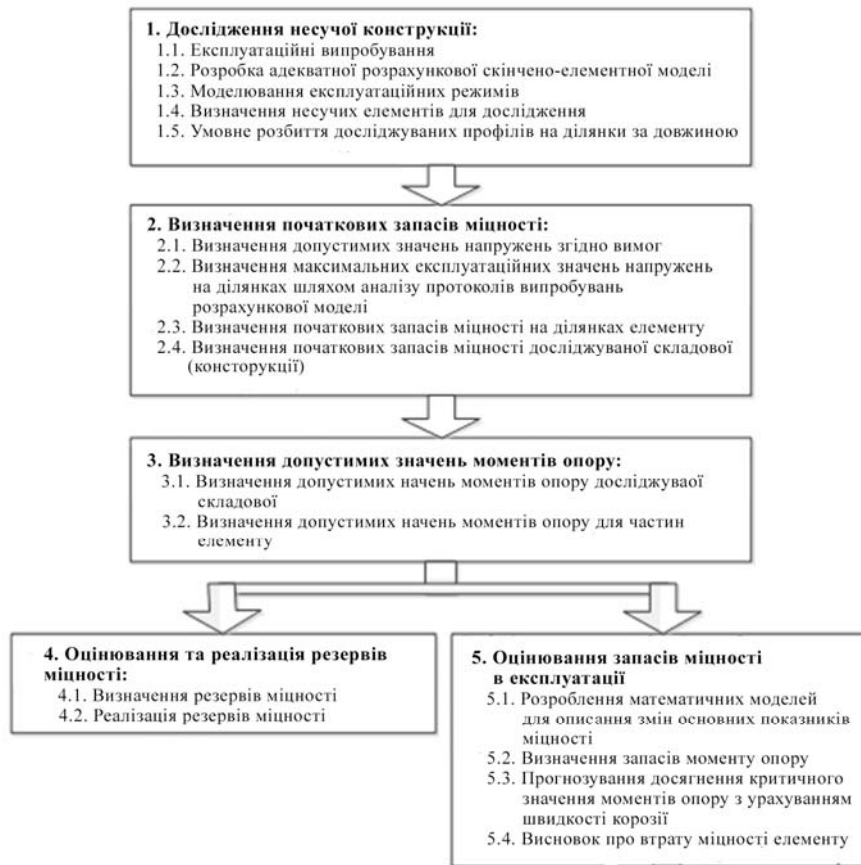


Рис. 2. Алгоритм визначення розрахункових запасів несучої здатності складових вантажних вагонів

Fig. 2. Algorithm for determination of estimated reserves of the carrier system of a freight car

У зв'язку з тим, що експлуатаційні еквівалентні напруження $\sigma_{екв.}$ визначаються як співвідношення сумарного еквівалентного моменту ($M_{екв.}$) та міцнісних характеристик ($W_{X(Y,Z)}$), але при цьому значення $M_{екв.}$ буде майже незмінним, то можна зробити висновок, що величина $\sigma_{екв.}$ буде прямо пропорційною значенням моментів опору $W_{X(Y,Z)}$. Тому як основні міцнісні характеристики профілів можна використовувати моменти опору $W_{X(Y,Z)}$. Таким чином, оцінювання міцнісних якостей несучої здатності складових вантажного вагонобудування зводиться до оцінки їх запасів моментів опору. Для цього на третьому етапі проводяться роботи з визначення допустимих значень моментів опору досліджуваної складової в цілому $[W_{X(Y,Z)}^{скл}]$ та

на окремих ділянках досліджуваної складової $[W_{X(Y,Z)}^{lk}]$. Далі, залежно від поставленого завдання, проводиться визначення та/чи використання розрахункових резервів міцності конструкції (блок 4, рис. 2) та/чи оцінювання запасів та прогнозування резервів міцності конструкції в експлуатації (блок 5). В останньому випадку визначаються математичні моделі, які описують змінювання моментів опору та матеріалоемності досліджуваних несучих елементів вагонів залежно від їх геометричних параметрів. А також визначаються конструктивні запаси/резерви міцності для окремих ділянок складової $\gamma_{W_{X(Y,Z)}^{скл}}^{рез.}$ та її загальне значення $\gamma_{W_{X(Y,Z)}^{lk}}^{рез.}$ з подальшим прогнозуванням часу досягнення критичного значення моменту опору з урахуванням швидкості корозії конструкції.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Результати

Комплексне вдосконалення конструкцій вантажних вагонів шляхом модернізації окремих складових є складною науково-технічною проблемою, вирішення якої на сучасному рівні потребує автоматизації процедури визначення розрахункових показників міцності та вибір конструкцій з оптимальними характеристиками [5, 8, 14, 15], що можливе за умови розроблення та використання відповідного наукового інструментарію реалізованого на ПЕОМ. Авторами запропоновано вирішувати дане завдання з використанням розроблених алгоритмів для визначення раціональних геометричних параметрів профілів одним з трьох методів, а саме:

- в програмі Excel стандартного пакету Microsoft Office;
- інтеграційних підходів на основі використання функцій Maximize та Minimize універсального програмного пакету MathCAD;
- або використанням розробленої авторської програми для роботи з трифакторними узагальненими математичними моделями [10, 12].

Як приклад практичної реалізації зазначених трьох методів нижче наведено їх застосування для визначення раціональних геометричних параметрів стійок та поясів каркасів універсальних напіввагонів, які в вагонах-аналогах виконані зі специфічного (а відповідно і вартісного) омега-подібного профілю (рис. 3, а), а пропонується їх виконувати з більш перспективної прямокутної труби (рис. 3, б).

У першу чергу оптимальні значення показників для такого впровадження були отримані за програмою Microsoft Excel, яка реалізує метод поступового перебирання всіх можливих рішень у заданому діапазоні, спочатку ОМР, а потім і ОДР. Аналогічні результати (рис. 4) з пошуку оптимальних характеристик профілю вагонного стояка також були отримані в розрахунках із використанням функцій Maximize та Minimize пакету MathCAD.

Слід також відзначити, що обидва вищеподані підходи орієнтовані на використання поширених програмних комплексів, які використовуються технічними службами більшості підприємств і не вимагають додаткових капіталовкладень (придбання спеціалізованих програм

та відповідного навчання технічного персоналу).

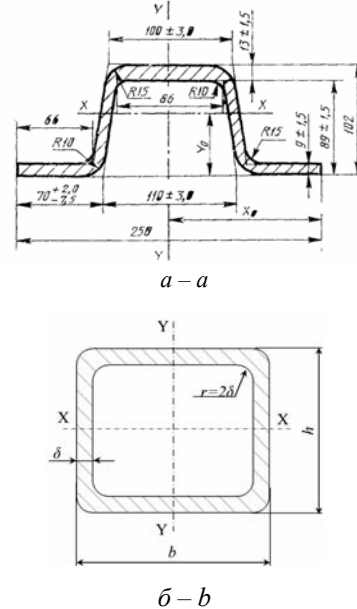


Рис. 3. Перерізи профілів:
а – вагонного стояка; б – прямокутної труби.

Fig. 3. Cross sections of profiles:
а – car post; б – rectangular tube.

Альтернативним підходом до визначення оптимальних параметрів, які забезпечать мінімальну матеріалоемність конструкції для заданих обмежень з конструкції та міцності вагонів, є використання розробленого спеціального програмного забезпечення. Такий програмний комплекс (приклад графічного інтерфейсу на рис. 5) спочатку визначає трифакторні узагальнені математичні моделі, які описують змінювання досліджуваних показників (матеріалоемності та осьових моментів опору) складових елементів вантажних вагонів під час варіювання геометричних параметрів (наприклад, висоти, ширини перерізу елемента та товщини листа, з якого його виготовлено).

При аналітичному визначенні оптимальних параметрів комп'ютерна програма реалізує запропонований алгоритм і визначає оптимальний варіант співвідношень досліджуваних характеристик. При цьому також цей комплекс дозволяє візуалізувати варіанти, які входять до ОДР, та виділяє оптимальний результат, що базується на 3d-модельованні в просторовій системі координат. Таким чином, приведені вище результати

досліджень показали, що незалежно від використаного інструментарію, порівняння експериментально отриманих характеристик з їх розрахунковими значеннями підтверджують правильність вибору всіх описаних вище методологічних підходів.

A photograph of a green Union Group railcar, likely a hopper or gondola, sitting on railroad tracks. The car has "UNION GROUP" written in large white letters on its side. The background shows a line of trees.

 $\delta - b$  $\mathcal{B} - \mathcal{C}$

a – розрахунковий блок; b – комп’ютерна модель.

Fig. 4. The results of exploration work using the MathCAD:
a – calculation unit; *b* – computer model.

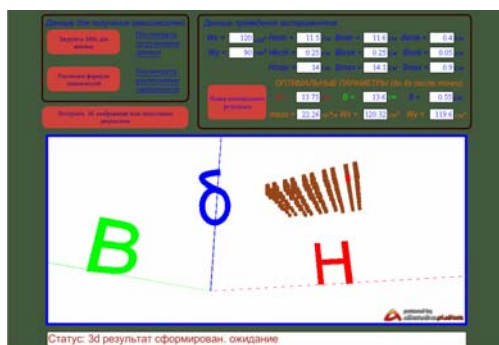


Рис. 5. Загальний вид робочої області програмно-обчислювального комплексу з візуалізацією варіантів рішень

Fig. 5. General view of the work area of software with visualization of solutions

Рис. 6. Моделі вантажних вагонів, створені та модернізовані з використанням методологічного комплексу оптимізаційного проектування
a – напіввагон універсальний моделі 12-9904 та 12-9904-01; *b* – напіввагон моделі 12-9745; *c* – вагон-хопер моделі 20-9749

Fig. 6. Models of freight cars created and upgraded by methodical complex of optimization design:

a – general-purpose gondola car models 12-9904 and 12-9904-01; b – gondola car of the model 12-9745; c – hopper car of the model 20-9749

Окрім цього, застосування запропонованих та описаних вище методичних підходів, дозволило розрахувати та розробити сім'ю перспективних моделей вантажних вагонів (рис. 7) [7, 8, 14].

