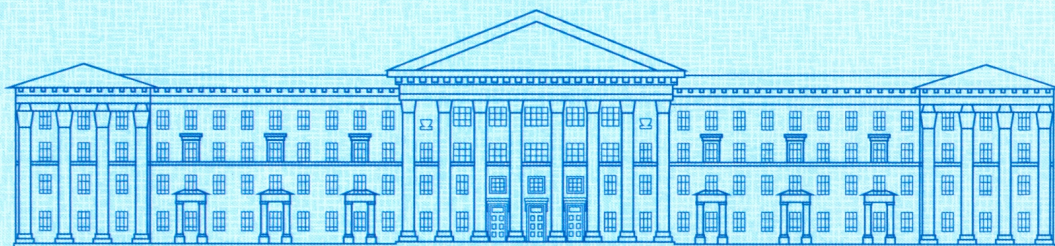




ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 5(71)

.. 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

№ 5 (71) 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

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (УКРАЇНА):

Афанасов А. М., Банніков Д. О., Бараш Ю. С., Біляєв М. М., Бобирь Д. В., Бобровський В. І., Боднар Б. Є., Босов А. А., Вакуленко І. О., Власова Т. І., Волкова В. Є., Габринєць В. О., Гаврилюк В. І., Гетьман Г. К., Главацький К. Ц., Гненний О. М., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобець В. Л., Доценко О. М., Дудкіна В. В., Ейтутіс Г. Д., Жуковицький І. В., Заблудовський В. О., Казакевич М. І., Капіца М. І., Копитко В. І., Костін М. О., Кравець В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган М. Б., Муха А. М., Настечик М. П., Нетеса М. І., Оковитий С. І., Очкасов О. Б., Петренко В. Д., Пічугов С. О., Пічурін В. В., Полішко Т. В., Радкевич А. В., Радченко М. О., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Сніжко Л. О., Урсуляк Л. В., 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, Республіка Польща); Вайчунас Г. (Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва); Васяк І. (Інститут електроенергетики Лодзинської політехніки, Республіка Польща); Гусєв Б. В. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Долежел І. (Університет Західної Богемії, Чеська Республіка); Зіммер К. (Інститут Електротехніки Варшавської політехніки, Республіка Польща); Куанишев Б. М. (Казахська академія транспорту і комунікацій, Республіка Казахстан); Лінгайтис В. Л. (Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва); Манашкін Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковські А. (Сілезька політехніка, Республіка Польща); Стржеleckькі Р. (Гданська морська академія, Республіка Польща); Тітова Т. С. (Петербурзький державний університет шляхів сполучення Імператора Олександра І, Російська Федерація); Худзікевич А. (Варшавський політехнічний університет, Республіка Польща); Шепонг Адам (Варшавський політехнічний університет, Республіка Польща).

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.
Видання внесено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки).
Журнал зареєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 30.10.2017 р., протокол № 3

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

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

Видання публікується з 1936 р.:

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

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Научный журнал

№ 5 (71) 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., Габринiec В. А., Гаврилюк В. И., Гетьман Г. К., Главацкий К. Ц., Гненний 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 30.10.2017 г., протокол № 3

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 NACIONAL'NOGO UNÌVERSITETU
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU
=
SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 5 (71) 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., Zhukovytsky I. V.

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Anisimov P. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Bialon A. (Railway Institute, Warszawa, Republic of Poland); Chudzikiewicz A. (Transport Warsaw University of Technology, Republic of Poland); Dolezel I. (The University of West Bohemia, Czech Republic); Gusev B. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Kuanyshv B. M. (Kazakh Academy of Transport and Communications, Republic of Kazakhstan); Lingaitis V. L. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Manashkin L. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», USA); Sladkowski A. (Silesian University of Technology, Republic of Poland); Strzelecki R. (Gdynia Maritime academy, Republic of Poland); 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 30.10.2017, Protocol no. 3
Publisher	Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro) Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003
Address of Founder	St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: http://stp.diit.edu.ua/

Edition is being published since 1936:

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

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

UDC 628.1

L. F. DOLINA^{1*}, P. B. MASHYKHINA^{2*}, A. A. KARPO^{3*}, A. A. MISHCHENKO^{4*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-6082-7091

^{2*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

^{3*}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 alichka-88.karpo@yandex.ru, ORCID 0000-0003-3201-8435

^{4*}Industry Research Laboratory «Cars», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 19, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-5543-8435

WATER REALITY IN UKRAINE AND WORLDWIDE

Purpose. The paper analyzes the state of water management in Ukraine and worldwide, as well as the best practices in this area. **Methodology.** The study was carried out based on the analysis of literature sources and reporting data on the state of water management in Ukraine, European countries, the USA (2010-2016). **Findings.** The water state analysis in the regions of Ukraine showed that the quality in most cases is close to or meets the requirements for drinking water. Drinking tap water requires post-treatment in all regions of the country. The main issue for today is the production of the necessary equipment for treatment plants. Unfortunately, not all equipment is produced in Ukraine. The condition of rural water pipelines is of particular concern. Among the tested pipelines 7.3% do not comply with the rules and regulations. At the same time, only 25% of villages in Ukraine are provided with centralized water supply. **Originality.** The authors presented the results of a comprehensive review of the world's issues on disinfection of drinking and waste water, where various methods are used, partly in combination with each other in Ukraine and the worldwide. The main unresolved issue today is the issue of the residual quantity of drugs in the drinking water. The main environmental threat of the world scale is the presence of medicines in drinking water. The treatment facilities are not suitable for the decomposition or trapping of medicinal products. Nowhere in the world there is protection from these substances. One of the key issues in the solution of drinking water production is seawater desalination. To reduce the cost of desalination of sea water the SWRO-membrane technology is used. **Practical value.** Water problems are number one problems all over the world and in Ukraine as well. It is necessary to provide for additional financing to solve problems in the preparation and purification of waters, not with whatever funds remain, taking into account the fact that water is the basis of life on earth as a whole, the health and life of the nation depends on the quality of the water supply source.

Key words: waste and drinking water treatment; medicines in wastewater; new sources of drinking water; disinfection of waste and drinking water; desalination plants; fresh water production from seas

Introduction

Let's try to look into the future and believe in the reality created on the screen. The films of 2008 «James Bond. Agent 007: Quantum of Solace» and 2015 «Mad Max: Fury Road» have one common global storyline, where the main roles are played

by water resources [1]. They do not just convince us of this, but rather state that water is becoming a means by which the world's main problems can be solved in aggregate: food, energy, economic, health and climate change.

According to UNESCO's predictions, in 2020, lack of water will be one of the main world prob-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

lems and possibly cause of wars in the region of China, India, Pakistan, where the largest number of people live and there is a great lack of water. This is predicted by the Norwegian scientist Terje Tvedt in his book «A Journey in the Future of Water» [12]. The author warns us that the most terrible wars of humanity are yet to come, and these will be wars for the right to have water. Today all over the world the agenda has the questions of the future existence of mankind, which, not for the first time in history, is directly associated with water resources and our capabilities to manage them.

Another environmental specialist L. Ron Hubbard said: «Humanity has reached such a level of development that it can destroy the planet. Now we need to raise it to a level where it would be able to save it and begin to act in this direction». [14].

Top 5 global risks for the next 10 years (≈ 2026): 39.8% – water crisis; 36.7% – insufficient measures to mitigate the climate change effects and adapt to them; 26.5% – extreme weather events; 25.2% – food crisis; 23.3% – deep social instability [1–20].

Purpose

Problems related to the quality of drinking water are of concern to millions of people in Ukraine, regardless of the regions in which they live. Most of the country's population uses tap water in everyday life. In this regard, from year to year for any resident there is a relevant question: is this water suitable for drinking? Do we need to clean it up with filters? Is it possible to get high quality water in the given conditions from tap water, the quality and taste of which often leaves much to be desired?

Methodology

The information search conducted by us showed that most often the water service company is one of the oldest municipal buildings in the city, which is not surprising, since the centralized water supply system began to be laid in the late XIX – early XX centuries (Table 1) [7]. The length of the water supply network is both an advantage and a disadvantage.

The advantage is: the longer the water supply network, the more houses and enterprises can receive purified water; the disadvantage is that it is

more difficult to ensure water bacteriological safety.

Table 1

General information about water service companies of Ukraine (according to the official websites of water service companies)

Public utility company	Established, year	Length of water supply network, km
PJSC AK Kievvodokanal	1874	4000
KP Donetsk gorkvodokanal	1932	3500
KP Dniprovodokanal	1869	2002
KP Kharkivvodokanal	1881	2570
Infosvodokanal (Odesa)	1873	1400
KP Mykolaivvodokanal	1906	1200
KP Lvivvodokanal	1901	1100
KP PRC Poltavavodokanal	1900	817
KP Cherkasyvodokanal	1914	460

The scheme of water treatment used in Ukrainian utility companies is traditional and consists of the following stages: dosing of reagents (coagulant, flocculant, oxidizer), mixing and settling, filtering, decontamination, supply to the consumer. All enterprises for water disinfection use chlorination, the exception is the Dnipro station where ozonization is used (Kiev). It should be noted that the equipment used for water disinfection in most cases is extremely deteriorated and requires immediate reconstruction.

Requirements to water quality according to the main indicators by DerzhSanPin 2.2.4.–171–10 «Hygienic requirements for drinking water, intended for human consumption»:

Dry residue, mg/l ≤ 1000
 Permanganate oxidability, mgO₂/l ≤ 5
 Color, degrees ≤ 20
 Hardness, mg-eq/l ≤ 7
 Aluminum, mg/l ≤ 0.2
 Manganese, mg/l ≤ 0.05

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Sulphates, $\text{mg/l} \leq 250$

Chlorides, $\text{mg/l} \leq 250$

Nitrates, $\text{mg/l} \leq 50$

Fluorides, $\text{mg/l} \leq 1.5$

As shown by the research data, the following above-limit values were noted according to the requirements of DerzhanSanPin 2.2.4.-171-10 [5]:

- oxidation (from 4.4 to 8.8 mgO_2/l) and colour (from 21 to 38 degrees) – in samples of tap water in the cities of Dnipro, Kiev, Cherkassy, Donetsk, Nikolaev, this is due to a significant content of natural organic (humic) compounds in surface water – sources of water supply;

- hardness (from 7 to 8.5 mg-eq/l) – in the samples of the cities of Donetsk, Kharkiv, Lviv, which is conditioned by groundwater (or make up of groundwater) in water supply sources;

- iron – in water samples of the city of Lviv (0.38 mg/l);

- aluminum – in the water of Donetsk and Kiev, which is associated with the use of the corresponding coagulants in the cleaning technology.

Findings

The obtained water quality monitoring data in the regions of Ukraine during the flood period showed that not everything is as bad as one could imagine, and despite the scandalous Internet messaging, the quality of tap water in various cities of Ukraine is in most cases close or meets the requirements for drinking water. However, it is also obvious that tap water in all regions should be additionally purified.

Provision of Ukraine with water resources, despite the abundance of various small and large reservoirs. Ukraine is one of the least well-water-resourced countries in Europe [10].

Provision of European countries with water resources (thousand m^3 per year per inhabitant): Ukraine – 1.2; Sweden – 24.0; Europe – 8.6; Austria – 7.7; Switzerland – 7.3; France – 4.6.

Regions of the country are provided with water in different ways. So, in Uzhhorod we reach the level of 6.27 ths. m^3 per year per inhabitant of the prosperous Switzerland, and in the Odessa region (0.14 ths. m^3 per year per inhabitant) we go down to the level of arid Algeria.

In general, for more than half of the country's territory, the level of water supply corresponds to the gradation «catastrophically low».

Imbalance, the difference between the required amount of water and available, exceeds the value of 10 ths. m^3 per year per person («catastrophic») and is observed in 5 southeastern regions of Ukraine. Also five regions can be considered the «balanced» (less than 1 ths. m^3 per year per person) – four western and one northern region. On the average, Ukraine is in the zone between «permissible» (from 0.1 to 0.3) and «extraordinary» (1.0 to 2.0) unbalance. In this case, it is necessary to think about alternative sources of water supply (for example, reuse of wastewater, seawater desalination, etc.)

Ukraine consumes 15 km^3 of water a year. Basically, water comes from surface freshwater sources of 12.15 km^3 per year or 81%, mainly from the Dnieper River – 9.3 km^3 of water per year or 77%. This amounts to approximately 26% of the total water in the Dnieper. Underground water makes up 13%, and seawater – 6%.

Water, taken from underground sources, does not reach the consumer due to the high content of salts and the profitability of its preparation. This applies to mine waters, the content of which in the total volume of groundwater withdrawn is 60 – 70%. Obviously, the organization of purification of mine waters to the level of the requirements if not for drinking water, at least for technical water and increasing the share of sea water can serve to stabilize the situation with water.

The distribution of water between the main consumers is constantly changing. Thus, in the period from 2006 to 2012, the share of water used in agriculture increased from 19 to 40% (from 2.6 to 5.7 km^3 per year), and in industry it decreased from 60% to 42% (from 8.6 to 5.9 km^3). The consumption of water in the housing and communal services (HCS) has decreased from 4.1 to 3.1 km^3 . This is due both to decreased population (from 46929 thousand in 2006 to 45633 thousand in 2012), and with consumers' attempts to save water.

Distribution of water between the main industries: 66% – electricity; 27% – metallurgy; 2% – chemical industry; 2% – food industry; 3% – others. Total use is 5.9 km^3 per year.

Distribution of desalted water among the main industries: 31% – electric power industry; 31% – metallurgy; 26% – chemical industry; 12% – production of beverages.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

The agriculture uses 5.7 km³ of water per year, of which 92% are used for irrigation (melioration and gardening) and 8% for agricultural water supply.

Unfortunately, not all the collected water reaches the consumer. On average, up to 20% of water falls to transport losses.

Water losses are 2.3 km³ per year, whereof: in housing and communal services – 50%; in industry – 25%; in agriculture – 25%.

Water consumption in housing and communal services (km³ per year): taken – 3.3; supplied to the network – 2.9; implemented – 1.9; losses and expenses – 1.4.

The main water losses in the housing and communal services are due to the unsatisfactory condition of the water supply network; the total length of pipelines is 135,958 km, of which 51,855 km (or 38%) requires urgent replacement. The annual replacement of pipes is carried out in the volume of 1 – 2% of the required one.

The main «producers» of wastewater: agriculture – 12% (0.95 km³); housing and communal services (HCS) – 27% (2.1 km³); industry – 61% (4.75 km³).

Condition of wastewater generated: contaminated – 19% (1.5 km³); normatively purified – 23% (1.8 km³); normally clean without treatment – 58% (4.5 km³).

The main amount of pollution comes from industrial wastewater (61%), only 9% of which is reused. One third of the volume of communal wastewater is discharged untreated.

Water quality. About 15% of the samples examined did not meet the standards for sanitary and chemical parameters, and about 4% - for sanitary and bacteriological indicators.

Of great concern is the condition of rural water pipelines; among tested rural water pipelines – 7.3% do not comply with the rules and regulations. At the same time, only 25% of villages in Ukraine are provided with centralized water supply.

According to experts, the payback period of investments in the city's HCS infrastructure is about 10 years, which means that utility companies need long-term and inexpensive credit resources, at least for the same period.

Not all the necessary equipment is produced in Ukraine, but even in cases when there are competitive domestic analogues or companies that can per-

form works well and qualitatively, foreign companies are preferred. The same applies to the terms of tenders for project implementation.

The package of documents for receiving HCS financing should be prepared with the involvement of qualified specialists at all levels from the Ministry and local authorities to specialist practitioners of manufacturing enterprises, economists, designers, installers, and others.

The activation of Ukraine's participation in attracting loans from international financial organizations for the reconstruction of HCS utilities is a strategically necessary and objectively important step, but it must be appropriately calculated and prepared.

For cold water in Germany they pay in average 2 €/m³, in Lithuania – 1.3 €/m³, in Poland – 1 €/m³, in Ukraine – 0.4 €/m³.

Summarizing conclusions on the water economy of Ukraine: water saving; local treatment of wastewater and its maximum re-use; increase in the volume of water used from alternative sources – seas, mines, etc.; use of local systems wherever possible – both for water preparation and post-treatment.

We consciously do not mention the two most radical and correct, but at the same time utopian ways – improvement of the technology of centralized water treatment and rehabilitation of water supply networks. The expensiveness of these solutions and the financial condition of Ukraine in the foreseeable future are unlikely to be compatible. And the remote future is still far distant.

Originality and practical value

«*Presence of drugs in drinking water* is a terrible environmental threat on a global scale. Pharmaceutical firms do not want even to hear about this problem – they do not want to spend huge money on the development and introduction of drugs that are fully absorbed by the body. But in the next two to three years they will have to listen to the opinion of ecologists and radically change the strategy of production of medicines», the modern ecologist Thomas Turne said (2016) [2].

Thousands of pharmaceutical factories annually launch tens of millions of tons of medicines on the world market. The volume of medicines sales in the world exceeds the volume of oil sales. Until recently, no one thought about their final fate. The

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

scientists found that more than half of the medicinal preparations are excreted from the human body in biologically active form and practically do not lose their properties. They come in colossal quantities into sewage and from there to drinking water sources [2].

The international database of chemicals includes 56 million items. Maximum permissible concentrations (MPCs) are defined for only 1% of *potential water pollutants*. While the laboratories that lead control may register even less amounts.

In 2007, German chemists Thomas Heberer and Hans-Jurgen Stan discovered in the groundwaters of Germany and Switzerland significant quantities of a popular in Europe drug for reduction in blood cholesterol. Soon the scientists also found other medicines in rivers, lakes and deep aquifers.

Consequently, each of us uses a medicine box full of high-potent pharmaceutical drugs from the tap every day.

Wastewater treatment plants, as a rule, are not adapted for decomposition or trapping of medicinal products. An effective method for wastewater treatment can be physical and physicochemical methods of purification (ozonation, membrane filtration, reverse osmosis, sorption, etc.). They even offer to create special toilets for cleaning and processing urine in hospitals, outpatient clinics, etc.

Waste medicines and pharmaceuticals are called organic micropollutants (OMP). This group includes pharmaceuticals, personal care products and pesticides, which are in the list of priority pollutants of the US Environmental Protection Agency, and are also of priority for the European Environment Agency.

In 2015, the European Commission developed a control list of substances to be monitored on a European Union scale – EU Directive 2015 (495) of 20 March 2015. The following substances were included in the control list: diclofenac, synthetic (EE2) and natural (E2), hormones (E1), three antibiotics (including erythromycin), a number of pesticides (methiocarb, etc.); antioxidant, which is used as a food additive.

OMP sources are: 1 – industrial wastewater; 2 – agricultural wastewater; 3 – landfills of household waste; 4 – household and hospital wastewater.

The existing wastewater treatment technologies are not designed to remove OMP. Both by physical

and chemical characteristics and because of their low content in the treated water.

For example, one of the OMP components is diclofenac, an anti-inflammatory drug that is widely used in surgery, traumatology, sports medicine, neurology, gynecology, urology, oncology and ophthalmology. Experts propose to completely ban it due to an increase (approximately by 40%) of the risk of heart attacks and other cardiovascular diseases in case of long-term ingestion. To purify waters from diclofenac, it is recommended to use a combined method – microfiltration and reverse osmosis.

In conclusion, I would like to note the following: until now in Ukraine the problem of natural waters pollution with OMP has not been considered either at the official or academic levels. In our country there are no normative legal documents that regulate the discharge of these substances into water bodies. According to the Proposal to the Basic Plan for Adaptation of National Environmental Legislation to the Legislation of the European Union, an immediate solution is required to develop and implement scientifically sound standards for the maximum permissible discharge of OMP into surface waters and strict control over their observance.

Foreign water news.

Europe's water economy is estimated according to The Richest, which makes the ratings of the top-10 by a variety of indicators.

Norway occupies the second place in the quality of tap water, second only to Switzerland [8]. The secret lies in the systemic approach to water management – from water intake to wastewater discharge after treatment, which in general is not a secret, but the prescribed truth of the water management textbooks. The recipe for translating theoretical principles into practice begins with the obligatory study of water management by students of engineering specialties who come to water treatment plants, industrial enterprises and local authorities, think not only about how to prepare water to the level of industry standards, but also about how to protect the water environment, reduce the consumption of reagents and electricity, thereby reducing the negative impact on the environment [3, 4].

The officially proclaimed mission of the Norwegian water sector is caring for health and envi-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ronment. Annually, water treatment plants purify 700 million m³ of drinking water and the same volume is discharged after treatment. An interesting fact is that there are more sewage treatment plants in the country than water treatment plants. 2,700 stations are in communal ownership and they cover 84% of the population, the remaining 16% use small local wastewater treatment systems, which amount to 330 000. The average water consumption in Norway is 200 liters per day per person. In total, 1,600 water treatment plants operate in the country, providing 90% of the population with water, while the remaining 10% use private wells.

One of the fundamental principles of water management is the exclusion or minimization of waste. So in Norway, all sludge from wastewater treatment plants is used as a safe and effective fertilizer in agriculture and gardening.

Money for the development of water infrastructure comes not from the sale of oil, as some think, but from the municipal budget, which is filled with payments for water supply and sanitation. So, on average, each household pays for water supply and sanitation about 850 euros per year. However, many municipalities already today point out the need to raise water fees, so that future generations would not have to pay tens of times more for water because of the urgent need for capital repairs.

Water management in Norway is a good example of following the methods of water management; the art, which is easy to learn and is a good example of developed countries.

In a small area of Switzerland, there is 6% of freshwater resources in Europe [11]. The average water consumption in Switzerland is 162 l/day per person. The sources of drinking water supply in Switzerland are spring waters – 40%, groundwater – 40%, water of rivers and lakes – 20%.

95% of Swiss citizens drink tap water. The quality and quantity of Switzerland's water resources can only be envied. Therefore, the source of drinking water supply in each case is chosen very carefully. It is interesting that the methods of drinking water disinfection are different in different cities. So, in the cities of Olten and Trimbach, which use only underground water, the latter is decontaminated only with chlorine dioxide. In the nearby village of Dulliken (underground

water), ozone is used for disinfection. The city of Oftringen, which uses underground and spring water in the ratio of 90% and 10% respectively, applies ultraviolet.

It is also curious that the amount of water in Switzerland is regulated by the law on food products. This imposes even more stringent requirements and restrictions to be met by the tap water quality. Tap water in Switzerland is equal or even superior in quality of bottled mineral water. In addition, tap water is cheaper. Thus, the average price of tap water is 0.0018 CHF/l, while that of the bottled water is 0.8 CHF/l.

The cost of tap water in different cities of Switzerland varies significantly. The highest tariff is in St. Gallen, about 3 CHF/m³, and the lowest one in Stans – only 0.5 CHF/m³.

Water hardness scale in Switzerland:
0 – 0.7 mmol/dm³ – very soft water;
0.7 – 1.5 mmol/dm³ – soft water;
1.5 – 2.5 mmol/dm³ – water of medium hardness;
2.5 – 3.2 mmol/dm³ – moderately hard water; 3.2 – 4.2 mmol/dm³ – hard water; More than 4.2 mmol/dm³ – very hard water.

The Swiss are not only proud of their water quality, but also cherish the water treasure that they inherited. It would be desirable for the people of Ukraine to know about this and follow everything like the Swiss.

Switzerland re-processes almost 100% of the waste. The garbage sorting system here is brought to the absolute and even to the point of absurdity as it may seem to someone. Herewith, the system does not know exceptions – everyone has to throw garbage in different containers. Those who do not agree pay a fine. In Switzerland, [6] there is a so-called environmental police, which, using modern technology, analyzes the garbage left in the wrong place or without paying tax, finds and penalizes an offender. More than 90% of the glass containers are returned to factories for glass recycling. At the same time, only when you return some types of beer bottles to the store you can get a certain reward. In other cases, those who hand over bottles do not receive anything for this. The paper is processed separately from the cardboard. 60% of all batteries sold in Switzerland are recycled and not thrown in the garbage. Separately handed over items are: daylight lamps, cans, PET bottles, household appliances. It is strictly forbidden to

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

change the oil in your own car – this should be done at technical stations.

If you want, you can certainly not sort the garbage. In this case, you have to pay the tax, which is collected from each kilogram of waste. For 5 kg of garbage you will have to pay about 2 – 3 francs, but to hand over waste to special points of reception costs nothing. It is worth noting that this was not always the case. In 80-ies of the twentieth century, the environmental situation in Switzerland was disastrous, only to Zurich more than 3,000 tons of waste was brought per day. The first step in solving this environmental puzzle was the introduction of a garbage duty.

As a result, Switzerland is now one of the most environmentally friendly countries in the world, with developed public transport and clean mountain air. One can safely drink water from any lake or tap.

Singapore today is the only country in the world that does not discharge a single liter of sewage [12]. That is, the sewage produced by the city-state is collected, purified and re-used. For example, wastewater purified for drinking purposes and bottled is called «New Water».

In the state of California (USA) for more than 30 years, the joint utility company (Orange County Water District and Orange County Sanitation District) has been operating to produce clean drinking water from urban sewage [18]. The purification system contains three main stages: microfiltration, reverse osmosis, post-treatment by ultraviolet.

The enterprise capacity is 32 thousand m³/day.

The city of Fukuoka (Japan) was the first to get hydrogen from sewage and use it as a fuel for cars [19]. The station works only 12 hours a day, and the gas produced there is enough to fill 65 cars. At the same time, working at full capacity, the station can provide hydrogen for up to 600 cars per day.

Scientists from the Netherlands proposed the technology of obtaining one of the main components of bioplastics, namely polyhydroxyalkanoate, from wastewater components and spent activated sludge [17].

In Poland, private companies use mussels for drinking water quality monitoring. This is due to the fact that the mussels respond instantly to changes in water quality and are closed, in case it is deteriorated, protecting themselves from the harmful effects of the environment [19]. The sys-

tem works online and gives the opportunity to respond to emerging water quality problems.

Water and human body. Since school, we have learned the truth that a human is 80% water. However, this value is averaged. For example, in a newborn child, water occupies 80% of the body weight, for a 4-month-old baby it is 93%, for a person in «his/her prime» – 70–75%, and for the elderly – only 60–65%.

Water helps the human body to breathe, carry out thermoregulation and transport of substances.

Loss of 1% of water from body weight reduces human performance, with a loss of 2% a person experiences a strong thirst, loss of 10% can cause syncope and hallucinations, loss of more than 12% is lethal.

It is necessary to drink water as often as possible, each time not more than a glass. The water must be fresh non-carbonated and soft.

The norm for adults is to drink during the day 30 grams of water per kilogram of weight at the outside temperature of 20–25°C, for teens this rate is twice as high.

The production of 1 kg of chocolate requires 24 m³ of water, 1 kg of meat – 15.5 m³, 1 kg of sugar – 1.5 m³, 1 cup of coffee – 140 l.

«Water Footprint» is a term that reflects the amount of water expended in the production of various goods or services. The definition of «water footprint», as a rule, applies to the consumer of water (human, organization, country) and takes into account the source of water consumed, as well as the time and intensity of consumption.

According to the calculations, the «water footprint» of each average inhabitant of the earth is 1,240 m³ of water per year.

Countries with the lowest «water footprint» include Latvia, Georgia, Hungary, China, Afghanistan, Peru, Congo, Angola and (600 – 1,000 m³ of water per year per person), the countries with the highest water footprint are the USA, Greece, Malaysia, Russia, Italy, Thailand, Spain, Sudan (2,100 – 2,500 m³ of water per year per person).

70% of all fresh water withdrawn from the environment by man goes to irrigation of agricultural land.

Specialists note that drinking water contaminated with nitrates when it is consumed is extremely dangerous for infants.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

And can water be carcinogenic? Yes! After water chlorination the gaseous chlorine with the organic part of water form carcinogenic substances.

Desalination of sea water. Reverse osmosis. Climatologists claim that the planet is to be faced with dry years, so already now there is reassessment of traditional water supplies [1]. The population is growing, and with it – the demand for water, which means that new sources of water supply will be needed.

In response to increased water shortages over the past 30 years, desalination has become a viable alternative to traditional sources of water supply. According to the International Desalination Association, more than 17,000 water desalination plants currently operate in 120 countries [13–16, 20]. At the same time, desalination provides only about 1% of the world's drinking water needs, but this proportion grows from year to year.

Desalinated drinking water is obtained either from brackish water (salt content <10 000 mg/l) or from sea water (mineralization from 14 000 to 44 000 mg/l). The total volume of brackish water in the world is limited (<1% of the world's water reserves).

The global ocean contains > 97.2% of the world's water resources. This is 1 330 million km³ of alternative water in addition to the available 41 thousand km³ of available fresh water from rivers, lakes and artesian springs. The ocean has its own distinctive features - its resources are virtually unlimited and their extent is not affected by drought and climate change.

More than 50% of the world's population lives in cities bordering the ocean. The group of leaders of the water desalination market in the period of 2010 – 2013 was presented by Saudi Arabia, USA and Australia. Further in this list there are Israel, Kuwait, Libya, the United Arab Emirates, China, India and Chile. According to statistics, the number of desalination centers in these regions is continuously growing at a rate of 7 to 9% per year.

The first thermal desalination plant started operation in the late 1850s on ships for boilers and drinking purposes. Over the past 10 years, desalination with seawater reverse osmosis (SWRO) membranes has dominated all desalination markets, except the Middle East (evaporation is the dominant technology).

Water desalination technologies: 63% – reverse osmosis; 31% – distillation; 3% – electrodialysis; 3% – combined methods.

In the Old World, Spain is of particular interest, as 40 years ago (in 1966) it built the first membrane plant in Europe for sea water desalination on the Canary Islands, and to this day it has been using these technologies most actively among European countries. In that way 40% of the water consumed by the city of Alicante (310 000 inhabitants) located on the Mediterranean coast is provided by membrane desalination plants. Today in Spain there are more than 900 such plants, the total capacity of which is 1.5 million m³/day and 49% of them desalinate sea water.

One of the key factors in reducing the cost of seawater desalination is the progress of SWRO membrane technology. First of all, this is the emergence of a new generation of low-pressure membranes with an increased surface area, with high resistance to fouling and biological effects.

The world leader in SWRO membrane production is Dow Chemical (USA). This is one of the largest companies that invest in research and development (R&D) in the chemical industry. In 2011, the company invested \$ 1.65 billion in innovative development; the staff employed in R&D amounted to 5,500 specialists.

Conclusions

In conclusion, it should be noted that water resources are a strategic issue of all countries of the world, their environmental, economic and energy development and food problems:

- The obtained water quality monitoring data in the regions of Ukraine during the flood period showed that not everything is as bad as one could imagine, and despite the scandalous Internet messaging, the quality of tap water in various cities of Ukraine is in most cases close or meets the requirements for drinking water. However, it is also obvious that tap water in all regions should be additionally purified;

- Imbalance exceeds the value of 10 thousand m³ per year per person («catastrophic») and is observed in 5 southeastern regions of Ukraine. Also five regions can be considered the «balanced» (less than 1 ths. m³ per year per person) – four western and one northern region. On the average, Ukraine is in the zone between «permissible» (from 0.1

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

to 0.3) and «extraordinary» (1.0 to 2.0) unbalance. In this case, it is necessary to think about alternative sources of water supply (for example, reuse of wastewater, seawater desalination, etc.);

– On average, up to 20% of water falls on transport losses. The main water losses in the HCS are due to the unsatisfactory condition of the water supply network;

– The main amount of pollution comes from industrial wastewater (61%), only 9% of which is reused. One third of the volume of communal wastewater is discharged untreated;

– About 15% of the samples examined did not meet the standards for sanitary and chemical indicators, and about 4% – for sanitary-bacteriological indicators;

– The activation of Ukraine's participation in attracting loans from international financial organizations for the reconstruction of utilities is a strategically necessary and objectively important

step, but it must be appropriately calculated and prepared;

– Up to now in Ukraine the problem of natural waters pollution with OMP has not been considered either at the official or academic levels. In our country there are no normative legal documents;

– Water management in Norway is a good example of following the methods of water management; the art, which is easy to learn and is a good example of developed countries;

– In response to increased water shortages over the past 30 years, desalination has become a viable alternative to traditional sources of water supply. According to the International Desalination Association, more than 17,000 water desalination plants currently operate in 120 countries. At the same time, desalination provides only about 1% of the world's drinking water needs, but this proportion grows from year to year.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Василюк, С. Опреснение морской воды: разные стороны вопроса / С. Василюк // Вода и водоочистные технологии. – 2016. – № 4. – С. 18–21.
2. Василюк, С. Побочные продукты здоровья / С. Василюк // Вода и водоочистные технологии. – 2016. – № 3. – С. 14–21.
3. Долина, Л. Защита вод от радиоактивного загрязнения : монография / Л. Долина, Е. Гунько, П. Машихина. – Днепропетровск : Лира, 2016. – 477 с.
4. Долина, Л. Ф. Современная техника и технология для очистки сточных вод от солей тяжёлых металлов : монография / Л. Ф. Долина. – Днепропетровск : Континент, 2008. – 254 с.
5. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною : затв. Наказом М-ва охорони здоров'я України 12.05.2010 р. № 400. – Київ : М-во охорони здоров'я України, 2010. – 39 с.
6. Как в Швейцарии не стало своего мусора // Вода и водоочистные технологии. – 2016. – № 4. – С. 30.
7. Макарова, Н. Единая страна – разная вода / Н. Макарова, Е. Светлейшая // Вода и водоочистные технологии. – 2014. – № 1. – С. 4–9.
8. Малецкий, З. Круговорот воды в Норвегии. Управление водными ресурсами, водоподготовка и водоочистка в скандинавской стране / З. Малецкий // Вода и водоочистные технологии. – 2016. – № 3. – С. 22–24.
9. Малецкий, З. Три кита МБР. Качество. Стабильность. Компактность / З. Малецкий // Вода и водоочистные технологии. – 2016. – № 1/2. – С. 4–8.
10. Митченко, Т. Украинские водные реалии в 10 фактах / Т. Митченко // Вода и водоочистные технологии. – 2016. – № 3. – С. 4–11.
11. Назаренко, Н. Водоподготовка в Швейцарии глазами очевидца / Н. Назаренко // Вода и водоочистные технологии. – 2016. – № 3. – С. 28–29.
12. Тведт, Т. Подорож у майбутнє води : [пер. з норвез.]. – Київ : Ніка-центр, 2013. – 232 с.
13. Федосенко, Н. Вчені відкрили нове джерело чистої енергії [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ecotown.com.ua/news/Vcheni-vidkryly-nove-dzherelo-chystoyi-enerhiyi/>. – Загл. с экрана. – Проверено: 20.06.2017.
14. Хаббард, Л. Р. Дорога к счастью [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.thewaytohappiness.ru/thewaytohappiness/precepts/safeguard-and-improve-your-environment.html/>. – Загл. с экрана. – Проверено: 20.06.2017.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

15. Australian Government National Water Commission [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.water.wa.gov.au/about-us/>. – Загл. с экрана. – Проверено: 20.06.2017.
16. Bio-plastic (poly-hydroxy-alkanoate) production from municipal sewage sludge in the Netherlands: a technology push or a demand driven process? / E. Bluemink, A. Nieuwenhuijzen, E. Wypkema, C. Uijterlinde // Water Science and Technology. – 2016. – Vol. 74, № 2. – P. 353–359.
17. Comprehensive membrane science and engineering / Edited by Enrico Drioli and Lidietta Giorno. – First edition. – [s. l.] : Elsevier, 2010. – 1570 p.
18. Norling, P. Water and Sustainable Development: Opportunities for the chemical Sciences : Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable / P. Norling, F. Wood-Black, T. M. Masciaglioli. – Washington : National Academies Press, 2004. – 106 p.
19. The world's most liveable cities [Електронний ресурс] // The Economist. – Режим доступа: http://www.economist.com/blogs/graphicdetail/2016/08/daily_chart-14. – Загл. с экрана. – Проверено : 20.06.2017.
20. Voutchkov, N. Desalination – Past, Present and Future [Електронний ресурс]. – Режим доступа: http://www.iwa-network.org/desalination_past_present_future. – Загл. с экрана. – Проверено : 20.06.2017.