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

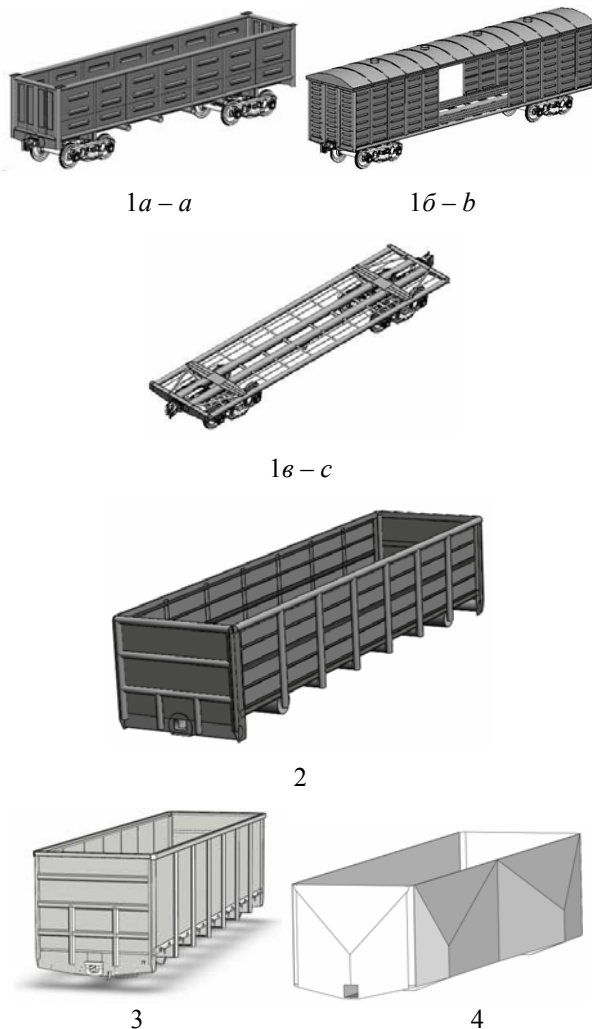


Рис. 7. Перспективні конструкції несучих систем вантажних вагонів, розроблені з використанням методологічного комплексу оптимізаційного проектування, виконані з:

1 – круглих труб: а – напіввагон, б – критий вагон, в – вагон-платформа; 2 – D-подібних труб; 3 – шестигранних профілів; 4 – вуглепластику.

Fig. 7. Advanced designs of the carrier system of freight cars created by methodical complex of optimization design. They are made of:

1 – round tubes: a – gondola car; b – covered car; c – flatcar; 2 – D-shaped tubes, 3 – hexagonal profiles, 4 – carbon fiber.

Таким чином, впровадження результатів проведених та представлених як приклад досліджень дозволять суттєво поліпшити техніко-економічні та експлуатаційні показники вантажних вагонів, що з урахуванням масовості їх парку (тільки парк ПАТ «Укрзалізниця» понад

160 тис. одиниць) забезпечить значний економічний ефект. Запропонований алгоритм може бути використаний при вирішенні інших відповідних оптимізаційних задач на основі узагальнених математичних моделей.

Наукова новизна та практична значимість

Представлені запропоновані авторами методологічні основи проектування вагонних складових, спрямовані на створення їх оптимальних структурно-параметричних виконань і базуються на результатах ретельного дослідження особливостей їх експлуатації та сучасних можливостях обчислювальної техніки.

Доцільність та ефективність використання розробленого науково-практичного інструментарію підтверджено позитивними результатами його застосування для напіввагонів універсальних 12-9904 та 12-9904-01 та глибокою модернізацією існуючих конструкцій вантажних вагонів, а саме напіввагонів 12-9745, вагонів-хоперів 20-9749.

Висновки

1. У даній статті було систематизовано запропонований методологічний комплекс заходів оптимізаційного проектування вантажних вагонів та їх складових, проаналізовано особливості кожного окремого його етапу та умови їх застосування.

2. Впровадження запропонованого науково-практичного інструментарію з оптимізаційного проектування вагонних складових, зокрема під час проектування вітчизняних напіввагонів моделей 12-9904 та 12-9904-01, глибокої модернізації напіввагонів 12-9745 та обкотишовозів 20-9749 та сім'ї вагонів з несучими системами з круглих труб, дозволило скоротити вартість їх життєвого циклу на 15–20 %, що свідчить про його ефективність. З урахуванням масовості парку вантажних вагонів (понад 160 тис. одиниць), гострої необхідності його оновлення (понад 87 % парку експлуатується на межі призначеного терміну служби та високої їх початкової вартості у середньому – понад 30 тис. долл. США), від практичної реалізації наведеного наукового підходу можливо досягти істотного економічного ефекту.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. Розроблена авторами математична модель для формалізації процедури впровадження різних складових враховує всі розрахункові випадки життєвого циклу вагону та може бути застосована для інших об'єктів транспорту, з урахуванням їх власних режимів експлуатації.

4. Використання методу з пошуку та реалізації раціональних показників міцності у вагонних конструкціях дозволяє пропонувати варіанти їх рівномірного виконання і, відповідно, досягати мінімальних значень матеріаломісткості.

5. Розроблені методи пошуку оптимальних рішень з достатньою точністю дозволяють ви-

значити шукані характеристики складових конструкцій. Варіативність підходів значно розширює програмно-розрахункову базу проектувальника та збільшує його можливості щодо синтезу та аналізу вагонних конструкцій.

Запропоновані теоретичні положення, методологічні основи та практичні засоби оптимізації випуску вагонів та їх складових доцільно використовувати при вирішенні аналогічних завдань і для інших типів рухомого складу, а також об'єктів транспортного машинобудування. Окрім цього, даний методологічний підхід можна використовувати не лише під час проектування, але і для аналізу вже існуючих рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог : монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин, А. П. Фалендыш. – Луганск : Ноулидж, 2011. – 173 с.
2. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ГосНИИВ : ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
3. РД 24.050.37-90. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – Москва : ВНИИВ : ВНИИЖТ, 1990. – 37 с.
4. Сапронова, С. Ю. Оптимізація профілів бандажів коліс локомотивів : монографія / С. Ю. Сапронова. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2011. – 171 с.
5. Тартаковский, Е. Д. Удосконалення процесу керування локомотивом шляхом використання систем підтримки прийняття рішень / Е. Д. Тартаковский, О. М. Горобченко, А. О. Антонович // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – 2016. – Т. 5, № 3 (83). – С. 4–11. doi: 10.15587/1729-4061.2016.80198.
6. Ткаченко, В. П. Оцінка стійкості залізничних екіпажів від сходу з рейок / В. П. Ткаченко, С. Ю. Сапронова // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Северодонецьк, 2015. – № 1 (218). – С. 266–271.
7. Фомін, О. В. Аналіз доцільності застосування шестигранних порожнистих профілів в якості складових елементів несучих систем напіввагонів / О. В. Фомін // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 6 (54). – С. 146–153. doi: 10.15802/stp2014/33403.
8. Analysis of syngas formation and ecological efficiency for the system of treating biomass waste and other solid fuels with CO₂ recuperation based on integrated gasification combined cycle with diesel engine / A. Y. Pilatau, H. A. Viarshyna, A. V. Gorbunov [et al.] // J. of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2014. – Vol. 36. – Iss. 4. – P. 673–679. doi: 10.1007/s40430-014-0166-7.
9. 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.
10. Fomin, O. V. Improvement of upper bunding of side wall of gondola cars of 12-9745 model / O. V. Fomin // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No. 1. – P. 45–48.
11. Formation of an automated traffic capacity calculation system of rail networks for freight flows of mining and smelting enterprises / S. V. Panchenko, T. V. Butko, A. V. Prokhorchenko, L. O. Parkhomenko // Науковий вісник НГУ. – 2016. – № 2. – С. 93–99.
12. Kelrych, M. Perspective directions of planning carrying systems of gondolas / M. Kelrych, O. Fomin // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – No. 6. – P. 64–67.
13. Lovska, A. The study of dynamic load on a wagon-platform at a shunting collision / A. Lovska, A. Ryibin // Eastern-European J. of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 3. – Iss. 7 (81). – P. 1–5. doi: 10.15587/1729-4061.2016.72054.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

14. Method of determining the parameters of improved railway brake equipment / N. Gorbunov, E. Kravchenko, O. Prosvirova [et al.] // TEKA Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2015. – Vol. 15. – No. 2. – P. 33–38.
15. Mohyla, V. The use of biofuel on the railway transport / V. Mohyla, I. Vasyliiev, E. Nozhenko // Transport Problems. – 2012. – Vol. 7. – Iss. 1. – P. 21–26.

А. В. ФОМИН^{1*}, А. Н. ГОРОБЧЕНКО², Н. С. КОЧЕШКОВА³, В. В. КОВАЛЕНКО⁴

^{1*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный экономико-технологический университет транспорта, ул. И. Огиенко, 19, Киев, Украина, 03049, тел. +38 (067) 813 97 88, эл. почта fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946

²Каф. «Эксплуатация и ремонт подвижного состава», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. + 38 (050) 972 04 71, эл. почта superteacher@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9868-3852

³Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный экономико-технологический университет транспорта, ул. И. Огиенко, 19, Киев, Украина, 03049, тел. +38 (095) 272 36 82, эл. почта Kocheshkova_N@bigmir.net, ORCID 0000-0003-1838-5167

⁴Каф. «Железнодорожный, автомобильный транспорт и подъемно-транспортные машины», Восточноукраинский национальный университет имени В. Даля, пр. Центральный, 59-а, Северодонецк, Украина, 93400, тел. +38 (095) 142 90 74, эл. почта kkaterina@ukr.net, ORCID 0000-0003-1706-2710

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ БАЗИС ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НЕСУЩИХ СИСТЕМ ВАГОНОВ

Цель. В статье необходимо рассмотреть систематизированное и структурированное представление теоретических основ оптимизационного проектирования вагонных составляющих и практических способов его реализации. **Методика.** Проведенное исследование, анализ и обобщение базируются на результатах изучения известных работ по теме, собственных разработок авторов, математическом обосновании и компьютерном моделировании. Расчет конструктивных элементов подвижного состава произведен с использованием современных общепризнанных методик. **Результаты.** Систематизирован комплекс методологических подходов оптимизационного проектирования грузовых вагонов и их составляющих, проведен анализ особенностей каждого отдельного этапа и условия применения. Представлено разработанную математическую модель для формализации процедуры внедрения разных составляющих, учитывающую все расчетные случаи жизненного цикла вагона, которая может применяться и для других объектов транспорта с учетом собственных режимов эксплуатации. Показана возможность генерирования (разработки) вариантов равнопрочностного исполнения вагонных составляющих при минимальных значениях материалоемкости. Разработаны методы поиска оптимальных решений, позволяющих с достоверной точностью определять искомые характеристики элементов конструкций. Представленная вариативность подходов значительно расширяет программно-расчетную базу проектировщика, увеличивая возможности синтеза и анализа вагонных конструкций. **Научная новизна.** Представлены предложенные авторами методологические основы проектирования вагонных составляющих за оптимальными структурно-параметрическими исполнениями, базирующимися на результатах детального исследования эксплуатационных особенностей. **Практическое значение.** Целесообразность и эффективность использования разработанного авторами научно-практического инструментария подтверждаются позитивными результатами его применения при создании полувагонов универсальных моделей 12-9904, 12-9904-01 и глубокой модернизации существующих конструкций грузовых вагонов, а именно полувагонов модели 12-9745, вагонов-хопперов 20-9749.

Ключевые слова: анализ и синтез вагонных конструкций; оптимальные решения; математическое моделирование; определение и реализация резервов прочности

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

O. V. FOMIN^{1*}, O. M. GOROBCHENKO², N. S. KOCHESHKOVA³, V. V. KOVALENKO⁴¹Dep. «Cars and Carriage Facilities», State Economy and Technology University of Transport, Ohiienko St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (067) 813 97 88, e-mail fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946²Dep. «Exploitation and Repair of Rolling Stock», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (050) 972 04 71, e-mail superteacher@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9868-3852³Dep. «Cars and Carriage Facilities», State Economy and Technology University of Transport, Ohiienko St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (095) 272 36 82, e-mail Kocheshkova_N@bigmir.net, ORCID 0000-0003-1838-5167⁴Dep. «Railway, Road Transport and Handling Machines», East Ukrainian Volodymyr Dahl National University, Tsentralnyi Av. 59-a, Severodonetsk, Ukraine, 93400, tel. +38 (095) 142 90 74, e-mail kkaterina@ukr.net, ORCID 0000-0003-1706-2710

THEORETICAL BASIS OF PARAMETRIC SYNTHESIS FOR CARRYING SYSTEMS OF CARS

Purpose. The article is aimed to systematize and structure representation of theoretical grounds for the optimization designing of railway car components and practical ways of its implementation. **Methodology.** The study is based on analysis of several well-known articles on the subject, as well as on authors' researches, some mathematical foundations and computer modeling. The rolling stock components structural analysis was made by applying modern and acknowledged methods. **Findings.** In the study the authors systematized the set of methodological approaches to the freight car design processes; they also analyzed every application phase of the designing process and its conditions. The article presents the developed mathematical model of the car component implementation. This model takes into account all the calculated cases of the car life cycle. Moreover, the model also can be applied to other transport modes accounting their specific operation modes. The possibility to generate different construction options for equally strong car component with minimum material intensity was also shown in the article. There were several methods developed for finding optimal solutions that make it possible to calculate the sought characteristics of construction elements with the reliable accuracy. The presented variety of different approaches significantly extends engineering apparatus by increasing the synthesis and analysis abilities of the car design. **Originality.** The authors proposed the methodological foundations of the car components design aimed at creating their optimal structural parameter execution and the operating features based on the results of the detailed research. **Practical value.** Expediency and effectiveness of the presented methods has been confirmed by positive experience of its application when constructing the general-purpose gondola cars, models 12-9904 and 12-9904-01, as well as when upgrading existing constructions of freight cars, model 12-9745 and the hopper car 20-9749.

Keywords: analysis and synthesis of car constructions; optimal solutions; mathematical modeling; de-finition and realization of safety reserves

REFERENCES

1. Tartakovskiy, E. D., Grishchenko, S. G., Kalabukhin, Y. Y., & Falendysh, A. P. (2011). *Metody otsenki zhiznennogo tsikla tyagovogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog* [Monograph]. Lugansk: Noulidzh.
2. All-Soviet Union Research Institute of Railway Transport. (1996). *Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)*. Moscow: GosNIIV-VNIIZhT.
3. All-Soviet Union Research Institute of Railway Transport. (1990). *Vagony gruzovyye i passazhirskiye. Metody ispytaniy na prochnost i khodovye kachestva, RD 24.050.37-90*. Moscow: GosNIIV-VNIIZhT.
4. Saponova, S. Y. (2011). *Optyimizatsiia profiliv bandazhiv kolis lokomotyviv* [Monograph]. Lugansk: Publishing center of V. Dahl East Ukrainian National University.
5. Tartakovskiy, E., Gorobchenko, O., & Antonovych, A. (2016). Improving the process of driving a locomotive through the use of decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 3(83), 4-11. doi:10.15587/1729-4061.2016.80198
6. Tkachenko, V., & Saponova, S. (2015). Evaluation of stability railway carriage derailment. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university*, 1(218), 266-271.
7. Fomin, O. V. (2014). Applicability analysis of hexahedral hollow profiles as component elements of supporting systems for gondola cars. *Science and Transport Progress*, 6(54), 146-153. doi:10.15802/stp2014/33403

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. Pilatau, A. Y., Viarshyna, H. A., Gorbunov, A. V., Nozhenko, O. S., Maciel, H. S., Baranov, V. Y., & Matus, A. (2014). Analysis of syngas formation and ecological efficiency for the system of treating biomass waste and other solid fuels with CO₂ recuperation based on integrated gasification combined cycle with diesel engine. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 36(4), 673-679. doi:10.1007/s40430-014-0166-7
9. Myamlin, S., Lingaitis, L. P., Dailydka, S., Vaičiūnas, G., Bogdevičius, M., & Bureika, G. (2015). Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie. *Transport*, 30(1), 88-92. doi:10.3846/16484142.2015.1020565
10. Fomin, O. V. (2015). Improvement of upper bunding of side wall of gondola cars of 12-9745 model. *Metallurgical and Mining Industry*, 1, 45-48.
11. Panchenko, S. V., Butko, T. V., Prokhorchenko, A. V., & Parkhomenko, L. O. (2016). Formation of an automated traffic capacity calculation system of rail networks for freight flows of mining and smelting enterprises. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 93-99.
12. Kelrych, M., & Fomin, O. (2014). Perspective directions of planning carrying systems of gondolas. *Metallurgical and Mining Industry*, 6, 64-67.
13. Lovskaya, A. O., & Ryibin, A. V. (2016). The study of dynamic load on a wagon-platform at a shunting collision. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, 7(81), 4-8. doi:10.15587/1729-4061.2016.72054
14. Gorbunov, N., Kravchenko, E., Prosvirova, O., Nozhenko, O., Kovtanets, M., Mokrousov, S., & Kara, S. (2015). Method of determining the parameters of improved railway brake equipment. *TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture*, 15(2), 33-38.
15. Mohyla V., Vasyliiev, I., & Nozhenko, E. (2012). The use of biofuel on the railway transport. *Transport Problems*, 7(1), 21-26.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. П. Ткаченком (Україна); д.т.н., проф. С. В. Мямліним (Україна)

Надійшла до редколегії: 10.03.2017

Прийнята до друку: 06.07.2017

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.21.09:004.925

К. І. ГЛАДКА¹, Н. П. БОЧАРОВА^{2*}

¹Каф. «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (63) 697 56 61, ел. пошта katiaturavey@gmail.com, ORCID 0000-0003-3587-6101

^{2*}Каф. «Графіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 59, ел. пошта bocharovanp@gmail.com, ORCID 0000-0002-6869-8826

ПОБУДОВА ПРОМІЖНОЇ ОПОРИ МОСТА ЯК ПАРАМЕТРИЧНОГО ОБ'ЄКТА ЗА ДОПОМОГОЮ AUTODESK REVIT

Мета. У науковій роботі необхідно вирішити наступні задачі: 1) дослідити можливості Autodesk Revit по створенню параметричних об'єктів; 2) створити інформаційну модель проміжної опори моста з можливістю зміни розмірів моделі без зміни геометрії об'єкта; 3) відстежити складність та доцільність використання параметричних моделей при проектуванні елементів мостових переходів. **Методика.** Дослідження проводились за допомогою просторового моделювання в системі Autodesk Revit. Задавалися співвідношення параметрів об'єкта, взаємозв'язки між окремими геометричними елементами та перевірялось, які зміни відбуваються з моделлю при зміні заданих параметрів. **Результати.** Створено модель опори двох типів: для залізничних мостів та для автодорожніх. Для обох типів моделі змінюються розміри та кількість складових елементів відповідно до введених параметрів. Проведена робота підтверджує можливість створення інформаційних параметричних моделей складної форми та доцільність їх використання при проектуванні мостів і не тільки. **Наукова новизна.** Створення інформаційних моделей – сучасна та актуальна тема. Але як в літературі, так і в інтернет-ресурсах параметризація розглядається на прикладі примітивних об'єктів. Модель, що запропонована в статті, складається з кількох залежних геометричних тіл, отже, розкриває тему параметризації об'єктів більш повно та детально, порівняно з існуючими джерелами. Що стосується створення параметричних моделей елементів мостових переходів – то в літературі така інформація не зустрічається, тобто, запропонована вперше. **Практична значимість.** Параметризація просторових моделей дає можливість значно прискорити та спростити процес проектування будь-яких об'єктів за рахунок використання типових параметричних моделей у багатьох проектах. Особливо це стосується проектування мостових переходів, адже стандартні елементи для них, такі як опора або прогонова будова, в програмних продуктах поки що не представлені. Проектування мостів, як плоского контуру, порівняно з використанням просторових інформаційних моделей, – довгий та неефективний процес, до того ж не дає можливості візуалізації, яка є необхідною складовою будь-якого проекту.

Ключові слова: просторове моделювання; параметричні об'єкти; опори мостів; Autodesk Revit

Вступ

Динаміка розвитку комп'ютерної графіки свідчить про тенденцію переходу від суто графічного відображення об'єктів, що проектуються, до так званого BIM (Building Information Model) інформаційного моделювання.

Основа концепції BIM – створення єдиної тривимірної інформаційної моделі, яка включає

всю інформацію про об'єкт від стадії проекту до будівництва та експлуатації. Інформаційна модель дає можливість працювати над одним об'єктом водночас групі спеціалістів, автоматично отримувати креслення, бази даних, графік виконання будівельних робіт та інше [1–4].

У комп'ютерних програмах для архітектурно-будівельного проектування (таких як

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Graphisoft ArchiCAD та Autodesk Revit) існує велика кількість стандартних елементів, таких як стіни, вікна, двері, перекриття, та ін., які дозволяють створювати інформаційні моделі будівель, не витрачаючи зайвого часу на розробку окремих елементів. Що стосується проектування мостових переходів – процес створення інформаційних моделей тут набагато складніший, адже поки що не представлені програмні продукти, які б мали стандартні елементи такі як опора або прогонова будова. Взагалі-то кожен мостовий перехід є унікальним. Але використовують певні типи опор чи прогонових будов, які мають однакову стандартну форму і відрізняються за розмірами. При цьому прогонові будови більш уніфіковані, ніж опори. Цю ситуацію останнім часом намагаються змінити, використовуючи в опорах збірні конструкції. Тому важливою є уніфікація розмірів опор мостів. Отже актуальним питанням, на нашу думку, є створення інформаційних моделей опор зі змінними параметрами.

Мета статті

Пропонується розглянути деякі можливості Autodesk Revit по створенню параметричних об'єктів, на прикладі побудови залізобетонної проміжної опори моста, перевірити можливість зміни розмірів моделі без зміни геометрії об'єкта та проаналізувати доцільність створення параметричних моделей.

Методика

На першому етапі необхідно визначити форму та розміри майбутньої моделі. Задати фіксовані розміри, розібратись, які залежності слід уводити для змінних величин. Ескіз можна виконати від руки та використати його scan-копію як основу для створення моделі. Або можна використати вже існуючий файл **Autocad** [1], як в наведеному прикладі (рис. 1).

Створення каркасу моделі

Відкривши Revit, слід створити сімейство на базі метричної системи, типової моделі (рис. 2).

Інструменти і принципи просторового моделювання **Revit** відрізняються від звичних нам інструментів моделювання **Autocad** [1, 5]. Замість команд «ЯЩИК» та «ФАСКА» в **Revit**

користуються «**ВЫДАВИТЬ**» та «**ПЕРЕХОД**». Але спочатку в **Revit** потрібно створити так звані «опорні площини». Для спрощення побудов імпортуємо існуючий файл **Autocad** через меню «**ВСТАВКА**» – «**ИМПОРТ ИЗ ФОРМАТОВ САПР**». Побудуємо спочатку площини рівня, прив'язуючи їх до існуючих площин імпортованої моделі по фасаду (рис. 3), [6, 7].