Л. Ф. ДОЛИНА^{1*}, П. Б. МАШИХІНА^{2*}, А. О. КАРПО^{3*}, А. А. МІЩЕНКО^{4*}

^{1*}Каф. «Гідраліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-6082-7091

^{2*}Каф. «Гідраліка 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 gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

^{3*}Каф. «Гідраліка 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 alichka-88.karpo@yandex.ru, ORCID 0000-0003-3201-8435

^{4*}Галузева науково-дослідна лабораторія «Вагони», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 19, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-5543-8435

ВОДНІ РЕАЛІЇ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ

Мета. У статті необхідно проаналізувати стан водного господарства в Україні та світі, а також кращі досягнення в цьому напрямку. **Методика.** Дослідження виконані на підставі аналізу літературних джерел та звітних даних про стан водного господарства в Україні, європейських країнах та США (2010–2016 рр.). **Результати.** Аналіз стану води в регіонах України показав, що її якість у більшості випадків відповідає вимогам для питної води або близька до них, але потрібне доочищення питної води, що надходить у водопровід, в усіх регіонах країни. Основним питанням на сьогоднішній день є виробництво необхідного обладнання для очисних споруд. На жаль, не все обладнання виготовляється в Україні. Стан сільських водопроводів викликає особливе занепокоєння. З перевірених водопроводів – 7,3 % не відповідають нормам та правилам. У той же час централізованим водопостачанням забезпечено лише 25 % сіл України. **Наукова новизна.** Авторами представлені результати комплексного розгляду питань знезараження питної та стічної вод, де використовуються різні методи, частково в комбінуванні один із одним (реалії України та світу). Головним, невирішеним на сьогоднішній день, є питання залишкової кількості ліків, що потрапляють у питну воду. Основна екологічна загроза світового масштабу в питній воді – наявність ліків. Очисні споруди не пристосовані для розкладання або виявлення лікарських засобів. У всьому світі ніде не передбачена боротьба з цими речовинами. Одним із ключових питань вирішення проблеми видобутку питної води є опріснення морської води. Для зниження вартості опріснення морської води використовуються технології SWRO-мембран. **Практична значимість.** Водні проблеми є проблемами номер один у всьому світі, й в Україні в тому числі. Потрібно передбачити додаткове фінансування для вирішення проблем підготовки та очищення вод, не за залишковим принципом, а з огляду на те, що вода – це основа життя на землі та в цілому від якості джерела водопостачання залежить здоров'я та життя нації.

Ключові слова: очистка стічних і питних вод; ліки в стічних водах; нові джерела питної води; знезараження стічної та питної вод; опріснювальні установки; отримання прісної води з морів.

Л. Ф. ДОЛИНА^{1*}, П. Б. МАШИХИНА^{2*}, А. А. КАРПО^{3*}, А. А. МИЩЕНКО^{4*}^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-6082-7091^{2*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204^{3*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта alichka-88.karpo@yandex.ru, ORCID 0000-0003-3201-8435^{4*}Отраслевая научно-исследовательская лаборатория «Вагоны», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 19, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-5543-8435

ВОДНЫЕ РЕАЛИИ В УКРАИНЕ И МИРЕ

Цель. В статье необходимо проанализировать состояние водного хозяйства в Украине и мире, а также лучшие достижения в этом направлении. **Методика.** Исследования выполнены на основании анализа литературных источников и отчетных данных о состоянии водного хозяйства в Украине, европейских странах, США (2010–2016 гг.). **Результаты.** Анализ состояния воды в регионах Украины показал, что ее качество в большинстве случаев соответствует требованиям для питьевой воды или близки к ним, но необходима доочистка питьевой воды, поступающей в водопровод, во всех регионах страны. Основным вопросом на сегодняшний день является производство необходимого оборудования для очистных сооружений. К сожалению, не всё оборудование производится в Украине. Состояние сельских водопроводов вызывает особенное беспокойство. Из проверенных водопроводов – 7,3 % не соответствуют нормам и правилам. В то же время централизованным водоснабжением обеспечено только 25 % сел Украины. **Научная новизна.** Авторами представлены результаты комплексного рассмотрения вопросов по обеззараживанию питьевой и сточной вод, где используются различные методы, частично в комбинировании друг с другом (реалии Украины и мира). Основным, нерешённым на сегодняшний день, является вопрос остаточного количества лекарств, попадающих в питьевую воду. Основная экологическая угроза мирового масштаба в питьевой воде – наличие лекарств. Очистные сооружения не приспособлены для разложения или обнаружения лекарственных средств. Во всем мире нигде не предусмотрена борьба с данными веществами. Одним из ключевых вопросов решения проблемы добычи питьевой воды является опреснение морской воды. Для снижения стоимости опреснения морской воды используются технологии SWRO-мембран. **Практическая значимость.** Водные проблемы являются проблемами номер один во всем мире, и в Украине в том числе. Нужно предусмотреть дополнительное финансирование для решения проблем подготовки и очистки вод, не по остаточному принципу, а учитывая то, что вода – это основа жизни на земле и в целом от качества источника водоснабжения зависит здоровье и жизнь нации.

Ключевые слова: очистка сточных и питьевых вод; лекарства в сточных водах; новые источники питьевой воды; обеззараживание сточной и питьевой вод; опреснительные установки; получение пресной воды из морей

REFERENCE

1. Vasilyuk, S. (2016). Opresneniye morskoy vody: raznyye storony voprosa. *Voda i Vodoochysni Tekhnologii*, 4 (82), 18–21.
2. Vasilyuk, S. (2016). Pobochnyye produkty zdorovya. *Voda i Vodoochysni Tekhnologii*, 3 (81), 14–21.
3. Dolina, L., Gunko, E. & Mashihina, P. (2016). *Zashchita vod ot radioaktivnogo zagryazneniya* [Monograph]. Dnipropetrovsk: Lira.
4. Dolina, L. (2008). *Sovremennaya tekhnika i tekhnologiya dlya ochistki stochnykh vod ot soley tyazhelykh metallov* [Monograph]. Dnipropetrovsk: Kontinent.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

5. Hiihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoj dlia spozhyvannia liudynoiu, DerzhSanPin 2.2.4-171-10 (2010).
6. Kak v Shveytsarii ne stalo svoyego musora. (2016). *Voda i Vodoochysni Tekhnolohii*, 4 (82), 30.
7. Makarova, N. & Svetleyshaya, E. (2014). Edinaya strana – raznaya voda. *Voda i Vodoochysni Tekhnolohii*, 1 (71), 4-9.
8. Maletskiy, Z. (2016). Krugovorot vody v Norvegii. Upravleniye vodnymi resursami, vodopodgotovka i vodoochistka v skandinavskoy strane. *Voda i Vodoochysni Tekhnolohii*, 3 (81), 22-24.
9. Maletskiy Z. (2016). Tri kita MBR. Kachestvo. Stabilnost. Kompaktnost. *Voda i Vodoochysni Tekhnolohii*, 1-2 (79-80), 4-8.
10. Mitchenko, T. (2016). Ukrainskiye vodnyye realii v 10 faktakh. *Voda i Vodoochysni Tekhnolohii*, 3 (81), 4-11.
11. Nazarenko, N. (2016). Vodopodgotovka v Shveytsarii glazami ochevidtsa. *Voda i Vodoochysni Tekhnolohii*, 3 (81), 28-29.
12. Tvedt, T. (2013). *Podorozh u maibutnie vody*. (Trans.). Kyiv: Nika-tsentr.
13. Fedosenko, N. (2016, July 19). Vcheni vidkryly nove dzherelo chystoi enerhii. *Ecotown*. Retrieved from <http://www.ecotown.com.ua/news/Vcheni-vidkryly-nove-dzherelo-chystoyi-enerhiyi/>
14. Hubbard, L. R. (1981). *The Way to Happiness: A Common Sense Guide to Better Living*. Smedeland: New Era Publications International ApS.
15. Australian Government National Water Commission: About us. (n.d.). Retrieved from <http://www.water.wa.gov.au/about-us/>
16. Bluemink, E. D., van Nieuwenhuijzen, A. F., Wypkema, E., & Uijterlinde, C. A. (2016). Bio-plastic (polyhydroxy-alkanoate) production from municipal sewage sludge in the Netherlands: a technology push or a demand driven process? *Water Science and Technology*, 74 (2), 353-359. doi:10.2166/wst.2016.191
17. Drioli, E., & Giorno, L. (Eds.). (2010). *Comprehensive membrane science and engineering*. Kidlington: Elsevier. Retrieved from <http://www.shinemem.com/uploads/soft/COMPREHENSIVE%20MEMBRANE%20SCIENCE%20AND%20ENGINEERING.pdf>
18. Norling, P., Wood-Black, F., & Masciangioli, T. M. (Eds.). *Water and Sustainable Development: Opportunities for the chemical Sciences* [Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable]. Washington (DC): National Academies Press (US)
19. *The Economist: The world's most liveable cities*. (2016, August 18). Retrived from <https://www.economist.com/blogs/graphicdetail/2016/08/daily-chart-14>
20. Voutchkov, N. (2016, August 17). Desalination – Past, Present and Future. *International Water Association*. Retrieved from <http://www.iwa-network.org/desalination-past-present-future/>

Prof. M. M. Biliaiev, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. O. K. Nahorna, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published

Received: April 10, 2017

Accessed: July 20, 2017

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

УДК 658.7/.8.004.67

И. М. ЦАРЕНКОВА^{1*}

^{1*}Каф. «Строительство и эксплуатация дорог», Белорусский государственный университет транспорта,
ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +375 (29) 384 70 76, эл. почта tsar_irina@mail.ru,
ORCID 0000-0002-1401-7968

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ ПО АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГЕ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ЛОГИСТИКИ

Цель. В научной работе необходимо рассмотреть развитие и адаптацию теоретико-методических основ совершенствования логистических систем доставки грузов автомобильным транспортом в рамках научного обеспечения процессов формирования транспортно-логистической системы страны. **Методика.** Теория управления функционированием систем требует формализации связей внутри системы. Выполнены качественные и количественные характеристики сущности и установлены закономерности взаимодействия элементов в системе перевозки грузов по автомобильной дороге. Уточнены роль автомобильной дороги в транспортном обеспечении и воздействие транспортно-логистического пространства на саму дорогу в процессе ее функционирования. При исследовании данной темы использован системный подход, методы обобщения и рационального решения проблем, теория массового обслуживания. **Результаты.** В работе автомобильная дорога представлена как элемент системы перевозки грузов, что позволит повысить ее экономическую эффективность в постоянно изменяющейся среде транспортно-логистического пространства по выбранному критерию – снижению совокупных издержек по продвижению материального потока. Теоретико-методические основы совершенствования логистических систем доставки грузов автомобильным транспортом состоят в обосновании применения логистики как эффективного элемента управления, позволяющего снижать издержки, связанные с перевозкой грузов. Они отличаются наличием научно-обоснованных методов расчета сроков и очередности выполнения дорожных работ, логистической интеграцией участвующих в перевозке грузов предприятий, структурой и объемом материального и сопутствующих ему потоков, а также формированием логистической цепи продвижения. **Научная новизна.** Автомобильная дорога представлена звеном единого интегрального процесса создания и управления материальными потоками. Предлагается формирование элементов дорожной и транспортной составляющих подсистем с их дальнейшим объединением в единую систему перевозки грузов по автомобильным дорогам. Взаимосвязи элементов системы формализуются в виде рассредоточенной двухэтапной системы массового обслуживания. Каждый из элементов системы оценивается собственными характеристиками. **Практическая значимость.** Результаты исследований могут использоваться работниками автотранспортных предприятий, служб предприятий, отвечающих за снабжение производства и транспортировку продукции, дорожными организациями для принятия научно обоснованных решений при формировании программы дорожных работ и по обеспечению альтернативных возможностей для рациональной организации перевозок грузов.

Ключевые слова: логистическая система; логистический поток; система массового обслуживания; транспортные затраты; цепи поставок

Введение

Постановка проблемы. Снижение расходов на транспортировку грузов, в том числе и в международном сообщении, является одним из

главных направлений государственной политики в развитии транспортного комплекса страны, что обуславливает требования к повышению эффективности перевозки грузов автомо-

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

бильным транспортом [2]. Совершенствование перевозки грузов является сложной многопараметрической задачей и в настоящее время составляет предмет изучения транспортной логистики [1, 3, 5, 10].

Вопросам определения маршрутов перевозок, формирования систем доставки, развития логистических систем и сети логистических центров всегда уделялось повышенное внимание [4, 7, 12, 13]. При этом из поля зрения исследователей и практиков практически выпадает инфраструктурная составляющая автотранспортного процесса, что приводит к узкоспециализированному и обособленному решению проблем модернизации автомобильных дорог и развития транспортно-логистической системы страны. Важные практические задачи по развитию систем перевозки грузов по автомобильным дорогам в настоящее время остаются неформализованными: выбор основных характеристик процесса обслуживания автомобильной дорогой транспортных потоков, оценка и установление параметров взаимного влияния транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог и состава и интенсивности транспортных потоков, формирование оптимальной программы проведения дорожных работ по модернизации автомобильных дорог. Отсутствует видение проблем развития систем доставки грузов с позиций дорожного хозяйства, как стороны, в наибольшей степени способной оказать влияние на снижение не только транспортных расходов, но и части логистических затрат.

Современное состояние экономики заставляет взглянуть на проблему развития системы перевозки грузов по автомобильной дороге с позиции логистики, позволяющей за счет комплексного подхода к объединению отдельных элементов в единую систему добиться повышения экономической эффективности этой системы за счет синергетического эффекта [6, 8, 9].

Анализ исследований по теме публикации. Проблемы проектирования и развития логистических систем нашли свое отражение в исследованиях многих зарубежных и отечественных ученых и специалистов. Наибольший вклад в их решение внесли работы следующих авторов: в западной научной литературе –

M. Christopher, D. Waters, D. J. Bowersox и D. J. Closs и другие; в российской научной литературе – А. М. Гаджинский, Л. Б. Миротин, А. И. Семененко, В. И. Сергеев, С. А. Уваров и другие; в белорусской научной литературе – И. А. Еловой, Р. Б. Ивуть, А. Д. Молокович, В. Я. Негрей, П. Г. Никитенко и др. Этими авторами исследуются методологические и теоретические основы формирования транспортных систем, различные аспекты развития теории и практики логистики, связанные с оптимизацией работы транспорта в рамках логистических систем.

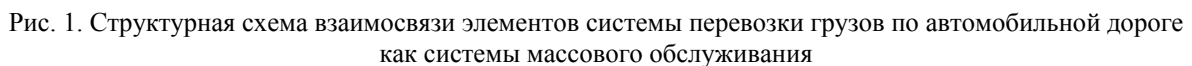
В дорожном строительстве научные исследования в области организации и управления дорожно-строительных работ, оценки состояния дорог, назначения и планирования ремонтных мероприятий, обеспечения безопасности движения в разное время проводили Л. А. Бронштейн, А. П. Васильев, В. В. Сильянов, И. И. Леонович, С. Е. Кравченко и другие.

Применение принципов логистики в научных работах последних лет позволяет комплексно подойти к проблеме взаимодействия автомобильной дороги, как сложной технической системы, и дорожной службы с грузоотправителями и грузополучателями в рамках глобальных процессов транспортировки грузов.

Цель

Основной целью работы является развитие и адаптация теоретико-методических основ совершенствования логистических систем доставки грузов автомобильным транспортом к требованиям социально-ориентированной рыночной экономики. Для достижения поставленной цели автомобильная дорога представлена как элемент системы перевозки грузов, оказывающий значительное влияние на эффективность ее работы. Предусмотрено проанализировать суть движения транспортного средства по автомобильной дороге с позиций логистики, акцентируя внимание на взаимосвязи дорожные условия – логистические транспортные потоки и совершенствуя ее с использованием математического аппарата теории массового обслуживания.

дорожными условиями от движущихся транспортных средств, подвергающиеся различным операциям обслуживания с постоянной или случайной продолжительностью. Таким образом, автомобильная дорога рассматривается как аппарат обслуживания, процесс обеспечения дорожными условиями – как процесс обслуживания логистических транспортных потоков и к управлению взаимодействием этих элементов применим математический аппарат системы массового обслуживания (рис. 1).



В процессе работы (функционирования, эксплуатации) автомобильной дороги происходит самообслуживание поставщиков (грузоотправителей), владельцев транспортных средств, потребителей (грузополучателей), логистических провайдеров. Данный процесс приводит к изменению, как правило, снижению определенных характеристик всех его участников, в связи с износом материальной базы либо расходом различных видов ресурсов.

зованием топлива в процессе движения, опла-
той заработной платы водителю, за выполнен-
ную работу и компенсации на восстановление
утраченной из-за утомления работоспособно-
сти, возможными расходами на техническое
обслуживание автомобиля, переадресовкой
груза в пути следования и т.п. Среда транс-
портно-логистического пространства способст-
вующего формированию и функционированию
материальных потоков оказывает воздействие,
большой частью отрицательное (например, рост
интенсивности перевозок приводит к ухудше-
нию состояния верхних слоев дорожной одеж-
ды) на характер процесса обслуживания
и функциональные параметры аппарата обслу-
живания. Улучшение параметров системы
обеспечивается деятельностью дорожной

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

службы (доведение транспортно-эксплуатационных качеств дороги до нормативных требований) и логистических провайдеров (оптимизация маршрутов перевозок, подбор рациональных способов перевозки с учетом характеристик грузов и т.п.), возмещающей расход ресурсов во всех элементах системы.

Управление восстановлением параметров системы возможно в случае, если износ аппарата обслуживания и процесс самообслуживания в изменяющейся среде транспортно-логистического пространства происходят самопроизвольно. В таких условиях объекты придорожного сервиса восполняют ресурсы транспортных средств, широкий спектр логистических услуг оптимизирует расходы поставщиков, совместная работа дорожной службы и логистических провайдеров рационализируют работу логистического транспортного потока (дорожная служба – обеспечивая безопасные условия движения, логистические провайдеры – формируя транспортный поток в соответствии с направлением движения материальных потоков). Кроме того, дорожная служба отвечает за высокие транспортно-эксплуатационные характеристики аппарата обслуживания (оптимальные дорожные условия), осуществляя круглогодичное содержание, капитальные ремонты и реконструкцию дорог.

Результаты

Таким образом, взаимосвязи элементов системы перевозки грузов по автомобильной дороге формализуются в виде рассредоточенной двухэтапной системы обслуживания. На первом этапе автомобильная дорога обеспечивает необходимые условия для продвижения материальных потоков, на втором – происходит восстановление утраченных в процессе движения различного рода ресурсов.

Каждый из элементов системы оценивается собственными характеристиками. Характеристикой аппарата обслуживания является его пропускная способность (μ) – число требований, обслуживаемых в единицу времени.

Каждая взаимосвязь элементов системы перевозки грузов по автомобильной дороге характеризуется собственной характеристикой пропускной способности аппарата обслуживания:

μ (дорожная служба – транспортные средства) – пропускная способность различных объектов дорожного сервиса (площадки для кратковременной остановки транспортных средств, площадки для отдыха со стоянками транспортных средств, устройства аварийно-вызывной связи и т.п.) находящихся на балансе дорожных организаций;

μ (поставщик – транспортные средства) – пропускная способность различных объектов придорожного сервиса (мотели, гостиницы, станции технического обслуживания, автозаправочные станции, пункты питания, связи, медицинской помощи и т.п.);

μ (дорожная служба – поставщик) – пропускная способность сети автомобильных дорог на маршруте продвижения материального потока;

μ (дорожная служба – логистический транспортный поток) – возможности дорожной службы по проведению мероприятий по организации движения транспортных средств по автомобильной дороге и продвижения материального потока по полигону сети автомобильных дорог.

Как было отмечено ранее, обозначенные взаимосвязи сопряжены с потерей ресурсов, что вызывает необходимость в обслуживании на втором этапе. При этом, если поток таких заявок превышает ресурс – пропускную способность соответствующего направления, происходит снижение показателя качества обслуживания на первом этапе.

В связи с тем, что обслуживание транспортного средства на маршруте его движения состоит из ряда последовательных операций происходящих в случайные моменты времени (заправка, остановки для отдыха водителя, осмотра транспортного средства, проверка документов сотрудниками ГАИ, проверка габаритов и массы транспортных средств на пропускных пунктах, покупка устройств для оплаты за дорогу и т.п.), каждая из которых выполняется отдельно обслуживающим аппаратом, то такое объединение аппаратов позволяет представить автомобильную дорогу в виде канала обслуживания, а саму систему – многофазной.

Технико-экономическая задача об оптимальных условиях функционирования системы перевозки грузов по автомобильной дороге

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

формулируется при наличии сведений о затратах на доведение параметров дороги до нормативных и на ее содержание в соответствии с требованиями перспективной интенсивности движения и экономических показателей характеризующих продвижение материального потока (логистические издержки, транспортные расходы).

Зависимость этих функций от года t связана с изменением транспортно-логистического пространства и параметров логистического транспортного потока. Функция распределения параметров взаимосвязи поставщик – транспортное средство также зависит от t , так как происходит постоянное совершенствование транспортных средств, логистической инфраструктуры и увеличение количества оказываемых логистических услуг.

Чтобы сформировать оптимальную программу капитального ремонта и реконструкции автомобильных дорог необходимо учесть не только капитальные вложения и затраты на последующее содержание, но и затраты пользователей автомобильных дорог [14]. Следует отметить, что в рамках проводимого исследования взаимосвязей элементов системы перевозки грузов по автомобильной дороге требуется уточнение категории пользователей дорог. В соответствии с Законом Республики Беларусь «Об автомобильных дорогах и дорожной деятельности» пособия [11, с. 9] к пользователям автомобильных дорог относятся юридические и физические лица, использующие автомобильную дорогу в качестве участников дорожного движения или осуществляющие деятельность, которая не относится к дорожной, в пределах полосы отвода. К пользователям автомобильными дорогами следует также относить участников логистических цепей поставок с использованием автомобильного транспорта и иные организации, результаты финансовой деятельности которых зависят от затрат на транспортировку грузов (товаров) по автомобильным дорогам.

Формируется база для оценки эффективности и сравнения вариантов мероприятий по повышению транспортно-эксплуатационных качеств дороги или сети дорог.

Рекомендуется в рамках исследования проинформировать детализацию и разбиение пространства

(логистические транспортные потоки (ЛТП), транспортно-логистическое пространство (ТЛП)) на отдельные параметры, т.е. назначаются параметры, характеризующие ЛТП (интенсивность движения транспортных средств, доля тяжелых и крупногабаритных транспортных средств в потоке) и ТЛП (показатель роста объемов производства продукции по отраслям экономики, показатель роста объемов перевозок грузов автомобильным транспортом, наиболее распространенные виды отправок грузов, наиболее часто перевозимые виды грузов и т.п.). Обследуется движение требований, схема размещения накопителей и обслуживающих аппаратов на каждой фазе обслуживания. Измеряются длительность обслуживания, время ожидания требований и время простоя обслуживающих аппаратов на каждой фазе. Для выбора соответствующей математической модели и придания ее параметрам числовых значений важна их статистическая оценка за исследуемое время непрерывной работы системы. В результате обработки данных выбирается закон распределения входящего потока и времени обслуживания. Накапливается информация о фазах обслуживания, вызывающих наибольшие потери из-за ожидания требований или, наоборот, из-за простоев обслуживающих аппаратов, устанавливаются требования, имеющие приоритеты в обслуживании и влияющие на это причины.

Как вариант улучшения качества функционирования рассматриваемой системы, можно прибегнуть к изменению порядка движения требований. Для каждой фазы, модификации может подлежать входящий поток или механизм обслуживания. При этом важно правильно определить такие варианты изменения системы (например, функциональное назначение объектов сервиса, очередность проведения работ по текущему или капитальному ремонту, реконструкции), которые реально осуществимы и могут с достаточной вероятностью повысить эффективность работы системы. Система будет оптимальной, если время пребывания требований в канале обслуживания не превысит заданного с определенной вероятностью при минимальных затратах. Если применяемые модификации не требуют значительных капитальных вложений (перепрофилирование объектов сер-

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

виса, проведение работ по текущему ремонту), в качестве критерия оптимальности принимается максимум производительности, либо минимум транспортных и логистических затрат на продвижение материального потока. При значительных объемах инвестиций (капитальный ремонт и реконструкция) общим критерием оптимальности выступает минимум суммарных дисконтированных затрат. При этом если объемы обслуживаемых материальных потоков изменяются в зависимости от модификации системы массового обслуживания, то необходимо рассматривать суммарные дисконтированные затраты либо на единицу материального потока, либо на его наибольший объем, обеспечиваемый одной из модификаций.

Научная новизна и практическая значимость

Установлено, что в условиях формирования и развития национальной транспортно-логистической системы возникает потребность определения роли и места автомобильных дорог в интегрированных цепях поставок как внутринациональных, так и международных, рассмотрения их с позиций современных технологий, увязывающих в единое целое грузовые, транспортные, материальные, информационные и финансовые потоки. Автомобильные дороги представлены важным и необходимым звеном единого интегрального процесса создания и управления материальными потоками.

Из элементов дорожной и транспортной составляющих сформированы подсистемы с дальнейшим объединением в единую систему перевозки грузов по автомобильным дорогам, что позволяет определить и оценить роль каждого элемента в обеспечении надежного и эффективного функционирования всей системы.

Выводы

1. Управляя функционированием автомобильных дорог с позиций логистики, появляется

возможность определения основных характеристик процесса обслуживания автомобильной дорогой логистических транспортных потоков. Характер их взаимодействия позволяет рассматривать автомобильную дорогу как систему, в которую через различные промежутки времени или регулярно поступают требования к обеспечению дорожными условиями от движущихся транспортных средств, подвергающихся различным операциям обслуживания с постоянной или случайной продолжительностью. Таким образом, автомобильная дорога рассматривается как аппарат обслуживания, процесс обеспечения дорожными условиями – как процесс обслуживания логистических транспортных потоков и к управлению взаимодействием этих элементов применим математический аппарат системы массового обслуживания.

2. Взаимосвязи элементов системы перевозки грузов по автомобильной дороге формализуются в виде рассредоточенной двухэтапной системы обслуживания. На первом этапе автомобильная дорога обеспечивает необходимые условия для продвижения материальных потоков, на втором – происходит восстановление утраченных в процессе движения различного рода ресурсов.

3. Каждый из элементов системы оценивается собственными характеристиками. Характеристикой аппарата обслуживания является его пропускная способность. Каждая взаимосвязь элементов системы перевозки грузов по автомобильной дороге характеризуется собственной характеристикой пропускной способности аппарата обслуживания.

4. Решение поставленной задачи позволит повысить эффективность взаимосвязей всех элементов системы в постоянно изменяющейся среде транспортно-логистического пространства по выбранному критерию – снижению совокупных издержек по продвижению материального потока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Борисова, Л. П. Основні проблеми та перспективи розвитку транспортної логістики в Україні / Л. П. Борисова // Економіка. Управління. Інновації. – 2013. – № 2. – С. 104–113.

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

2. Государственная программа развития транспортного комплекса Республики Беларусь на 2016–2020 гг. [Электронный ресурс] : утв. Пост. Совета Министров Респ. Беларусь 28 апр. 2016 г. № 345 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь : [Веб-Сайт]. – [Минск, 2016]. – Режим доступа: <http://pravo.by/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 23.10.2017.
3. Домнина, С. В. Развитие рынка транспортно-логистических услуг в странах – членах Евразийского экономического союза / С. В. Домнина, А. И. Федоренко // Логистика сегодня. – 2014. – № 6. – С. 25–43.
4. Зак, Ю. А. Транспортная задача в условиях стохастических данных о стоимости поставки грузов / Ю. А. Зак // Логистика сегодня. – 2017. – № 2. – С. 18–27.
5. Ивуть, Р. Б. Развитие транзитного потенциала Республики Беларусь в условиях формирования ее транспортно-логистической системы / Р. Б. Ивуть, А. Ф. Зубрицкий, А. С. Зиневич // Новости науки и технологий. – 2015. – № 1 (32). – С. 19–33.
6. Колодізева, Т. О. Методичне забезпечення оцінки ефективності логістичної діяльності підприємств : монографія / Т. О. Колодізева, Г. Р. Руденко. – Харків : Вид-во ХНЕУ, 2012. – 292 с.
7. Кузнецова, О. В. Цепи поставок и функции логистики в управлении ими на предприятиях [Электронный ресурс] / О. В. Кузнецова ; Дальневост. гос. ун-т путей сообщения. – Режим доступа: <http://www.dvgups.ru/science-and-innovation/conferences/m-e-r-v-k-g/2090-kuznecova-ov>. – Загл. с экрана. – Проверено : 01.07.2017.
8. Логистика и управление цепями поставок : монография / Т. Р. Терешкина, Л. Е. Баранова, Л. В. Войнова [и др.]. – Санкт Петербург : СПбГТУРП, 2011. – 155 с.
9. Логистика : монография / В. В. Багинова [и др.]. – Москва : РУСАЙНС, 2016. – 272 с.
10. Матюшин, Л. Н. Современные проблемы логистики в транспортной сфере / Л. Н. Матюшин // Логистика. – 2016. – № 11. – С. 44–47.
11. Содержание и ремонт автомобильных дорог : пособие начальнику линейной дорожной дистанции и дорожному мастеру по ремонту и содержанию автомобильных дорог / С. Е. Кравченко [и др.]. – Минск : БНТУ, 2013. – 239 с.
12. Connecting to Compete 2014: Trade Logistics in the Global Economy: The Logistics Performance Index and Its Indicators [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://worldbank.org/content/dam/Worldbank/document/Trade/LPI2014.pdf>. – Загл. с экрана. – Проверено : 01.10.2017.
13. Ivuts, R. Economic ways of increasing efficiency of road-building planning / R. Ivuts, I. Tsarenkova, M. Jarocka // Economics and Management : Quarterly Journal of the Faculty of Management. – 2015. – Vol. 7. – Iss. 1. – P. 145–156.
14. Isaac, P. Shortest path problem with arc failure scenario / P. Isaac, A. M. Campbell // EURO Journal on Transportation and Logistics. – 2017. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 139–163. doi: 10.1007/s13676-015-0092-6.

І. М. ЦАРЕНКОВА^{1*}

^{1*}Каф. «Будівництво та експлуатація доріг», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +375 (29) 384 70 76, ел. пошта tsar_irina@mail.ru, ORCID 0000-0002-1401-7968

РОЗВИТОК СИСТЕМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ ПО АВТОМОБІЛЬНІЙ ДОРОЗІ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПІВ ЛОГІСТИКИ

Мета. У науковій роботі необхідно розглянути розвиток та адаптацію теоретико-методичних основ удосконалення логістичних систем доставки вантажів автомобільним транспортом в рамках наукового забезпечення процесів формування транспортно-логістичної системи країни. **Методика.** Теорія управління функціонуванням систем вимагає формалізації зв'язків усередині системи. Виконані якісна й кількісна характеристики сутності та встановлено закономірності взаємодії елементів у системі перевезення вантажів по автомобільній дорозі. Уточнено роль автомобільної дороги в транспортному забезпеченні та вплив транспортно-логістичного простору на саму дорогу в процесі її функціонування. При дослідженні цієї теми використано системний підхід, методи узагальнення та раціонального вирішення проблем, теорія масового обслуговування. **Результати.** В роботі автомобільна дорога представлена як елемент системи перевезення вантажів, що дозволить підвищити її економічну ефективність у постійно змінному середовищі транспортно-логістичного процесу.

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

тору за обраним критерієм – зниженні сукупних витрат за просування матеріального потоку. Теоретико-методичні основи вдосконалення логістичних систем доставки вантажів автомобільним транспортом полягають в обґрунтуванні застосування логістики як ефективного елемента керування, що дозволяє знижувати витрати, пов'язані з перевезенням вантажів. Вони відрізняються наявністю науково обґрунтованих методів розрахунку термінів і черговості виконання дорожніх робіт, логістичною інтеграцією підприємств, що беруть участь у перевезенні вантажів, структурою та обсягом матеріального та супутніх йому потоків, а також формуванням логістичного ланцюга просування. **Наукова новизна.** Автомобільна дорога представлена ланкою єдиного інтегрального процесу створення та управління матеріальними потоками. Пропонується формування елементів дорожньої та транспортної складових підсистем із їх подальшим об'єднанням в єдину систему перевезення вантажів автомобільними дорогами. Взаємозв'язки елементів системи формалізуються у вигляді розосередженої двоступінної системи масового обслуговування. Кожен із елементів системи оцінюється власними характеристиками. **Практична значимість.** Результати досліджень можуть використовуватися працівниками автотранспортних підприємств, служб підприємств, які відповідають за постачання виробництва й транспортування продукції, дорожніми організаціями для прийняття науково обґрунтованих рішень при формуванні програми дорожніх робіт із забезпечення альтернативних можливостей для раціональної організації перевезень вантажів.

Ключові слова: логістична система; логістичний потік; система масового обслуговування; транспортні витрати; ланцюги поставок

I. M. TSARENKOVA

¹ Dep. «Construction and Operation of Roads», Belarusian State University of Transport, Kirova St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653, tel. +375 (29) 384 70 76, e-mail tsar_irina@mail.ru, ORCID 0000-0002-1401-7968

DEVELOPMENT OF CARGO TRANSPORTATION SYSTEM BY ROAD ON THE BASIS OF LOGISTICS PRINCIPLES

Purpose. The article is aimed to develop and adapt the theoretical and methodological foundations for improving logistics system of cargo delivery by road transport in the framework of the scientific support of formation processes of transport-logistical system of the country. **Methodology.** The theory of system functioning control requires formalization of connections within the system. The qualitative and quantitative characteristics of entity were performed and the regularities of elements interaction in the system of road goods transportation were found out. The role of the road in transport industry and the influence of transportation and logistics space on the road itself in the process of its functioning were clarified. In the study of this topic the system approach, methods of synthesis and rational problem solving, theory of mass service were used. **Findings.** The work presents the highway as an element of the cargo transportation system that will make it possible to increase its economic efficiency in a constantly changing environment of transportation and logistics space according to the chosen criterion, the lower total costs to promote material flow. Theoretical-methodological bases of perfection of logistics system of cargo delivery by road transport include substantiation for the use of logistics as an effective control element to reduce the costs associated with goods transportation. They are distinguished by the presence of evidence-based methods for calculating the timing and sequence of execution of road works, logistic integration involved in the carriage of goods of the enterprises, structure and volume of material and accompanying flows and the formation of the logistics chain of its promotion. **Originality.** The road is represented by the link of single integral process of creation and management of the material flows. We propose formation of sub-system of the elements of road and transportation components with their further unification by a single road transportation system. Inter-connected elements of the system are formalized in the form of dispersed two-phase system of mass service. Each element of the system is evaluated by its own characteristics. **Practical value.** The practical significance of research consists in possibility of their use by employees of motor transport enterprises, service enterprises, responsible for procurement of production and transportation of products, travel agencies to make science-based decisions in forming the program of road works and to provide alternative opportunities for the rational organization of cargo transportation.