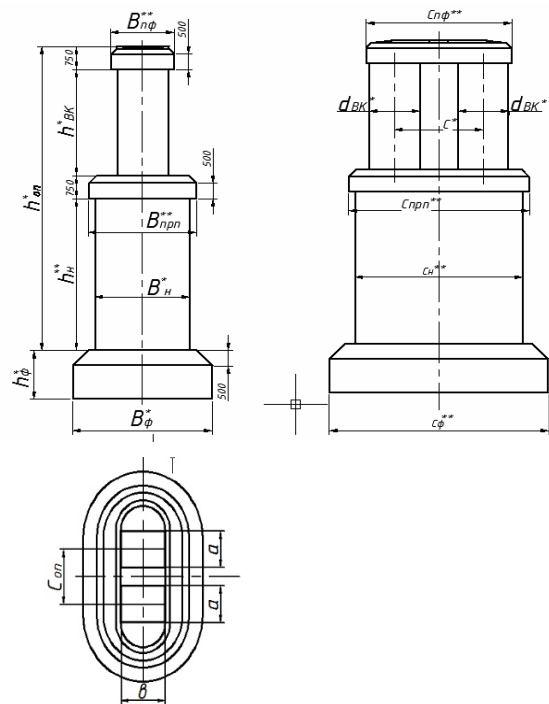


Рис. 1. Ескіз моделі

Fig. 1. Sketch of the model

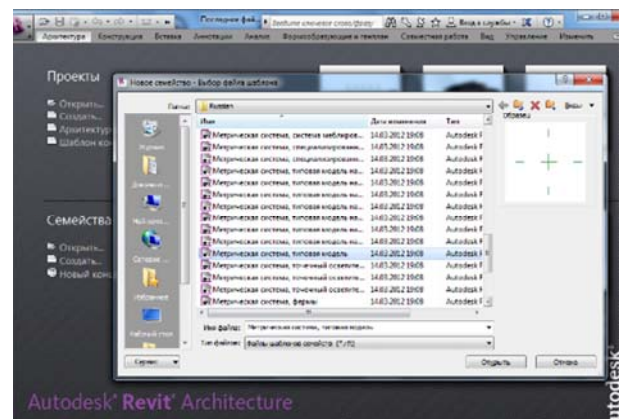


Рис. 2. Вибір шаблону сімейства

Fig. 2. Selecting the family template

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

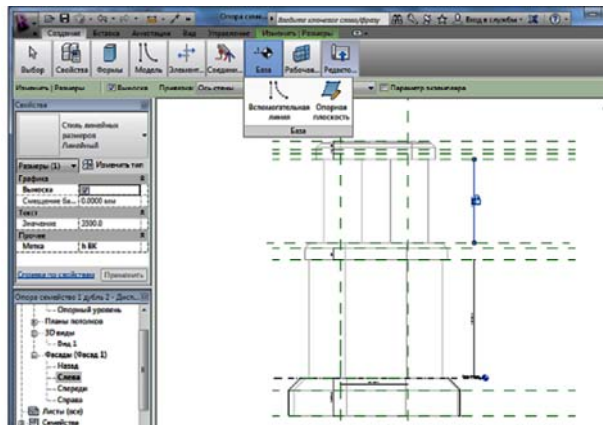


Рис. 3. Створення опорних площин

Fig. 3. Creating the planes of reference

Перейдемо на опорний рівень «ПЛАН», та створимо вертикальні площини, що пройдуть через осі симетрії колон.

Створюючи опорні площини, одразу зафіксуємо незмінні розміри – висоту підферментної та проміжної плит та висоту фасок (поставимо «замочок»). Для змінних розмірів введемо відповідні параметри через «СЕМЕЙСТВО» – «ТИПОРАЗМЕРЫ В СЕМЕЙСТВЕ» (рис. 4). Такими будуть висота фундаменту h_f , висота нижньої частини опори $h_{нк}$, що залежить від $h_{оп}$, та висота колон $h_{вк}$.

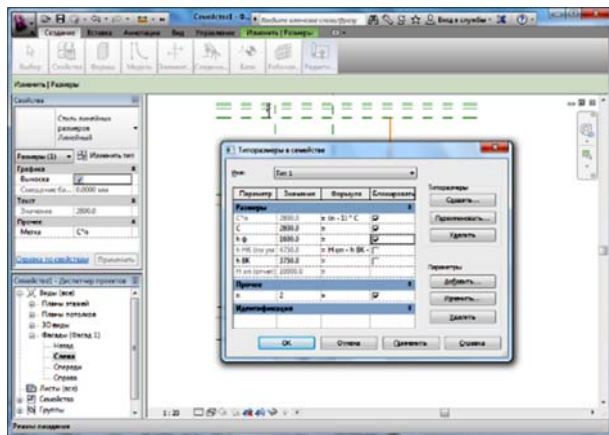


Рис. 4. Аналіз форм моделі

Fig. 4. Analysis of model forms

Створення об'ємної геометрії. Опора має досить складну форму, тому для кожного елемента, що буде створений як окремий геометричний об'єкт, потрібно одразу задавати необхідні параметри та перевіряти коректність зміни цих параметрів [6–13].

Перейдемо на опорний рівень плану та активізуємо команду «СОЗДАТЬ» – «ФОРМУ» – «ВЫДАВЛИВАНИЕ». Створимо спочатку частину фундаменту між опорними вертикальними площинами, що розташовані на відстані C .

Побудуємо прямокутник шириною $B\phi$ (4 400 мм), задаємо початок видавлювання – 500 мм, кінець видавлювання – $H\phi$, у нашому прикладі – 1 600 мм (рис. 5, а, 5, б).

Щоб закріпити потрібні нам параметри при активному розмірі, вибираємо опцію «МЕТКА» – «ДОБАВИТЬ ПАРАМЕТР». При цьому відкриється меню «СВОЙСТВА ПАРАМЕТРА», де і слід задати спочатку тип, назву та категорію параметра (рис. 5, в), а потім його величину чи формулу (рис. 5, г).

Далі створимо ще два симетричних тіла, прив'язуючи їх до першого за опорними площинами.

Для цього будуємо контур півкола радіусом $R=B\phi/2$, замкнутого відрізком прямої. Дугу кола прив'язуємо до кутів першого тіла та виконуємо видавлювання з тими ж параметрами. (рис. 5, д).

Перейдемо до 3D виду та об'єднаємо створені об'єкти через меню «ГЕОМЕТРИЯ» – «СОЕДИНИТЬ» (рис. 5, е).

Одразу перевіримо коректність роботи створеного об'єкта при зміні параметрів. Для цього збільшимо відстань між осями C вдвічі та змінимо висоту фундаменту h_f з 1 600 мм на 2 000 мм (рис. 5, є). Для порівняння змін залишимо в проекті модель опори, що імпортована з AutoCAD. Очевидно, що побудоване тіло змінило розміри, отже параметри задані коректно.

Для подальшої роботи відновимо первинно встановлені параметри та перейдемо на опорний рівень плану.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

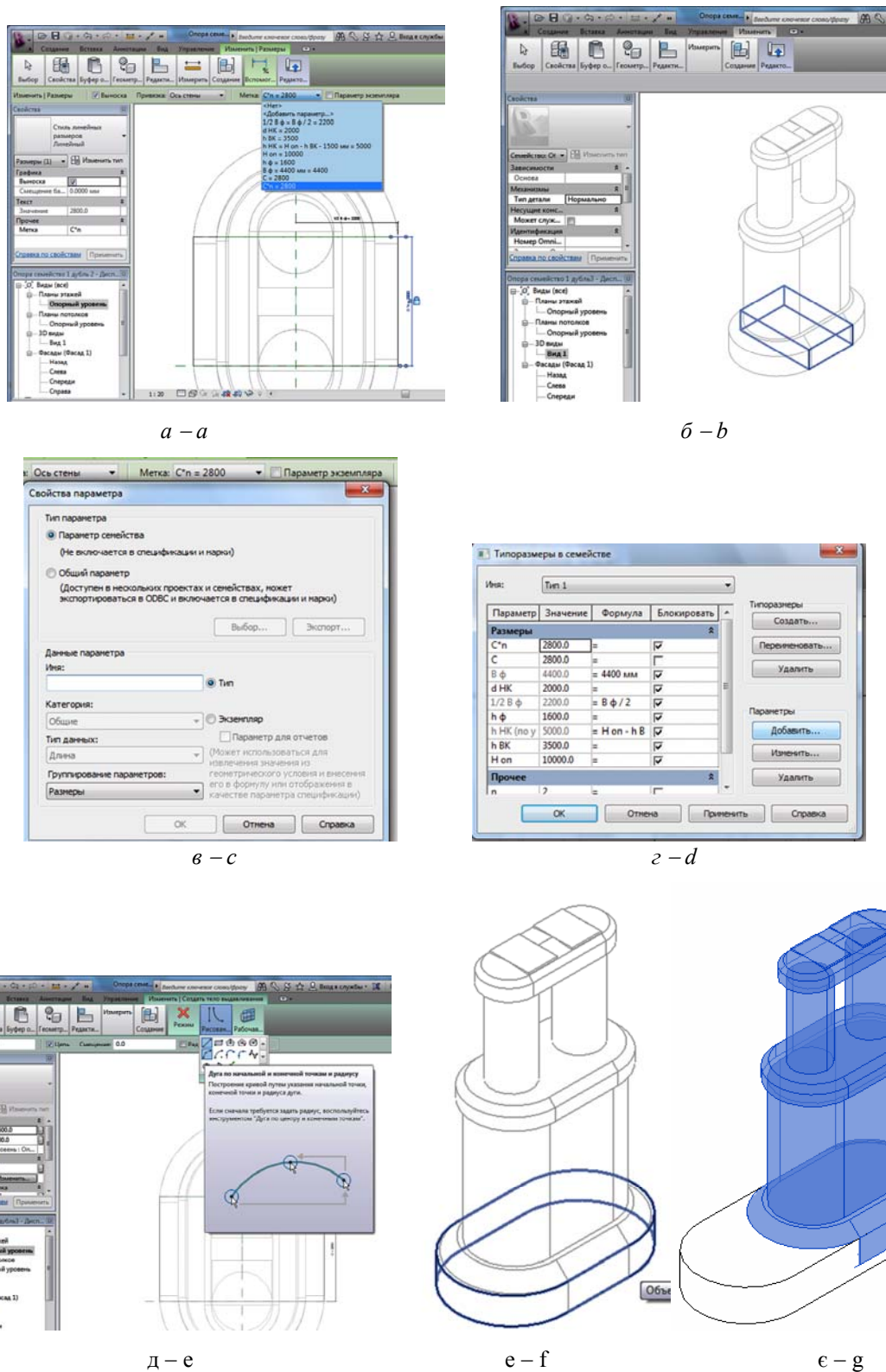


Рис. 5. Створення геометрії фундаменту

Fig. 5. Creation of foundation geometry

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Фаску фундаменту побудуємо за допомогою інструмента «СОЗДАТЬ» – «ПЕРЕХОД» (рис. 6, а). Спочатку слід вказати «робочу площину», вибравши її з раніше створених. Далі будуємо контур нижньої основи тіла переходу, потім контур верхньої основи. Задаємо висоту видавлювання – 500 мм, і підтверджуємо, що побудови закінчено. Усі контури прив'язуємо до відповідних ліній ескизу (імпортованої моде-

лі). Форму переходу поділимо на три умовні частини, як і попередню форму видавлювання. Центральну частину прямокутної форми бачимо на рис. 6, б.

Далі будуємо послідовно дві заокруглені форми переходу (рис. 6, в). Результат бачимо на рис. 6, г.