Keywords: logistics system; logistics flow; queuing system; transport costs; supply chains

REFERENCES

1. Borisova, L. P. (2013). Major problems and prospects of development of transport logistics in Ukraine. *Economy. Management. Innovations*, 2, 104-113.
2. The state program of development of transport complex of the Republic of Belarus for 2016-2020, approved. Resolution Orls. Min-s Resp. Belarus April 28 2016 No. 345 (2016). Retrieved from <http://pravo.by/>
3. Domnina, S. V., & Fedorenko, A. I. (2014). In the development of the market of transport and logistics services in the countries – members of the Eurasian economic Union. *Logistics Today*, 6, 25-43.
4. Zack, J. A. (2017). Transportation problem under stochastic data on the cost of delivery of goods. *Logistics Today*, 2, 18-27.
5. Ivut, R. B., Zubritsky, A. F., & Zinevich, A. C. (2015). Transit capacity development in the Republic of Belarus in the context of its transport-logistical system formation. *News of Science and Technology*, 1 (32), 19-33.
6. Kolodizieva, T. O., & Rudenko, H. R. (2012). *Metodychne zabezpechennia otsinky efektyvnosti lohistychnoi diialnosti pidpriemstv*. Kharkiv: Kharkiv National Economic University.
7. Kuznetsova, O. V. (2017). Tsyepi postavok i funktzii logistiki v upravlenii imi na pryedpriyatiakh. Retrieved from <http://www.dvgups.ru/science-and-innovation/conferences/m-e-r-v-k-g/2090-kuznecova-ov>
8. Tereshkina, T. R., Baranova, L. E., Voinov, L. V., Pogoreltsev, Y. A., Shaner, N. Y., & Klunko, A. N. (2011). *Logistika i upravleniye tsepyami postavok* [Monograph]. Saint Petersburg: Saint Petersburg State Technological University of Plant Polymers.
9. Baginova, V. V., Fedorov, L. S., Andreeva, L. A., Kreneva, G. V., & Sysoeva, Y. A. (2016). *Logistics*. Moscow: RUSYNS.
10. Matyushin, L. N. (2016). Contemporary logistics problems in the transportation sphere. *Logistics*, 11, 44-47.
11. Kravchenko, S. Y., Reut, Z. V., Sobolevskaya, S. N., Igoshkin, D. G., & Gurbo, N. M. (2013). *Soderzhanie i remont avtomobilnykh dorog: posobie nachalniku lineynoy dorozhnoy distantsii i dorozhnomu masteru po remontu i sodержaniyu avtomobilnykh dorog*. Minsk: BNTU.
12. Arvis, J.-F., Saslavsky, D., Ojala, L., Shepherd, B., Busch, C., & Raj, A. (2014). *Connecting to Compete 2014: Trade Logistics in the Global Economy: The Logistics Performance Index and Its Indicators*. Washington: The International Bank for Reconstruction and Development. Retrieved from <http://worldbank.org/content/dam/Worldbank/document/Trade/LPI2014.pdf>
13. Ivuts, R., Tsarenkova I., & Jarocka M. (2015). Economic ways of increasing efficiency of road-building planning. *Economics and Management: Quarterly Journal of the Faculty of Management*, 7(1), 145-156.
14. Isaac, P., & Campbell, A. M. (2017). Shortest path problem with arc failure scenario. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 6(2), 139-163. doi:10.1007/s13676-015-0092-6

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Н. Б. Курганом (Украина); канд.экон.н., проф. В. Г. Гизатуллиной (Республика Беларусь)

Поступила в редколлегию: 08.06.2017

Принята к печати: 14.09.2017

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.432:62–593

А. О. СУЛИМ^{1*}, С. О. МУЖИЧУК², П. О. ХОЗЯ³, О. О. МЕЛЬНИК⁴, В. В. ФЕДОРОВ⁵

^{1*}Науково-дослідна лабораторія електротехнічних, динамічних, теплотехнічних та міцносних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, ел. пошта sulim1.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8144-8971

²Публічне акціонерне товариство «Крюківський вагонобудівний завод», вул. І. Приходька, 139, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (067) 535 64 96, ел. пошта zgk_metro@kvsz.com, ORCID 0000-0002-2653-1622

³Науково-дослідна лабораторія електротехнічних, динамічних, теплотехнічних та міцносних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, ел. пошта pavel.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8948-6032

⁴Науково-дослідна лабораторія електротехнічних, динамічних, теплотехнічних та міцносних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, ел. пошта shurik110982@gmail.com, ORCID 0000-0001-8964-4790

⁵Науково-дослідна лабораторія вантажного та спеціального рухомого складу, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (053) 666 13 84, ел. пошта F.vladimir.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0963-7265

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ШТАТНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ З СИСТЕМАМИ РЕКУПЕРАЦІЇ

Мета. За результатами аналізу існуючих досліджень встановлено, що на даний час проблема підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену стає особливо актуальною та потребує своєчасного вирішення. Відомо, що впровадження систем рекуперативного гальмування на рухомому складі дозволить в значній мірі вирішити цю проблему. Обґрунтовано, що одним із ключових питань при впровадженні вищезазначених систем залишаються дослідження з ефективності використання електроенергії рекуперативного гальмування. **Мета роботи** – оцінка кількості надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування під час штатних умов експлуатації рухомого складу з системами рекуперації для аналізу резерву енергозбереження. **Методика.** Використовуючи результати експериментальних досліджень енергообмінних процесів під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації, а також застосовуючи статистичні методи обробки даних, визначено кількісні показники електроенергії, спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі та виділеної на гальмівних резисторах (надлишкової). **Результати.** За аналізом результатів досліджень під час заданих штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену на Святошинсько-Броварській лінії КП «Київський метрополітен» встановлено наступне: 1) впровадження систем рекуперації на рухомому складі дозволяє повернути в контактну мережу на рівні 17,9–23,2 % електроенергії, що споживається на тягу; 2) існують резерви підвищення енергоефективності рухомого складу з системами рекуперації на рівні 20,2–29,9 % електроенергії, що споживається на тягу. **Наукова новизна.** Вперше обґрунтовано, що найбільш вагомим фактором, який здійснює вплив на кількісні показники електроенергії рекуперації, є профіль колії. Запропоновано в якості кількісної оцінки застосовувати коефіцієнти, які показують кількість та резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії. Дістали подальшого розвитку дослідження з визначення кількісних показників електроенергії рекуперації для аналізу резервів енергозбереження. **Практична значимість.** Отримані кількісні показники надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування можуть бути використані під час створення нового або модернізації існуючого рухомого складу метрополітену у випадку розробки енергоефективного технічного рішення для утилізації, збереження та акумулювання цієї електроенергії.

Ключові слова: рекуперативне гальмування; рухомий склад метрополітену; система рекуперації; енергозбереження; енергоефективність

Вступ

Метрополітен є одним з найважливіших засобів забезпечення мобільності населення великих міст. У зв'язку з постійним підвищенням кількості транспортних засобів у містах з населенням більше ніж 1 млн чоловік тільки метрополітен здатний вирішити проблему мобільності населення. Однак, за наявності ряду позитивних якостей метрополітену, таких як забезпечення високої мобільності перевезень, екологічність, збереження архітектури міста, має місце і негативний фактор – значне споживання електроенергії. Тому, починаючи з впровадження перших метрополітенів, ведуться роботи зі зменшення витрат електроенергії метрополітену.

Від того, наскільки ефективно експлуатується метрополітен, залежать обсяги перевезень, витрати за спожиту електроенергію та собівартість транспортних послуг, що представляються населенню. В умовах збільшення пасажироперевезень та постійного підвищення тарифів на електроенергію, зниження енергоспоживання даним видом транспорту стає особливо актуальним [16].

Вирішенню низки питань з енергозбереження на міському електричному транспорті, зокрема на метрополітені, присвячені роботи багатьох вітчизняних та іноземних вчених [1–9, 12–20].

З аналізу зазначених досліджень відомо, що один з ефективних заходів зі зниження споживання електроенергії на тягу – використання систем рекуперативного гальмування на рухомому складі. За результатами деяких досліджень [1–9, 12–20] встановлено, що впровадження систем рекуперації на рухомому складі метрополітену дозволить скоротити до 40 % електроенергії, що витрачається на тягу. Проте з аналізу досліджень [1–9] встановлено, що ефективність використання електроенергії рекуперативного гальмування залежить від багатьох факторів. Серед основних можна виділити наступні: інтенсивність руху в зоні рекуперації, режим руху інших споживачів електроенергії, відстань між станціями та профіль колії. Як наслідок, використання електроенергії рекуперативного гальмування має імовірнісний характер.

До недавнього часу рухомий склад вітчизняних метрополітенів не був обладнаний системами рекуперації, як наслідок, не було можливості генерації електроенергії в контактну мережу і вона повністю розсіювалась у вигляді теплоти на гальмівних резисторах. В останні роки, з метою скорочення споживання електроенергії на тягу, метрополітенами України поступово вводиться в експлуатацію новостворений та модернізований рухомий склад. Головними відмінностями даного рухомого складу є впровадження енергозберігаючого обладнання та технологій, насамперед систем рекуперації.

При впровадженні систем рекуперації на рухомому складі метрополітену одним з ключових питань є оцінка кількості надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування під час його реальних умов експлуатації. Актуальність вирішення даного питання обумовлена необхідністю визначення реальної ефективності від застосування зазначених систем на рухомому складі метрополітену.

Слід зазначити, що в низці досліджень проводилась така оцінка реальної ефективності від впровадження систем рекуперації на рухомому складі. У роботах [7, 9] виконано оцінку можливої кількості заощадженої електроенергії для реальних умов експлуатації рухомого складу з реостатним гальмуванням в КП «Дніпропетровський метрополітен»; у роботі [14] – у Московському метрополітені. Зазначені дослідження здійснювалися на рухомому складі метрополітену без можливості генерації електроенергії до контактної мережі. За результатами цих досліджень встановлено, що в режимі реостатного гальмування утилізується 15–52 % електроенергії, яка витрачається на тягу поїздів. У роботах [1, 3, 4, 12, 20] оцінка виконувалась для рухомого складу метрополітену з встановленими на ньому системами рекуперації. У зазначених дослідженнях оцінка здійснювалась для рухомого складу метрополітену без урахування реальних умов експлуатації (зміни профілю колії, завантаження вагонів, графіку руху тощо). За результатами аналізу дослідження [3] встановлено, що впровадження систем рекуперації на вагонах моделей 81.715, 81.716 в умовах їх експлуатації на одній з ліній Московського метрополітену з максимальним завантаженням вагонів дозволяє заощадити в середньому 9,4 % від

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

всієї електроенергії, яка витрачається на тягу поїздів.

Таким чином, результати досліджень [1–9, 12–20] не дають змогу оцінити ефективність від впровадження систем рекуперації на рухомому складі в повному обсязі. Зокрема, відсутні дослідження з оцінки ефективності зазначених систем під час зміни штатних умов експлуатації. Отже, вищезазначене питання залишається маловивченим і актуальним.

Мета

Оцінка кількості надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації для аналізу резервів енергозбереження.

Методика

Дослідження енергообмінних процесів виконано на Святошинсько-Броварській лінії КП «Київський метрополітен» під час типових штатних умов експлуатації рухомого складу з системами рекуперації протягом доби. Під типовими штатними умовами експлуатації маються на увазі наступні режими: максимальне завантаження з дотриманням «непікового» та «пікового» графіків руху, номінальне завантаження з дотриманням «непікового» та «пікового» графіків руху, мінімальне завантаження (зайняті сидячі місця) з дотриманням «непікового» графіку руху. Рухомий склад представляє собою п'ятивагонний модернізований поїзд з асинхронним тяговим приводом, в якому головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні.

Дослідження проведено з використанням вимірювальної системи, що встановлена на модернізованому поїзді. Вимірювальна система розроблена спеціалістами ДП «УкрНДІВ» для дослідження енергообмінних процесів між контактною мережею та поїздом в реальних умовах його експлуатації. До складу вимірювальної системи входять: персональний комп'ютер, аналого-цифровий перетворювач, блок комутації, блок узгодження та вимірювальні датчики. Обробка даних на персональному комп'ютері здійснюється за допомогою атестованого програмного забезпечення «ЕЛЕКТРО» [10]. Вимі-

рювальна система передбачає отримання, відображення та збереження даних вимірювальних датчиків, які встановлені на дослідному поїзді.

Графіки напруги контактної мережі та струму у вагоні поїзда метрополітену під час здійснення рекуперативного гальмування зображені на рис. 1. Осцилограми напруги контактної мережі (на струмоприймачі), струму та швидкості руху поїзда при його експлуатації з максимальним завантаженням між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії за умов дотримання «непікового» графіку руху приведені на рис. 2–3. Аналогічним чином було отримано осцилограми для інших заданих умов ведення поїзда (максимальне завантаження з дотриманням «пікового» графіка руху, номінальне завантаження з дотриманням «непікового» та «пікового» графіків руху, мінімальне завантаження з дотриманням «непікового» графіку руху.) Також для зазначених штатних умов експлуатації були отримані осцилограми напруги на гальмівних резисторах та струму, який розсіяно у вигляді теплоти на гальмівних резисторах. Таким чином, за допомогою вимірювальної системи було зафіксовано з частотою дискретизації 2,5 кГц напругу на струмоприймачі $u(t)$, струм поїзда в режимах тяги та рекуперативного гальмування $i(t)$; напругу на гальмівних резисторах $u_{3R}(t)$, струм на гальмівних резисторах $i_R(t)$, а також швидкість руху поїзда $v(t)$.

За результатами обробки масивів даних, що отримані під час типових штатних умов експлуатації рухомого складу з системами рекуперації визначені наступні показники: середні значення напруги контактної мережі в режимах тяги і рекуперативного гальмування ($U_{\text{сер.тяги}}$, $U_{\text{сер.рек}}$); середнє значення струму в режимах тяги поїзда ($I_{\text{сер.тяги}}$); середнє значення струму, що генерується поїздом до контактної мережі під час рекуперативного гальмування ($I_{\text{сер.рек}}$); середнє значення напруги на гальмівних резисторах ($U_{\text{сер.R}}$); середнє значення струму, що розсіяється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах в режимі рекуперативного гальмування ($I_{\text{сер.R}}$); час руху в режимах тяги та рекуперативного гальмування ($t_{\text{тяги}}$, $t_{\text{рек}}$), а також середню експлуатаційну швидкість на перегоні ($V_{\text{сер.екс}}$).

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

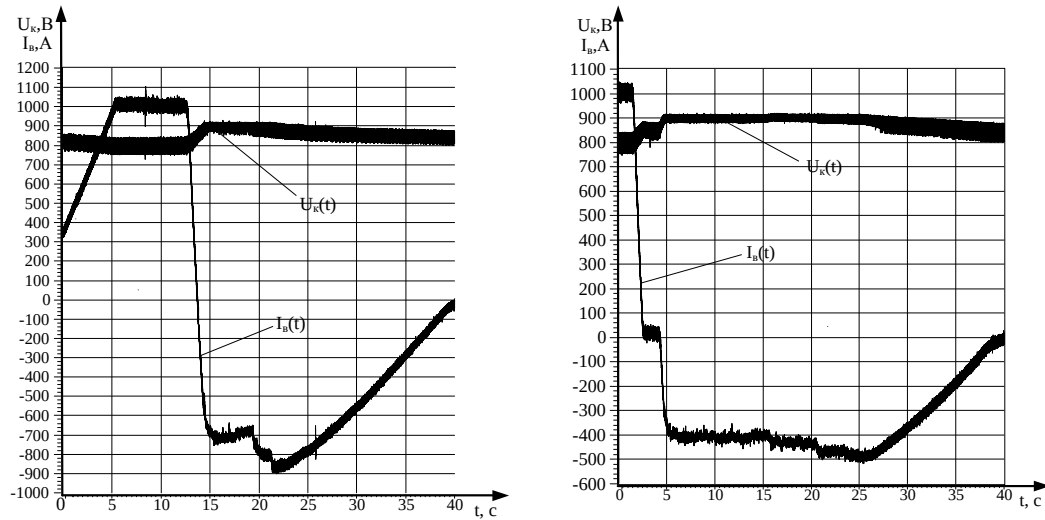


Рис. 1. Графіки напруги контактної мережі та струму вагона поїзда метрополітену під час здійснення рекуперативного гальмування

Fig. 1. Graphs of the contact network voltage and the train car current in the subway when performing regenerative braking

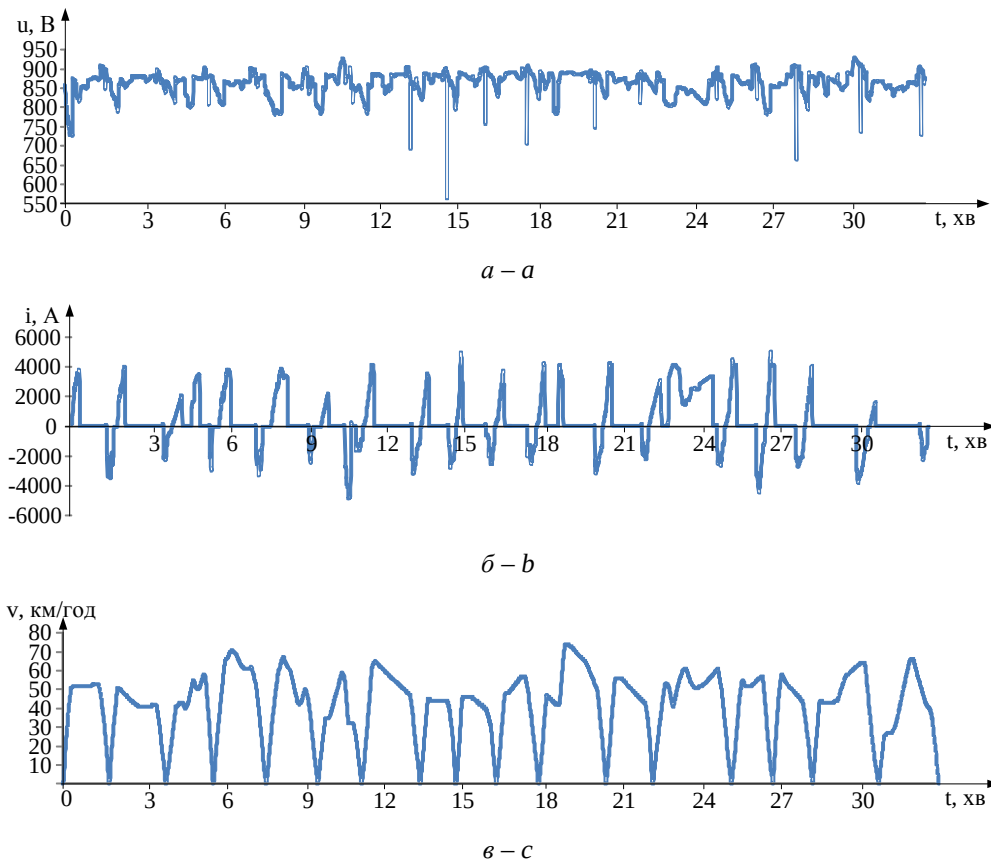


Рис. 2. Осцилограми напруги: *a* – на струмоприймачі; *b* – струму поїзда; *в* – та швидкості руху поїзда під час його експлуатації між станціями «Лісова–Академмістечко»

Fig. 2. Oscillograms of voltage: *a* – on current collectors; *b* – train current; *c* – and the speed of the train (in) when its operation between stations «Lisova–Akademmistechko»

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

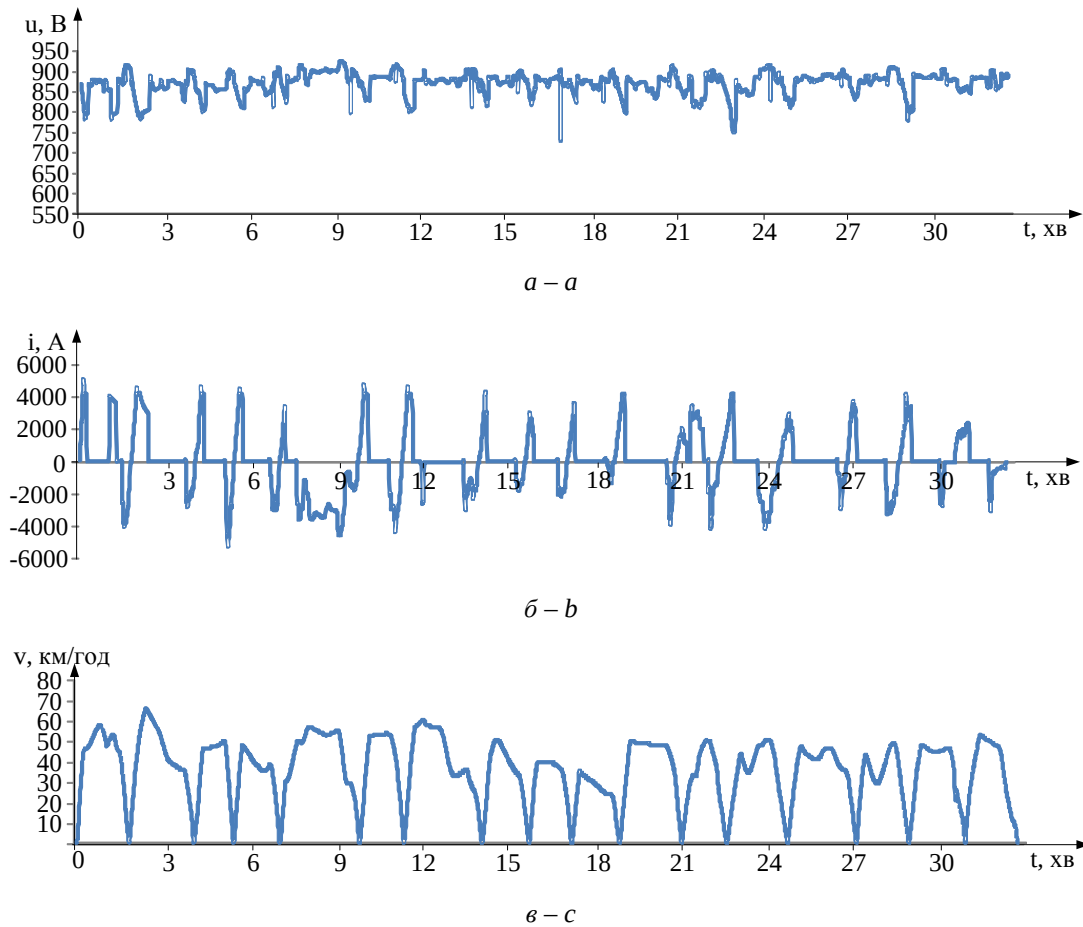


Рис. 3. Осцилограми: *a* – напруги на струмоприймачі; *б* – струму поїзда; *в* – та швидкості руху поїзда під час його експлуатації між станціями «Академмістечко–Лісова»

Fig. 3. Oscillograms: *a* – voltage on current collectors; *b* – train current; *c* – and the speed of the train (in) when its operation between stations «Akademmistechko–Lisova»

За визначеними значеннями величин в процесі обробки масивів даних розраховано наступні енергетичні показники: кількість спожитої електроенергії в режимах тяги ($A_{\text{тяги}}$); кількість електроенергії, що генерується до контактної мережі ($A_{\text{рек}}$); кількість електроенергії, що виділяється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах (A_R); коефіцієнт рекуперації ($k_{\text{рек}}$); коефіцієнт, який показує кількість невикористаної (надлишкової) електроенергії (k_R); коефіцієнт, який показує резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії рекуперативного гальмування (k_T).

Кількість електроенергії, що споживається в режимах тяги, розраховується за формулою [7, 9, 11]:

$$A_{\text{тяги}} = \frac{U_{\text{сер.тяги}} \cdot I_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3600 \cdot 1000}. \quad (1)$$

Кількість електроенергії, що генерується до контактної мережі, розраховується за формулою [5]:

$$A_{\text{рек}} = \frac{U_{\text{сер.рек}} \cdot I_{\text{сер.рек}} \cdot t_{\text{рек}}}{3600 \cdot 1000}. \quad (2)$$

Кількість електроенергії, що виділяється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах (надлишкова енергія), розраховується за формулою [5, 11]:

$$A_R = \frac{U_{\text{сер.Р}} \cdot I_{\text{сер.Р}} \cdot t_{\text{рек}}}{3600 \cdot 1000}. \quad (3)$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Коефіцієнт рекуперації визначається за відношенням згенерованої електроенергії до контактної мережі під час рекуперативного гальмування до спожитої електроенергії в режимі тяги [7]:

$$k_{\text{рек}} = \frac{A_{\text{рек.}}}{A_{\text{тяги}}} \quad (4)$$

Коефіцієнт, який показує кількість невикористаної (надлишкової) електроенергії під час рекуперативного гальмування визначається за наступним відношенням:

$$k_R = \frac{A_R}{(A_{\text{рек.}} + A_R)} \quad (5)$$

Коефіцієнт, який показує резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії рекуперативного гальмування:

$$k_r = \frac{A_R}{A_{\text{тяги}}} \quad (6)$$

Крім того, для кожного штатного режиму експлуатації поїзда між кінцевими станціями визначались питомі витрати електроенергії на тягу без урахування та з урахуванням електроенергії рекуперації.

Питомі витрати електроенергії на тягу визначаються за формулою [5, 11]:

$$a_{\text{пит}} = \frac{U_{\text{сер.тяги}} \cdot I_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3600 \cdot m \cdot L}, \quad (7)$$

де m – маса поїзда; L – довжина ділянки.

Питомі витрати електроенергії на тягу з урахуванням електроенергії рекуперації визначаються за формулою [5]:

$$a_{\text{пит.рек}} = \frac{U_{\text{сер.тяги}} \cdot I_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3600 \cdot m \cdot L} - \frac{U_{\text{сер.рек}} \cdot I_{\text{сер.рек}} \cdot t_{\text{рек}}}{3600 \cdot m \cdot L} \quad (8)$$

Результати

Результати розрахунків, виконаних за виразами (1)–(6), наведено в табл. 1–2.

Кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі та виділеної на гальмівних резисторах електроенергії, а також їх відношення під час заданих штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену до систем рекуперації між кінцевими станціями «Лісова–Академмістечко–Лісова», зображено у вигляді діаграм на рис. 4–8.

Результати розрахунків питомих витрат на тягу для штатних режимів експлуатації поїзда приведено в табл. 3.

Таблиця 1

Результати розрахунків енергетичних показників при «піковому» графіку руху поїзда

Table 1

Calculations results of energy indices at the «peak» schedule of train movement

Досліджувана ділянка	Номінальне/максимальне завантаження поїзда (кількість енергії та поправочні коефіцієнти)					
	$A_{\text{тяги}}$ кВт·год	$A_{\text{рек}}$ кВт·год	A_R кВт·год	$k_{\text{рек}}$	k_R	k_r
Лісова–Чернігівська	12,28/14,6	3,29/2,32	5,21/7,74	0,27/0,16	0,61/0,77	0,42/0,53
Чернігівська–Дарниця	15,34/15,92	4,94/3,57	1,33/4,1	0,32/0,22	0,21/0,53	0,09/0,26
Дарниця–Лівобережна	13,65/13,63	3,4/3,56	2,67/3,09	0,25/0,26	0,44/0,46	0,2/0,23
Лівобережна–Гідропарк	14,26/18,68	5,03/3,63	3,56/6,88	0,35/0,19	0,41/0,65	0,25/0,37
Гідропарк–Дніпро	23,71/23,52	5,25/3,14	3,04/4,93	0,22/0,13	0,37/0,61	0,13/0,21

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Закінчення таблиці 1

End of table 1

Досліджувана ділянка	Номінальне/максимальне завантаження поїзда (кількість енергії та поправочні коефіцієнти)					
	$A_{\text{тяги}}$ кВт·год	$A_{\text{рек}}$ кВт·год	A_R кВт·год	$k_{\text{рек}}$	k_R	k_r
Дніпро–Арсенальна	3,38/2,28	4,28/3,21	4,17/5,01	1,27/1,41	0,49/0,61	1,23/2,2
Арсенальна–Хрещатик	13,92/13,94	1,49/1,82	3,1/5,05	0,11/0,13	0,68/0,74	0,22/0,36
Хрещатик–Театральна	11,06/14,18	3,77/1,84	1,52/5,85	0,34/0,13	0,29/0,76	0,14/0,41
Театральна–Університет	11,3/13,55	2,79/2,4	0,85/3,02	0,25/0,18	0,23/0,45	0,08/0,22
Університет–Вокзальна	9,3/14,45	2,94/0,95	0,21/5,59	0,32/0,07	0,07/0,85	0,02/0,39
Вокзальна–КПП	14,4/20,53	0,88/2,1	2,1/4,38	0,06/0,1	0,7/0,68	0,15/0,21
КПП–Шулявська	15,78/18,37	3,76/4,46	0,68/2,85	0,24/0,24	0,15/0,4	0,04/0,16
Шулявська–Берестейська	79,27/84,09	3,35/2,58	0,16/2,94	0,04/0,03	0,05/0,55	0/0,03
Берестейська–Нивки	15,78/21,82	4,22/7,08	3,14/4,56	0,27/0,32	0,43/0,39	0,2/0,21
Нивки–Святошин	13,15/9,66	2,42/2,09	0,94/1,17	0,18/0,22	0,28/0,36	0,07/0,12
Святошин–Житомирська	6,04/11,95	5,47/3,56	3,08/8,7	0,91/0,3	0,36/0,71	0,51/0,73
Житомирська–Академістечко	4,98/4,15	1,31/2,89	3,03/0,78	0,26/0,7	0,7/0,21	0,61/0,19
Академістечко–Житомирська	24,22/25,22	0,96/1,51	5,79/5,84	0,04/0,06	0,86/0,79	0,24/0,23
Житомирська–Святошин	24,14/25,92	3,44/3,17	3,61/0,85	0,14/0,12	0,51/0,21	0,15/0,03
Святошин–Нивки	14,15/12,05	8,25/2,09	1,93/5,59	0,58/0,17	0,19/0,73	0,14/0,46
Нивки–Берестейська	15,5/17,85	2,68/0,78	4,33/7,89	0,17/0,04	0,62/0,91	0,28/0,44
Берестейська–Шулявська	4,69/5,72	21,15/13,08	23,2/32,28	4,51/2,29	0,52/0,71	4,95/5,64
Шулявська–КПП	9,28/17,83	1,26/4,04	3,93/5,82	0,14/0,23	0,76/0,59	0,42/0,33
КПП–Вокзальна	14,85/16,2	2,69/4,0	2,32/2,35	0,18/0,25	0,46/0,37	0,16/0,15
Вокзальна–Університет	8,08/10,44	1,49/3,15	0,66/0,74	0,18/0,3	0,31/0,19	0,08/0,07
Університет–Театральна	8,18/10,39	1,53/2,44	0,82/1,53	0,19/0,23	0,35/0,39	0,1/0,15
Театральна–Хрещатик	11,44/12,93	0,5/1,73	3,64/3,76	0,04/0,13	0,88/0,68	0,32/0,29
Хрещатик–Арсенальна	12,58/13,88	1,72/3,97	1,62/0,86	0,14/0,29	0,49/0,18	0,13/0,06
Арсенальна–Дніпро	22,42/22,32	1,73/0,67	2,62/3,11	0,08/0,03	0,6/0,82	0,12/0,14
Дніпро–Гідропарк	13,1/15,91	2,33/3,49	8,88/10,2	0,18/0,22	0,79/0,75	0,68/0,64
Гідропарк–Лівобережна	13,1/17,75	1,83/3,17	1,29/2,47	0,14/0,18	0,41/0,44	0,1/0,14
Лівобережна–Дарниця	12,45/12,83	3,84/2,58	3,37/4,52	0,31/0,2	0,47/0,64	0,27/0,35
Дарниця–Чернігівська	11,34/11,0	3,11/1,0	2,8/4,19	0,27/0,09	0,47/0,81	0,25/0,38
Чернігівська–Лісова	16,28/15,4	2,08/1,76	4,22/4,24	0,13/0,11	0,67/0,71	0,26/0,28

Таблиця 2

Результати розрахунків енергетичних показників при «непіковому» графіку руху поїзда

Table 2

Calculations results of energy indices at the «off-peak» schedule of train movement

Досліджувана ділянка	Мінімальне/номінальне/максимальне завантаження поїзда та відповідні коефіцієнти					
	$A_{\text{тяги}}$ кВт·год	$A_{\text{рек}}$ кВт·год	A_R кВт·год	$k_{\text{рек}}$	k_R	k_r
Лісова– Чернігівська	7,17/9,68/8,46	0,86/2,92/ 1,05	1,98/1,84/ 4,28	0,12/0,3/ 0,12	0,7/0,39/ 0,8	0,28/0,19/ 0,51
Чернігівська– Дарниця	6,45/10,48/11,11	1,76/2,13/ 1,91	1,74/0,57/ 2,19	0,27/0,2/ 0,17	0,5/0,21/ 0,53	0,27/0,05/ 0,2
Дарниця– Лівобережна	7,89/16,44/8,98	2,45/0,81/ 1,85	0,63/0,42/ 1,64	0,31/0,05/ 0,21	0,2/0,34/ 0,47	0,08/0,03/ 0,18
Лівобережна– Гідропарк	7,35/15,24/9,8	1,13/3,1/ 1,23	1,98/1,08/ 4,7	0,15/0,2/ 0,13	0,64/0,26/ 0,79	0,27/0,07/ 0,48
Гідропарк– Дніпро	13,61/22,82/21,81	0,52/1,93/ 2,01	1,5/0,5/4,74	0,04/0,08/ 0,09	0,74/0,21/ 0,7	0,11/0,02/ 0,22
Дніпро– Арсенальна	3,64/4,63/3,48	2,72/3,43/ 5,36	3,16/6,25/ 3,61	0,75/0,74/ 1,54	0,54/0,65/ 0,4	0,87/1,35/ 1,04
Арсенальна– Хрещатик	8,76/12,03/12,77	1,0/2,85/ 3,13	1,35/1,64/ 1,76	0,11/0,24/ 0,25	0,57/0,37/ 0,36	0,15/0,14/ 0,14
Хрещатик– Театральна	4,87/8,18/8,25	1,09/3,04/ 2,0	0,93/1,13/ 2,11	0,22/0,37/ 0,24	0,46/0,27/ 0,51	0,19/0,14/ 0,26
Театральна– Університет	5,91/8,14/9,2	1,12/2,14/ 1,64	1,13/1,07/ 2,5	0,19/0,26/ 0,18	0,5/0,33/ 0,6	0,19/0,13/ 0,27
Університет– Вокзальна	6,22/8,47/9,85	0,32/1,62/ 1,46	1,52/1,4/ 2,43	0,05/0,19/ 0,15	0,83/0,46/ 0,62	0,24/0,17/ 0,25
Вокзальна–КПП	10,84/16,19/16,75	2,2/3,8/2,54	1,13/0,96/ 2,2	0,2/0,23/ 0,15	0,34/0,2/ 0,46	0,1/0,06/ 0,13
КПП–Шулявська	8,68/11,67/13,05	1,91/2,74/ 3,89	0,75/0,67/ 0,86	0,22/0,23/ 0,3	0,28/0,2/ 0,18	0,09/0,06/ 0,07
Шулявська– Берестейська	52,39/78,21/81,31	1,19/2,95/ 3,64	2,29/1,13/ 0,65	0,02/0,04/ 0,04	0,66/0,28/ 0,15	0,04/0,01/ 0,01
Берестейська– Нивки	8,81/11,96/17,68	1,61/3,47/ 4,73	1,58/3,69/ 4,31	0,18/0,29/ 0,27	0,5/0,52/ 0,48	0,18/0,31/ 0,24
Нивки– Святошин	9,07/13,61/13,69	0,33/0,65/ 2,56	2,11/2,99/ 1,2	0,04/0,05/ 0,19	0,86/0,82/ 0,32	0,23/0,22/ 0,09
Святошин– Житомирська	5,34/7,83/6,25	0,69/1,05/ 2,28	5,47/8,7/ 6,41	0,13/0,13/ 0,36	0,89/0,89/ 0,74	1,02/1,11/ 1,03

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Закінчення таблиці 2

End of table 2

Досліджувана ділянка	Мінімальне/номінальне/максимальне завантаження поїзда та відповідні коефіцієнти					
	$A_{\text{тяги}}$, кВт·год	$A_{\text{рек}}$, кВт·год	A_R , кВт·год	$k_{\text{рек}}$	k_R	k_r
Житомирська–Академмістечко	1,65/2,63/2,88	1,07/1,38/ 1,46	0,75/1,06/ 1,64	0,65/0,52/ 0,51	0,41/0,43/ 0,53	0,45/0,4/ 0,57
Академмістечко–Житомирська	15,17/22,04/19,03	1,59/1,16/ 2,34	2,02/4,38/ 1,44	0,1/0,05/ 0,12	0,56/0,79/ 0,38	0,13/0,2/ 0,08
Житомирська–Святошин	14,45/24,63/24,56	2,06/2,44/ 2,9	0,81/1,5/ 0,57	0,14/0,1/ 0,12	0,28/0,38/ 0,16	0,06/0,06/ 0,02
Святошин–Нивки	6,31/10,48/8,47	0,13/5,41/ 2,4	4,18/2,63/ 4,06	0,02/0,52/ 0,28	0,97/0,33/ 0,63	0,66/0,25/ 0,48
Нивки–Берестейська	11,07/11,43/13,39	3,23/3,75/ 4,43	1,99/1,69/ 1,92	0,29/0,33/ 0,33	0,38/0,31/ 0,3	0,18/0,15/ 0,14
Берестейська–Шулявська	4,94/5,14/5,11	13,9/21,25/ 20,98	11,4/23,01/ 24,95	2,81/4,13/ 4,11	0,45/0,52/ 0,54	2,31/4,48/ 4,88
Шулявська–КПП	7,53/14,01/11,78	1,58/2,46/ 2,63	0,7/5,74/ 3,97	0,21/0,18/ 0,22	0,2/0,7/0,6	0,09/0,41/ 0,34
КПП–Вокзальна	11,07/14,76/15,21	1,24/2,93/ 3,04	0,52/2,46/ 1,96	0,11/0,2/ 0,2	0,3/0,46/ 0,39	0,05/0,17/ 0,13
Вокзальна–Університет	6,86/8,04/8,15	1,13/1,49/ 1,86	0,77/0,84/ 0,67	0,16/0,19/ 0,23	0,41/0,36/ 0,26	0,11/0,1/ 0,08
Університет–Театральна	5,81/8,67/7,94	1,53/2,27/ 1,21	1,04/0,94/ 1,49	0,26/0,26/ 0,15	0,4/0,29/ 0,55	0,18/0,11/ 0,19
Театральна–Хрещатик	6,01/6,7/8,14	0,69/0,73/ 1,75	0,37/0,22/ 0,38	0,11/0,11/ 0,21	0,35/0,23/ 0,18	0,06/0,03/ 0,05
Хрещатик–Арсенальна	11,05/12,76/13,83	1,23/0,94/ 2,01	1,76/2,44/ 2,99	0,11/0,07/ 0,15	0,59/0,72/ 0,6	0,16/0,19/ 0,22
Арсенальна–Дніпро	15,76/22,94/23,13	1,5/2,97/ 1,44	1,1/1,6/3,06	0,1/0,13/ 0,06	0,42/0,35/ 0,68	0,07/0,07/ 0,13
Дніпро–Гідропарк	9,87/13,61/10,49	2,76/3,95/ 3,75	3,51/7,98/ 6,11	0,28/0,29/ 0,36	0,56/0,67/ 0,62	0,36/0,59/ 0,58
Гідропарк–Лівобережна	8,71/12,6/15,07	1,34/1,85/ 0,96	1,21/0,93/ 3,7	0,15/0,15/ 0,06	0,47/0,33/ 0,79	0,14/0,07/ 0,25
Лівобережна–Дарниця	7,32/10,44/9,96	0,88/1,4/ 1,89	2,81/4,29/ 3,53	0,12/0,13/ 0,19	0,76/0,75/ 0,65	0,38/0,41/ 0,35
Дарниця–Чернігівська	9,91/12,68/11,52	1,43/1,09/ 0,41	3,17/0,99/ 5,72	0,14/0,09/ 0,04	0,69/0,48/ 0,93	0,32/0,08/ 0,5
Чернігівська–Лісова	8,36/14,99/11,83	1,02/1,73/ 0,58	0,75/0,99/ 2,82	0,12/0,12/ 0,05	0,42/0,36/ 0,83	0,09/0,07/ 0,24

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

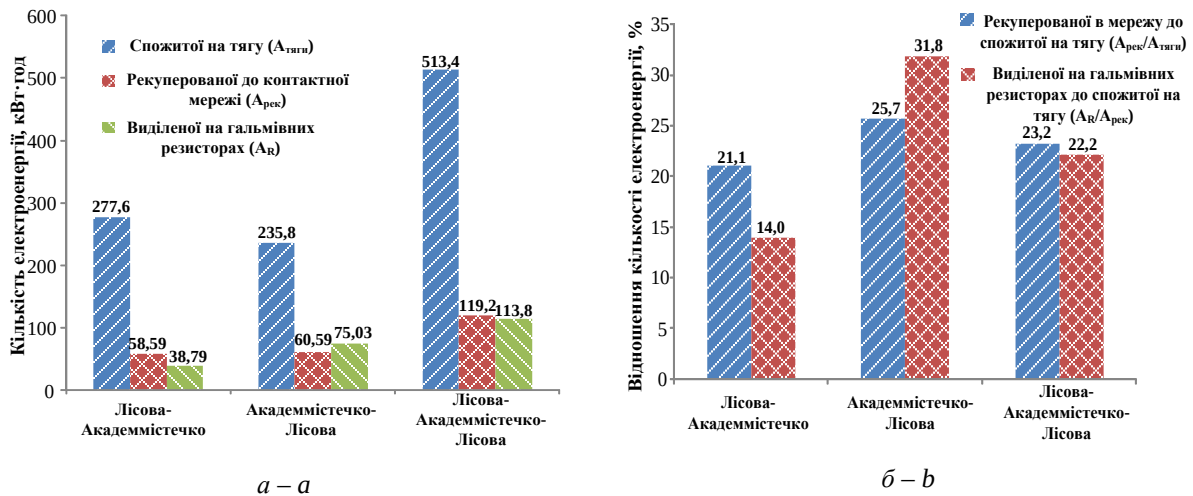


Рис. 4. Витрати енергії:

a – кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі і виділеної на гальмівних резисторах електроенергії; b – та співвідношення, видів енергії під час «пікового» графіку руху поїзда з номінальним завантаженням

Fig. 4. Energy consumption:

a – amount of energy for traction, recuperated to the contact net and dissipated in braking resistors; b – and their relation, types of energy at «peak» schedule of train movement with a nominal load

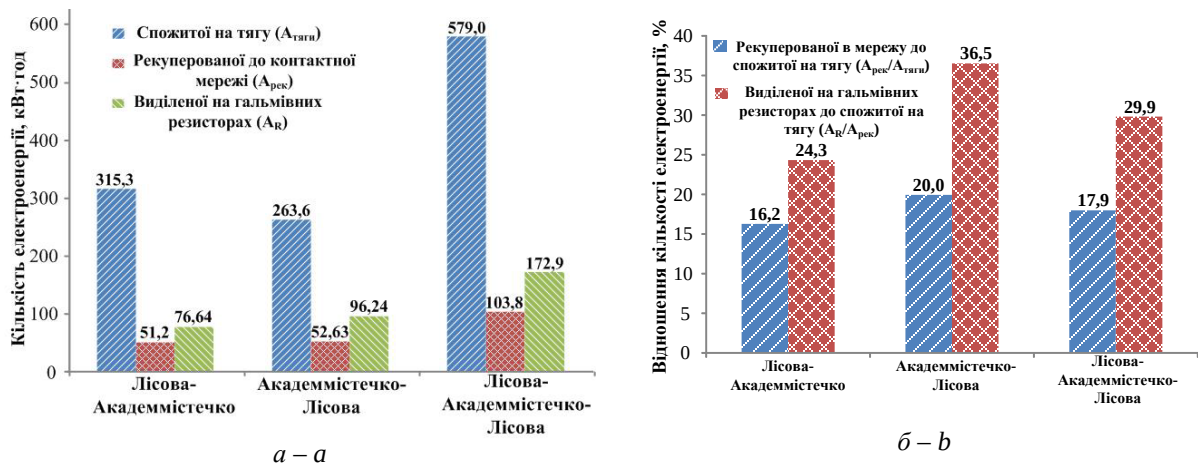


Рис. 5. Витрати енергії:

a – кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі і виділеної на гальмівних резисторах електроенергії; b – та співвідношення під час «пікового» графіку руху поїзда з максимальним завантаженням

Fig. 5. Energy consumption:

a – amount of energy for traction, recuperated to the contact net and dissipated in braking resistors; b – and their relation at the «peak» schedule of train movement with a maximum load

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

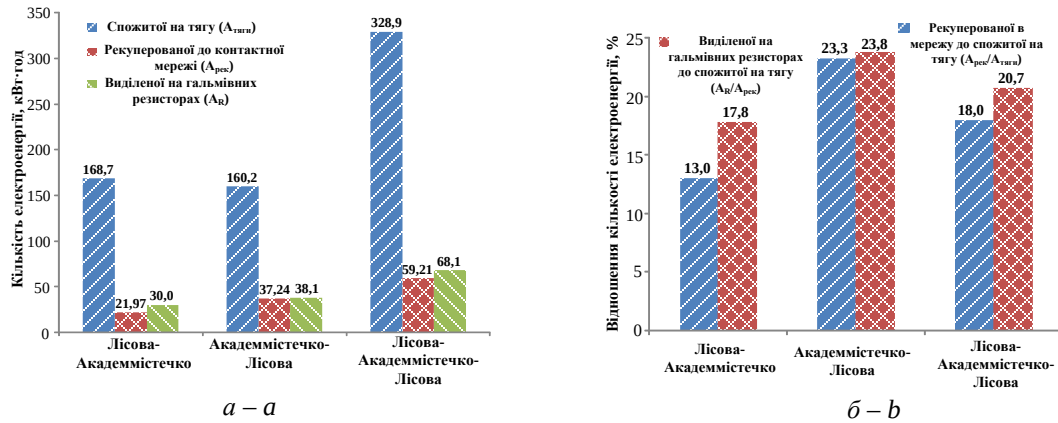


Рис. 6. Витрати енергії:

a – кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі і виділеної на гальмівних резисторах електроенергії; b – та їх відношення під час «непікового» графіку руху поїзда з мінімальним завантаженням

Fig. 6. Energy consumption:

a – amount of energy for traction, recuperated to the contact net and dissipated in braking resistors; b – and their relation at the «off-peak» schedule of train movement with a minimum load

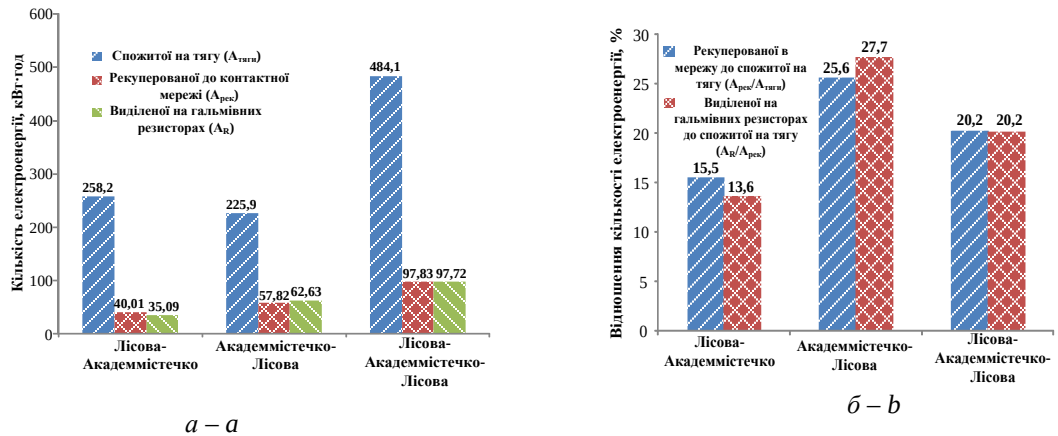


Рис. 7. Витрати енергії:

a – кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі і виділеної на гальмівних резисторах електроенергії; b – та їх відношення під час «непікового» графіку руху поїзда з номінальним завантаженням

Fig. 7. Energy consumption:

a – amount of energy for traction, recuperated to the contact net and dissipated in braking resistors; b – and their relation at the «off-peak» schedule of train movement with a nominal load

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

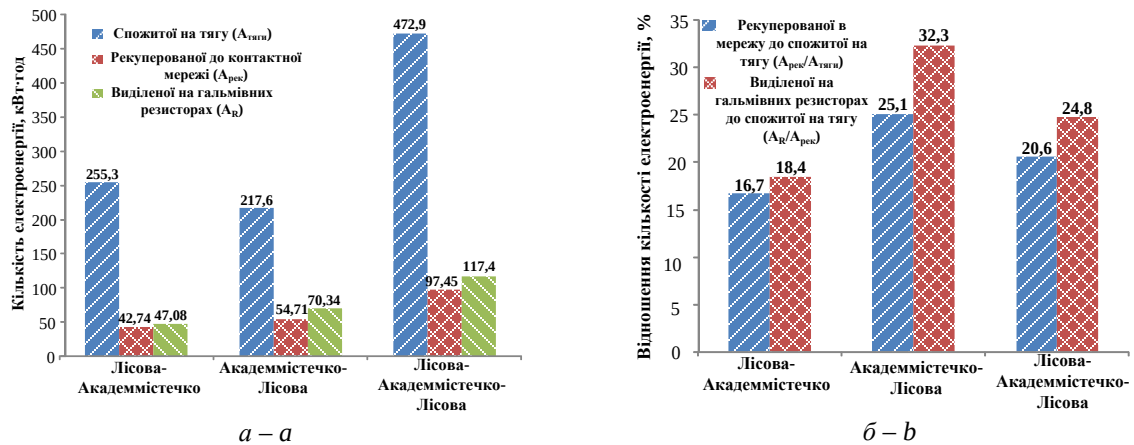


Рис. 8. Витрати енергії:
 а – кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі і виділеної на гальмівних резисторах електроенергії; б – та їх відношення під час «непікового» графіку руху поїзда з максимальним завантаженням

Fig. 8. Energy consumption:
 a – amount of energy for traction, recuperated to the contact net and dissipated in braking resistors; b – and their relation at the «off-peak» schedule of train movement with a maximum load

Таблиця 3

Результати розрахунків питомих витрат на тягу при «піковому» графіку руху поїзда

Table 3

Calculations results of specific costs for traction at the «peak» schedule of train movement

Досліджувана ділянка	Завантаження поїзда			
	Номінальне		Максимальне	
	$a_{\text{пит.т}}$ Вт·год/т·км	$a_{\text{пит.рек}}$ Вт·год/т·км	$a_{\text{пит.т}}$ Вт·год/т·км	$a_{\text{пит.рек}}$ Вт·год/т·км
Лісова–Академістечко	48,8	38,47	53,63	45,01
Академістечко–Лісова	43,16	32,45	41,02	32,18
Лісова–Академістечко–Лісова	45,29	34,76	48,96	40,22

Таблиця 4

Результати розрахунків питомих витрат на тягу при «непіковому» графіку руху поїзда

Table 4

Calculations results of specific costs for traction at the «off-peak» schedule of train movement

Досліджувана ділянка	Завантаження поїзда					
	Мінімальне		Номінальне		Максимальне	
	$a_{\text{пит.т}}$ Вт·год/т·км	$a_{\text{пит.рек}}$ Вт·год/т·км	$a_{\text{пит.т}}$ Вт·год/т·км	$a_{\text{пит.рек}}$ Вт·год/т·км	$a_{\text{пит.т}}$ Вт·год/т·км	$a_{\text{пит.рек}}$ Вт·год/т·км
Лісова–Академістечко	52,77	45,22	45,88	38,78	45,39	37,86
Академістечко–Лісова	45,64	34,82	39,69	29,76	36,21	27,07
Лісова–Академістечко–Лісова	48,15	39,56	43,13	35,06	39,91	31,76

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Як було вказано раніше, на кількість спожитої та рекуперованої електроенергії і, відповідно, на коефіцієнти рекуперації і кількості невикористаної (надлишкової) електроенергії в основному впливають такі фактори як профіль колії, графік руху (експлуатаційна швидкість), відстань між станціями, завантаженість вагонів.

Тому в даній роботі додатково здійснювався аналіз отриманих даних для визначення найбільш вагомого фактору впливу на кількість електроенергії рекуперації. Результати аналізу факторів, які впливають на кількість спожитої та рекуперованої електроенергії зображені в табл. 5.

Таблиця 5

Результати аналізу факторів

Table 5

Results of factors

Досліджувана ділянка	Незмінні умови	$A_{\text{тяги}},$ кВт·год	$(A_{\text{рек}} + A_R),$ кВт·год	$k_a = (A_{\text{рек}} + A_R) / A_{\text{тяги}}$
Змінна умова – профіль колії				
№ 1 Університет–Вокзальна Берестейська–Нивки	$S=1035$ м; $V_{\text{сер.екс}}=40$ км/год; $m=248,7$ т – номінальна завантаженість	8,47 11,97	3,01 7,16	0,36 0,6
№ 2 Дніпро–Арсенальна Арсенальна–Дніпро	$S=902$ м; $V_{\text{сер.екс}}=33$ км/год; $m=262$ т – максимальна завантаженість	3,48 23,13	8,97 4,57	2,58 0,2
№ 3 Гідропарк–Лівобережна Лівобережна–Гідропарк	$S=1640$ м; $V_{\text{сер.екс}}=44$ км/год; $m=262$ т – максимальна завантаженість	9,8 15,07	5,93 4,66	0,61 0,31
№ 4 КПП–Вокзальна Берестейська–Шулявська	$S=2230$ м; $V_{\text{сер.екс}}=48$ км/год; $m=262$ т – максимальна завантаженість	15,21 5,11	5,00 45,93	0,33 8,99
№ 5 Нивки–Берестейська Вокзальна–Університет	$S=1035$ м; $V_{\text{сер.екс}}=39$ км/год; $m=248,7$ т – номінальна завантаженість	11,43 8,04	5,44 2,33	0,48 0,29
Змінна умова – графік руху (експлуатаційна швидкість)				
№ 1 Лісова–Чернігівська	$S=1217$ м; профіль колії; $m=262$ т – максимальна завантаженість	8,46 14,6	5,33 10,06	0,63 0,69
№ 2 Дарниця–Лівобережна	$S=1115$ м; профіль колії; $m=262$ т – максимальна завантаженість	8,98 10,48	3,49 2,7	0,39 0,26
№ 3 Лівобережна–Гідропарк	$S=1640$ м; профіль колії; $m=262$ т – максимальна завантаженість	9,8 18,68	5,93 10,51	0,61 0,56

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Закінчення таблиці 5

End of table 5

№ 4 Шулявська–Берестейська	$S=2230$ м; профіль колії; $m=248,7$ т – номінальна заванта- женість	79,27 78,21	3,51 4,29	0,04 0,05
№ 5 Театральна–Хрещатик	$S=770$ м; профіль колії; $m=262$ т – максимальна заванта- женість	8,14 12,93	2,13 5,49	0,26 0,42
Змінна умова – відстань між станціями				
№ 1 Чернігівська–Дарниця Нивки–Святошин	профіль колії; $V_{сер.екс}=39$ км/год; $m=262$ т – максимальна заванта- женість	11,11 13,69	4,1 3,76	0,37 0,27
Змінна умова – відстань між станціями				
№ 2 Лісова–Чернігівська Святошин–Нивки	профіль колії; $V_{сер.екс}=38$ км/год; $m=262$ т – максимальна заванта- женість	8,46 8,47	5,33 6,46	0,63 0,76
№ 3 Лівобережна–Гідропарк Вокзальна–КПП	профіль колії; $V_{сер.екс}=50$ км/год; $m=248,7$ т – номінальна заванта- женість	15,24 16,19	4,18 4,76	0,27 0,29
№ 4 Університет–Вокзальна КПП–Вокзальна	профіль колії; $V_{сер.екс}=47$ км/год; $m=262$ т – максимальна заванта- женість	14,45 16,2	6,54 6,35	0,45 0,39
№ 5 Хрещатик–Театральна Дарниця–Чернігівська	профіль колії; $V_{сер.екс}=41$ км/год; $m=262$ т – максимальна заванта- женість	14,18 11,00	7,69 5,19	0,54 0,47
Змінна умова – завантаженість вагонів				
№ 1 Чернігівська–Дарниця	$S=1315$ м; профіль колії; $V_{сер.екс}=38$ км/год	10,48 11,11	2,7 4,1	0,26 0,37
№ 2 Арсенальна–Хрещатик	$S=1666$ м; профіль колії; $V_{сер.екс}=46$ км/год	12,03 12,77	4,49 4,89	0,37 0,38
№ 3 Вокзальна–КПП	$S=2230$ м; профіль колії; $V_{сер.екс}=51$ км/год	16,19 16,75	4,76 4,74	0,29 0,28
№ 4 Житомирська– Академмістечко	$S=1445$ м; профіль колії; $V_{сер.екс}=39$ км/год	2,63 2,88	2,44 3,1	0,93 1,08
№ 5 Чернігівська–Лісова	$S=1218$ м; профіль колії; $V_{сер.екс}=41$ км/год	14,99 11,83	2,72 3,4	0,18 0,29

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Вагомість впливу того чи іншого фактору на ефективність процесу рекуперації запропоновано підтверджувати за допомогою коефіцієнта, який визначається як відношення загальної кількості електроенергії рекуперації під час гальмування до кількості електроенергії, спожитої на тягу. Як критерій обрано різницю між зазначеними коефіцієнтами за умови, що три фактори є незмінними, а один – змінний:

$$Q = \left| \frac{(A_{\text{рек1}} + A_{R1})}{A_{\text{тяги1}}} - \frac{(A_{\text{рек2}} + A_{R2})}{A_{\text{тяги2}}} \right| = |k_{\alpha1} - k_{\alpha2}|. \quad (9)$$

Фактор впливу вважається найбільшим для тієї умови, при якій спостерігається максимальна різниця між вищевказаними коефіцієнтами, і, навпаки, фактор впливу мінімальний – для мінімального значення критерію.

На рис. 9–12 зображено отримані значення критерію для 4-х змінних умов (на прикладі 5-х окремих дослідів для кожної умови).

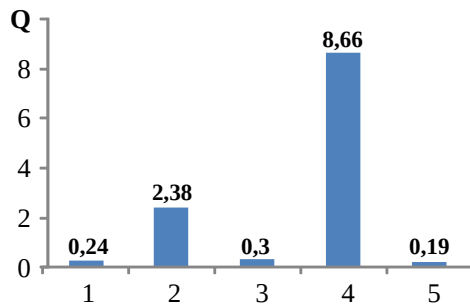


Рис. 9. Значення критерію за умови зміни профілю колії

Fig. 9. The value of the criterion when changing the profile of the track

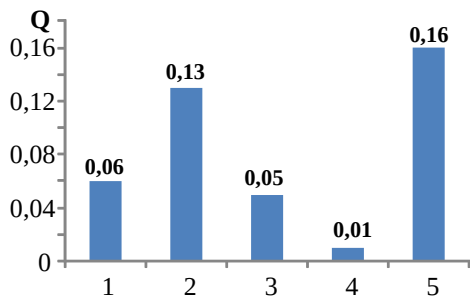


Рис. 10. Значення критерію за умови зміни графіку руху (експлуатаційної швидкості)

Fig. 10. The value of the criterion when changing the schedule (operating speed)

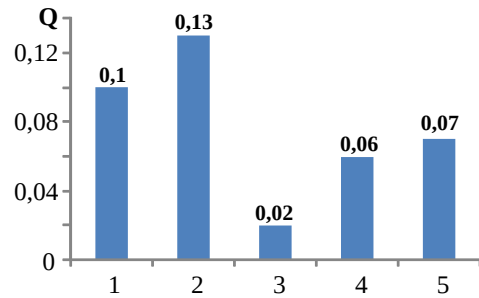


Рис. 11. Значення критерію за умови зміни відстані між станціями

Fig. 11. The value of the criterion when changing the distance between stations

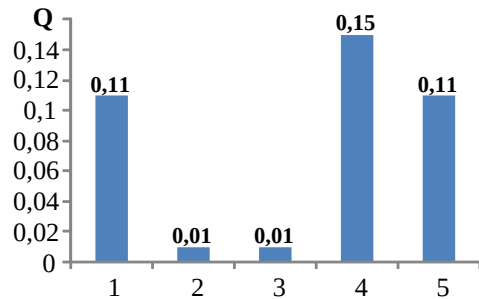


Рис. 12. Значення критерію за умови зміни завантаженості вагонів

Fig. 12. The value of the criterion when changing cars loading level

Виконаний аналіз результатів досліджень для заданих штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену дозволив встановити наступне:

- максимальна кількість спожитої електроенергії ($A_{\text{тяги}}$) спостерігається на перегоні із затяжним підйомом 42 ‰ «Шулявська–Берестейська», мінімальна – на перегонах зі спусками «Дніпро–Арсенальна» (30 ‰) та «Житомирська–Академмістечко» (38 ‰) (табл. 1–2);

- найбільшу кількість рекуперованої до контактної мережі електроенергії ($A_{\text{рек}}$) та надлишкової електроенергії (A_R) зафіксовано на перегоні з затяжним спуском 42 ‰ «Берестейська–Шулявська» (табл. 1–2);

- найменшу кількість рекуперованої до контактної мережі електроенергії ($A_{\text{рек}}$) зафіксовано на перегоні «Нивки–Святошин» під час експлуатації поїзда з дотриманням «непікового» графіку руху з мінімальною завантаженістю вагонів (табл. 1–2);

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

– мінімально зафіксоване значення кількості надлишкової електроенергії (A_R) зареєстровано на перегоні «Шулявська–Берестейська» під час експлуатації поїзда з дотриманням «пікового» графіку руху з номінальною завантаженістю вагонів (табл. 1–2);

– під час експлуатації поїзда між кінцевими станціями «Лісова–Академістечко–Лісова», залежно від штатної умови руху, кількість спожитої на тягу електроенергії змінюється в межах 328,9–579,0 кВт·год, кількість рекуперованої електроенергії до контактної мережі – у діапазоні 59,21–119,2 кВт·год, кількість надлишкової електроенергії, що розсіюється на резисторах у вигляді теплоти – у межах 68,1–172,9 кВт·год (рис. 4–8). Отже, впровадження систем рекуперації на рухомому складі дозволяє повернути в контактну мережу на рівні 17,9–23,2 % електроенергії, що споживається на тягу (рис. 4–8), а також завдяки цим системам з’являються резерви енергозбереження за рахунок ефективного використання надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування на рівні 20,2–29,9 %, що споживається на тягу (рис. 4–8).

– найбільші резерви енергозбереження спостерігаються під час «пікового» графіку руху з максимальною завантаженістю вагонів; найменші – при «непіковому» графіку руху та мінімальній завантаженості вагонів (рис. 4–8);

– максимальне значення питомих витрат електроенергії на тягу без та з урахуванням електроенергії рекуперації зафіксовано під час дотримання «пікового» графіку руху з максимальною завантаженістю вагонів; мінімальне – під час дотримання «непікового» графіку руху з максимальною завантаженістю вагонів (табл. 3–4);

– найбільш вагомим фактором, що впливає на кількість спожитої та загальну кількість рекуперованої електроенергії, є профіль колії; інші фактори (експлуатаційна швидкість, відстань між станціями, завантаженість) є менш вагомими та мають практично однаковий вплив (табл. 5, рис. 9–12);

– різниця між відношеннями кількості загальної рекуперованої до кількості спожитої електроенергії залежно від характеру зміни профі-

лю колії змінюється в межах 0,19–8,66; експлуатаційної швидкості – у межах 0,01–0,16; відстані між станціями – у межах 0,02–0,13; завантаженості – у межах 0,01–0,15 (рис. 9–12).

Наукова новизна та практична значимість

Вперше обґрунтовано, що найбільш вагомим фактором, який здійснює вплив на кількісні показники електроенергії рекуперації, є профіль колії. Дістали подальшого розвитку дослідження з визначення кількісних показників електроенергії рекуперації для аналізу резерву енергозбереження. Встановлені кількісні показники надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування можуть бути використані під час створення нового або модернізації існуючого рухомого складу метрополітену, при розробці енергоефективного технічного рішення для утилізації, збереження та акумулювання цієї електроенергії.

Висновки

Аналіз результатів розрахунково-експериментальних досліджень під час заданих типових умов експлуатації рухомого складу метрополітену між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії показав наступне:

– впровадження систем рекуперації на рухомому складі дозволяє повернути в контактну мережу на рівні 17,9–23,2 % електроенергії, що споживається на тягу (рис. 5–8);

– існують резерви підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену з системами рекуперації за рахунок ефективного використання надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування на рівні 20,2–29,9 %, що споживається на тягу (рис. 5–8);

– найбільш вагомим фактором, який здійснює вплив на кількість спожитої, рекуперованої до контактної мережі, а також надлишкової електроенергії, є профіль колії (рис. 9–12).

Подальші дослідження необхідно зосередити на розробці енергоефективного технічного рішення для утилізації, збереження та акумулювання надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації рухомого складу метрополітену / А. В. Донченко, А. О. Сулим, О. С. Сіора [та ін.] // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 3 (63). – С. 108–119. doi: 10.15802/stp2016/74732.
2. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена / В. Г. Кузнецов, О. И. Саблин, П. В. Губский, Е. Г. Колыхаев // Гірнична електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. / Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ, 2015. – № 95. – С. 68–73.
3. Бычкова, М. П. Энергосбережение в метро / М. П. Бычкова // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – Спец. вып. : Наука и транспорт. Метрополитены будущего. – С. 67.
4. Васильев, В. А. Повышение энергетической эффективности электропоездов постоянного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Васильев Виталий Алексеевич ; Петербург. гос. ун-т путей сообщения. – Санкт-Петербург, 2012. – 16 с.
5. Гаврилов, Я. И. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями / Я. И. Гаврилов, В. А. Мнацаканов. – Москва : Транспорт, 1986. – 229 с.
6. Дослідження енергоефективності модернізованого поїзда метрополітену виробництва ПАТ «КВБЗ» / А. В. Донченко, С. О. Мужичук, А. О. Сулим, П. О. Хозя, О. О. Мельник // Рейковий рухомий склад : зб. наук. пр. – Кременчук, 2015. – Вип. 12. – С. 48–56.
7. Костин, Н. А. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока / Н. А. Костин, А. В. Никитенко // Залізн. трансп. України. – 2014. – № 3. – С. 15–23.
8. Нікітенко, А. В. Збільшення об'єму рекуперованої електроенергії на електропоїздах постійного струму / А. В. Нікітенко, М. О. Костін // Залізн. трансп. України. – 2015. – № 3. – С. 25–31.
9. Основы электрического транспорта : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / М. А. Слепцов, Г. П. Долаберидзе, А. В. Прокопович [и др.]. – Москва : Академия, 2006. – 464 с.
10. Саблін, О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О. І. Саблін // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – 2014. – Т. 6, № 8. – С. 9–13. doi: 10.15587/1729-4061.2014.30483.
11. Свідцтво про реєстрацію авторського права на твір № 16669 (Україна). Програмний комплекс для збору, відображення, запису та подальшої математичної обробки даних з аналого-цифрових перетворювачів у комп'ютеризованих вимірювальних комплексах («ЕЛЕКТРО») / С. Д. Сичов ; ДП «УкрНДІВ» ; зареєстр. 19.05.2006.
12. Сулим, А. А. Повышение эффективности энергообеспечения подвижного состава метрополитена с системами рекуперации путем применения емкостных накопителей энергии : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Сулим Андрей Александрович ; Гос. предприятие «Гос. науч. исслед. центр ж.-д. трансп. Украины». – Киев, 2015. – 188 с.
13. Улитин, В. Г. Проблема использования избыточной энергии рекуперации на городском электрическом транспорте / В. Г. Улитин // Коммунальное хозяйство городов. Серия: Техн. науки : науч.-техн. сб. / Харк. нац. акад. город. хоз-ва. – Харьков, 2009. – Вып. 88. – С. 266–271.
14. Шевлюгин, М. В. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии / М. В. Шевлюгин, К. С. Желтов // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 1. – С. 15–20.
15. Щуров, Н. И. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги / Н. И. Щуров, К. В. Щеглов, А. А. Штанг // Сб. науч. тр. Новосиб. гос. техн. ун-та. – Новосибирск, 2008. – № 1 (51). – С. 99–104.
16. Ярещенко, С. А. Обеспечение энергоэффективности функционирования создаваемого электротехнического комплекса Красноярского метрополитена : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Ярещенко Семен Александрович ; Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2009. – 19 с.
17. An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems / X. Yang, A. Chen, X. Li, B. Ning, T. Tang // Transportation Research. Part C. Emerging Technologies. – 2015. – Vol. 57. – P. 13–29. doi: 10.1016/j.trc.2015.05.002.
18. Iannuzzi, D. The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines / D. Iannuzzi, E. Pagano, P. Tricoli // Energies. – 2013. – Vol. 6. – Iss. 4. – P. 1802–1820. doi: 10.3390/en6041802.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

19. Sevilla, M. Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage / M. Sevilla, R. Mokaya // *Energy & Environmental Science*. – 2014. – Vol. 7. – Iss. 4. – P. 1250–1280. doi: 10.1039/C3EE43525C.
20. Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line / R. Teymourfar, B. Asaei, H. Iman-Eini, R. Nejati fard // *Energy Conversion and Management*. – 2012. – Vol. 56. – P. 206–214. doi: 10.1016/j.enconman.2011.11.019.

А. А. СУЛИМ^{1*}, С. А. МУЖИЧУК², П. А. ХОЗЯ³, А. А. МЕЛЬНИК⁴, В. В. ФЕДОРОВ⁵

^{1*}Научно-исследовательская лаборатория электротехнических, динамических, теплотехнических и прочностных исследований железнодорожной техники, Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения», ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, эл. почта sulim1.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8144-8971

²Публичное акционерное общество «Крюковский вагоностроительный завод», ул. И. Приходько, 139, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (067) 535 64 96, эл. почта zgk_metro@kvsz.com, ORCID 0000-0002-2653-1622

³Научно-исследовательская лаборатория электротехнических, динамических, теплотехнических и прочностных исследований железнодорожной техники, Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения», ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, эл. почта pavel.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8948-6032

⁴Научно-исследовательская лаборатория электротехнических, динамических, теплотехнических и прочностных исследований железнодорожной техники, Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения», ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, эл. почта shurik110982@gmail.com, ORCID 0000-0001-8964-4790

⁵Научно-исследовательская лаборатория грузового и специального подвижного состава, Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения», ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (053) 666 13 84, эл. почта F.vladimir.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0963-7265

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ШТАТНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА С СИСТЕМАМИ РЕКУПЕРАЦИИ

Цель. По результатам анализа существующих исследований установлено, что в данное время проблема повышения энергоэффективности подвижного состава метрополитена становится особенно актуальной и требует своевременного решения. Известно, что внедрение систем рекуперативного торможения на подвижном составе позволит в значительной мере решить эту проблему. Обосновано, что одним из ключевых вопросов при внедрении вышеобозначенных систем остаются исследования по эффективности использования электроэнергии рекуперативного торможения. Цель работы – оценка количества избыточной электроэнергии рекуперативного торможения при штатных условиях эксплуатации подвижного состава с системами рекуперации для анализа резерва энергосбережения. **Методика.** Используя результаты экспериментальных исследований энергообменных процессов при штатных условиях эксплуатации подвижного состава метрополитена с системами рекуперации, а также применяя статистические методы обработки данных, определены количественные показатели электроэнергии, потребляемой на тягу, рекуперированной в контактную сеть и выделяемой на тормозных резисторах (избыточной). **Результаты.** По результатам анализа исследований при заданных штатных условиях эксплуатации подвижного состава метрополитена на Святошинско-Броварской линии КП «Киевский метрополитен» установлено следующее: 1) внедрение систем рекуперации на подвижном составе позволяет вернуть в контактную сеть на уровне 17,9–23,2 % электроэнергии, потребляемой на тягу; 2) существуют резервы повышения энергоэффективности подвижного состава с системами рекуперации на уровне 20,2–29,9 % электроэнергии, потребляемой на тягу. **Научная новизна.** Впервые обосновано, что наиболее весомым фактором, который влияет на количественные показатели электроэнергии рекуперации, является профиль пути. Предложено в качестве количественной оценки использовать коэффициенты, которые показывают количество и резервы неиспользованной (избыточной) электроэнергии. Получили дальнейшее развитие исследования по определению количественных показателей электроэнергии рекуперации для анализа резервов энергосбережения. **Практическая значимость.** Полученные количественные показатели избыточной электроэнергии рекуперативного торможения могут быть использованы при создании нового или модернизации существующего подвижного состава метрополитена в

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

случае разработки энергоэффективного технического решения для утилизации, сохранения и аккумуляции этой электроэнергии.