Перевіримо коректність зміни параметрів (рис. 6, д).

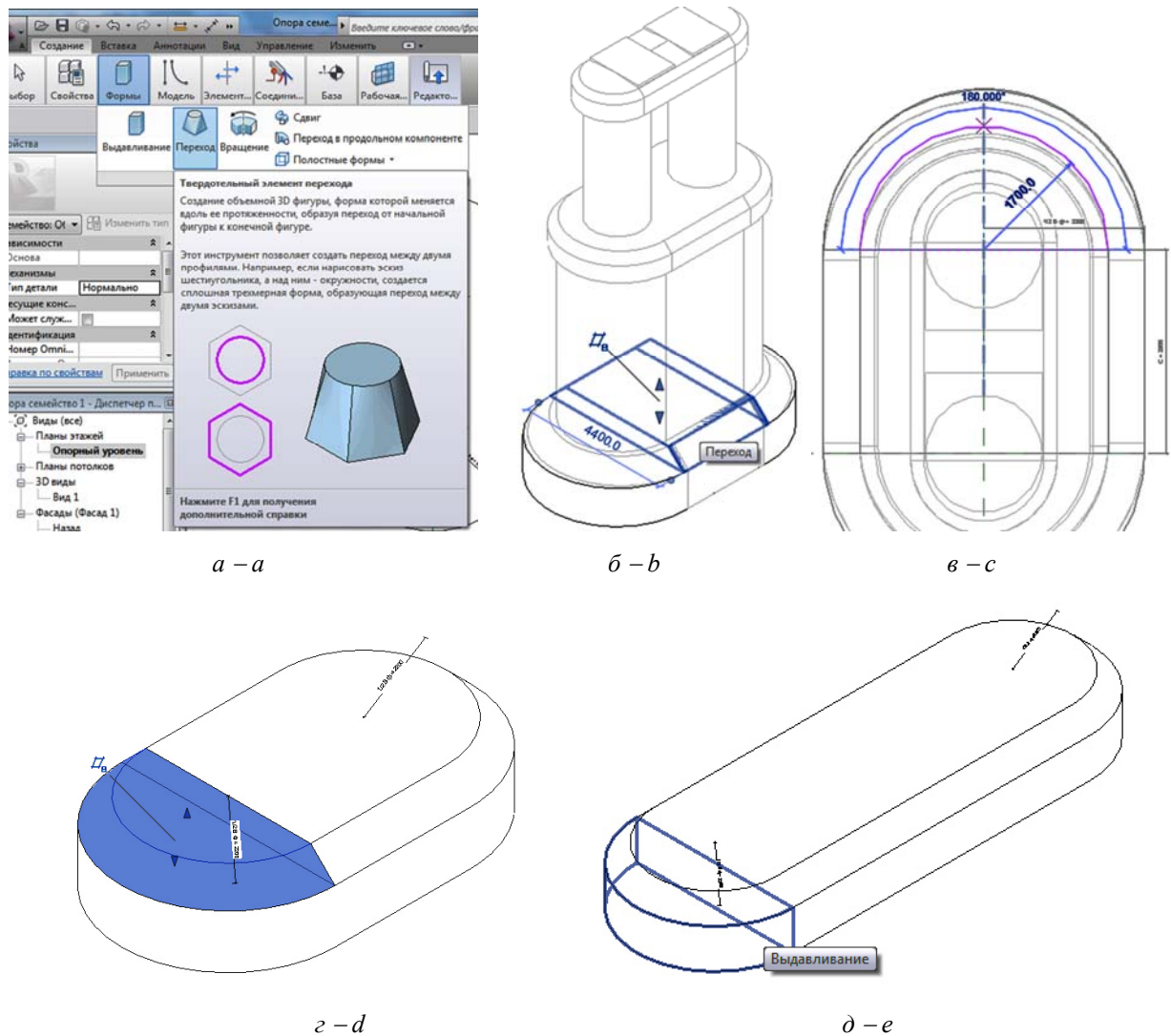


Рис. 6. Побудова фаски

Fig. 6. Building of chamfer

Тіло опори створюємо за аналогією з фундаментом, використовуючи інструмент «ВЫДАВЛИВАНИЕ». Робочу площину вибираємо за зрізом фундаменту зі створених опорних площин [1, 6, 7].

Висоту задаємо як змінний параметр, що залежить від повної висоти опори (рис. 7, а).

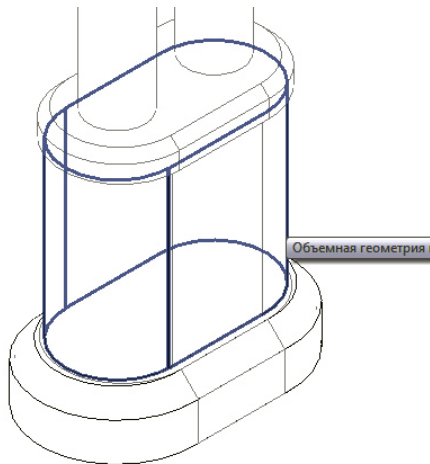
Після побудови необхідно зв'язати створене тіло з опорними площинами.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

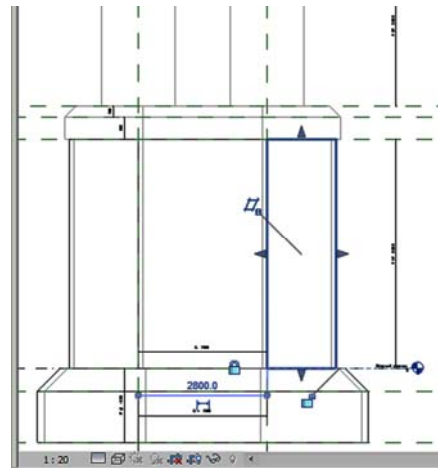
Для виконання цієї операції перейдемо у вікно «ФАСАД» – зліва, та зафіксуємо «замочками» створений об’єкт (рис. 7, б).

Геометрія проміжної плити аналогічна геометрії фундаменту, тож послідовно

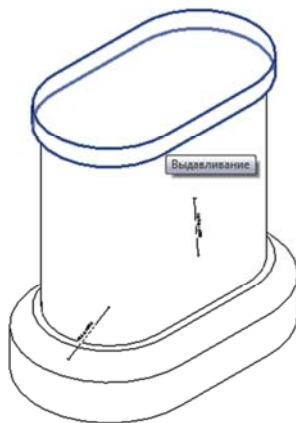
виконаємо операції, аналогічні раніше розглянутим (рис. 7, в, 7, г). Наприкінці побудов зафіксуємо об’єкт, скріплюючи його з опорними площинами.



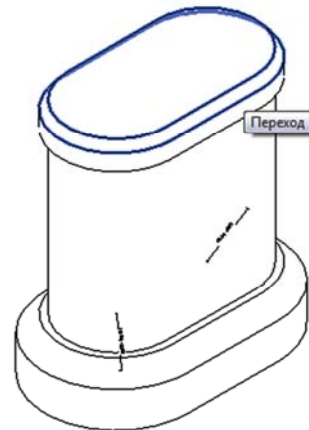
а – а



б – б



в – в



г – г

Рис. 7. Створення геометрії тіла опори

Fig. 7. Creating the geometry of the support body

Перейдемо на рівень зрізу проміжної плити, прив’язуючись до вертикальної опорної площини, створимо тіло видавлювання в основі якого коло діаметром d_{BK} (рис. 8, а). Одразу введемо параметр діаметра колони в таблиці «ТИПОРАЗМЕРЫ В СИМЕЙСТВЕ» та закріпимо колону за вертикальними площинами у вікні «фасад-зліва» (рис. 8, б).

Враховуючи, що планується на базі вибраної опори залізничного моста створити опору для автодорожнього моста, де кількість колон

більша двох, побудуємо другу колону за допомогою команди «МАССИВ». Відстань між елементами масиву дорівнює відстані між осями колон C . Кількість елементів – 2, але додамо змінний параметр n в таблицю «ТИПОРАЗМЕРЫ В СИМЕЙСТВЕ» (рис. 8, в). Якщо змінити кількість елементів n з 2 на 5, побачимо, що опора коректно змінює параметри (рис. 8, г).

Повернемо опорі попередній вигляд, щоб перейти до наступних побудов.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

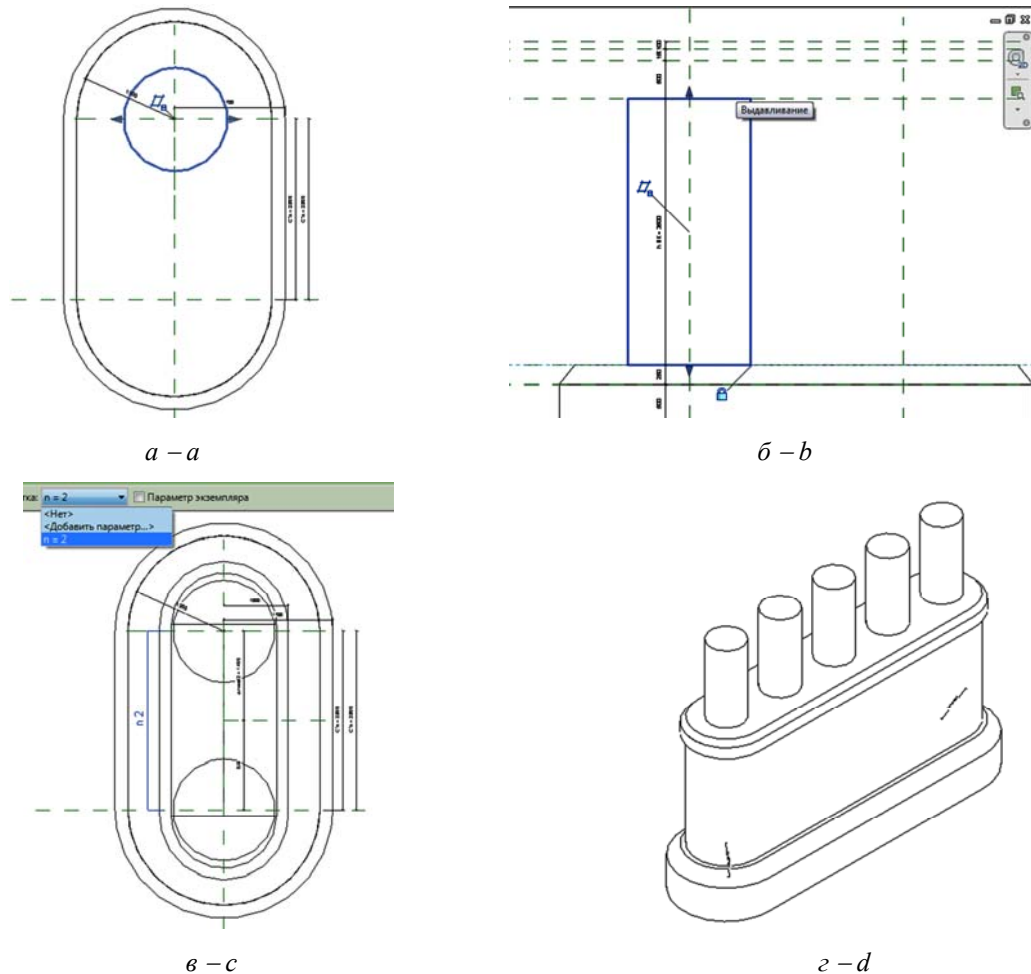


Рис. 8. Побудова колон

Fig. 8. Construction of columns

Підферменна плита будується також аналогічно фундаменту, але тіл переходу буде два – одне створює фаску, друге – злив. Тож виконаємо ці побудови, не забуваючи ввести відповідні параметри та закріпити об'єкти за опорними площинами (рис. 9, а, 9, б, 9, в).

Наприкінці побудов створимо опорні подушки. Розміри їх можна встановити фіксовані або змінні. Відстань між осями опор для залізничного моста відрізняється від величини C , тож треба створити додаткові опорні площини, на відстані C_{om} побудувати один елемент за допомогою команди «МАССИВ» з кількістю елементів $n=2$. Результат можемо бачити на рис. 9, г.

У результаті отримано просторову тривимірну модель опори із певними розмірними залежностями (рис. 10, а), назвемо її «Тип 1». Для перевірки коректності зміни параметрів задаємо інші значення висоти опори, діаметра колон та висоти фундаменту. Результат бачимо на рис. 10, б. Після деяких налаштувань параметрів прив'язки опорних подушок та геометрії підферменної плити змінимо тип опори на автодорожню. Збільшимо кількість колон до 5 та збережемо як сімейство «Тип 2» (рис. 10, в). Далі також змінимо висоту опори, кількість колон, висоту фундаменту. Результат бачимо на рис. 10, г.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

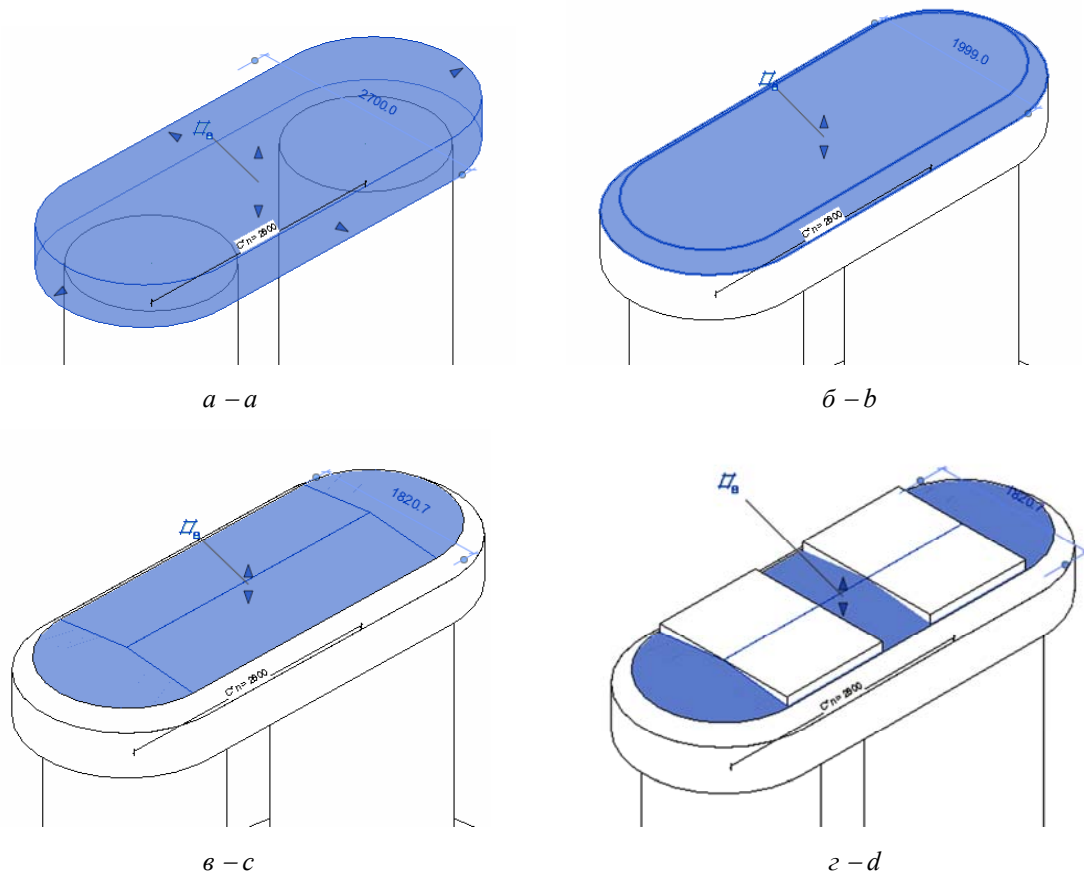


Рис. 9. Побудова геометрії підферменної плити

Fig. 9. Construction of the bridge cap geometry

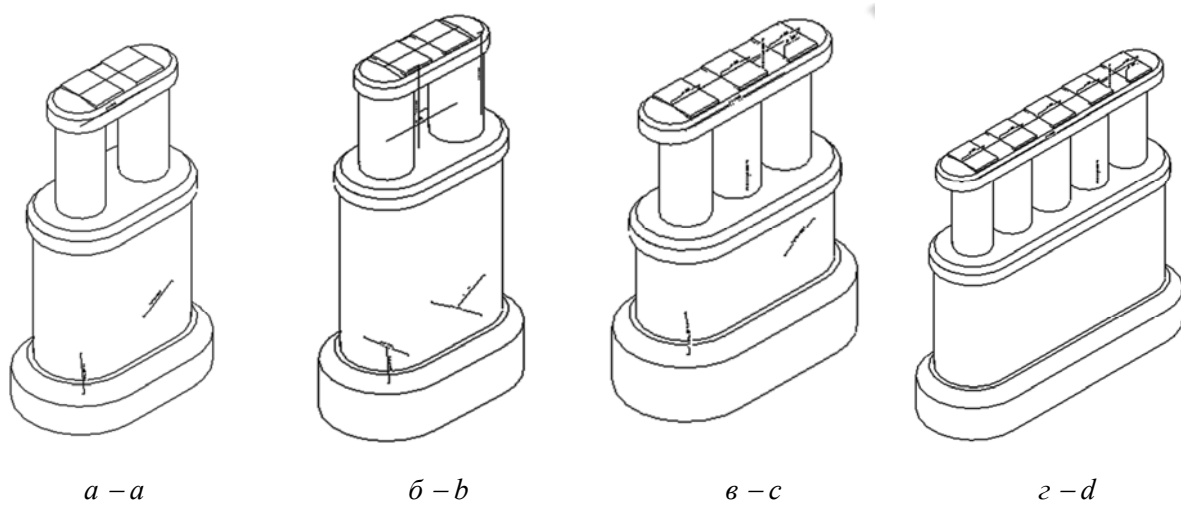


Рис. 10. Просторова тривимірна модель опори

Fig. 10. Spatial three-dimensional support model

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Наукова новизна та практична значимість

На сьогоднішній день актуальним є використання новітніх комп'ютерних технологій при проектуванні будь-яких об'єктів. Створення параметричних інформаційних моделей – один з найпрогресивніших напрямків комп'ютерного проектування, але не достатньо ще вивчений. Як в літературі, так і в інтернет-ресурсах, параметризація розглядається на прикладі примітивних об'єктів [6-13]. Що стосується створення параметричних моделей елементів мостових переходів – у літературі така інформація не зустрічається, отже запропонована вперше.

Побудова параметричних об'єктів в Revit потребує більш детального аналізу моделі та взаємозв'язків геометричних елементів та більшого часу, ніж виконання креслень у плоскому контурі чи побудова просторової моделі в Autocad. Але в результаті ми отримаємо об'єкт, який в подальшому можна налаштовувати, редагувати, використовувати в різних проектах, що значно зекономить час. Наприклад, можна розрахувати об'єм бетону, використати побудовану модель для подальших розрахунків міцності, тощо. Особливо це актуально, враховуючи тенденцію до уніфікації елементів

мостових переходів та використання збірних елементів конструкцій. Можемо відмітити, що зміна параметрів висот, кількості елементів масиву, відстані між елементами відбувається коректно, при вірних вихідних даних та прив'язках окремих елементів до базового рівня. Проектування ж мостів як плоского контуру, порівняно з просторовим моделюванням, довгий та не ефективний процес, до того ж не дає можливості візуалізації проектів.

Висновки

1. Отримано параметричну інформаційну модель опори моста, на прикладі якої розглянуто можливості Autodesk Revit.

2. Параметризація просторових моделей дає можливість значно прискорити і спростити процес проектування, використовуючи типові параметричні моделі в багатьох проектах, адже стандартні елементи для мостових переходів у програмних продуктах поки що не представлені.

3. У цілому можна порекомендувати для вивчення та використання продукт Autodesk Revit, особливо можливості параметризації об'єктів, бо очевидно, що за прогресивними технологіями майбутнє.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вандезанд, Д. Autodesk Revit. Architecture 2013–2014 : офиц. учеб. курс / Д. Вандезанд, Ф. Рид, Э. Кригел. – Москва : ДМК, 2013. – 327 с.
2. Гирич, В. Локалізація архітектурно-будівельного пакету Revit в Україні, створення бібліотек / В. Гирич, О. Терещенко // Proceedings of the National Aviation University. – 2006. – Vol. 29, No. 3. – P. 82–84. doi: 10.18372/2306-1472.29.1361.
3. Голдберг, Э. Для архитекторов: Revit Architecture 2009/2010 : самоучитель по технологии BIM / Э. Голдберг. – Москва : ДМК, 2010. – 471 с.
4. Информационная модель здания. Строительные конструкции. AUTODESK REVIT Structure 2010 [Електронний ресурс]. – Режим доступа: http://www.arcada.com.ua/infot/free/RevitStruct10_Brochure-Detail_A4_RUS.pdf. – Назва з екрана. – Перевірено : 04.04.2017.
5. Михайленко, В. Є. Інженерна та комп'ютерна графіка / В. Є. Михайленко, В. В. Ванін, С. М. Ковальов. – 6-е вид. – Київ : Каравела, 2012. – 368 с.
6. Ожигин, Д. А. Работа с параметрическими компонентами Autodesk Revit [Електронний ресурс] / Д. А. Ожигин // CADmaster. – 2006. – № 4. – С. 86–90. – Режим доступа: http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_34_autodesk_revit.html#hcq=Bhayiyp. – Назва з екрана. – Перевірено : 04.04.2017.
7. Плохой, И. Создание параметризованных семейств [Електронний ресурс] / И. Плохой // Revit MEP. – 2008. – 23 сент. – Режим доступа: http://revit-mep-plohoi.blogspot.com/2008/09/blog-post_23.html. – Назва з екрана. – Перевірено : 04.04.2017.
8. Проектирование и сооружение фундаментов опор мостов и путепроводов / А. А. Шеин, В. А. Швецов, А. А. Пискунов, И. Г. Овчинников. – Казань : КГАСА, 2003. – 289 с.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

9. Создание семейств с использованием общих параметров в Autodesk Revit Architecture 2011 [Електронний ресурс]. – Режим доступа: http://www.cad.ru/ru/software/Revit_Architecture/lessons/creating_a_family.php. – Назва з екрана. – Перевірено : 04.04.2017.
10. Чубрик, Д. Семейства Revit. Параметризация вложенных семейств Revit [Електронний ресурс] / Д. Чубрик // Revit: просто о сложном. – 2016. – 25 мар. – Режим доступа: <http://easy4smart.blogspot.com/2016/03/revit-family-param.html>. – Назва з екрана. – Перевірено : 04.04.2017.
11. Baik, A. Hijazi architectural object library (haol) / A. Baik, J. Boehm // The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2017. – Vol. XLII-2/W3. – P. 55–62. doi:10.5194/isprs-archives-xxii-2-w3-55-2017.
12. Garagnani, S. Il modello parametrico in architettura: la tecnologia B.I.M. di Autodesk Revit / S. Garagnani, S. C. Luciani // Disegnarecon. – 2011. – Vol. 4 (7). – P. 20–29.
13. Yang, X. Parametric modelling of as-built beam framed structure in BIM environment / X. Yang, M. Koehl, P. Grussenmeyer// The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2017. – Vol. XLII-2/W3. – P. 651–657. doi:10.5194/isprs-archives-xxii-2-w3-651-2017.