Ключевые слова: рекуперативное торможение; подвижной состав метрополитена; система рекуперации; энергосбережение; энергоэффективность

A. O. SULYM^{1*}, S. O. MUZHUCHUK², P. O. KHOZYA³, O. O. MELNYK⁴,
V. V. FEDOROV⁵

^{1*}Research laboratory of electrotechnical, dynamic, thermotechnical and strength research of railway vehicles, State Enterprise «Ukrainian Research Railway Car Building Institute», I. Prikhodko St., 33, Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (05366) 6 20 43, e-mail sulim1.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8144-8971

²Public Joint Stock Company «Kryukov Railway Car Building Works», I. Prikhodko St., 139, Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (067) 535 64 96, e-mail zgk_metro@kvsz.com, ORCID 0000-0002-2653-1622

³Research laboratory of electrotechnical, dynamic, thermotechnical and strength research of railway vehicles, State Enterprise «Ukrainian Research Railway Car Building Institute», I. Prikhodko St., 33, Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (05366) 6 20 43, e-mail pavel.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8948-6032

⁴Research laboratory of electrotechnical, dynamic, thermotechnical and strength research of railway vehicles, State Enterprise «Ukrainian Research Railway Car Building Institute», I. Prikhodko St., 33, Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (05366) 6 20 43, e-mail shurik110982@gmail.com, ORCID 0000-0001-8964-4790

⁵Research laboratory of freight and special rolling stock, State Enterprise «Ukrainian Research Railway Car Building Institute», 33, I. Prikhodko St., Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (05366) 6 13 84, e-mail F.vladimir.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0963-7265

STUDY ON ENERGY EXCHANGE PROCESSES IN NORMAL OPERATION OF METRO ROLLING STOCK WITH REGENERATIVE BRAKING SYSTEMS

Purpose. The analysis of the existing studies showed that the increasing of energy efficiency of metro rolling stock becomes especially important and requires timely solutions. It is known that the implementation of regenerative braking systems on rolling stock will allow significantly solving this problem. It was proved that one of the key issues regarding the introduction of the above-mentioned systems is research on efficient use of electric energy of regenerative braking. The purpose of the work is to evaluate the amount of excessive electric power of regenerative braking under normal operation conditions of the rolling stock with regenerative braking systems for the analysis of the energy saving reserves. **Methodology.** Quantifiable values of electrical energy consumed for traction, returned to the contact line and dissipated in braking resistors (excessive energy) are determined using results of experimental studies of energy exchange processes under normal operating conditions of metro rolling stock with regenerative systems. Statistical methods of data processing were applied as well. **Findings.** Results of the studies analysis of metro rolling stock operation under specified conditions in Sviatoshynsko-Brovarskaia line of KP «Kyiv Metro system» stipulate the following: 1) introduction of regenerative braking systems into the rolling stock allows to return about 17.9–23.2% of electrical energy consumed for traction to the contact line; 2) there are reserves for improving of energy efficiency of rolling stock with regenerative systems at the level of 20.2–29.9 % of electrical energy consumed for traction. **Originality.** For the first time, it is proved that the most significant factor that influences the quantifiable values of the electrical energy regeneration is a track profile. It is suggested to use coefficients which indicate the amount and reserves of unused (excessive) electrical energy for quantitative evaluation. Studies on determination of the quantifiable values of electricity recovery for analysis of energy saving reserve showed prospects for further development. **Practical value.** The obtained qualified values of excessive electric energy of regenerative braking can be applicable to construction of new or upgrading of the existing metro rolling stock provided that energy efficient technical solution for the utilization, preservation and storage of such electrical energy is developed.

Key words: regenerative braking; metro rolling stock; regenerative system; energy saving, energy efficiency

REFERENCES

1. Donchenko, A. V., Sulym, A. O., Siora, O. S., Melnyk, O. O., & Fedorov, V. V. (2016). Analysis of energy saving and energy efficiency issues during operation of the metro rolling stock. *Science and Transport Progress*, 3 (63), 108–119. doi:10.15802/stp2016/74732

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

2. Kuznetsov, V. G., Sablin, O. I., Gubskiy, P. V., & Kolykhaev, Y. G. (2015). Analiz rezervov energosberezheniya pri vnedrenii sistemy rekuperatsii energii na poyezdakh Dnepropetrovskogo metropolitena. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka*, 95, 68-73.
3. Bychkova, M. P. (2010). Energosberezheniye v metro. Science and Transport. Subways future [Special issue]. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 67.
4. Vasilyev, V. A. (2012). *Energy efficiency of electric trains of direct current*. (PhD thesis). Available from Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg.
5. Gavrilov, Y. I., & Mnatsakanov, V. A. (1986). *Vagony metropolitena s impulsnymi preobrazovatelnyami*. Moscow: Transport.
6. Donchenko, A. V., Muzhychuk, S. O., Sulym, A. O., Khozya, P. O., & Melnyk, O. O. (2015). A study of energy efficiency of a modernized train of the metro production of «KRCBW» PJSC. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovyi rukhomyi sklad»*, 12, 48-56.
7. Kostin, N. A., & Nikitenko, A. V. (2014). Autonomy regenerative braking – the basis for reliable energy-efficient heat recovery in electric rolling stock DC. *Railway Transport of Ukraine*, 3, 15-23.
8. Nikitenko, A. V., & Kostin, M. O. (2015). Increasing the amount of recycled electric trains in DC. *Railway transport of Ukraine*, 3, 25-31.
9. Sleptsov, M. A., Dolaberidze, G. P., Prokopovich, A. V., Savina, T. I., & Tulupov, V. D. (2006). *Osnovy elektricheskogo transporta*. [textbook]. Moscow: Akademiya.
10. Sablin, O. I. (2014). Study of the efficiency of the electric energy recovery process in the subway. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 8 (72), 9-13. doi:10.15587/1729-4061.2014.30483
11. Sychoy, S. D. (2006). *The Certificate of Registration of Copyright No. 16669*. Kyiv: State Intellectual Property Service of Ukraine.
12. Sulim, A. A. (2015). *Improvement of power supply the efficiency of the metro rolling stock equipped with recuperation systems by using a capacitive energy storage*. (PhD thesis). Derzhavnyi naukovy-doslidnyi centr zaliznynogo transportu Ukrayini, Kyiv.
13. Ulitin, V. G. (2009). Problem of excessive energy recovery for urban electric transport. *Municipal Economy of Cities*, 88, 266-271.
14. Shevlyugin, M. V., & Zheltov, K. S. (2008). On reduction of electric power consumption in Moscow underground by application of capacitive energy storage devices. *Science and Technology in Transport*, 1, 15-20.
15. Shchurov, N. I., Shcheglov, K. V., & Shtang, A. A. (2008). Primeneniye nakopiteley energii v sistemakh elektricheskoy tyagi. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*, 1 (51), 99-104.
16. Yareshchenko, S. A. (2009). *Obespecheniye energoeffektivnosti funktsionirovaniya sozdavayemogo elektrotekhnicheskogo kompleksa Krasnoyarskogo metropolitena*. (PhD thesis). Omsk State Technical University.
17. Yang, X., Chen, A., Li, X., Ning, B., & Tang, T. (2015). An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems. *Transportation Research Part C. Emerging Technologies*, 57, 13-29. doi:10.1016/j.trc.2015.05.002
18. Iannuzzi, D., Pagano, E., Tricoli, P. (2013). The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines. *Energies*, 6 (4), 1802-1820. doi:10.3390/en6041802
19. Sevilla, M., Mokaya, R. (2014). Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage. *Energy & Environmental Science*, 7 (4), 1250-1280. doi:10.1039/C3EE43525C
20. Teymourfar, R., Asaei, B., Iman-Eini, H., & Nejati fard, R. (2012). Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line. *Energy Conversion and Management*, 56, 206-214. doi:10.1016/j.enconman.2011.11.019

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О. В. Фомінім (Україна);
к.т.н., ст.наук.спів., акад. ТАН А. В. Донченко (Україна); д.т.н., проф. А. М. Афанасовим (Україна)

Надійшла до редколегії: 10.05.2017

Прийнята до друку: 31.08.2017

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.04.067:621.313.3

А. М. МУХА^{1*}, М. О. КОСТІН², О. Я. КУРИЛЕНКО³, Г. В. ЦИПЛЯ⁴

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта andremu@i.ua, ORCID 0000-0002-5629-4058

²Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта nkostin@ukr.net, ORCID 0000-0002-0856-6397

³Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта kyrylenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-2045-917X

⁴Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 043 06 29, ел. пошта glebtsyplia@gmail.com, ORCID 0000-0002-5568-605X

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Мета. У науковій роботі необхідно проаналізувати розширення діапазону навантаження та здійснення рекуперативного гальмування (РГ) електричного приводу постійного струму шляхом застосування суперконденсаторних накопичувачів електроенергії. **Методика.** Для розв'язання поставленої задачі використовуються методи теорії електроприводу, імпульсної електротехніки та методика розрахунку перехідних електромагнітних процесів у лінійних електричних колах при наявності в них суперконденсаторів. **Результати.** Здійснено суттєве збільшення жорсткості механічної та електромеханічної характеристик двигунів послідовного збудження, що дає можливість використання електроприводу постійного струму при навантаженні, значно меншому, ніж 15–20 % від номінального. Виконано чисельні розрахунки процесу дії суперконденсаторного накопичувача електроенергії при різкому зменшенні навантаження тягового електродвигуна електровоза постійного струму. Обґрунтовано можливість РГ електроприводу постійного струму з двигуном послідовного збудження. Виконано розв'язання рівнянь процесу зарядження й розрядження суперконденсаторного накопичувача в режимі РГ. Досліджено вплив величини ємності на характер підтримання в часі струму збудження електродвигуна в режимі малих навантажень. **Наукова новизна.** Розроблено теоретичні підходи щодо перетворення м'яких (механічних та електромеханічних) характеристик у жорсткі електродвигунів постійного струму послідовного збудження. Вперше запропоновано й обґрунтовано новий, комбінований, метод РГ двигунів послідовного збудження. Подальший розвиток отримали методи оцінки параметрів блока ємнісного накопичувача з урахуванням критеріїв надійної паралельної роботи суперконденсаторів із обмоткою збудження електродвигуна. **Практична значимість.** Запропоноване та обґрунтоване авторами перетворення м'яких характеристик у жорсткі дозволяє використовувати загальнопромислові електроприводи з двигунами послідовного збудження й при малих навантаженнях, а в тягових електроприводах – знизити інтенсивність буксування колісних пар електрорухомого складу. Розроблена методика розв'язання перехідних рівнянь дає можливість врахувати випадковий характер зміни напруги на двигуні в режимах зарядження та розрядження суперконденсаторного накопичувача. Запропонований комбінований метод РГ робить можливим здійснення РГ й при малих швидкостях обертання якоря електродвигуна, тим самим підвищуючи енергоефективність експлуатації електроприводів цього типу.

Ключові слова: електропривод; накопичувач; рекуперация; суперконденсатор; характеристика електродвигуна; струм; процес; електроенергія

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Вступ

Завдяки м'якості механічної $\omega(M)$ і електромеханічної $\omega(I_y)$ характеристик, а також великим пусковому і перевантажному моментам, двигуни постійного струму з послідовним збудженням отримали широке застосування [4, 9]. Зокрема їх використовують в електроприводах підйомно-транспортних механізмів, паперово-виробничих машинах, неперервних приводах валків металургійних прокатних станів, в механічних карусельних станках, в роботах, маніпуляторах, компресорах, повітрорудних і бурових установках, а також в електроприводах залізничного магістрального, промислового і міського електротранспорту. І в той же час, якраз м'якість характеристик зазначених електродвигунів обумовлює їх суттєві недоліки, а саме, в електроприводах загальновиробничих механізмів двигуни послідовного збудження неможливо використовувати при навантаженнях нижче 15–20 % від номінального. Це обумовлене тим, що, згідно характеристик $\omega(I_y)$ і $\omega(M)$, при малих навантаженнях, коли струм якоря I_y і обертовий момент M близькі до нуля, кутова швидкість ω обертання якоря необмежено збільшується і в режимі холостого ходу стає в 5–6 разів більше номінального значення. Таке збільшення ω неприпустиме за умов міцності колектора і бандажів, що укріплюють обмотку якоря. По-друге, як відомо, в двигунах послідовного збудження не може бути реалізовано рекуперативне гальмування внаслідок їх електричної нестійкості. Нарешті, в транспортних електроприводах електрорухомого складу (в електровозах, електропоїздах, мотор-вагонах метрополітену, трамваях) м'якість характеристик двигунів являється причиною розносного буксування коліс рухомого складу, для недопущення якого треба мати жорсткі характеристики двигуна.

Тому далі, в цій роботі розв'язати ці задачі пропонується за допомогою застосування суперконденсаторних накопичувачів електроенергії [1, 13, 16, 19].

Мета

Розширення діапазону навантаження та здійснення рекуперативного гальмування (РГ) електричного приводу постійного струму шляхом застосування суперконденсаторних накопичувачів електроенергії.

Методика**Теоретичні передумови перетворення м'яких характеристик в жорсткі**

Як відомо [4, 9] м'якими електромеханічною і механічною характеристиками володіють двигуни послідовного збудження, а жорсткими – двигуни незалежного збудження. Для розв'язання задачі перетворення перших характеристик у другі отримаємо їх аналітичні вирази.

Згідно 2-го закону Кірхгофа маємо (рис.1):

$$U_m = E_y + R_{дв} I_y, \quad (1)$$

а за законом Фарадея:

$$E_y = c_e \Phi \omega, \quad (2)$$

і згідно закону Ампера:

$$M = c_m \Phi I_y. \quad (3)$$

Тоді, враховуючи вирази (1) – (3), загальні вирази характеристик для обох типів двигунів будуть мати вигляд:

– електромеханічна $\omega(I_y)$:

$$U_m = c_e \Phi \omega + R_{дв} I_y; \\ \omega = \frac{U_m}{c_e \Phi} - \frac{R_{дв}}{c_e \Phi} I_y, \quad (4)$$

– механічна $\omega(M)$:

$$\omega = \frac{U_m}{c_e \Phi} - \frac{R_{дв}}{c_e c_m \Phi^2} M. \quad (5)$$

У виразах (1) – (5) і на рис. 1: U_m – напруга живлення мережі; I_y , I_z – струм якоря та обмотки збудження (ОЗ); $R_{дв} = r_y + r_z$ – сумарний активний опір кола двигуна; c_e , c_m – конструктивні коефіцієнти двигуна; ω – кутова швидкість обертання якоря; Φ – магнітний потік двигуна.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

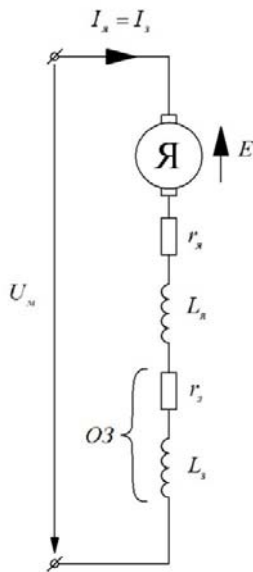


Рис. 1. Принципова схема двигуна постійного струму послідовного збудження

Fig. 1. Schematic circuit of the DC series motor

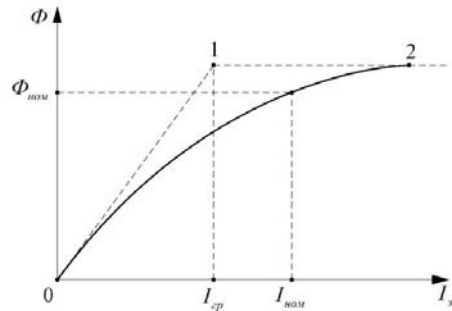
При врахуванні характеристики намагнічування $\Phi(I_3)$ двигуна послідовного збудження рівняння (4) і (5) змінюються. Покажемо це, скориставшись кусково-лінійною апроксимацією кривої $\Phi(I_3)$ (рис. 2). На лінійній ділянці 0–1, коли $I_3 = I_я < I_{ном}$, маємо що $\Phi(I_3) = k_\Phi I_3$ і тоді електромеханічна характеристика прийме вигляд:

$$\omega = \frac{U_m}{c_e k_\Phi I_3} - \frac{R_{дв}}{c_e k_\Phi} = \frac{A}{I_3} - B, \quad (6)$$

де $A = \frac{U_m}{c_e k_\Phi}$, $B = \frac{R_{дв}}{c_e k_\Phi}$, а механічна характеристика буде:

$$\omega = \frac{U_m}{c_e k_\Phi I_3} - \frac{R_{дв}}{c_e c_m k_\Phi^2 I_3^2} M. \quad (7)$$

Із (6) та (7) випливає, що при малих навантаженнях ($I_я < I_{ном}$, рис. 2) характеристики мають рівняння гіперболічного виду (рис. 3), тобто являються м'якими.

Рис. 2. Характеристика залежності магнітного потоку Φ від струму збудження I_3 Fig. 2. Characteristics of dependence of the magnetic flux Φ on the excitation current I_3

На ділянці насичення 1–2 (рис. 2) магнітний потік $\Phi = \text{const}$ і тоді рівняння (4) і (5) перетворюються в лінійно-спадаючі:

$$\omega(I_я) = G - Q I_3, \quad (8)$$

$$\omega(M) = G - F M, \quad (9)$$

де G , Q , F – постійні.

Із порівняння виразів (6) і (8), а також (7) і (9) випливає, що для перетворення м'яких (гіперболічного характеру) характеристик в жорсткі потрібно підтримувати струм збудження I_3 , не «дозволяти» йому зменшуватися. За нашою думкою, це можливо здійснювати розрядом ємнісного накопичувача C_k , увімкненого паралельно обмотці збудження (рис. 4, де r_c – внутрішній опір ємності). При цьому в усталеному режимі (контактор $K1$ замкнено) роботи електропривода, коли $I_я$ і I_3 не змінюються, накопичувач заряджено до напруги на обмотці збудження ($I_я = I_3$, оскільки $I_c = 0$). При зменшенні навантаження ($I_я, M$) частота ω різко збільшується (рис. 3) і згідно (2) відповідно зростає проти-е.р.с. якоря E і тому знижується струм I_3 (який дорівнює струмові $I_я$). Напруга на обмотці збудження стає менше напруги U_c на накопичувачі, в результаті останній починає розряджатися через ОЗ й тим самим підтримує I_3 , що й забезпечує збільшення жорсткості характеристик $\omega(I_я)$, $\omega(M)$.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

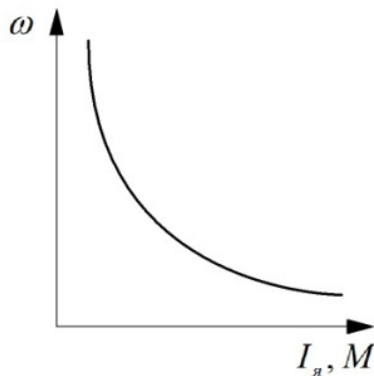


Рис. 3. Механічна і електро механічна характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження

Fig. 3. Mechanical and electromechanical characteristics of the DC series motor

В схемі рис. 4 можливо другий варіант: в усталеному режимі контактор К1 вимкнено, а К2 – увімкнено і накопичувач C_K заряджається в режимі рекуперації. При потребі К2 вимикається, К1 вмикається й тим самим здійснюється розряд C_K на обмотку збудження.

У подальшому задача полягає у виборі необхідної величини ємності C_K накопичувача, що виконується за таких умов (рис. 4).

Розряд накопичувача здійснюється в перехідному режимі в колі $C_K - r_3 - L_3$, а це означає, що при певних значеннях параметрів елементів кола можливі: аперіодичний, граничний чи періодичний режими розряду. Тому першою умовою є те, що розряд повинен протікати в аперіодичному чи граничному режимі. Тоді ємність вибирається за умови, що сумарний активний опір кола, тобто $(r_C + r_3)$, повинен бути більше критичного опору розрядного кола [6], для рис. 4 рівного $2\sqrt{\frac{L_3}{C_K}}$, звідки шукане значення ємності:

$$C_K \geq 4 \frac{L_3}{(r_3 + r_C)^2}. \quad (10)$$

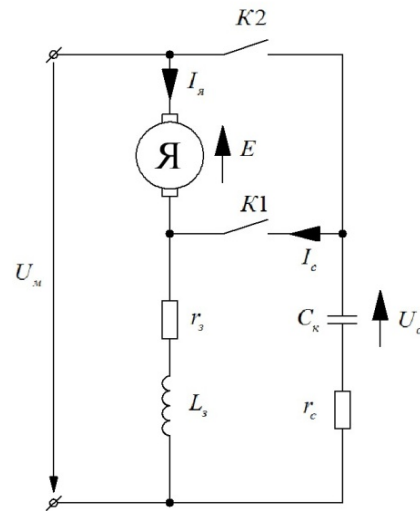


Рис. 4. Принципова схема двигуна постійного струму послідовного збудження з увімкнутим ємнісним накопичувачем

Fig. 4. Schematic circuit of the DC series motor with enabled storage unit

Тривалість перехідного процесу $T_{\text{пр}}$ розряду C_K через ОЗ повинна бути не менше тривалості терміну часу $t_{\text{пр}}^{\text{min}}$ роботи двигуна електроприводу при малому навантаженні:

$$T_{\text{пр}} \geq t_{\text{пр}}^{\text{min}}. \quad (11)$$

З іншого боку, як відомо [6], $T_{\text{пр}} = (4 \dots 5) \tau$, де τ – стала часу розрядного кола; отримаємо її методом вхідного опору [6].

Вхідний комплексний опір розрядного кола (рис.4) запишеться як

$$\underline{Z}(j\omega) = (r_C + r_3) + j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega C_K}, \quad (12)$$

звідки характеристичне рівняння має вигляд

$$(r_C + r_3) + pL_3 + \frac{1}{pC_K} = 0, \quad (13)$$

розв'язання дає корені

$$p_{1,2} = -\frac{r_C + r_3}{2L_3} \pm \sqrt{\left(\frac{r_C + r_3}{2L_3}\right)^2 - \frac{1}{L_3 C_K}}. \quad (14)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Оскільки $\tau = \left| \frac{1}{p} \right|$, а в задачі два кореня, тоді, згідно (11), маємо:

$$t_{\text{пр}}^{\text{max}} = \frac{4 \dots 5}{\left| -\frac{r_C + r_3}{2L_3} \pm \sqrt{\left(\frac{r_C + r_3}{2L_3} \right)^2 - \frac{1}{L_3 C_K}} \right|}. \quad (15)$$

Третя умова визначення C_K повинна бути виконана у випадку, коли мережева напруга живлення U_m являє собою випадковий (стохастичний) процес й тим самим можливий режим резонансу на певній частоті. І тому умова полягає в недопущенні в силовому колі рис. 4 режиму резонансу напруг, що можливо, коли, як відомо [9], в колі спостерігається рівність нулю реактивної складової вхідного опору:

$$\text{Im}[Z_{\text{вх}}(j\omega)] = 0,$$

тобто, для кола рис.4 маємо умову:

$$\text{Im} \left[r_{\text{я}} + j\omega L_{\text{я}} + \frac{(r_3 + j\omega L_3) \left(r_C - j \frac{1}{\omega C_K} \right)}{\left(r_3 + r_C + j\omega L_3 - j \frac{1}{\omega C_K} \right)} \right] = 0. \quad (16)$$

Формули (10), (15), (16) і є виразами вибору величини C_K накопичувача.

Теоретичні передумови імпульсної рекуперації

Рекуперативне гальмування (РГ) можливо застосовувати в підйомно-транспортних установках, приводах карусельних верстатів і в системах електричного транспорту. В двигунах з послідовним збудженням це можливо лише при накопиченні електроенергії не в живлячу електромережу, а в незалежний накопичувач, зокрема, в ємнісний (істотно, при умові відімкнення двигуна від мережі). Розглянемо цей режим на прикладі схеми рис. 5. При цьому вважаємо що ємність C_K було заряджено до невеликої напруги U_{C0} від обмотки збудження в нерекуперативному режимі при увімкненому контакторі K1 (рис. 4).

При перемиканнях, зв'язаних з переходом від робочого режиму до гальмівного рекуперативного, магнітні системи ТЕД розмагнічуються до залишкової індукції, що складає 2–3 % від номінальної. І тому на початку режиму рекуперації в обмотці якоря ТЕД індукується невелика залишкова е.р.с., яка не в змозі створити необхідний за величиною зарядний струм. В зв'язку з цим і відсутністю незалежного збудження ТЕД (рис. 5) перехід ТЕД до режиму повноцінної рекуперації здійснюється не миттєво, а через протікання так званої початкової стадії, під якою розуміється період самозбудження ТЕД з одночасним повільним зростанням е.р.с. і струму якоря, однак ще при відсутності процесу передачі рекуперативної електроенергії в ємнісний накопичувач.

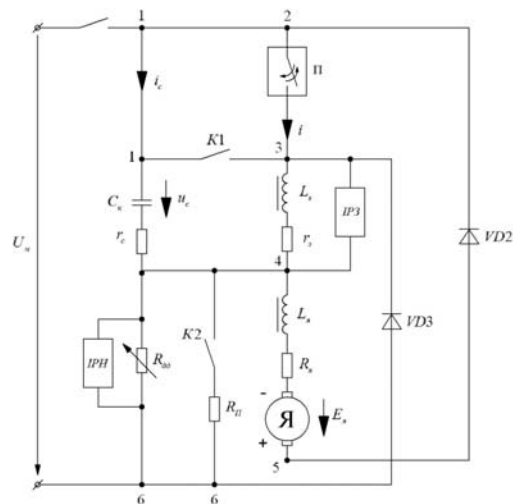


Рис. 5. Схема ввімкнення ємнісного накопичувача і імпульсного перетворювача

Fig. 5. Schematic circuit of the DC series motor with enabled storage unit

Для здійснення процесу самозбудження виконується реверсування обмотки якоря ТЕД і вмикається імпульсний регулятор П (контактори K1 і K2 на рис. 5 вимкнені), тим самим створюється коло самозбудження 2 – 3 – 4 – 5 – VD2 – 2 для протікання струму через обмотку збудження ТЕД. Однак поки що (на початку) зарядний струм по цьому колі не протікає, оскільки, по-перше, ємність C_K накопичувача (внаслідок невеликої залишкової енергії, енергії «мертвого» об'єму [2]) має початкову напругу

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

U_{C0} , яка перевищує сумарну початкову («за-
лишкову») е.р.с. $E_{я0}$ якоря двигуна, і, по-друге,
катод напівпровідникового діода $VD2$ має по-
тенціал «+», створений ємністю C_k , і тому він
закритий. У зв'язку з цим далі застосовується
форсування (зменшення терміну часу) процесу
самозбудження ТЕД шляхом його підмагнічу-
вання від ємності C_k накопичувача. Для цього
вмикаються контактор $K2$ та імпульсний регу-
лятор $П$ (рис.5). В результаті створюється коло
 $1-2-3-4-K2-R_{\Pi}-6-IPH-r_C-C_k-1-r_C-C_k-1$,
(при цьому резистор R_{Π} після само-
збудження вимикається). Рівняння цього режи-
му має вигляд:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R_{\Sigma}}{L_{\Sigma}} \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{L_{\Sigma} C_k} u_C(t) = E_{я}(t), \quad (17)$$

де $R_{\Sigma} = r_C + R_{дд} + r_3 + r_{я}$; $L_{\Sigma} = L_{я} + L_3 + L_{дд}$.

В цій фазі ємність розряджається, а е.р.с.
якоря $E_{я}$ збільшується за рахунок протікання
розрядного струму по обмотці збудження, тоб-
то внаслідок підмагнічування. Протікання
струму по цьому колу, а отже і по ОЗ ТЕД, фор-
сує підмагнічування ТЕД, що обумовлює зрос-
тання початкової е.р.с. ($E_{я0}$) ТЕД. Остання
стає більшою, ніж U_{C0} ($E_{я0} > U_{C0}$), діод $VD2$
відкривається і по раніше зібраному колу $2-3-4-5-VD2-2$ (колу самозбудження) починає
протікати гальмівний струм ТЕД, який зростає
по мірі підсилення намагнічування системи
ТЕД згідно рівняння:

$$R_{\Sigma} i(t) + L_{\Sigma} \frac{di}{dt} = E_{\Gamma}(t), \quad (18)$$

при початковій умові $i(0) = \frac{E_{\Gamma}}{r_C + R_{дд} + r_3 + r_{я}}$.

Розв'язок рівняння (18) має вигляд
 $i(t) = \frac{E_{\Gamma}(t)}{r_3 + r_{я}} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$. В результаті $E_{я}$ зростає
до максимального значення ($E_{я, \max}$). Після цьо-
го початкову стадію РГ, стадію самозбудження,
можна вважати закінченою.

Далі переривач $П$ (рис. 5) вимикається і по-
переднє коло $2-3-4-5-VD2-2$ струму галь-
мування (але ще не зарядного) перериваєть-

ся. І тепер гальмівний струм під дією е.р.с.
 $E_{я, \max}$ починає протікати уже по новому колу
 $5-VD2-2-1-C_k-r_C-IPH-6-VD3-3-4-5$. Цей гальмівний рекуперативний струм і за-
ряджає ємність C_k накопичувача.

У подальшому процес заряджання здійсню-
ється в залежності від величини швидкості, на-
приклад, опускання вантажу електроприводом.

Щоб в зоні від високих до середніх швидко-
стей е.р.с. якоря ($E_{я} = c_e \Phi V$) не перевищувала
допустимої напруги на колекторі ТЕД потріб-
но, щоб останній працював на лінійній ділянці
кривої намагнічування $c_e \Phi(I_3)$ (рис. 2), тому
потік Φ треба регулювати. По-друге, при зни-
женні швидкості підтримку на заданому рівні
величини $E_{я, \max}$ теж треба здійснювати регу-
люванням (збільшенням) величини $c_e \Phi$.
Останнє в зазначеній вище зоні швидкостей
регулювання збудження ТЕД виконується за
допомогою імпульсного регулятора збудження
ІРЗ струму і тому $E_{я} = \text{const} = E_{я, \max}$. Одночас-
но, підтримка гальмівного зарядного струму
здійснюється виводом опору резистора $R_{дд}$ ім-
пульсним регулятором ІРН (рис. 5). Рівняння
режиму цього етапу таке:

$$u_C(t) + R_{\Sigma} i(t) + R_{дд}(t) i(t) + L_{\Sigma} \frac{di}{dt} = E_{я, \max}, \quad (19)$$

а через $u_C(t)$:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R_{\Sigma} + R_{дд}(t)}{L_{\Sigma}} \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{L_{\Sigma} C} u_C(t) = E_{я, \max}. \quad (20)$$

В зоні середніх і низьких швидкостей заря-
джання починається при виході магнітної сис-
теми ТЕД на характеристику повного магнітно-
го поля (на ділянці насичення характеристики
 $c_e \Phi(I_3)$) (рис. 2). Оскільки на цій ділянці
 $c_e \Phi \approx \text{const}$, імпульсний регулятор ІЗР не діє
і тому його вимикають, а гальмівний струм під-
тримується на рівні уставки регулятором ІРН

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

шляхом подальшого виводу опору резистора $R_{\text{дд}}$. При цьому в початковий термін етапу ємність C_k накопичувача заряджається повним струмом силового кола доти, поки е.р.с. E_y , що зменшується, не урівноважить зростаючу напругу накопичувача з урахуванням спаду напруги на R_{Σ} силового кола ТЕД. При такій умові подальше заряджання C_k повним гальмівним струмом силового кола уже не може бути забезпечене. Подальше заряджання повинно здійснюватися шляхом імпульсної передачі енергії через індуктивні елементи силового кола. Для цього необхідно задати імпульсний періодичний режим роботи імпульсного регулятора П, починаючи з мінімального значення коефіцієнта заповнення його імпульсного циклу. Переривач (імпульсний регулятор) П короткочасно вмикається й тим самим закорочує силове коло ТЕД по колу 2 – 3 – 4 – 5 – VD2 – 2. За цей термін часу при протіканні зростаючого гальмівного струму в індуктивностях силового кола ТЕД накопичується енергія. Через деякий час регулятор П вимикається і гальмівний зарядний струм протікає під дією $E_{y,\text{max}}$ і накопиченої в індуктивностях електроенергії по колу (рис.5): 3–4–5–VD2 – 2 – 1 – C_k – r_c – IPH – 6 – VD3 – 3. Напруга на ємності C_k зростає, а гальмівний струм $i(t)$ зменшується до певного значення. При наступному вмиканні регулятора П (рис. 5) ТЕД знову переходить в режим к.з., знову $i(t)$ збільшується, а при вимиканні П – зменшується і далі процес повторюється. В квазіусталеному режимі роботи схеми рис. 5 перемикання регулятора П мають стабільний коливальний характер з частотою від 30 до 600 Гц. Однак при цьому треба враховувати, що в процесі гальмування швидкість обертання якоря ТЕД зменшується, в результаті знижується генераторна е.р.с. двигуна. Тому для підтримання заданих меж струму, що необхідно для підтримання гальмівного струму ($I_y = \text{const}$), потрібно: а) в термін замкненого стану регулятора П зменшувати коефіцієнт імпульсного заповнення $\gamma = \frac{t_i}{T}$; б) в термін вимкнутого стану

П зменшувати імпульсним регулятором IPH величину додаткового опору $R_{\text{дд}}$.

Вибір типу конденсаторного накопичувача

Ідея використання накопичувачів електроенергії в різних системах і пристроях не є новою і не заперечується. Стосовно електричного приводу, то найбільш докладні дослідження виконано для систем електричного транспорту, особливо для міського транспорту (трамваїв і тролейбусів) [2, 3, 5, 7, 8, 10-12, 14, 15, 17, 21]. Для систем загальнопромислового електроприводу публікації результатів досліджень авторам невідомі. В існуючих роботах розглядаються застосування установок, головним чином, на основі індуктивних, електрохімічних, напівпровідникових індуктивних та ємнісних накопичувачів. При цьому більшість дослідників, у тому числі і закордонних, робить висновок, що найбільш доцільно застосування ємнісних накопичувачів і обов'язково на базі суперконденсаторів (або інакше: ультраконденсаторів, конденсаторів надвисокої енергоємності, конденсаторів подвійного електричного шару (КПЕШ) та інші).

Це обумовлено тим, що суперконденсаторні накопичувачі володіють високою питомою потужністю, порядку $10^4 - 10^6$ кВт/кг, при накопичуваній питомій електроенергії 45–50 кДж/кг і терміну часу заряду до 30 с, високий (88–90%) к.к.д., характеризуються малим внутрішнім опором, що дозволяє досягати питомої потужності імпульсного розряду до 100 Вт/см³. Модулі КПЕШ витримують напругу в сотні вольт і величину струму в декілька кілоампер. Суперконденсатори не мають негативної екологічної дії і вибухобезпечні.