К. И. ГЛАДКАЯ¹, Н. П. БОЧАРОВА^{2*}

¹Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 697 56 61, эл. почта katiaturavey@gmail.com, ORCID 0000-0003-3587-6101

^{2*}Каф. «Графика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 59, эл. почта bocharovanp@gmail.com, ORCID 0000-0002-6869-8826

ПОСТРОЕНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРЫ МОСТА КАК ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ AUTODESK REVIT

Цель. В научной работе необходимо решить такие задачи: 1) исследовать возможности Autodesk Revit по созданию параметрических объектов; 2) создать информационную модель промежуточной опоры моста с возможностью изменения размеров модели без изменения геометрии объекта; 3) отследить сложность и целесообразность использования параметрических моделей при проектировании элементов мостовых переходов. **Методика.** Исследования проводились с помощью пространственного моделирования в системе Autodesk Revit. Задавались соотношения параметров объекта, взаимосвязи между отдельными геометрическими элементами и проверялось, какие изменения происходят с моделью при изменении заданных параметров. **Результаты.** Создана модель опоры двух типов: для железнодорожных мостов и для автодорожных. Оба типа модели изменяют размеры и количество составляющих элементов в соответствии с введенными параметрами. Проведенная работа подтверждает возможность создания информационных параметрических моделей сложной формы и целесообразность их использования при проектировании мостов и не только. **Научная новизна.** Создание информационных моделей – современная и актуальная тема. Но как в литературе, так и в интернет-ресурсах параметризация рассматривается на примере простых объектов. Модель, предложенная в статье, состоит из нескольких зависимых геометрических тел, следовательно, раскрывает тему параметризации объектов более полно и подробно, по сравнению с существующими источниками. Что касается создания параметрических моделей элементов мостовых переходов – то в литературе такая информация не встречается, то есть, предложена впервые. **Практическая значимость.** Параметризация пространственных моделей позволяет значительно ускорить и упростить процесс проектирования любых объектов за счет использования типовых параметрических моделей во многих проектах. Особенно это касается проектирования мостовых переходов, поскольку стандартные элементы для них, такие как опора или пролетное строение, в программных продуктах пока не представлены. Проектирование мостов, как плоского контура, по сравнению с использованием пространственных информационных моделей, – длительный и неэффективный процесс, к тому же не дающий возможности визуализации, которая является необходимой составляющей любого проекта.

Ключевые слова: пространственное моделирование; параметрические объекты; опоры мостов; Autodesk Revit

K. I. HLADKA¹, N. P. BOCHAROVA^{2*}¹Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (63) 697 56 61, e-mail katiaturavey@gmail.com, ORCID 0000-0003-3587-6101^{2*}Dep. «Graphics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (56) 373 15 59, e-mail bocharovanp@gmail.com, ORCID 0000-0002-6869-8826

CONSTRUCTION THE BRIDGE PIER AS PARAMETRIC OBJECT USING AUTODESK REVIT

Purpose. The work is aimed to solve the following tasks: 1) to investigate the possibilities of Autodesk Revit to create parametric objects; 2) to create an information model of the bridge pier with the possibility of changing the model size without changing geometry of the object; 3) to trace the complexity and feasibility of using parametric models when designing the elements of bridges. **Methodology.** The studies were carried out using spatial modeling in the Autodesk Revit system. The ratio of the parameters of the object was set, the relationship between individual geometric elements was determined and the changes that were made to the model with the change of the specified parameters were checked. **Findings.** Support model of two types has been created: for railway bridges and for road bridges. Both types of models change the dimensions and the number of constituent elements in accordance with the entered parameters. The performed work confirms the possibility of creating information parametric models of complex form and the expediency of using them in the design of bridges and not only. **Originality.** Creation of information models is a modern and relevant topic. But both in the literature and in Internet resources, parametrization is considered on the example of simple objects. The model proposed in the article consists of several dependent geometric bodies; therefore, it opens the topic of objects parameterization more fully and in detail, in comparison with the existing sources. As for the creation of parametric models of the bridge elements - such information is not found in the literature, that is, it is proposed for the first time. **Practical value.** Parametrization of spatial models allows significantly to accelerate and simplify the process of designing any objects due to the use of typical parametric models in many projects. Especially it concerns the design of bridges, since the standard elements for them, such as support or span are not yet presented in software products. Designing the bridges as a flat contour, in comparison with the use of spatial information models, is a long and inefficient process, besides it does not allow visualization, which is a necessary component of any project.

Keywords: spatial modeling; parametric objects; bridge supports; Autodesk Revit

REFERENCES

1. Vandezand, D., Rid, F., & Krigel, E. (2013). *Autodesk Revit. Architecture 2013-2014* (V. Talapov, Trans.). Moscow: DMK.
2. Gyrych, V., & Tereshchenko, O. (2006). Localization of the architectural-building package Revit in Ukraine, creation of libraries. *Proceedings of National Aviation University*, 29 (3), 82-84. doi: 10.18372/2306-1472.29.1361
3. Goldberg, E. (2010). *Dlya arxitektorov: Revit Architecture 2009/2010. Samouchitel po texnologii BIM* (V. Talapov, Trans.). Moscow: DMK.
4. AO Arkada. (n.d.) *Informatsionnaya model zdaniya. Stroitelnyye konstruksii. AUTODESK REVIT Structure 2010*. Retrieved from http://www.arcada.com.ua/infot/free/RevitStruct10_Brochure-Detail_A4_RUS.pdf.
5. Mykhailenko, V. Y., Vanin, V. V., & Kovalov, S. M. (2012). *Inzhenerna ta kompiuterna hrafika*. (6th ed.). Kyiv: Karavela.
6. Ozhigin, D. (2006). Rabota s parametricheskimi komponentami Autodesk Revit. *CADmaster*, 4 (34), 86-90. Retrieved from http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_34_autodesk_revit.html#hcq=Bhayiyp
7. Plokhoy, I. (2008, September 23). *Sozdaniye parametrizirovannykh semeystv*. Retrieved from http://revit-mep-plokhoy.blogspot.com/2008/09/blog-post_23.html
8. Shein, A. A., Shvetsov, V. A., Piskunov, A. A., & Ovchinnikov, I. G. (2003). *Proyektirovaniye i sooruzheniye fundamentov opor mostov i puteprovodov*. Kazan: Kazan State University of Architecture and Engineering.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

9. Russian Industrial Co. (n.d.) *Sozdaniye semeystva s ispolzovaniyem obshchikh parametrov v Autodesk Revit Architecture* 2011. Retrieved from http://www.cad.ru/ru/software/Revit_Architecture/lessons/creating_a_family.php.
10. Chubrik, D. (2016). *Semeystva Revit. Parametrizatsiya vlozhennykh semeystv Revit*. Retrieved from http://www.cad.ru/ru/software/Revit_Architecture/lessons/creating_a_family.php
11. Baik, A., & Boehm, J. (2017). Hijazi architectural object library (HAOL). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W3, 55-62, doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-55-2017
12. Garagnani, S., & Luciani, S. C. (2011). Il modello parametrico in architettura: la tecnologia B.I.M. di Autodesk Revit. *Disegnarecon*, 4 (7), 20-29.
13. Yang, X., Koehl, M., & Grussenmeyer, P. (2017). Parametric modelling of asbuilt beam framed structure in BIM environment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W3, 651-657. doi: 10.5194/isprs-archives-xlii-2-w3-651-2017

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. С. А. Щербаком (Україна);
д.т.н., проф. В. Д. Петренком (Україна)

Надійшла до редколегії: 30.03.2017

Прийнята до друку: 05.07.2017

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

К. І. ЯЩУК

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛІВ
УЗДОВЖ РЕЙОК 7

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Л. В. АМЕЛІНА, М. М. БІЛЯЄВ, П. Б. МАШИХІНА
ЗНИЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ АМІАКУ В АТМОСФЕРІ
ПРИ ЙОГО РАПТОВІЙ ЕМІСІЇ 16

**М. М. БІЛЯЄВ, О. С. СЛАВІНСЬКА,
Р. В. КИРИЧЕНКО**
ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ
ЗАБРУДНЕННЯ НА МІСЬКІЙ ВУЛИЦІ 23

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

М. І. КАПЦА, Д. В. БОБИРЬ, А. Є. ДЕСЯК
ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОЇ ШВИДКОСТІ РУХУ
ПОЇЗДА З ПРИМУСОВИМ НАХИЛОМ КУЗОВА В
КРИВИХ ДІЛЯНКАХ КОЛІЇ 29

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

О. П. ДАЦИШИН, Г. П. МАРЧЕНКО, А. Ю. ГЛАЗОВ
ПРО ПОВЕРХНЕВЕ РУЙНУВАННЯ ГОЛОВОК
ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК 41

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Г. М. КОРОТЕНКО, Л. М. КОРОТЕНКО, А. Т. ХАРЬ
СТВОРЕННЯ ІТ-ОРІЄНТОВАНОГО ОНТОЛОГІЧНОГО
ФРЕЙМВОРКУ ДЛЯ ЦІЛЕЙ ФОРМУВАННЯ ОСВІТНІХ
ПРОГРАМ НА ОСНОВІ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ 50

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

В. В. НЕТРЕБКО, І. П. ВОЛЧОК
ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЧАВУНУ НА
РОЗПОДІЛ СР ПОМІЖ ФАЗАМИ ПІСЛЯ
ВІДПАЛУ ПРИ 690 °С 60

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

**В. М. БОГОМАЗ, Л. М. БОНДАРЕНКО,
М. В. ОЧЕРЕТНЮК, О. О. ТКАЧОВ**
СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ ЖОРСТКІСНИМИ
ВТРАТАМИ ТА ВТРАТАМИ В ПІДШИПНИКАХ
КАНАТНИХ БЛОКІВ 71

Ю. М. КОРОЛЬ, О. Н. КОРНЕЛЮК
ВПЛИВ ЛОПАТЕВИХ ТА ПРОФІЛЬНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК НА ГІДРОДИНАМІЧНУ
ЕФЕКТИВНІСТЬ ГРЕБНИХ ГВИНТІВ 80

**С. В. КРАВЕЦЬ, О. П. ПОСМІТЮХА,
В. М. СУПОНЄВ**
ВИЗНАЧЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНОГО ТА
ОПТИМАЛЬНОГО ДІАМЕТРІВ КОНІЧНО-
ЦИЛІНДРИЧНОГО НАКОНЕЧНИКА
З ВИСТУПАМИ ДЛЯ ПРОКОЛЮВАННЯ ҐРУНТУ 89