Дослідженнями та розробками в сфері суперконденсаторів займаються більше 50 компаній в різних країнах, з них більша частина компаній займається розробкою і виготовленням малогабаритних КПЕШ, призначених для використання в малопотужних електричних схемах для портативних та побутових електронних пристроїв [1, 18-20].

Найбільш високі характеристики серед КПЕШ в сотні тисяч фарад на елемент доступні

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

компаніям Maxwell (США), Matsuchita Electric Industrial (Японія), SAFT (Франція), EPCOS (Германія, підготовка виробництва за ліцензією Maxwell), YUNASKO (Україна), NessCap (Южна Корея), випускають КПЕШ з органічним електролітом і російські компанії ЭСМА, ЭКОНД, ЭЛТОН, ELIT, у яких КПЕШ має водний склад електроліту.

Результати та аналізи чисельних розрахунків

Розглянемо вибір блоку суперконденсаторів і процес його дії при різкому зменшенні навантаження (чи в режимі буксування колісної пари, чи при різкій зміні напруги) тягового двигуна типу ЕД141У1 електровоза ДЕ1, що має параметри: $I_{\text{ном}} = 565 \text{ А}$, $r_3 = 0,019 \text{ Ом}$, $L_3 = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

Згідно умови (10), необхідна ємність блоку суперконденсаторів для одного двигуна буде: $C_k = 54,3 \text{ Ф}$.

Виходячи із значень ємності, маси і об'єму найбільш поширених типів суперконденсаторів, а також віддаючи перевагу вітчизняному виробнику, використаємо суперконденсатори типу E-cells (виробник YUNASKO, Україна), які мають такі технічні характеристики:

- електрична ємність – $C_{\text{ск}} = 480 \text{ Ф}$;
- номінальна напруга – $U_{\text{ск}} = 2,7 \text{ В}$;
- максимальний струм розряду:
при $\Delta T = 15^\circ\text{C} - 165 \text{ А}$;
при $\Delta T = 40^\circ\text{C} - 270 \text{ А}$;
- максимальний струм к.з. – 2700 А ;
- довжина – $h = 214 \text{ мм}$;
- ширина – $l = 131 \text{ мм}$;
- товщина – $d = 17 \text{ мм}$;
- маса (вага) – $M = 0,07 \text{ кг}$;
- об'єм – $V_{\text{ск}} = 0,00013 \text{ м}^3$;
- максимальний внутрішній опір – $0,17 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$;
- робоча температура – $T = -40^\circ\text{C} \dots +60^\circ\text{C}$;
- постійна часу – $\tau = 0,6 \pm 0,1 \text{ с}$;
- кількість циклів «заряду-розряду» – $> 10^5$.

В номінальному режимі роботи двигуна напруга на обмотці збудження складає:

$$U_3 = r_3 I_{\text{ном}} = 0,019 \cdot 565 = 10,74 \text{ В}.$$

Тоді для забезпечення необхідної максимальної напруги блок конденсаторів повинен мати таку кількість послідовно з'єднаних елементів – суперконденсаторів:

$$n = \frac{10,74}{2,7} = 4 \text{ шт.}$$

А, враховуючи допустиме значення струму, отримаємо кількість паралельно увімкнених суперконденсаторів:

$$m = \frac{565}{270} = 2 \text{ шт.}$$

Тоді розрахункова ємність блока накопичувача складе:

$$C_n = \frac{C_{\text{ск}}}{n} m = \frac{480}{4} \cdot 2 = 240 \text{ Ф}.$$

а внутрішній опір:

$$r_c = \frac{R_{\text{ск}}}{m} n = \frac{0,00017}{2} \cdot 4 = 0,00034 \text{ Ом}.$$

і загальний об'єм:

$$V_c = 13 \cdot 10^{-5} \cdot 8 = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Оскільки $r_c \ll r_3$, то r_c у подальших розрахунках нехтуємо.

Розрахуємо перехідну напругу $u_c(t)$ на блоці суперконденсаторів і струм розрядження згідно рис. 4.

Згідно схеми рис. 4 з параметрами $C_k = 54,3 \text{ Ф}$, $r_3 = 0,019 \text{ Ом}$ і $L_3 = 0,0049 \text{ Гн}$ і за виразом (14), корені характеристичного рівняння дорівнюють: $p_1 = p_2 = p = -1,94 \text{ с}^{-1}$, згідно якого шукана перехідна $u_c(t)$ може бути записана у вигляді [6]:

$$u_c(t) = (A_1 + A_2 t) e^{p \cdot t}. \quad (21)$$

Визначимо постійні інтегрування A_1 і A_2 , для чого візьмемо похідну від (21):

$$u_c'(t) = A_2 e^{p \cdot t} + (A_1 + A_2 t) p e^{p \cdot t}. \quad (22)$$

Запишемо (21) і (22) для моменту комутації $t = 0$:

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$\begin{cases} u_C(0) = A_1, \\ u_C'(0) = A_2 + A_1 p. \end{cases} \quad (23)$$

$$u_C'(0) = A_2 + A_1 p. \quad (24)$$

До комутації суперконденсаторний накопичувач був заряджений до U_3 , тобто, $u_C(0) = U_0 \neq 0$, а через обмотку збудження протікав струм навантаження, тобто, $i_C(0) = i_3(0) = I_0$.

Як відомо, струм в ємності: $i_C(t) = C \frac{du_C}{dt}$,

$$\text{тобто, } u_C'(0) = \frac{i_C(0)}{C_K} = \frac{I_0}{C_K}.$$

Тоді система рівнянь (23) – (24) прийме вигляд:

$$\begin{cases} U_0 = A_1, \\ \frac{I_0}{C_K} = A_2 + A_1 p. \end{cases} \quad (25)$$

$$\frac{I_0}{C_K} = A_2 + A_1 p. \quad (26)$$

Визначивши із (25) і (26) постійні A_1 та A_2 і підставивши їх в (21), отримаємо:

$$u_C(t) = \left[U_0 + \left(\frac{I_0}{C_K} - U_0 p \right) t \right] e^{pt}, \quad (27)$$

$$i_C(t) = i_3(t) = C_K \frac{du_C}{dt} = \left[I_0 (1 + pt) - \frac{U_0}{L} t \right] e^{pt}. \quad (28)$$

За виразом (28) було виконано чисельні розрахунки перехідного розрядного струму, що протікає через обмотку збудження при різних ступенях навантаження ($I_0 = 0; 56,5; 113$ А) і $U_0 = U_3 = 10,74$ В; результати представлено на рис.6. Із цього рисунка випливає, що при спаді навантаження до 0% (крива 1), 10% (крива 2) і 20% (крива 3) від $I_{\text{ном}} = 565$ А струм збудження підтримується на достатньому рівні на протязі 2 секунд. Якщо за виробничими умовами цього недостатньо, тоді можливо передбачити другу ступінь розряду з аналогічним суперконденсаторним накопичувачем.

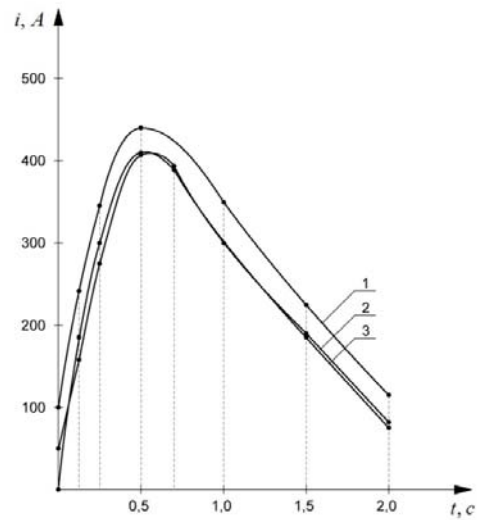


Рис.6. Результати чисельних розрахунків перехідного розрядного струму, що протікає через обмотку збудження при різних ступенях навантаження у графічному вигляді

Fig. 6. Results of the numerous calculations of the transient discharge current flowing through the excitation winding at different load levels in a graphical form

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено теоретичні підходи щодо перетворення м'яких механічної та електромеханічної характеристик в жорсткі електродвигунів постійного струму послідовного збудження. Вперше запропоновано і обґрунтовано новий, комбінований, метод РГ двигунів послідовного збудження. Подальший розвиток отримали методи оцінки параметрів блока ємнісного накопичувача з урахуванням критеріїв надійної паралельної роботи суперконденсаторів з обмоткою збудження електродвигуна.

Запропоноване і обґрунтоване перетворення м'яких характеристик в жорсткі дозволяє використовувати загальнопромислові електроприводи з двигунами послідовного збудження і при малих навантаженнях, а в тягових електроприводах – знизити інтенсивність буксування колісних пар електрорухомого складу. Розроблена методика розв'язування рівнянь перехідних дає можливість врахувати випадковий характер зміни напруги на двигуні в режимах зарядження і розрядження суперконденсаторного накопичувача. Запропонований комбінований метод РГ робить можливим здійснювати РГ

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

і при малих швидкостях обертання якоря електродвигуна й тим самим дозволяє підвищити енергоефективність експлуатації електроприводів цього типу.

Висновки

1. М'якість механічної та електромеханічної характеристик двигунів постійного струму послідовного збудження обумовлює ряд недоліків їх роботи в електроприводі.

2. Перетворення м'яких характеристик двигуна в жорсткі можливо шляхом розрядження при малих навантаженнях ємнісного накопичувача електроенергії через обмотку збудження двигуна.

3. Розрахунок необхідної величини ємності накопичувача повинен здійснюватися за трьох умов, головною із яких є та, щоб при цьому спостерігався аперіодичний чи граничний режим розрядження.

4. Використання ємнісного накопичувача робить можливим здійснювати рекуперативне гальмування двигуна послідовного збудження з застосуванням режиму імпульсної передачі енергії при малих швидкостях обертів якоря двигуна.

5. В якості ємнісного накопичувача доцільно використовувати суперконденсаторний накопичувач, оскільки він володіє високою питомою потужністю, великим терміном часу збереження енергії, розрахований на велику кількість зарядно-розрядних циклів, має високий к.к.д., характеризується малим внутрішнім опором, його модулі витримують напругу в сотні вольт і величину струму в декілька кілоампер.

6. Виходячи із значень ємності, маси та об'єму доцільно використовувати суперконденсатори типу E-cells (виробник YUNASKO, Україна) або типу VCAP (виробник Maxwell, США).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Астахов, А. Конденсаторы с двойным электрическим слоем / А. Астахов, С. Карабанов, Ю. Кухмистров // Радио. – 1997. – № 4. – С. 57–58.
2. Васильев, В. А. Анализ возможности применения емкостных накопителей энергии на электрическом подвижном составе / В. А. Васильев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщ. – 2011. – Вып. 1. – С. 35–44.
3. Евстафьев, А. М. Применение емкостных накопителей на электрическом подвижном составе / А. Е. Евстафьев // Eltrans'2009 : материалы междунар. симп. – Санкт-Петербург. – 2009. – С. 537–545.
4. Колб, А. А. Теорія електроприводу / А. А. Колб. – Днепропетровск : НГУ, 2006. – 511 с.
5. Костін, М. О. Використання суперконденсаторних накопичувачів енергії рекуперативного гальмування на локомотивах постійного струму ВЛ11М6 / М. О. Костін, А. М. Муха, А. В. Нікітенко // Електрифікація залізничного транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО-2015» : тези IX Міжнар. наук.-практ. конф. (21.12–22.12.2015). – Дніпропетровськ, 2015. – С. 102–103.
6. Костін, М. О. Теоретичні основи електротехніки : у 3 т. / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2007. – Т. 2. – 273 с.
7. Рябцев, Г. Г. Расчет конденсаторных накопителей энергии для вагонов метрополитена / Г. Г. Рябцев, И. А. Ермаков, Н. А. Рубичев // Электротехника. – 2011. – № 8. – С. 15–19.
8. Спиридонов, Е. А. Повышение эффективности использования энергии в электротранспортных комплексах с накопительными устройствами : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Спиридонов Егор Александрович ; Новосиб. гос. тех. ун-т. – Новосибирск, 2010. – 165 с.
9. Теорія електроприводу / М. Г. Попович, М. Г. Борисюк, В. А. Гаврилук [та ін.] ; за ред. М. Г. Поповича. – Київ : Вища шк., 1993. – 494 с.
10. Штанг, А. А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Штанг Александр Александрович ; Новосиб. гос. тех. ун-т. – Новосибирск, 2006. – 233 с.
11. Щуров, Н. И. Определение параметров накопительного устройства для электротранспортного комплекса / Н. И. Щуров, А. А. Штанг, Е. А. Спиридонов // Электричество. – 2007. – № 6. – С. 53–56.
12. Harpool, S. Supercapacitor Performance Characterization for Renewables Applications / S. Harpool, A. von Jouanee, A. Yokochi // IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech) (24.07–26.07.2014). – Portland, OR, USA, 2014. – P. 160–164. doi: 10.1109/SusTech.2014.7046237.
13. Iannuzzi, D. Speed-Based State-of-Charge Tracking Control for Metro Trains with Onboard Supercapacitors / D. Iannuzzi, P. Tricoli // IEEE Transaction on Power Electronics. – 2012. – Vol. 27. – Iss. 4. – P. 2128–2140. doi: 10.1109/tpe.2011.2167633.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

14. Improvement of light load efficiency of dual active bridge DC-DC converter by using dual leakage transformer and variable frequency / G. Guidi, M. Pavlovsky, A. Kawamura, T. Imakubo, Y. Sasaki // Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition : Conf. Paper (12.09–16.09.2010). – Atlanta, GA, USA, 2010. – P. 830–837. doi: 10.1109/ecce.2010.5617909.
15. Klohr, M. Energiespeicher auf Straßen-und Stadtbahnfahrzeugen – das erste Serienprojekt / M. Klohr, A. Maroschik // Elektrische Bahnen. – 2012. – Vol. 110, no. 8/9. – P. 444–451.
16. Tango fur Genf mit // Elektrischen Bahnen. – 2012. – Vol. 110, No. 8/9. – P. 508.
17. Optimal Energy Storage Sizing and Control for Wind power Applications / Ted K. A. Brekken, A. Yokochi, A. von Jouanne, Z. Z. Yen, H. Max Hapke, D. A. Halamay // IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2011. – Vol. 2. – Iss. 1. – P. 69–77. doi: 10.1109/TSTE.2010.2066294.
18. Pulling, N. Tram builders go to ground to find business / N. Pulling // Tramways&Urban Transit. – 2009. – No. 72 (860). – P. 300–303.
19. Rufer, A. Power-Electronic Interface for a Supercapacitor-Based Energy-Storage Substations in DC-Transportation Networks / A. Rufer, P. Barrade, D. Hotellier // EPE Journal. – 2004. – Vol. 14. – Iss. 4. – P. 43–49. doi: 10.1080/09398368.2004.11463573.
20. Transit new // Railway Journal. – 2009. – No. 6. – P. 10–12.
21. Variobahn mit Energiespeicher in Heidelberg in Betrieb // Elektrische Bahnen. – 2010. – Vol. 108, no. 1/2. – P. 93–94.

А. Н. МУХА^{1*}, Н. А. КОСТИН², Е. Я. КУРИЛЕНКО³, Г. В. ЦИПЛЯ⁴

^{1*}Каф. «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, эл. почта andremu@i.ua, ORCID 0000-0002-5629-4058

²Каф. «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, эл. почта nkostin@ukr.net, ORCID 0000-0002-0856-6397

³Каф. «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, эл. почта kyrylenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-2045-917X

^{4*}Каф. «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 043 06 29, эл. почта glebtsyplia@gmail.com, ORCID 0000-0002-5568-605X

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Цель. В научной работе необходимо проанализировать расширение диапазона нагрузки и осуществления рекуперативного торможения (РТ) электрического привода постоянного тока путем применения суперконденсаторных накопителей электроэнергии. **Методика.** Для решения поставленной задачи используются методы теории электропривода, импульсной электротехники и методика расчета переходных электромагнитных процессов в линейных электрических цепях при наличии в них суперконденсаторов. **Результаты.** Осуществлено существенное увеличение жесткости механической и электромеханической характеристик двигателей последовательного возбуждения, что дает возможность использования электропривода постоянного тока при нагрузке, значительно меньшей, чем 15–20 % от номинальной. Выполнены численные расчеты процесса действия суперконденсаторного накопителя электроэнергии при резком уменьшении нагрузки тягового электродвигателя электровоза постоянного тока. Обоснована возможность РТ электропривода постоянного тока с двигателем последовательного возбуждения. Выполнено решение уравнений процесса зарядки и разрядки суперконденсаторного накопителя в режиме РТ. Исследовано влияние величины емкости на характер поддержания во времени тока возбуждения электродвигателя в режиме малых нагрузок. **Научная новизна.** Разработаны теоретические подходы по преобразованию мягких (механических и электромеханических) характеристик в жесткие электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения. Впервые предложен и обоснован новый, комбинированный метод РТ двигателей последовательного возбуждения. Дальнейшее развитие получили методы оценки параметров блока емкостного нако-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

пителя с учетом критериев надежной параллельной работы суперконденсаторов с обмоткой возбуждения электродвигателя. **Практическая значимость.** Предложенное и обоснованное авторами преобразование мягких характеристик в жесткие позволяет использовать общепромышленные электроприводы с двигателями последовательного возбуждения и при малых нагрузках, а в тяговых электроприводах – снизить интенсивность буксования колесных пар электроподвижного состава. Разработанная методика решения переходных уравнений дает возможность учесть случайный характер изменения напряжения на двигателе в режимах зарядки и разрядки суперконденсаторного накопителя. Предложенный комбинированный метод делает возможным осуществление РТ и при малых скоростях вращения якоря электродвигателя, тем самым повышая энергоэффективность эксплуатации электроприводов этого типа.

Ключевые слова: электропривод; накопитель; рекуперация; суперконденсатор; характеристика электродвигателя; ток; процесс; электроэнергия

A. M. MUKHA^{1*}, M. O. KOSTIN², O. Y. KURYLENKO³, H. V. TSYPLIA⁴

^{1*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail andremu@i.ua, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{2*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail nkostin@ukr.net, ORCID 0000-0002-0856-6397

^{3*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail kyrilenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-2045-917X

^{4*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 043 06 29, e-mail glebtsyplia@gmail.com, ORCID 0000-0002-5568-605X

ENHANCING THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF DIRECT CURRENT DRIVE BASED ON USE OF SUPERCONDENSER POWER STORAGE UNITS

Purpose. The scientific work is intended to analyse the expansion of the load range and the implementation of regeneration braking (RB) of the direct current drive by using the supercondenser power storage units. **Methodology.** To solve the problem, we use the methods of the electric drive theory, impulse electronics and the method of calculation of transient electromagnetic processes in linear electric circuits in the presence of supercondensers therein. **Findings.** The stiffness of the mechanical and electromechanical characteristics of a series motor is significantly increased, which makes it possible to use a DC drive under load, much smaller than 15...20% of the nominal one. Numerical calculations of the operation process of the supercondenser power storage unit were fulfilled with a sharp decrease in the load of a traction electric motor of a direct current electric locomotive. The possibility of RB of the direct current drive with the series motor is substantiated. The equations of the process of charging and discharging of super-condenser storage unit in RB mode are solved. The authors examined the effect of capacitance on the nature of maintaining the excitation current of an electric motor in the mode of small loads. **Originality.** The paper developed theoretical approaches for the transformation of soft (mechanical and electromechanical) characteristics into hard ones of DC series motors. For the first time a new, combined method of the series motor RB is proposed and substantiated. Further development obtained the methods for evaluating the storage unit parameters, taking into account the criteria for reliable parallel operation of super-condensers with an electric motor field. **Practical value.** The proposed and substantiated transformation of soft characteristics into stiff ones allows us to use general-purpose electric drives with series motors and at low loads, and in traction electric drives - to reduce the intensity of electric stock wheel slipping. The developed method of solving transitional equations makes it possible to take into account the random nature of the voltage change on the motor in super-condenser drive charge and discharge modes. The proposed combined method makes it possible to carry out RB at low speeds of the motor armature as well, and thus to increase energy efficiency of operation of electric drives of this type.

Key words: electric drive; storage unit; regeneration; super-condenser; characteristic of the electric motor; current; process; power

REFERENCES

1. Astakhov, A., Karabanov, S., & Kukhmistrov, Y. (1997). Kondensatory s dvoynym elektricheskim slozem. *Radio*, 4, 57-58.
2. Vasilyev, V. A. (2011). The Analysis of Application Possibility of the Capacitor Energy Storing Devices on the Electric Rolling Stock. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 1 (26), 35-44.
3. Yevstafev, A. M. (2010). Primeneniye emkostnykh nakopiteley na elektricheskom podvizhnom sostave. In *Proceedings of the 5th International symposium «ELTRANS-2009», October 20-23, 2009, SPb* (pp. 537-545). St. Petersburg: PGUPS.
4. Kolb, A. A. (2006). *Teoriia elektropriyodu*. Dnipropetrovsk: National Mining University.
5. Kostin, M. O., Mukha, A. M., & Nikitenko, A. V. (2015). Vykorystannia superkondensatornykh nakopychuvachiv enerhii rekuperatyvnoho halmuvannia na lokomotyvakh postiinoho strumu VL11M6. In *Proceedings of the VIII International Scientific Conference Electrification on Transport «TRANSELECTRO-2015», December 21-22, 2015, Dnipropetrovsk* (pp. 102-103). Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.
6. Kostin, M. O., & Sheikina, O. H. (2007). *Teoretychni osnovy elektrotekhniki* (Vol. 2). Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.
7. Ryabtsyev, G. G., Yermakov, I. A., & Rubichyev, N. A. (2011). Raschet kondensatornykh nakopiteley energii dlya vagonov metropolitena. *Russian Electrical Engineering*, 8, 15-19.
8. Spiridonov, Y. A. (2010). *Povysheniye effektivnosti ispolzovaniya energii v elektrotransportnykh kompleksakh s nakopitelnyimi ustroystvami*. (PhD thesis). Available from Novosibirsk State Technical University. Novosibirsk.
9. Popovych, M. H. (Ed). (1993). *Teoriia elektropriyoda* [textbook]. Kyiv: Vyshcha shkola.
10. Shtang, A. A. (2006). *Povysheniye effektivnosti elektrotransportnykh sistem na osnove ispolzovaniya nakopiteley energii*. (PhD thesis). Available from Novosibirsk State Technical University. Novosibirsk.
11. Shchurov, N. I., Shtang, A. A., Spiridonov, E. A., Prokushev, Y. A., & Vertokhvostov, A. P. (2007). Determination of the Parameters of an Energy Store for an Electric Transport System. *Electrical Technology Russia*, 6, 53-56.
12. Harpool, S., von Jouanee A., & Yokochi A. (2014). Supercapacitor Performance Characterization for Renewables Applications. In *Proceeding of the IEEE Conference on Technologies for Sustainability SusTech, July 24-26, 2014, Portland, OR, USA*. 160-164. doi:10.1109/SusTech.2014.7046237
13. Iannuzzi, D., & Tricoli P. (2012). Speed-Based State-of-Charge Tracking Control for Metro Trains with Onboard Supercapacitors. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 27 (4), 2128-2140. doi:10.1109/tpel.2011.2167633.
14. Guidi, G., Pavlovsky, M., Kawamura, A., Imakubo, T., & Sasaki, Y. (2010). Improvement of light load efficiency of dual active bridge DC-DC converter by using dual leakage transformer and variable frequency. In *Proceeding of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 12-16, 2010, Atlanta, GA, USA*. 830-837. doi:10.1109/ecce.2010.5617909
15. Klohr, M., & Maroschik, A. (2012). Energiespeicher auf Straßen-und Stadtbahnfahrzeugen – das erste Serienprojekt. *Elektrische Bahnen*, 110 (8-9), 444-451.
16. Tango fur Genf mit. (2012). *Elektrischen Bahnen*, 110 (8-9), 508.
17. Brekken, T. K. A., Yokochi, A., von Jouanne, A., Yen, Z. Z., Hapke, H. M., & Halamay, D. A. (2011). Optimal Energy Storage Sizing and Control for Wind power Applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2 (1), 69-77. doi:10.1109/TSTE.2010.2066294
18. Pulling, N. (2009). Tram builders go to ground to find business. *Tramways&Urban Transit*, 72 (860), 300-303.
19. Rufer, A., Barrade, P., Hotellier, D. (2004). Power-Electronic Interface for a Supercapacitor-Based Energy-Storage Substations in DC-Transportation Networks. *EPE Journal*, 14 (4), 43-49. doi:10.1080/09398368.2004.11463573
20. Transit new. (2009). *Railway Journal*, 6, 10-12.
21. Variobahn mit Energiespeicher in Heidelberg in Betrieb. (2010). *Elektrische Bahnen*, 108 (1/2), 93-94.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. П. Є. Михаліченком (Україна);
д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцем (Україна)

Надійшла до редколегії: 06.04.2017

Прийнята до друку: 12.07.2017

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

UDC 629.4.016.56/.024.1

S. T. DJABBAROV^{1*}

*Dep. «Construction of Railways, Track and Track Facilities», Tashkent Institute of Railway Transport Engineers, Adylkhodzhaev St., 1, Tashkent, Uzbekistan, 100167, tel. +99 (890) 185 29 34, e-mail _saidhon_@inbox.ru.
ORCID 0000-0002-3798-407X

CONSIDERATION OF AERODYNAMIC IMPACT IN SETTING THE MAXIMUM PERMISSIBLE SPEEDS OF HIGH-SPEED TRAIN

Purpose. Studies of the effect of aerodynamic pressure on the maximum permissible speeds of a high-speed train on the existing railway infrastructure. **Methodology.** The study of the magnitude and direction of the aerodynamic pressure, its effect on the maximum speeds of a high-speed train was carried out on a train model composed of axisymmetric bodies with conical forms of head and tail parts. **Findings.** Determined the values of the aerodynamic pressure at different distances from the train are, when the high-speed train moves at a speed of 200 km/h or more. The maximum speeds of a high-speed train are determined taking into account the state of the infrastructure of the existing railway, ensuring the safe operation of a high-speed railway. **Originality.** Theoretical studies of aerodynamic pressure from secondary air currents formed during the movement of high-speed trains are performed on a model of a train composed of identical axisymmetric bodies with conical forms of head and tail moving in a compressible medium. The results of the research allow the regularity of the change in aerodynamic pressure during the movement of a high-speed train. **Practical value.** The obtained results allow to establish: 1) the maximum permissible speeds of a high-speed train taking into account the technical condition of permanent devices and structures of the existing railway infrastructure; 2) technical parameters of individual objects and structural elements of the infrastructure of high-speed iron subjected to the effect of aerodynamic pressure for a given maximum speed of high-speed trains.

Keywords: railway transport; high-speed train movement; aerodynamics; aerodynamic pressure; railway infrastructure; maximum speeds; technical parameters

Introduction

Half a century of experience in the operation of high-speed railroads, the results of numerous theoretical and experimental studies have shown that with an increase in speed, the character of the aerodynamic field around a moving high-speed train, the magnitude and vector of air currents change dramatically. The resulting air flows have a negative impact on the environment, worsening the safe functioning of the system «high-speed railway – the environment (or surrounding objects)».

The study of air flows generated by trains at high speeds is an urgent task of ensuring safety on high-speed railways.

Conducted the experimental and theoretical research directed carried out are aimed at obtaining information on the speed, direction of the secondary air currents and aerodynamic pressure arising from the movement of high-speed trains; assessment of their impact on the railway infrastructure facilities, surrounding nature, as well as on people; Security and comfort to passengers [1–4]. According to the results of experimental studies, determined the dependences of the aerodynamic drag on the speed [5]; the interaction of a moving high-speed train with objects located along the railway, including trains moving along a parallel path [3, 4, 6–8]; the physics of the formation of aerodynamic flows in separate parts of a moving high-speed train [5, 9].

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Theoretical studies performed on the model of a high-speed train as an axisymmetric body made it possible to establish the magnitude and velocity vector of secondary air currents, as well as aerodynamic effects on railway infrastructure objects and people [10].

Providing traffic safety for trains and passengers; uninterrupted operation of the entire infrastructure of high-speed railway is the main condition for the organization of high-speed and high-speed passenger train traffic. A high degree of security is usually provided at all stages of creating a high-speed highway, i.e. is laid during the design, is provided during construction and is implemented in the course of operation of the infrastructure of high-speed railways. This task is relevant in the design of high-speed train traffic on existing railways, which were designed for the maximum speed of passenger trains of 120–160 km/h.

Since, on existing lines, high-speed traffic is possible after a large-scale reconstruction and modernization of permanent facilities and structures of the existing infrastructure, when designing a high-speed traffic organization using the existing railway infrastructure, the maximum permissible speeds for a high-speed train for each facility should be set separately taking into account their technical condition.

Purpose

To ensure the safe operation of a high-speed railway, it is necessary to consider the aerodynamic impact on people and railway infrastructure objects as one of the main safety criteria for high-speed passenger train traffic, since a train moving at high speed exerts aerodynamic impact on each i -th object by the $P_{\max i}$ value.

In this case, the technical state of the i -th object allows him to perceive the impact with the maximum permissible value of P_{peri} without reducing the safety level of movement high-speed trains.

In connection with the foregoing, in order to ensure the safe operation of a high-speed railway on all sites or structural elements of the infrastructure of the existing path, the condition

$$P_{\max i} \leq P_{\text{peri}} \quad (1)$$

Since, according to Bernoulli's law, the aerodynamic pressure varies directly in proportion to the speed of the air flow V_f created by the movement of a high-speed train, let us consider the theoretical aspects of establishing the value of the maximum train speed ensuring the fulfillment of condition (1).

Methodology

The aerodynamic impact, strength and directivity of pressure on an object depend on the maximum speed and duration of the air flow, the spatial location, availability and proximity of the railway infrastructure objects relative to a moving high-speed train.

For each i -th object (or its structural element) of the infrastructure of the existing railway, it is possible to compute a design scheme of the effect of aerodynamic pressure on it (Fig. 1). In all calculation cases, for a known distance B from a moving high-speed train to an object and the maximum permissible impact that a given P_{peri} object can perceive, it is necessary to determine the speed of the high-speed train $V_{\max i}$ and hence the airflow rate V_f that satisfies condition (1).

Thus, the task of determining the aerodynamic impact on object i is reduced to determining the speed of the secondary airflow V_{fi} directly at the i -th object when the high-speed train moves at a speed $V_{\max i}$.

As the development of earlier studies [10] the distribution of the air flow and the determination of its velocity along a moving high-speed train, we investigate on a model of a train consisting of a locomotive and $2n$ wagons. Locomotive and wagons are presented as an axisymmetric body with streamlined forms of the head and tail parts moving in a compressible (acoustic) medium [10].

To simplify the calculations, we assume that the locomotive and all wagons in the cross section have the same shape, i.e. consist of a circular cylinder with the same shape of the head and tail in the form of cones (Fig. 2).

The axisymmetric wave equation of the aerodynamic field near a high-speed train consisting of a locomotive and $2n$ wagons is solved both for a train consisting of one single wagon [8].

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

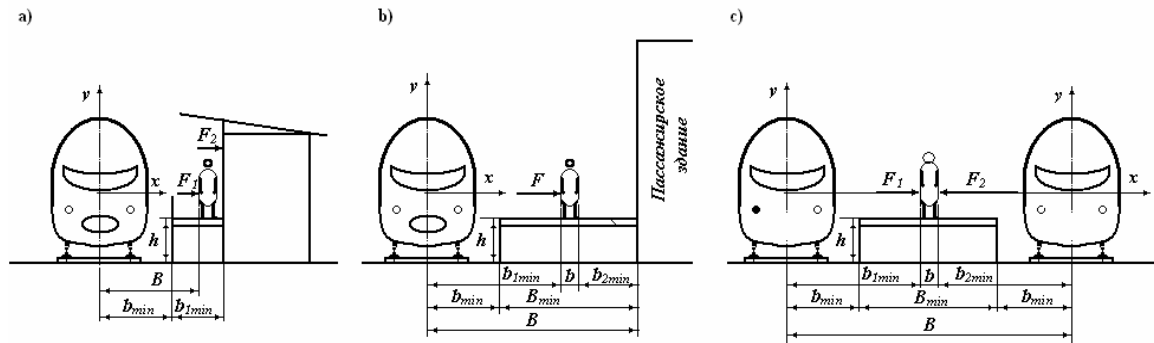


Fig. 1. Calculation schemes for the location of high-speed train and facilities:
a – «train-man-object»; b – «train-passenger on the platform-object»;
c – «train-passenger on the platform-train»

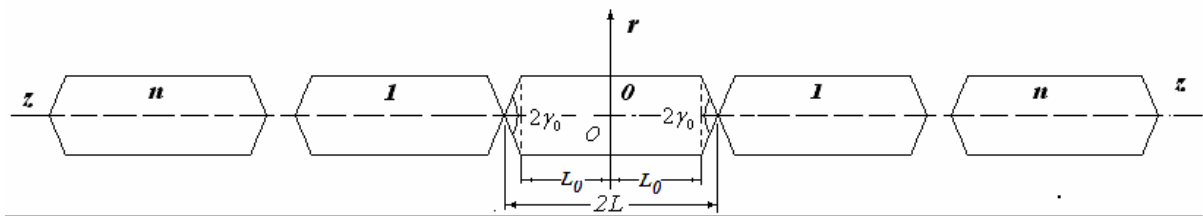


Fig. 2. Scheme of a high-speed train with a locomotive and $2n$ wagons

In the given case, we consider the function $f(z)$ for each wagons can be represented in the form $f_{ij}(z)$, where the index i indicates the ordinal number of the wagons from the center of the train ($j=0$ corresponds to the number of the middle car), the index j on the geometric shape of the part of the wagons. If we assume that the wagon consists of three geometric parts, i.e. Head, cylindrical, tail parts, then $j=1, 2, 3$ ($j=1$ corresponds to the cylindrical part, $j=2$ the tail part, $j=3$ the head part).

The propagation of an acoustic wave in the air medium can be represented by the equation (2) with the boundary conditions (3) and (5) [10]. The condition that the component along the velocity axis of the medium on the boundary of the half-space be zero, in contrast to equation (4) [11], takes the following form

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial y} = 0 \text{ at } y = -h - R - f(z). \quad (2)$$

To find the solution of the equation, the method of sources was used [11]. Considering the function $\varphi(r, z)$ satisfying (2), the boundary conditions (3),

(5) [9] and (2), the solution in [10] can be represented in the form

$$\varphi_1 = -\frac{1}{4\pi} \int_{-(2n+1)L}^{(2n+1)L} \frac{q(\xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - z)^2 + \alpha^2 r^2}}. \quad (3)$$

Where $q(z)$ – is the power of the source distributed over the surface of the moving body within $0 < r < f_{ij}(z)$, $-(2n+1)L < z < (2n+1)L$.

For an axisymmetric body from formula (3) to [12], it can be asserted that

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial r} \rightarrow \frac{q(z)}{2\pi r} \text{ at } r \rightarrow 0. \quad (4)$$

Since the problem is symmetrical with respect to the axis $0z$, a high-speed train consists of a locomotive and $2n$ wagons, the equation of the surface of the body $r = f_{ij}(z)$, as well as the power of the source from each car $q(z)$ and its components can be recorded separately.

For the cylindrical part of the car:

$$\text{at } 2nL - L_0 < z < 2nL + L_0 \text{ and}$$

$$(2nL + L_0) < z < -(2nL - L_0) \quad f_{n1} = R \quad q = 0.$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

For the head and tail parts of the wagon located up to the middle of the train:

at $2nL + L_0 < z < (2n+1)L$

$$f_{n2} = \gamma_0[(2n+1)L - z] \quad q = -2\pi v_0 \gamma_0^2 f_{n,2};$$

and $-(2n+1)L < z < -(2nL + L_0)$

$$f_{n2} = \gamma_0[(2n+1)L + z] \quad q = 2\pi v_0 \gamma_0^2 f_{n,2}.$$

For the head and tail parts of the wagon located behind the middle of the train:

at $(2n+1)L < z < (2n+1)L + L_0$

$$f_{n3} = \gamma_0[z - (2n+1)L] \quad q = -2\pi v_0 \gamma_0^2 f_{n3};$$

$$\begin{aligned} \varphi_1 = & -\frac{v_0 \gamma_0^2}{2} \left\{ \sum_{i=0}^n \left[\int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{(2i+1)L - \xi}{\sqrt{(z+\xi)^2 + \alpha^2 r^2}} d\xi - \int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{(2i+1)L - \xi}{\sqrt{(z-\xi)^2 + \alpha^2 r^2}} d\xi \right] \right\} + \\ & + \frac{v_0 \gamma_0^2}{2} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{\xi - (2i-1)L}{\sqrt{(z+\xi)^2 + \alpha^2 r^2}} d\xi - \int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{\xi - (2i-1)L}{\sqrt{(z-\xi)^2 + \alpha^2 r^2}} d\xi \right] \right\}. \quad (5) \end{aligned}$$

We introduce a new variable $r_{ij} = r_{ij}(x, y, z)$ expressed by the formula

$$r_{ij} = \sqrt{x^2 + [2f_{ij}(z) + 2h + 2R + y]^2}. \quad (6)$$

And consider the total potential presented in the form

$$\varphi_n = \varphi_1(r, z) + \varphi_1[r_{ij}(x, y, z), z]. \quad (7)$$

The function $\varphi_n(x, y, z)$ satisfies the boundary condition (2), and the function $\varphi_1 = \varphi_1[r_{ij}(x, y, z), z]$ satisfies equations (4) only for $\gamma_0 = 0$. Assuming γ_0 a small parameter and setting $f_{ij} = \gamma_0 f_{0ij}$ the function

and $-(2n+1)L + L_0 < z < -(2n+1)L$

$$f_{n3} = -\gamma_0[(2n+1)L + z] \quad q = -2\pi v_0 \gamma_0^2 f_{n,3}.$$

For example, for a wagon $i=1$ and its part $j=2$ as: $2L + L_0 < z < 3L$; $f_{12} = \gamma_0(3L - z)$; $q = -2\pi v_0 \gamma_0^2 f_{12}$.

Taking into account the symmetry of the problem with respect to the variable z , the power of the source from each car and its components $q(z)$, equation (3) can be represented in the following form

$$\begin{aligned} 1/r_{ij} = & 1/\sqrt{x^2 + [2\gamma_0 f_{0ij}(z) + 2h + 2R + y]^2}, \text{ we can} \\ & \text{expand in powers of this parameter as} \\ \frac{1}{r_{ij}} = & \frac{1}{\sqrt{x^2 + [2\gamma_0 f_{0ij}(z) + 2h + y]^2}} = \\ = & \frac{1}{r_1} + \gamma_0 \frac{2(2h + y)f_{0ij}(z)}{r_1^3} + \dots, \quad (8) \end{aligned}$$

where $r_1 = \sqrt{x^2 + (2h + 2R + y)^2}$.

If we substitute expression (8) into (5), then formula (7) takes the form

$$\varphi_n = \gamma_0^2 [\varphi_{01}(r, z) + \varphi_{01}(r_1, z) + \gamma_0 \varphi_{02} + \dots], \quad (9)$$

where

$$\begin{aligned} \varphi_{01} = & -\frac{v_0}{2} \left\{ \sum_{i=0}^n \left[\int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{(2i+1)L - \xi}{\sqrt{(z+\xi)^2 + \alpha^2 r^2}} d\xi - \int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{(2i+1)L - \xi}{\sqrt{(z-\xi)^2 + \alpha^2 r^2}} d\xi \right] \right\} + \\ & + \frac{v_0}{2} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{\xi - (2i-1)L}{\sqrt{(z+\xi)^2 + \alpha^2 r^2}} d\xi - \int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{\xi - (2i-1)L}{\sqrt{(z-\xi)^2 + \alpha^2 r^2}} d\xi \right] \right\}; \quad (10) \end{aligned}$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

$$\begin{aligned} \Phi_{02} = v_0 \left\{ \sum_{i=0}^n \left[\int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{[(2i+1)L-\xi][2h+y]f_{0ij}(z)}{\sqrt{[(z+\xi)^2+\alpha^2r_1^2]^3}} d\xi - \int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{[(2i+1)L-\xi][2h+y]f_{0ij}(z)}{\sqrt{[(z-\xi)^2+\alpha^2r_1^2]^3}} d\xi \right] \right\} + \\ + v_0 \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{[\xi-(2i-1)L][2h+y]f_{0ij}(z)}{\sqrt{[(z+\xi)^2+\alpha^2r_1^2]^3}} d\xi - \int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{[\xi-(2i-1)L][2h+y]f_{0ij}(z)}{\sqrt{[(z-\xi)^2+\alpha^2r_1^2]^3}} d\xi \right] \right\}. \quad (11) \end{aligned}$$

In the sum of potentials (9), the first approximation is a function Φ_{01} that satisfies equation (6) [10] and boundary condition (2).

The components of the velocity vector of air particles can be determined by the following formulas

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_n}{\partial x} = \frac{\partial \Phi_{01}(r, z)}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_{01}(r_1, z)}{\partial r_1} \frac{\partial r_1}{\partial x} = \frac{v_0 x}{2r} \left\{ \sum_{i=0}^n \left[\int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{(2i+1)L-\xi}{(z+\xi)^2+\alpha^2r^2} d\xi - \int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{(2i+1)L-\xi}{(z-\xi)^2+\alpha^2r^2} d\xi \right] \right\} - \\ - \frac{v_0 x}{2r} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{\xi-(2i+1)L}{(z+\xi)^2+\alpha^2r^2} d\xi - \int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{\xi-(2i-1)L}{(z-\xi)^2+\alpha^2r^2} d\xi \right] \right\} + \\ + \frac{v_0 x}{2r_1} \left\{ \sum_{i=0}^n \left[\int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{(2i+1)L-\xi}{(z+\xi)^2+\alpha^2r_1^2} d\xi - \int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{(2i+1)L-\xi}{(z-\xi)^2+\alpha^2r_1^2} d\xi \right] \right\} - \\ - \frac{v_0 x}{2r_1} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{\xi-(2i-1)L}{(z+\xi)^2+\alpha^2r_1^2} d\xi - \int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{\xi-(2i+1)L}{(z-\xi)^2+\alpha^2r_1^2} d\xi \right] \right\}; \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_n}{\partial y} = \frac{\partial \Phi_1(r, z)}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial y} + \frac{\partial \Phi_1(r_1, z)}{\partial r_1} \frac{\partial r_1}{\partial y} = \frac{v_0 y}{2r} \left\{ \sum_{i=0}^n \left[\int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{(2i+1)L-\xi}{(z+\xi)^2+\alpha^2r^2} d\xi - \int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{(2i+1)L-\xi}{(z-\xi)^2+\alpha^2r^2} d\xi \right] \right\} - \\ - \frac{v_0 y}{2r} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{\xi-(2i+1)L}{(z+\xi)^2+\alpha^2r^2} d\xi - \int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{\xi-(2i-1)L}{(z-\xi)^2+\alpha^2r^2} d\xi \right] \right\} + \\ + \frac{v_0(y+2h+2R)}{2r_1} \left\{ \sum_{i=0}^n \left[\int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{(2i+1)L-\xi}{(z+\xi)^2+\alpha^2r_1^2} d\xi - \int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{(2i+1)L-\xi}{(z-\xi)^2+\alpha^2r_1^2} d\xi \right] \right\} - \\ - \frac{v_0(y+2h+2R)}{2r_1} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{\xi-(2i-1)L}{(z+\xi)^2+\alpha^2r_1^2} d\xi - \int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{\xi-(2i-1)L}{(z-\xi)^2+\alpha^2r_1^2} d\xi \right] \right\}; \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_n}{\partial z} = \frac{\partial \Phi_1(r, z)}{\partial z} + \frac{\partial \Phi_1(r_1, z)}{\partial z} = \frac{v_0}{2} \left\{ \sum_{i=0}^n \left[\int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{[(2i+1)L-\xi](z+\xi)}{(z+\xi)^2+\alpha^2r^2} d\xi - \int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{[(2i+1)L-\xi](z-\xi)}{(z-\xi)^2+\alpha^2r^2} d\xi \right] \right\} - \\ - \frac{v_0}{2} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{[\xi-(2i-1)L](z+\xi)}{(z+\xi)^2+\alpha^2r^2} d\xi - \int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{[\xi-(2i-1)L](z-\xi)}{(z-\xi)^2+\alpha^2r^2} d\xi \right] \right\} + \\ + \frac{v_0}{2} \left\{ \sum_{i=0}^n \left[\int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{[(2i+1)L-\xi](z+\xi)}{(z+\xi)^2+\alpha^2r_1^2} d\xi - \int_{2iL+L_0}^{(2i+1)L} \frac{[(2i+1)L-\xi](z-\xi)}{(z-\xi)^2+\alpha^2r_1^2} d\xi \right] \right\} - \\ - \frac{v_0}{2} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{[\xi-(2i-1)L](z+\xi)}{(z+\xi)^2+\alpha^2r_1^2} d\xi - \int_{(2i-1)L}^{2iL-L_0} \frac{[\xi-(2i-1)L](z-\xi)}{(z-\xi)^2+\alpha^2r_1^2} d\xi \right] \right\}. \quad (14) \end{aligned}$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

The absolute speed of the air flow constitute by the system of high-speed train cars when it moves at a steady speed at an arbitrary point M (x, y, z) can be defined as

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}. \quad (15)$$

The airflow pressure can be determined from formula

$$\Delta p = -\rho_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \rho_0 v_0 \left[\frac{\partial \varphi_1(r, z)}{\partial z} + \frac{\partial \varphi_1(r_1, z)}{\partial z} \right]. \quad (16)$$

Findings

As an example, the establishment of the maximum permissible speed of a high-speed train for a protected rail crossing is considered.

In this case, the most vulnerable object to the effect of aerodynamic pressure is the duty guard on

the guarded crossing. In the calculations it is assumed that a high-speed train consists of a locomotive and four wagons, i.e. $n = 2$, the length of the locomotive and wagons $L = 25$ m, the total length of the train $L_{tr} = 125$ m, $R = 2$ m, $\rho_0 = 1.2$ kg/m³, the speed of the train v_0 is assumed to be 160, 200, 250, 350, 400 km/h. For visual study of the influence between wagons space on the magnitude of aerodynamic pressure, space was artificially created.

Based on the results of the calculations, graphs are constructed of the change in the aerodynamic pressure of the air flow during the passage of a high-speed train at a speed of 200 km/h along the duty room of the guard on the guarded crossing (Fig. 3).

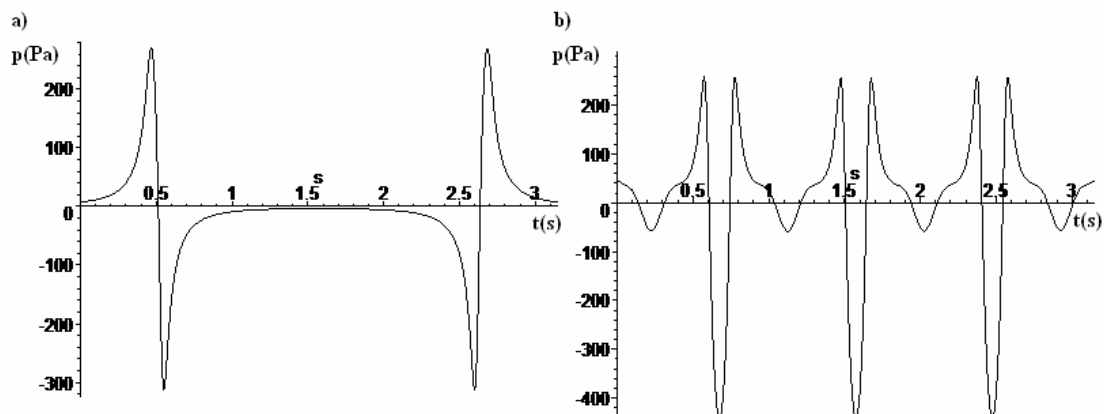


Fig. 3. Graphs of the change in aerodynamic airflow pressure versus time:
a – with closed and b – open between wagon spaces

Analysis of the graphs shows that in both cases the negative pressure is greater than the positive one. The reliability of these calculations is confirmed by the results of previous experiments in the US, Russia, Sweden. The effect between the wagons space on the magnitude of the negative (suction) aerodynamic pressure is clearly visible in the graph shown in Fig. 3, b. On the railways of individual states, the movement of dual high-speed trains is practiced. With sufficient streamlining of the head and tail wagons, in places the pairing of trains produces a negative aerodynamic pressure, the value of which considerably exceeds the value of the excess pressure. Similar graphs can be constructed for other velocities and distances.

Thus, it can be argued that in order to ensure the safe operation of the railway infrastructure, it is necessary to take into account the aerodynamic flows and pressures in their independence.

Using the results of calculations, it is also possible to construct a curve for the dependence of the magnitude of aerodynamic pressure on the speed of trains and the distance to the considered point P_{max} (Fig. 4), similarly to Fig. 3 [7]. Using these dependencies, you can set the maximum permissible speed of a high-speed train along an object. Suppose that in the considered calculation case the permissible value of the aerodynamic impact on the moving attendant is known, which according to the sanitary norms should not exceed 100 PA. In this case, the distance on which the

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

office space is located is regulated by the C dimension in accordance with GOST 9238 and should be at least 2.45 m from the track axis. Using the curve $P_{\max}$ shown in Fig. 4, one can find the intersection point of the lines corresponding to the

aerodynamic pressure of 100 PA and a distance of 2.45 m, i.e. Train speed.

Thus, when a high-speed train moves at a maximum speed of 150 km/h, the corresponding condition (1) will be satisfied by the value of this point, i.e. safety of the shift attendant.

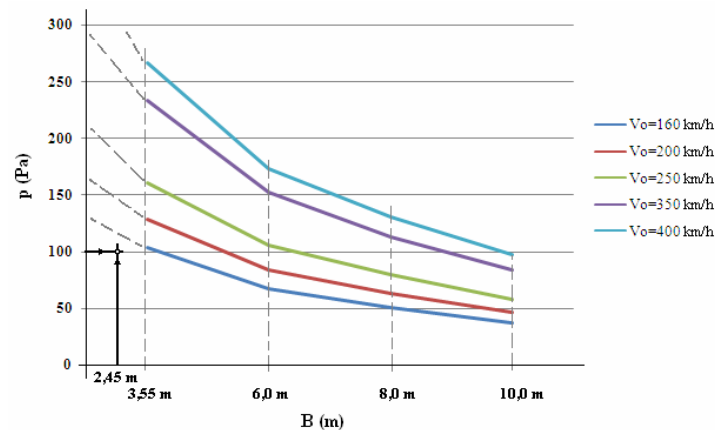


Fig. 4. The curves of the dependence of aerodynamic pressure on the speed of trains (V_0) and the distance to the object (B)

Originality and practical value

Theoretical studies of aerodynamic pressure from secondary air currents formed during the movement of high-speed trains are performed on a model of a train composed of identical axisymmetric bodies with conical forms of head and tail moving in a compressible medium. The results of the research allow us to establish the patterns of variation in aerodynamic pressure during the movement of a high-speed train.

Conclusions

The obtained results allow to establish:

- the maximum permissible speed of a high-speed train, taking into account the technical condition of permanent devices and structures of the existing railway infrastructure;
- technical parameters of individual objects and structural elements of high-speed iron infrastructure subjected to the effect of aerodynamic pressure for a given maximum speed of high-speed trains.

The proposed method can be used in the practice of designing high-speed train traffic both on existing and newly constructed railways.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Исанов, Р. Ш. Двухслойный поток воздуха при обтекании высокоскоростного поезда / Р. Ш. Исанов // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 4 (46). – С. 127–134. doi: 10.15802/stp2013/16609.
2. Лазаренко, Ю. М. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении / Ю. М. Лазаренко, А. Н. Капускин // Вестн. ВНИИЖТа. – 2012. – № 4. – С. 11–14.
3. Ламб, Г. Гидродинамика / Г. Ламб. – Москва ; Ленинград : ОГИЗ, 1947. – 929 с.
4. Сагомоян, А. Я. Проникание / А. Я. Сагомоян. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1974. – 299 с.
5. Baker, C. The Flow Around High Speed Trains / Baker C. // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2010. – Vol. 98. – Iss. 6/7. – P. 277–298. doi: 10.1016/j.jweia.2009.11.002.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

6. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform / A. Khayrullina, B. Blocken, W. Janssen, J. Straathof // *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2015. – Vol. 139. – P. 100–110. doi: 10.1016/j.jweia.2015.01.019.
7. Derkowski, P. Aerodynamic effects of high speed trains on passenger, track workers, and other people [Electronic resource] / P. Derkowski, S. Clark, R. Sturt // *Proc. of the Arema 2014 Annual Conference & Exposition, Chicago, IL, 28.09–01.10.2014*. – Available at: https://www.arema.org/files/library/2014_Conference_Proceedings/Aerodynamic_Effects_of_High_Speed_Trains_on_Passengers_Track_Workers_and_Other_People.pdf. – Title from the screen. – Accessed : 25.09.2017.
8. Djabbarov, S. T. Aerodynamic field model of high-speed train / S. T. Djabbarov, M. Mirakhmedov, B. Mardonov // *Transport Problems : VIII Conf. Intern. (27.06–29.06.2016)* / Silesian University of Technology. – Katowice, 2016. – P. 107–115.
9. Harvey, S. Lee. The Aerodynamic Effects of Passing Trains to Surrounding Objects and People. Final Report / S. Lee Harvey // DOTVNTSC-FRA-04-05. U.S. / Department of Transportation Research and Special Programs Administration John A. Volpe National Transportation Systems Center. – Washington, DC, 2009. – April 2009. – P. 257.
10. Holmes, S. Aerodynamic Effects of High-Speed Passenger Trains on Other Trains. Final Report / S. Holmes, M. Schroeder // DOTVNTSC-FRA-01-05. U.S. / Department of Transportation Research and Special Programs Administration John A. Volpe National Transportation Systems Center. – Washington, DC, 2002. – September 2000–March 2001. – P. 72.
11. Research on running stability of CRH3 high speed trains passing by each other / Z. Sun, Y. Zhang, D. Guo, G. Yang, Y. Liu // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. – 2014. – Vol. 8. – Iss. 1. – P. 140–157. doi: 10.1080/19942060.2014.11015504.
12. Yang Q.-S. A moving model rig with a scale ratio of 1/8 for high speed train aerodynamics / Q.-S. Yang, J.-H. Song, G.-W. Yang // *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2016. – Vol. 152. – P. 50–58. doi: 10.1016/j.jweia.2016.03.002.

С. Т. ДЖАББАРОВ^{1*}

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

УЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ МАКСИМАЛЬНО-ДОПУСТИМЫХ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОЕЗДА

Цель. В работе предполагается провести исследования влияния аэродинамического давления на максимально-допустимые скорости движения высокоскоростного поезда по существующей инфраструктуре железной дороги. **Методика.** Исследование величины и направления аэродинамического давления, его влияние на максимальные скорости высокоскоростного поезда проведено на модели поезда, составленного из осесимметричных тел с коническими формами головных и хвостовых частей. **Результаты.** Определены значения аэродинамического давления на различном расстоянии от поезда при движении высокоскоростного поезда со скоростью 200 км/ч и более. Установлены максимальные скорости движения высокоскоростного поезда с учетом состояния объектов инфраструктуры существующей железной дороги, что обеспечивает безопасное функционирование высокоскоростной железной дороги. **Научная новизна.** Теоретические исследования аэродинамического давления от вторичных воздушных потоков, образуемых при движении высокоскоростных поездов, выполнены на модели поезда, составленного из одинаковых осесимметричных тел с коническими формами головных и хвостовых частей, движущегося в сжимаемой среде. Результаты исследований позволяют установить закономерности изменения аэродинамического давления при движении высокоскоростного поезда. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют установить: 1) максимально-допустимые скорости высокоскоростного поезда с учетом технического состояния постоянных устройств и сооружений существующей инфраструктуры железных дорог; 2) технические параметры отдельных объектов и конструктивных элементов инфраструктуры высокоскоростных железных дорог, подвергающихся

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

воздействию аэродинамического давления при заданном значении максимальной скорости движения высокоскоростных поездов.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; высокоскоростное движение поездов; аэродинамика; аэродинамическое давление; инфраструктура железной дороги; максимальные скорости; технические параметры

С. Т. ДЖАББАРОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Будівництво залізниць, колія та колійне господарство», Ташкентський інститут інженерів залізничного транспорту, вул. Адилходжаєва, 1, Ташкент, Узбекистан, 100167, тел. +99 (890) 185 29 34, ел. пошта _saidhon_@inbox.ru, ORCID 0000-0002-3798-407X

ВРАХУВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ ПРИ ВСТАНОВЛЕННІ МАКСИМАЛЬНО-ПЕРЕДБАЧЕНИХ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ПОТЯГУ

Мета. У роботі передбачається провести дослідження впливу аеродинамічного тиску на максимально-допустимі швидкості руху високошвидкісного поїзда по існуючій інфраструктурі залізниці.

Методика. Дослідження величини та напрямку аеродинамічного тиску, його впливу на максимальні швидкості високошвидкісного поїзда проведено на моделі поїзда, складеного з осесиметричних тіл із конічними формами головних і хвостових частин. **Результати.** Визначено значення аеродинамічного тиску на різній відстані від поїзда при русі високошвидкісного поїзда зі швидкістю 200 км/год і більше. Встановлено максимальні швидкості руху високошвидкісного поїзда з урахуванням стану об'єктів інфраструктури існуючої залізниці, що забезпечує безпечне функціонування високошвидкісної залізниці.

Наукова новизна. Теоретичні дослідження аеродинамічного тиску від вторинних повітряних потоків, утворених при русі високошвидкісних поїздів, виконані на моделі поїзда, складеного з однакових осесиметричних тіл із конічними формами головних і хвостових частин, що рухається в стискуваному середовищі. Результати досліджень дозволяють установити закономірності зміни аеродинамічного тиску при русі високошвидкісного поїзда. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють встановити: 1) максимально-допустимі швидкості високошвидкісного поїзда з урахуванням технічного стану постійних пристроїв і споруд існуючої інфраструктури залізниць; 2) технічні параметри окремих об'єктів та конструкційних елементів інфраструктури високошвидкісних залізниць, що піддаються впливу аеродинамічного тиску при заданому значенні максимальної швидкості руху високошвидкісних поїздів.

Ключові слова: залізничний транспорт; високошвидкісний рух поїздів; аеродинаміка; аеродинамічний тиск; інфраструктура залізниці; максимальні швидкості; технічні параметри

REFERENCES

1. Isanov, R. S. (2013). Double layer air current during the high speed train flow-around. *Science and Transport Progress*, 4 (46), 127-134. doi:10.15802/stp2013/16609
2. Lazarenko, Y. M., & Kapuskin, A. N. (2012). High-speed train «Sapsan»'s aerodynamical action on passengers standing on platform and on oncoming train when crossing. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 4, 11-14.
3. Lamb, G. (1947). *Gidrodinamika* (A. V. Germogenov, V. A. Kudryavtsev, Trans.). Moscow, Leningrad: OGIZ-Gostekhizdat.
4. Sagomonyan, A. Y. (1974). *Pronikaniye* [Monograph]. Moscow: Moscow State University.
5. Baker, C. (2010). The Flow Around High Speed Trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98 (6/7), 277-298. doi:10.1016/j.jweia.2009.11.002
6. Khayrullina, A., Blocken, B., Janssen, W., & Straathof, J. (2015). CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139, 100-110. doi:10.1016/j.jweia.2015.01.019
7. Derkowski, P., Clark, S., & Sturt, R. (2014). Aerodynamic effects of high speed trains on passenger, track workers, and other people. In *Proceedings of the AREMA 2014 Annual Conference & Exposition, Chicago, IL, September 28 - October 1*. Retrieved from

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- https://www.arena.org/files/library/2014_Conference_Proceedings/Aerodynamic_Effects_of_High_Speed_Trains_on_Passengers_Track_Workers_and_Other_People.pdf
8. Djabbarov, S. T., Mirakhmedov, M., & Mardonov B. (2016). Aerodynamic field model of high-speed train. In *Proceedings of the VIII International Conference Transport Problems, June 27-29, Katowice*. (pp. 107-115). Katowice: Silesian University of Technology.
 9. Harvey, S. Lee. (2009). *The aerodynamic effects of passing trains to surrounding objects and people: safety of high-speed ground transportation systems* (final report DOTVNTSC-FRA-04-05). Washington, DC: Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Office of Railroad Policy and Development.
 10. Holmes, S., & Schroeder, M. (2002). *Aerodynamic Effects of High-Speed Passenger Trains on Other Trains* (final report DOTVNTSC-FRA-01-05). Washington, DC: U. S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration.
 11. Sun, Z., Zhang, Y., Guo, D., Yang, G., & Liu, Y. (2014). Research on running stability of CRH3 high speed trains passing by each other. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8 (1), 140-157. doi:10.1080/19942060.2014.11015504
 12. Yang, Q.-S., Song, J.-H., & Yang, G.-W. (2016). A moving model rig with a scale ratio of 1/8 for high speed train aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 152, 50-58. doi:10.1016/j.jweia.2016.03.002

Prof. M. B. Kurhan, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. S. S. Fayzibaev, D. Sc. (Tech.), (Uzbekistan) recommended this article to be published

Received: May 17, 2017

Accessed: Sept. 21, 2017

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

UDC 669:621.791.75:539.5

I. O. VAKULENKO¹, S. O. PLITCHENKO^{2*}, N. G. MURASHOVA³

¹Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

^{2*}Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail plit4enko@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

³«Design and Technological Bureau», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport Named After Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0003-2758-0749

INFLUENCE OF STRUCTURAL PARAMETERS OF LOW-CARBON STEEL ON ELECTRIC ARC BURNING

Purpose. The article is aimed to evaluate the influence of structural parameters of low-carbon steel on arcing process. **Methodology.** The values of the micro- and substructure characteristics of the electrode wire metal were changed by varying the parameters of heat treatment and cold deformation by drawing. The degree of plastic deformation was obtained by drawing blanks from different initial diameter to final dimension of 1 mm. The thermal treatment was carried out in electric chamber furnace of the SNOL-1,6.2,5.1/11-IZ type. The temperature was measured by chromel-alumel thermocouple and the electromotive force was determined using the DC potentiometer. In order to obtain the substructure of different dispersion degree the steel (after quenching from temperatures and tempering at 650°C for 1 hour) was subjected to cold drawing to reduction 17 – 80%. To form structure with different ferrite grain size the steel after drawing was annealed at 680°C for 1 hour. The microstructure was examined under a light and electron transmission microscope UEMV-100K at the accelerating voltage 100 kV. The grain and sub-grain sizes were evaluated using the methodologies of quantitative metallography. A welding converter of the PSG-500 type was used to study the arc welding process of direct and reverse polarities. **Findings.** The experimentally detected value of the welding current, which depends on the degree of deformation during wire drawing, under conditions of stable arc burning of direct polarity is about an order of magnitude lower than the calculated value. Similar difference was found for the arc of reverse polarity: the experimental value of the welding current is 5–6 times less than the calculated value. Dependence analysis shows that, regardless of the polarity of the welding arc, a good enough agreement between the calculated and experimental values of the welding current is limited to deformations of 60%. For deformation degrees of more than 60%, the differences are explained by qualitative changes in the dislocation cell structure. **Originality.** In the conditions of stable arcing of different polarity for the electrode of low-carbon steel, an extreme dependence of welding current on the degree of cold plastic deformation was observed. **Practical value.** Influence of ferrite grain size of electrode wire on the value of welding current is much greater than that from substructure presence.

Keywords: structure; welding electric current; polarity; welding arc stability; cold plastic deformation; cell; ferrite

Introduction

In conditions of electric arc welding the process of arcing is sensitive to the influence of a certain number of factors [7, 11, 12, 18]. They include

maintaining the optimal ratio between the rate of the electrode metal melting and its feeding into reaction zone, conditions of metal transfer through the interelectrode space [8, 15-17, 19, 20], etc. Taking into account that metal transfer between the

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

electrodes is carried out in the form of a gas-droplet mixture, the very process of liquid metal droplet formation at the end of the electrode, its size and shape should to some extent influence the technological characteristics of electric arc welding. Analysis of the conditions for formation of liquid metal droplet indicates existence of certain relationship between the surface tension of metal and gravitational component [9]. Taking into account possible dependence of the surface tension forces on the structural state of electrode metal, the size of structural elements may have certain influence on the conditions of formation and burning of electric arc.

Purpose

The article is aimed to evaluate the influence of structural parameters of low-carbon steel on arcing process.

Material and methodology of study

A wire of 1 mm diameter of low-carbon steel with a carbon content of 0.2% was used as a material for electrode. The values of the micro- and substructure characteristics of the electrode wire metal were varied by varying the parameters of heat treatment and cold deformation by drawing. The values of the micro- and substructure characteristics of the electrode wire metal were changed by varying the parameters of heat treatment and cold deformation by drawing. The degree of plastic deformation was obtained by drawing blanks from different initial diameter to final dimension of 1 mm. Thermal treatment was carried out in electric chamber furnace of the SNOL-1,6,2,5,1/11-IZ type. To prevent the formation of oxide film on the metal surface, the samples were placed in quartz glass ampoules with preliminary deairing to the level of forvacuum. The temperature was measured by chromel-alumel thermocouple and the electromotive force was determined using the DC potentiometer. In order to obtain the substructure of different dispersion degree the steel after quenching from temperatures A_{c_3} and tempering at 650°C for 1 hour was subjected to cold drawing to reduction 17–80%. To form structure with different ferrite grain size the steel after drawing was annealed at 680°C for 1 hour. The microstructure was exam-

ined under a light and electron transmission microscope UEMV–100K at the accelerating voltage 100 kV. The grain and subgrain sizes were evaluated using the methodologies of quantitative metallography [5]. A welding converter of the PSG-500 type was used to study the arc welding process of direct and reverse polarities. The welding current value was estimated as the average of 10 measurements.

Findings

Analysis of the results of investigations [7–9] indicates that when metal is melting, the surface tension forces form a drop at the end of the electrode. The moment of droplet detachment corresponds to the condition that the gravitational component exceeds the surface tension force. Taking into account that as the molten metal temperature rises, the surface tension force decreases, the welding current increase should lead to the dispersion of the emerging droplets. Condition of balance between the hydrostatic pressure from pinch effect and the surface tension (σ) makes it possible to estimate the critical value of welding current ($I_k = B\sqrt{\sigma \cdot d}$, where B – is a constant equal to 32.7 A/dynes^{0.5}, d – the electrode diameter) upon the detachment of liquid metal droplet [9]. Substituting the constant B and σ of molten metal (1220 dynes/cm [9]) in the ratio for I_k , the value I_k for low-carbon steel should be about 360 A, which is confirmed by the data [8, 9]. The experimentally observed value of the welding current (I_1) on the degree of deformation during wire drawing (ε) under conditions of stable arcing of direct polarity, is approximately an order of magnitude lower than the calculated value (Fig. 1). A similar difference was found for the arc of reverse polarity: I_1 less than the calculated one in 5–6 times.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

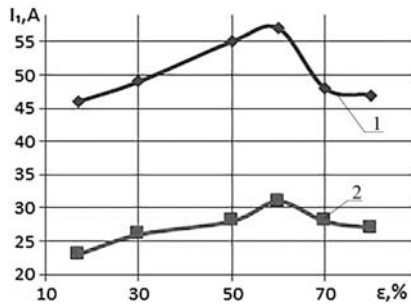


Fig. 1. Influence of the plastic deformation degree by drawing on the welding current value (I_1):
1 – reverse polarity arc; 2 – direct polarity arc

The extreme nature of I_1 dependence on ε , is apparently due to the peculiarities of the substructural metallic structure. Considering the nature of dependence for I_k , one can formally assume that either the value B depends on the chemical composition or structure of the steel, or σ should be replaced by another characteristic. To explain the correlation ratio I_1 on ε (Fig. 1), it was made an attempt to replace σ by the metal surface tension coefficient in the solid state. Taking into account the presence of volume fraction of ferrite in the investigated steel around 97–98%, the ferrite surface tension coefficient (σ_F) can be taken as σ . Using the experimental data [2] and the transformations carried out [14], for a cold-deformed state one can write:

$$\sigma_F = G \cdot b^2 / 2D, \quad (1)$$

where G – ferrite shear modulus (0.82 dynes/cm^2), b – Burgers vector $2.3 \cdot 10^{-8} \text{ sm}$ [1], D – size of dislocation cell.

Refinement of the dislocation cell structure obeys a proportional dependence on the degree of cold plastic deformation.

Taking into account that 20–30% of reduction is enough to start the formation of dislocation cellular structure of various degrees of perfection (Fig. 2), determination of the dependence of D on ε made it possible to calculate the welding current value (I_D).

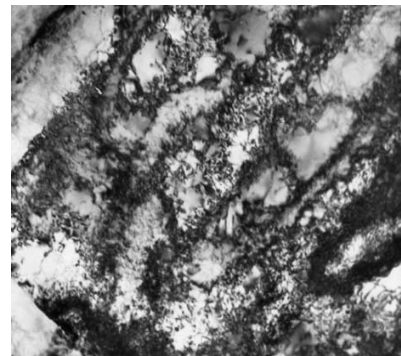
As a ratio the dependence for I_k after an appropriate substitution of σ for σ_F was used:

$$I_D = B \cdot \sqrt{\sigma_F d} \quad (2)$$

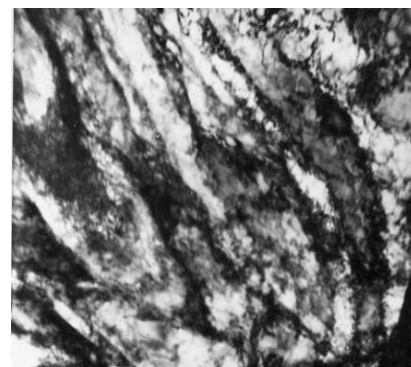
A joint analysis of absolute values I_D and I_1 (Fig. 3) for direct polarity arc indicates a fairly good correlation only up to 60% reduction. For deformation degrees of more than 60%, the observed differences can only be explained by qualitative changes in the dislocation cell structure.

Indeed, at reductions more than 60–70% in carbon steels the processes of perfecting the formed dislocation cells start to develop.

At high degrees of plastic deformation, a progressive increase in the dislocation density is accompanied by intensive cleansing of the cell body from unbound dislocations, changes in the form of cells, decrease in thickness of subboundaries, and so on. [1, 4, 13]. All this, apparently leads to violation of the ratio for σ_F and is inherited by calculations I_D . The results obtained for reverse polarity arc are similar to the data for direct polarity arc.



a – a



b – b

Fig. 2. Structure of steel 20 after martensite quenching, tempering at 650 °C, cold drawing on 17 (a) and 30 % (b)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

With constant sub-structural parameters of cold-deformed steel, for the arc of direct and reverse polarity, the nature of relationships $I_1 = f(\varepsilon)$ (Fig. 1) indicates possible change in the coefficient B depending on the arc polarity. Taking into account existence of certain difficulties in burning an arc of reverse polarity, a change of value B can be fully justified. Indeed, when the polarity reverses, the conditions for stable arc burning should become more complicated [7, 8]. The evaluation showed that in order to increase the degree of coincidence between the calculated and experimental values of the welding current, for the reverse polarity arc, the value B should be about twice as large as for the direct polarity arc. The result of electric current calculating for the reverse polarity arc with respect to relation (2) (will be denoted as I_D^*) is shown in the Fig. 3.