Р. П. ПОГРЕБНЯК
ПРУЖНА НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА РУХУ СУПОРТА
КАРУСЕЛЬНОГО ВЕРСТАТА ДЛЯ ОБРОБКИ
СУЦІЛЬНОКАТАНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС 98

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Е. В. БІЛОШИЦЬКИЙ
СПОСОБИ УПРАВЛІННЯ ІНЕРТНІСТЮ
ОПАЛЕННЯ 106

**О. В. ФОМІН, О. М. ГОРОБЧЕНКО,
Н. С. КОЧЕШКОВА, В. В. КОВАЛЕНКО**
ТЕОРЕТИЧНИЙ БАЗИС ПАРАМЕТРИЧНОГО
СИНТЕЗУ НЕСУЧИХ СИСТЕМ ВАГОНІВ 117

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

К. І. ГЛАДКА, Н. П. БОЧАРОВА
ПОБУДОВА ПРОМІЖНОЇ ОПОРИ МОСТА ЯК
ПАРАМЕТРИЧНОГО ОБ'ЄКТА ЗА ДОПОМОГОЮ
AUTODESK REVIT 129

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

Е. И. ЯЩУК

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ПОТЕНЦИАЛОВ ВДОЛЬ РЕЛЬСОВ..... 7

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

Л. В. АМЕЛИНА, Н. Н. БЕЛЯЕВ, П. Б. МАШИХИНА
СНИЖЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ АММИАКА В
АТМОСФЕРЕ ПРИ ЕГО ВНЕЗАПНОЙ ЭМИССИИ..... 16

**Н. Н. БЕЛЯЕВ, О. С. СЛАВИНСКАЯ,
Р. В. КИРИЧЕНКО**
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА
ГОРОДСКОЙ УЛИЦЕ 23

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

М. И. КАПИЦА, Д. В. БОБЫРЬ, А. Е. ДЕСЯК
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ СКОРОСТИ
ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ
НАКЛОНОМ КУЗОВА В КРИВЫХ
УЧАСТКАХ ПУТИ 29

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ

А. П. ДАЦЫШИН, Г. П. МАРЧЕНКО, А. Ю. ГЛАЗОВ
О ПОВЕРХНОСТНОМ РАЗРУШЕНИИ ГОЛОВОК
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ 41

ИНФОРМАЦИОННО- КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Г. М. КОРОТЕНКО, Л. М. КОРОТЕНКО, А. Т. ХАРЬ
СОЗДАНИЕ IT-ОРИЕНТИРОВАННОГО
ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ФРЕЙМВОРКА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ
ФОРМИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ
НА ОСНОВЕ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ 50

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В. В. НЕТРЕБКО, И. П. ВОЛЧОК
ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЧУГУНА
НА МЕЖФАЗНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СР ПОСЛЕ
ОТЖИГА ПРИ 690 °С 60

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА. МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ

**В. Н. БОГОМАЗ, Л. Н. БОНДАРЕНКО,
М. В. ОЧЕРЕТНЮК, А. А. ТКАЧОВ**
СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЖЕСТКОСТНЫМИ
ПОТЕРЯМИ И ПОТЕРЯМИ В ПОДШИПНИКАХ
КАНАТНЫХ БЛОКОВ 71

Ю. М. КОРОЛЬ, О. Н. КОРНЕЛЮК
ВЛИЯНИЕ ЛОПАСТНЫХ И ПРОФИЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ 80

С. В. КРАВЕЦ, А. П. ПОСМИТЮХА, В. Н. СУПОНЕВ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО И
ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРОВ КОНИЧЕСКИ-
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО НАКОНЕЧНИКА С
ВЫСТУПАМИ ДЛЯ ПРОКАЛЫВАНИЯ ПОЧВЫ 89

Р. П. ПОГРЕБНЯК

УПРУГАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ
СУПОРТОВ КАРУСЕЛЬНОГО СТАНКА ДЛЯ
ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС 98

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

Э. В. БЕЛОШИЦКИЙ

СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНЕРТНОСТЬЮ
ОТОПЛЕНИЯ 106

**А. В. ФОМИН, А. Н. ГОРОБЧЕНКО,
Н. С. КОЧЕШКОВА, В. В. КОВАЛЕНКО**
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ БАЗИС ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
СИНТЕЗА НЕСУЩИХ СИСТЕМ ВАГОНОВ 117

ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

К. И. ГЛАДКАЯ, Н. П. БОЧАРОВА
ПОСТРОЕНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРЫ МОСТА
КАК ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ
AUTODESK REVIT 129

CONTENTS

TRANSPORT AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

K. I. YASHCHUK

POTENTIALS RAIL WISE PROPAGATION STUDY 7

TRANSPORT ECOLOGY

L. V. AMELINA, M. M. BILIAIEV, P. B. MASHYKHINA
REDUCING AMMONIA CONCENTRATIONS IN
ATMOSPHERE AFTER ITS UNPLANNED RELEASE 16

**M. M. BILIAIEV, O. S. SLAVINSKA,
R. V. KYRYCHENKO**

NUMERICAL SIMULATION OF POLLUTION
DISPERSION IN URBAN STREET 23

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

M. I. KAPITSA, D. V. BOBYR, A. Y. DESIAK

DETERMINING PERMISSIBLE SPEED OF TILTING
TRAIN IN CURVED TRACK 29

RAILWAY TRACK

**O. P. DATSYSHYN, H. P. MARCHENKO,
A. Y. GLAZOV**

ON SURFACE FRACTURE OF RAIL HEADS 41

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING

G. M. KOROTENKO, L. M. KOROTENKO, A. T. KHAR

CREATION OF IT-ORIENTED ONTOLOGICAL
FRAMEWORK FOR THE PURPOSE OF MAKING
EDUCATIONAL PROGRAMS ON THE BASE OF
COMPETENCIES 50

MATERIAL SCIENCE

V. V. NETREBKO, I. P. VOLCHOK

INFLUENCE OF THE CAST IRON'S CHEMICAL
COMPOSITION ON THE INTERPHASE
DISTRIBUTION OF CR AFTER ANNEALING
AT 690 °C 60

NON-TRADITIONAL TRANSPORT MODES. MACHINES AND MECHANISMS

**V. M. BOHOMAZ, L. M. BONDARENKO,
M. V. OCHERETNIUK, O. O. TKACHOV**

THE RELATIONSHIP BETWEEN STIFFNESS LOSSES
AND LOSSES IN BEARINGS OF ROPE BLOCKS 71

Y. M. KOROL, O. M. KORNELYUK

INFLUENCE OF BLADE AND PROFILE
CHARACTERISTICS ON HYDRODYNAMIC
EFFICIENCY OF MARINE PROPELLERS 80

**S. V. KRAVETS, O. P. POSMITJUKHA,
V. M. SUPONYEV**

DETERMINING OF THE EQUIVALENT AND OPTIMUM
DIAMETERS OF CONE-CYLINDER TIP WITH SOIL
BROACHING SPURS 89

R. P. POGREBANYAK

ELASTIC NONLINEAR DYNAMICS OF MOTION
OF SLIDE OF VERTICAL TURNING MACHINE
FOR WORKING OF SOLID-ROLLED
RAILWAY WHEELS 98

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

E. V. BILOSHYTSKYI

WAYS TO MANAGE HEATING INERTIA 106

O. V. FOMIN, O. M. GOROBCHENKO,

N. S. KOCHESKOVA, V. V. KOVALENKO
THEORETICAL BASIS OF PARAMETRIC SYNTHESIS
FOR CARRYING SYSTEMS OF CARS 117

TRANSPORT CONSTRUCTION

K. I. HLADKA, N. P. BOCHAROVA

CONSTRUCTION THE BRIDGE PIER AS PARAMETRIC
OBJECT USING AUTODESK REVIT 129

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. Для набору формул використовується MathType.

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 A4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

- 1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;
- 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;
- 3) рецензія на статтю з місця роботи авторів;
- 4) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються трьома мовами – українською, російською та англійською;
- 5) Оригінал експертного висновку.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,

49010

e-mail: visnik@diit.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

ОГОЛОШЕННЯ

АСПІРАНТУРА

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна ЗАПРОШУЄ для навчання

на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальностями:

- ❖ 033 Філософія
- ❖ 051 Економіка
- ❖ 073 Менеджмент
- ❖ 101 Екологія
- ❖ 122 Комп'ютерні науки та інформаційні технології
- ❖ 144 Теплоенергетика
- ❖ 192 Будівництво та цивільна інженерія
- ❖ 273 Залізничний транспорт
- ❖ 275 Транспортні технології (за видами)

Підготовка аспірантів здійснюється за денною та заочною формою навчання за рахунок Держбюджету України та коштів фізичних, юридичних осіб. Термін навчання 4 роки.

Етапи вступної кампанії у 2017 році:

- прийом заяв та документів – з **21 серпня по 03 вересня 2017 року;**
- терміни проведення вступних іспитів – з **04 вересня по 10 вересня 2017 року;**
- початок навчання в аспірантурі – **2 жовтня 2017 року.**

Звертатися за адресою: 49010, Україна, м. Дніпро, вул. В. Лазаряна, 2,
☎ +38(056) 373-15-63, e-mail: aspirantura_diit@ndch.diit.edu.ua



Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician
V. Lazaryan invites for postgraduate studies in the field of:

- ❖ 033 Philosophy
- ❖ 051 Economy
- ❖ 073 Management
- ❖ 101 Ecology
- ❖ 122 Computer Science and Information Technology
- ❖ 144 Power System
- ❖ 192 Construction and Civil Engineering
- ❖ 273 Railway Transport
- ❖ 275 Transport Technologies (by types)

Training of postgraduate students in the University is carried out in full-time and correspondence forms. The standard period of study is 4 years.

Stages of admission to postgraduate school in 2017:

- acceptance of applications and documents – **from 21/08/2017 to 03/09/2017;**
- timing of entry exams – **from 04/09/2017 to 10/09/2017;**
- beginning of postgraduate studies – **2/10/2017**

49010, Ukraine, Dnipro, V. Lazaryana St., 2, tel.: +38 (056) 373 15 63,
e-mail: aspirantura_diit@ndch.diit.edu.ua

Наукове видання

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

№ 4 (70) 2017

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – А. І. Миргородська
Комп'ютерне верстання – А. О. Каїра, О. В. Помінова
Літературна обробка – Ю. Г. Дішкант

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 16,97. Тираж 300 пр.

**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

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60
Свідцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



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)**

№ 4 (70) 2017

(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – А. И. Миргородская
Компьютерная верстка – А. О. Каира, О. В. Поминова
Литературная обработка – Ю. Г. Дишкант

Формат 60×84¹/₈. Ус. печат. лист. 16,97. Тираж 300 экз.

**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

Печать:

Издательство «Герда», 49000, г. Днепр, пр. Д. Яворницкого, 60
Свидетельство субъекта издательского дела серия ДК № 397 от 03.04.2001 г.



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. 4 (70) 2017

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – А. І. Myrhorodska
Desktop publishing – А. О. Kaira, О. V. Pominova
Redaction – Yu.H. Dishkant

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 16,97. Circulation 300.

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

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