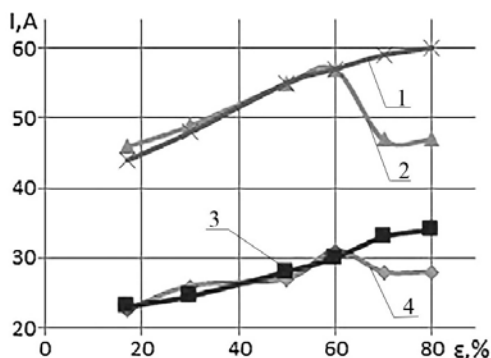


Fig. 3. The influence of deformation degree by drawing the steel 20 on the welding current when burning the arc of direct (3, 4) and reverse (1, 2) polarity:

2, 4 – current curves I_1 obtained experimentally;

1, 3 – curves of currents, I_D^* and I_D respectively calculated according to the relation (2)

Dependence analysis shows that, regardless of the welding arc polarity, a good enough agreement between the calculated and experimental values of the welding current is limited to deformations of 60%. For large reductions, the degree of mismatch is proportional to the level of welding current values. For the direct polarity arc, when the welding current level is 20–35, the deviation of calculated values (I_D) from I_1 is 12–14%. For the reverse polarity arc at $I_1 = 45$ –57 A, the value of difference between I_D^* and I_1 reaches 20%. Results of the study indicate the existence of a certain influ-

ence of substructural metallic structure of the electrode metal on the welding arc burning processes. The observed dependence of the electric current value when burning the arc of different polarity is sufficiently well explained by the parameters of the substructure of cold-deformed low-carbon steel before the appearance of qualitative changes in the internal structure of metal.

In order to explain the nature of the observed welding current dependence on the substructure parameters of cold-drawn metal, investigations were carried out on the influence of ferrite grain boundaries of with large disorientation angles (d_f – is the ferrite grain size after annealing the cold-drawn metal). Such necessity is due to differences in the degree of accumulation and distribution of crystal structure defects from the reduction value when drawing and after development of recrystallization processes when annealing. Taking into account the inverse proportional relationship between the ferrite subgrain size (D) on the reduction degree when drawing [6] and the observed correlation relationship $I_1 = f(\varepsilon)$ (Fig. 3), it can be assumed that to describe the dependence $I_1 \approx f(d)$ the relationship of the following type can be used:

$$I = A + k \cdot D^n, \quad (3)$$

where A , k and n – are the constants.

Results of the construction I_1 on $(d_0)^{-0,5}$, where d_0 – ferrite grain size of the steel are shown in the Fig. 4.

The analysis of the ratios indicates a fairly good correlation when using the dependence:

$$I_1 = I_i + k d_0^{-0,5}, \quad (4)$$

where I_i – is the welding current at $d_0 \rightarrow \infty$, k – is the angle coefficient.

In general, it should be noted that regardless of the type of interface, increase in their total length is accompanied by increase in the welding current value. Taking into account qualitative differences in the distribution nature of crystal structure defects during the formation of grain boundaries with large disorientation angles and sub-grains as a result of cold drawing [4, 6], the existence of sepa-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

rate dependences for d_f and D is completely justified.

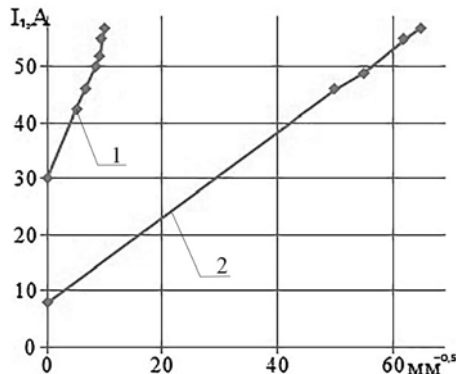


Fig. 4. Influence of the grain sizes (1) and the ferrite subgrain (2) of steel 20 on the welding current when burning the arc of reverse polarity

Analysis of the absolute values of the parameters of equation (4) indicates that the influence of the presence of ferrite grain boundaries with large disorientation angles ($I_i=30$ A, $k=2$ A/mm^{1.5}) in the steel structure is much greater than the influence of the subgrain structure ($I_i=8$ A, $k=0,75$ A/mm^{1.5}). On the other hand, the electric resistance value for the ferrite structure of low-

carbon steels is proportional to the accumulated defect density of the crystal structure [3] and inversely proportional to the ferrite grain size [10], can to some extent exert its influence on the process of welding arc burning through the surface tension of the metal.

Conclusions

1. In the conditions of stable burning of the arc of different polarity for the low-carbon steel electrode, the extreme dependence of the welding current on the degree of cold plastic deformation was observed.

2. Influence of the ferrite grain size of the electrode wire on the welding current value is much greater than the effect of the substructure presence.

Acknowledgement

The authors are grateful to Nadezhdin Yu. L., the Head of the Laboratory of the Department of Applied Mechanics and Materials Science of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan for participating in the experiments and discussing the results.

THE LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бабич, В. К. Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – Москва : Металлургия, 1972. – 320 с.
2. Баранов, А. А. О начальных стадиях сфероидизации цементита в стали / А. А. Баранов // Изв. АН СССР. Серия: Металлы. – 1969. – № 3. – С. 104–107.
3. Бернштейн, М. Л. Структура деформированных металлов / М. Л. Бернштейн. – Москва : Металлургия, 1977. – 431 с.
4. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Днепропетровск : Маковецкий, 2008. – 196 с.
5. Вакуленко, І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І. О. Вакуленко. – Дніпропетровськ : Маковецкий, 2010. – 124 с.
6. Гриднев, В. Н. Прочность и пластичность холоднодеформированных сталей / В. Н. Гриднев, В. Г. Гаврилюк, Ю. Я. Мешков. – Київ : Наук. думка, 1974. – 231 с.
7. Ерохин, А. А. Основы сварки плавлением / А. А. Ерохин. – Москва : Машиностроение, 1973. – 448 с.
8. Крюковский, Н. Н. Ручная дуговая сварка плавящимся электродом // Сварка в машиностроении : справочник : в 4 т. – Москва, 1978. – Т. 1. – С. 144–163.
9. Петров, А. А. Сварка в защитных газах // Сварка в машиностроении : справочник : в 4 т. – Москва, 1978. – Т. 1. – С. 196–258.
10. Шульце, Г. Металлофизика / Г. Шульце. – Москва : Мир, 1971. – 503 с.
11. Effect of Welding Parameters on Mechanical Properties of Plasma Transferred Arc Welded SS 202 Plates / M. Ravichandran, N. Sabarirajan, T. Sathish, S. Saravanan // Applied Mechanics & Materials. – 2016. – Vol. 852. – P. 324–330. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.852.324.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

12. Holt, D. L. Dislocation Cell Formation in Metals / D. L. Holt // *J. of Applied Physics*. – 1970. – Vol. 41. – Iss. 8. – P. 3197–3201. doi: 10.1063/1.1659399.
13. Influence of substructure strengthening of low carbon steel on the arcing process / I. O. Vakulenko, S. O. Plitchenko, Yu. L. Nadezhdin, Yu. D. Kirienko // *Welding and related technologies : Proc. of 9th Intern. Conf. of young scientists (23–26 May 2017, Kyiv, Ukraine)*. – Kyiv, 2017. – P. 117–121.
14. Investigation of cathode spot behavior of atmospheric argon arcs by mathematical modeling / J. Wendelstorf, G. Simon, I. Decker [et al.] // *Proc. of 12th Intern. Conf. on Gas Discharges and Their Applications*. – Greifswald, Germany, 1997. – Vol. 1. – P. 62–65.
15. Metal transfer in submerged arc welding / L. Ke, W. Zhisheng, Z. Yanjun, L. Cuirong // *J. of Materials Processing Technology*. – 2017. – Vol. 244. – P. 314–319. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.02.004.
16. Metal Vapour Behaviour in Gas Tungsten Arc Thermal Plasma during Welding / M. Tanaka, K. Yamamoto, S. Tashiro [et al.] // *Welding in the World*. – 2008. – Vol. 52. – Iss. 11–12. – P. 82–88. doi: 10.1007/bf03266686.
17. Murphy, A. B. A Perspective on Arc Welding Research: The Importance of the Arc, Unresolved Questions and Future Directions / A. B. Murphy // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. – 2015. – Vol. 35. – Iss. 3. – P. 471–489. doi: 10.1007/s11090-015-9620-2.
18. Nestor, O. H. Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs / O. H. Nestor // *J. of Applied Physics*. – 1962. – Vol. 33. – Iss. 5. – P. 1638–1648. doi: 10.1063/1.1728803.
19. Numerical simulation of droplet detachment in pulsed gas–metal arc welding including the influence of metal vapour / M. Hertel, A. Spille-Kohoff, U. Füssel, M. Schnick // *J. of Physics D: Applied Physics*. – 2013. – Vol. 46. – Iss. 2. – P. 224003. doi: 10.1088/0022-3727/46/22/224003.
20. Shirvan, A. J. Modelling of electrode-arc coupling in electric arc welding / A. J. Shirvan, I. Choquet, H. Nilsson // *Proc. of 6th Intern. Swedish Production Symposium*. – Gothenburg, Swedish, 2014. – Vol. 1. – P. 1–8.

I. O. ВАКУЛЕНКО¹, С. О. ПЛІТЧЕНКО^{2*}, Н. Г. МУРАШОВА³

¹Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt_textmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

^{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 56, ел. пошта plitchenko@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

³«Проектно-конструкторське технологічне бюро», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt_textmat@ukr.net, ORCID 0000-0003-2758-0749

ВПЛИВ СТРУКТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ НА ГОРІННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ

Мета. В статті передбачається зробити оцінку впливу структурних параметрів низьковуглецевої сталі на процес горіння електричної дуги. **Методика.** Значення мікро- і субструктурних характеристик металу електродного дроту змінювали, варіюючи параметрами термічної обробки та холодної деформації волочінням. Ступінь пластичної деформації отримували волочінням заготовок різного вихідного діаметра на кінцевий розмір 1 мм. Термічну обробку здійснювали в електричній камерній печі типу СНОЛ-1,6,2,5.1/11-3. Температуру вимірювали термопарою хромель-алюмель із визначенням електрорушійної сили за потенціометром постійного струму. Для отримання субструктури різної дисперсності сталь (після загартування й відпускання температури до 650 °С протягом 1 години) піддавали холодному волочінню на обтиск до 17–80 %. Для формування структури з різним розміром зерна фериту сталь після волочіння піддавалася відпалу при 680 °С протягом 1 години. Мікроструктуру досліджували під світловим електронним просвітчастим мікроскопом УЕМВ-100К при прискорюючій напрузі 100 кВ. Розмір зерна і субзерна оцінювали з використанням методик кількісної металографії. Для досліджень процесу горіння зварювальної дуги прямої та зворотної полярностей використовували зварювальний перетворювач типу ПСГ-500. **Результати.** Експериментально виявлене значення зварювального струму, що залежить від ступеня деформації при волочінні дроту, в умовах

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

стабільного горіння дуги прямої полярності приблизно на порядок нижче розрахункової величини. Аналогічну відмінність виявлено й для дуги зворотної полярності: експериментальна величина зварювального струму менше розрахункової у 5–6 разів. Аналіз залежностей свідчить, що незалежно від полярності зварювальної дуги, досить гарний збіг між розрахунковими та експериментальними значеннями зварювального струму обмежується деформаціями до 60 %. Для ступенів деформації більше 60 % відмінності пояснюються якісними змінами в дислокаційній комірчастій структурі. **Наукова новизна.** В умовах стабільного горіння дуги різної полярності для електрода з низьковуглецевої сталі виявлена екстремальна залежність зварювального струму від ступеня холодної пластичної деформації. **Практична значимість.** Вплив розміру зерна фериту електродного дроту на величину зварювального струму значно перевищує ефект від присутності субструктури.

Ключові слова: структура; зварювальний електричний струм; полярність; стабільність зварювальної дуги; холодна пластична деформація; комірка; ферит

И. А. ВАКУЛЕНКО¹, С. А. ПЛИТЧЕНКО^{2*}, Н. Г. МУРАШОВА³

¹Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта dnuzt_textmat@ukr.net ORCID 0000-0002-7353-1916

^{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 56, эл. почта plit4enko@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

³«Проектно-конструкторское технологическое бюро», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта dnuzt_textmat@ukr.net, ORCID 0000-0003-2758-0749

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ НА ГОРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Цель. В статье предполагается сделать оценку влияния структурных параметров низкоуглеродистой стали на процесс горения электрической дуги. **Методика.** Значения микро- и субструктурных характеристик металла электродной проволоки изменяли, варьируя параметрами термической обработки и холодной деформации волочением. Степень пластической деформации получали волочением заготовок разного исходного диаметра на конечный размер 1 мм. Термическую обработку осуществляли в электрической камерной печи типа СНОЛ-1,6,2,5.1/11-ИЗ. Температуру измеряли термопарой хромель-алюмель с определением электродвижущей силы по потенциометру постоянного тока. Для получения субструктуры разной дисперсности сталь (после закалки и отпуска температуры до 650 °С в течение 1 часа) подвергали холодному волочению на обжатие до 17–80 %. Для формирования структуры с разным размером зерна феррита сталь после волочения подвергалась отжигу при 680 °С в течение 1 часа. Микроструктуру исследовали под световым электронным просвечивающим микроскопом УЭМБ-100К при ускоряющем напряжении 100 кВ. Размер зерна и субзерна оценивали с использованием методик количественной металлографии. Для исследования процесса горения сварочной дуги прямой и обратной полярностей использовали сварочный преобразователь типа ПСГ-500. **Результаты.** Экспериментально обнаруженное значение сварочного тока, зависящего от степени деформации при волочении проволоки, в условиях стабильного горения дуги прямой полярности примерно на порядок ниже расчетной величины. Аналогичное различие обнаружено и для дуги обратной полярности: экспериментальная величина сварочного тока меньше расчетной в 5–6 раз. Анализ зависимостей свидетельствует, что независимо от полярности сварочной дуги, достаточно хорошее совпадение между расчетными и экспериментальными значениями сварочного тока ограничивается деформациями до 60 %. Для степеней деформации более 60 % различия объясняются качественными изменениями в дислокационной ячеистой структуре. **Научная новизна.** В условиях стабильного горения дуги различной полярности для электрода из низкоуглеродистой стали обнаружена экстремальная зависимость сварочного тока от степени холодной пластической деформации. **Практическая значимость.** Влияние размера зерна феррита электродной проволоки на величину сварочного тока значительно превышает эффект от присутствия субструктуры.

Ключевые слова: структура; сварочный электрический ток; полярность; стабильность сварочной дуги; холодная пластическая деформация; ячейка; феррит

REFERENCES

1. Babich, V. K., Gul, Y. P., & Dolzhenkov, I. Y. (1972). *Deformatsionnoye starenie stali*. Moscow: Metallurgiya.
2. Baranov, A. A. (1969). O nachalnykh stadiyakh sferoidizatsii tsementita v stali. *Russian Metallurgy*, 3, 104-107.
3. Bernshteyn, M. L. (1977). *Struktura deformirovannykh metallov*. Moscow: Metallurgiya.
4. Vakulenko, I. A., & Bolshakov V. I. (2008). *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali*. Dnipropetrovsk: Makovetskyi.
5. Vakulenko, I. O. (2010). *Strukturnyi analiz v materialoznavstvi*. Dnipropetrovsk: Makovetskyi.
6. Gridnev, V. N., Gavrilyuk, V. G., & Meshkov, Y. Y. (1974). *Prochnost i plastichnost kholodnodeformirovannykh staley*. Kyiv: Naukova dumka.
7. Yerokhin, A. A. (1973). *Osnovy svarki plavleniyem*. Moscow: Mashinostroeniye.
8. Kryukovskiy, N. N. (1978). Ruchnaya dugovaya svarka plavyashchimsya elektrodom. In *Svarka v mashinostroyenii* [Guide] (Vol. 1) (pp. 144-163). Moscow: Mashinostroeniye.
9. Petrov, A. A. (1978). Svarka v zashchitnykh gazakh. In *Svarka v mashinostroyenii* [Guide] (Vol. 1) (pp. 196-258). Moscow: Mashinostroeniye.
10. Shultse, G. (1971). *Metallofizika*. Moscow: Mir.
11. Ravichandran, M., Sabarirajan, N., Sathish, T., & Saravanan, S. (2016). Effect of Welding Parameters on Mechanical Properties of Plasma Transferred Arc Welded SS 202 Plates. *Applied Mechanics & Materials*, 852, 324-330. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.852.324
12. Holt, D. L. (1970). Dislocation Cell Formation in Metals. *Journal of Applied Physics*, 41 (8), 3197-3201. doi:10.1063/1.1659399
13. Vakulenko, I. O., Plitchenko, S. O., Nadezhdin, Y. L., & Kirienko, Y. D. (2017). Influence of substructure strengthening of low carbon steel on the arcing process. *Proceedings of the 9th International Conference Young Scientists Welding and related Technologies, May 23-26, 2017, Kyiv*, 117-121. Kyiv: PWI NASU.
14. Wendelstorf, J., Simon, G., Decker, I., & Wohlfahrt, H. (1997). Investigation of cathode spot behavior of atmospheric argon arcs by mathematical modeling. *Proceedings of the 12th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, 8th-12th September, 1997, Greifswald* (pp. 62-65). Germany: University of Greifswald.
15. Li, K., Wu, Z., Zhu, Y., & Liu, C. (2017). Metal transfer in submerged arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 244, 314-319. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.02.004
16. Tanaka, M., Yamamoto, K., Tashiro, S., Nakata, K., Ushio, M., Yamazaki, K., & Lowke, J. J. (2008). Metal Vapour Behaviour in Gas Tungsten Arc Thermal Plasma during Welding. *Welding in the World*, 52 (11-12), 82-88. doi:10.1007/bf03266686
17. Murphy, A. B. (2015). A Perspective on Arc Welding Research: The Importance of the Arc, Unresolved Questions and Future Directions. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 35 (3), 471-489. doi:10.1007/s11090-015-9620-2
18. Nestor, O. H. (1962). Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs. *Journal of Applied Physics*, 33 (5), 1638-1648. doi:10.1063/1.1728803
19. Hertel, M., Spille-Kohoff, A., Füssel, U., & Schnick, M. (2013). Numerical simulation of droplet detachment in pulsed gas-metal arc welding including the influence of metal vapour. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46 (2), 224003. doi:10.1088/0022-3727/46/22/224003
20. Shirvan, A. J., Choquet, I., Nilsson, H. (2014). Modelling of electrode-arc coupling in electric arc welding. *Proceedings of the 6th Intern. Swedish Production Symposium, September 16-18 2014, Göteborg*. Swedish, Gothenburg: Swedish Production Academy.

Associate Prof. O. A. Chaykovskiy, Candidate of Science (Engineering) (Ukraine);
Prof. V. A. Zabudovskiy, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published

Received: June 08, 2017

Accessed: Sept. 14, 2017

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.181

А. А. РЕДЬКО^{1*}, И. А. РЕДЬКО^{2*}

^{1*}Каф. «Теплогасоснабжение, вентиляция и использование тепловых вторичных энергоресурсов», Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (057) 700 16 40, эл. почта andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID 0000-0003-2331-7273

^{2*}Каф. «Эксплуатация газовых и тепловых систем», Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (050) 400 77 99, эл. почта germes_s2006@ukr.net, ORCID 0000-0002-9863-4487

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Цель. Данная работа направлена на экспериментальное исследование теплообмена в высокотемпературном кипящем слое с крупными частицами для того, чтобы обеспечить выполнение экологических требований к системам теплоснабжения. **Методика.** Для решения поставленной задачи разработана экспериментальная установка, обеспечивающая проведение исследований при температуре кипящего слоя и пульсирующего кипящего слоя в диапазоне 800–1 000 °С. Температура кипящего слоя обеспечивалась путем сжигания природного газа и древесных отходов. В качестве материала слоя использовались песок и шамот с размером частиц от 1,0 до 5,0 мм. Коэффициент теплоотдачи от слоя к поверхности, погруженной в слой, и плотность теплового потока измерялись калориметрическим методом при стационарном режиме. Исследовались гладкие и поперечно оребренные трубы с различной высотой и шагом ребер. Опыты в высокотемпературном пульсирующем кипящем слое проводились при пульсирующем сжигании природного газа либо в подрешеточной камере, в которую отдельно подавались природный газ и воздух. Частота пульсаций горения обеспечивалась системой автоматики. Частота вспышки регулировалась в диапазоне от 0,14 до 5 Гц. **Результаты.** Представлены результаты физического моделирования оценки коэффициентов теплоотдачи гладких и оребренных труб в кипящем слое крупных частиц при сжигании древесных отходов и газообразного топлива. Показано, что коэффициент теплоотдачи с повышением температуры возрастает в 2–2,5 раза, и в слое с диаметром частиц 2,5–5 мм составляет 300–350 Вт/(м² К), что значительно выше, чем для слоевых топок. Результаты опытов представлены в виде обобщенной зависимости, учитывающей диаметр частиц и значение коэффициента оребрения. Теплоотдача оребренных труб на 15–20 % ниже, чем гладких труб, но плотность теплового потока, отнесенная к площади оребренной трубы, равна 0,12–0,20 МВт/м², что выше, чем для гладких труб. При пульсирующей подаче топлива с частотой 1–2 Гц коэффициент теплоотдачи возрастает от 10–15 % до 25–30 %. При частоте пульсаций от 2 до 5 Гц коэффициент теплоотдачи изменяется от 510 до 570 Вт/(м² К). При дальнейшем увеличении частоты пульсаций коэффициент теплоотдачи уменьшается и составляет 515–520 Вт/(м² К). Показано существенное влияние скважности пульсаций от 0,8 до 0,3: коэффициент теплоотдачи увеличивается на 30–35 %. Однако, при этом наблюдается неустойчивый режим горения газозооной смеси и выброс частиц материала из слоя. Результаты опытов представлены в виде обобщенной зависимости. **Научная новизна.** Авторами представлены впервые полученные опытные данные значений коэффициентов теплоотдачи оребренных труб в кипящем слое и пульсирующем кипящем слое крупных частиц при температуре слоя 800–1100 °С. **Практическая значимость.** Полученные в работе результаты позволяют разрабатывать топочные устройства с низкотемпературным кипящим слоем путем погружения в слой оребренных трубчатых поверхностей. Опытные данные обобщены и представлены в критериальном виде, удобном для практического использования.

Ключевые слова: теплообмен; кипящий слой; оребренные поверхности; пульсирующий кипящий слой; теплоотдача; критериальные уравнения

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

Введение

Решение проблемы энергосбережения и повышения эффективности использования топлива возможно путем применения технологии сжигания топлива различного вида в низкотемпературном кипящем слое (НКС). Применение технологии НКС обеспечивается размещением поверхности нагрева в кипящем слое. Однако, размещение в кипящем слое поверхностей нагрева для отвода теплоты слоя требует достоверных опытных данных о значениях теплоотдачи гладких и оребренных труб. В этой связи проблема эффективности теплообмена оребренных поверхностей в кипящем слое крупных частиц остается в числе особо актуальных. В последнее время в Украине вопросам интенсификации теплообмена и сжигания топлива уделяется недостаточно внимания. Сжигание твердого топлива ведется в слоевых, недостаточно эффективных топках. Технология сжигания низкосортного топлива в кипящем слое, получившая широкое развитие в 80-е годы прошлого столетия, не получила практического продолжения. Анализ литературных источников показал, что опытные данные по теплоотдаче поперечно-оребренных труб практически отсутствуют.

Цель

Данная работа направлена на экспериментальное исследование теплообмена в высокотемпературном кипящем слое крупных частиц для обеспечения выполнения экологических характеристик систем теплоснабжения.

Состояние проблемы

Эффективность процессов сжигания твердого топлива в кипящем слое, сопровождающихся отводом теплоты, значительно повышается при размещении в слое оребренных поверхностей [1].

Отсутствие точных аналитических решений потребовало широкого проведения экспериментальных исследований и разработки на их основе приближенных зависимостей.

Теплообмен оребренных поверхностей в кипящем слое изучался в работах [4, 7, 12, 15, 18, 23, 25]. При этом в работах [7, 16, 19, 23, 24] приведены результаты экспериментального исследования труб с поперечным круглым ореб-

рением. Оребрение выполнено из меди и алюминия. В работе [24] исследуется эффективность круглого (зубчатого), у [7, 9, 11] – спирального оребрения. В работах [11, 25] изучался теплообмен труб с продольным оребрением. Возможность повышения интенсивности теплоотдачи путем применения различной формы насечек рассматривалась в работе [28]. В работах [3, 8, 10, 16, 27] изучался теплообмен гладких труб в высокотемпературном кипящем слое.

В работе [27] проведены исследования теплоотдачи и теплообменного элемента, выполненного в виде пластины с ребрами прямоугольного профиля. Толщина ребер от 6 до 14 мм, высота от 6 до 14 мм, шаг между ребрами 20 мм. Показано, что оптимальная высота ребер 8 мм. Максимальные значения коэффициента теплоотдачи получены при шаге между ребрами 12 мм.

В работе [26] также исследовался теплообмен одиночной трубы с поперечным круглым оребрением. Изучалось влияние высоты и толщины ребер, шага оребрения на интенсивность теплоотдачи. Дисперсный материал – стеклянные шарики диаметром от 0,4 до 0,8 мм. Высота ребра изменялась от 7,5 до 37,5 мм, шаг оребрения от 2 до 10 мм. Ребра изготовлены из меди толщиной от 0,5 до 2 мм. Результаты показали, что с увеличением высоты ребра коэффициент теплоотдачи уменьшается, увеличение его шага приводит к повышению коэффициента теплоотдачи, т. е. максимальные значения коэффициента теплоотдачи достигаются при меньшей высоте ребер и большем шаге. При этом коэффициент теплоотдачи уменьшается с высотой ребер, тем сильнее, чем тоньше ребра и чем меньше их теплопроводность. Результаты исследований позволили определить оптимальные геометрические характеристики оребрения: для медных ребер принимается толщина около 1 мм, высота 40 мм; для стальных ребер – толщина 1 мм, высота 20 мм; шаг оребрения – около 4 мм.

В работе [12] приведены результаты исследований труб с ребрами треугольного профиля в псевдооживленном слое крупнодисперсного материала – песка $d_T = 0,25; 0,62$ мм, шамотной крошки $d_T = 0,975$ мм, зернах проса $d_T = 2,0$ мм. Результаты исследований показывают, что ин-

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

тенсивность теплообмена возрастает с увеличением высоты ребер и уменьшением шага между ними.

Авторами работы [24] исследовалась теплоотдача поперечно- (зубчато-) оребренных труб в псевдооживленном слое стеклянных шариков диаметром $d_t = 0,2–0,47$ мм. Высота ребер изменялась до 22,2 мм. Толщина ребра равнялась 0,635 мм. Шаг между ребрами – 3,2 мм. Исследования показали, что интенсивность теплообмена увеличивается с увеличением высоты ребра до 25 мм, при дальнейшем увеличении высоты ребра, коэффициент теплоотдачи повышается медленнее. Взаимное расположение труб в пучке оказывает влияние на расстоянии до 50,8 мм. Подтверждается вывод, что коэффициент теплоотдачи увеличивается с уменьшением диаметра частиц.

В работе [4] изучалась теплоотдача шахматного пучка горизонтальных стальных труб в псевдооживленном слое крупнодисперсного материала (алюмосиликагеля) с диаметром частиц 2,8–4 мм (эквивалентный диаметр $d_e = 3,5$ мм). Рассматривался пучок стальных труб диаметром $D = 39$ мм в количестве 14 труб, расположенных в три ряда, оребрение пучка – приварное ленточное стальное – высотой 8 мм, толщиной 0,9 мм, шаг между ребрами – 6,8 мм. Шаг размещения труб в пучке $S = 80$ мм. Результаты измерений показали, что коэффициент теплоотдачи равнялся 230–280 Вт/(м²·К) и в диапазоне скорости воздуха 1,28–1,8 м/с не зависил от скорости псевдооживления.

Таким образом, анализ результатов экспериментальных исследований, выполненных различными авторами, показал, что применение оребрения позволяет значительно повысить (в 3–5 раза) интенсивность теплообмена между псевдооживленным слоем и поверхностью. Исследования теплообмена выполнены, в основном, для одиночной оребренной трубы и мелкодисперсного материала $d_t=0,4–0,8$ мм, исследования с крупнодисперсным материалом носят частный характер (для некоторых типов поперечного оребрения). Интенсивность теплообмена оребренных труб в пучке на 10–15 % ниже по сравнению с одиночной трубой, при этом компоновка труб в шахтном или коридорном пучке практически не влияет на коэффициент теплоотдачи, но при высоких скоростях

и малом шаге рекомендуется шахматное расположение труб, при этом коэффициент теплоотдачи практически не зависит от вертикального шага. Изменение шага размещения труб в пучке в широком интервале (при $S>2,2$) не влияет на эффективность теплообмена. Степень интенсификации теплообмена не зависит от размеров и формы теплообменной поверхности, слабо зависит от скорости воздуха, а определяется, в основном, размером и плотностью частиц, при этом теплосъем с оребренной поверхности трубного пучка возрастает пропорционально коэффициенту оребрения.

В работах [3, 8, 16] указывается, что коэффициент теплоотдачи в пульсирующем слое на 15–20 % выше, чем в кипящем слое. Однако работы по исследованию процессов интенсификации малочисленны, опытные данные разрознены.

Высокая температура в топке с кипящим слоем двояко определяет интенсивность внешнего теплообмена: происходит изменение теплофизических свойств дисперсного материала и оживающего газа, а также существенным становится лучистый теплоперенос [12, 15–19, 28]. Это свидетельствует о слабом влиянии на степень теплообмена черноты, структуры слоя, которая изменяется в зависимости от скорости газа и положения теплообменника. Степень черноты кипящего слоя не зависит от концентрации излучающих газов в продуктах сгорания. Результаты опытов показывают, что основными характеристиками дисперсной системы, определяющими ее излучательные свойства, являются характеристики материала частиц и распределение температуры в системе.

Приведенный коэффициент теплоотдачи уменьшается с высотой ребер тем сильнее, чем тоньше ребра и чем меньше их теплопроводность. Коэффициент теплоотдачи на ребре практически не зависит от толщины ребра, возрастает с увеличением шага между ребрами, уменьшается с увеличением высоты ребер. Рекомендации различных авторов по выбору оптимальной геометрии оребрения противоречивы. Опытные данные по теплообмену оребренных труб в высокотемпературном кипящем слое практически отсутствуют.

Таким образом, эффективность теплообмена поверхности нагрева, размещенной в кипящем

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

слое, может быть достаточно высокой (230–300 Вт/(м². К), достигая 500–600 Вт/(м². К). Интенсификация теплообмена обеспечивается применением оребренных (развитых) теплообменных поверхностей и пульсирующей подачей оживающего газа.

Методика исследования

Опыты проводились на экспериментальной установке, представляющей собой теплообменную камеру круглого сечения диаметром 210 мм, высотой 1,0 м (рис. 1). Температура кипящего слоя варьировалась за счет сжигания в нем древесных отходов и газозвдушной смеси непосредственно в слое дисперсного материала. В качестве материала слоя использовались песок и шамот. Экспериментальное исследование теплообмена в кипящем слое проводилось при температуре 1073–1373 К.

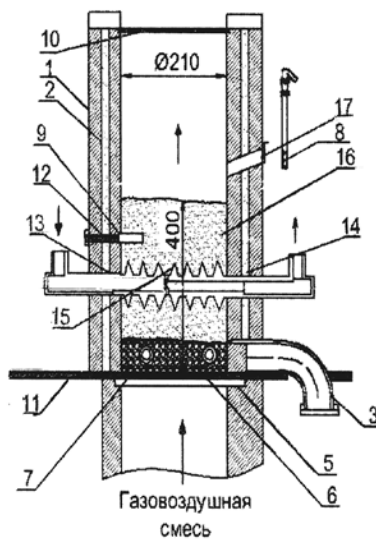


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

- 1 – кладка; 2 – засыпка; 3 – желоб;
- 5 – газораспределительная решетка; 6 – слой неподвижных частиц; 7 – газовая горелка;
- 8 – запальник; 9 – термопара слоя; 10 – отбойная решетка;
- 11 – рабочая площадка; 12 – датчик-калориметр;
- 13, 14 – термопара; 15 – термопара поверхности датчика; 16 – слой; 17 – смотровое стекло

Fig. 1. Scheme of laboratory installation:

- 1 – laying; 2 – backfilling; 3 – trough;
- 5 – gas distribution grating; 6 – layer of fixed particles;
- 7 – gas burner; 8 – igniter; 9 – thermocouple layer;
- 10 – baffle grating; 11 – working platform;
- 12 – sensor-calorimeter; 13, 14 – thermocouple;
- 15 – sensor surface thermocouple;
- 16 – layer; 17 – sight glass

Камера выполнена из огнеупорного кирпича. В боковой стене камеры имелся желоб для сыпания материала слоя. Над теплообменной камерой располагался короб вытяжной вентиляции.

В качестве газораспределительного устройства применялась плоская перфорированная керамическая решетка живым сечением 1,5 %. Подача воздуха в теплообменную камеру осуществлялась двумя напорными вентиляторами типа ВВД-5. На высоте 50 мм от газораспределительного устройства в камере располагались две подовые горелки низкого давления. Температура КС поддерживалась в пределах 800–1100 °С. Температура слоя измерялась дифференциально включенной ХК-термопарой.

Пульсации газового потока осуществлялись при помощи электромагнитных клапанов и пульсатора роторного типа.

Размещенный в кипящем слое датчик обеспечивал измерение суммарного коэффициента теплоотдачи от слоя к поверхности стационарным калориметрическим методом:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{M_B C_P (t_B'' - t_B')}{F_{OP} (t_{KC} - t_{CT})}, \quad (1)$$

где M_B , C_P , t_B'' , t_B' – соответственно массовый расход и теплоемкость воды, температура воды на выходе и входе в калориметр. F_{OP} – площадь оребренной поверхности; t_{KC} – температура кипящего слоя; t_{CT} – температура стенки калориметра.

Калориметр представлял собой оребренную трубу. В качестве теплоносителя использовали воду с температурой 10–20 °С.

Опыты в пульсирующем кипящем слое проводили следующим образом. Оживление слоя осуществляется продуктами пульсирующего сжигания природного газа, которое происходит либо в слое, либо в подрешеточной камере, представляющей собой цилиндрическое пространство объемом 50–500 см³. Объем пульсирующей камеры сгорания газа изменяется путем заполнения его крупным дисперсным материалом. В камере сгорания имеется два отверстия для подвода воздуха и газа, а также две запальные свечи системы зажигания. На трубопроводах подачи воздуха и газа имеются электромагнитные клапаны, предотвращающие

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

проникновение ударной волны при возгорании газозвушной смеси и регулирующие подачу воздуха и газа. Для измерения расхода воздуха используется ротаметр РС-3, а для измерения расхода газа – счетчик типа «Rombach», по показаниям которых устанавливается необходимое соотношение газа и воздуха (0,9–1,8). Система зажигания пульсирующей камеры сжигания состоит из блока радиоэлектронных элементов, позволяющих регулировать частоту вспышки от 5 до 0,14 Гц, частоту подачи газа и воздуха, двух запальных свечей, универсального блока питания от сети переменного тока 220 В и постоянного тока 12 В.

Результаты исследования

Результаты измерений теплоотдачи гладкой и оребренной труб показаны на рис. 2.

Зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости ожигающего газа в высокотемпературном кипящем слое аналогична зависимости коэффициента теплоотдачи в слое при низких температурах $T_{\text{кс}}$ до 423 К. В опытах выбирались скорости продуктов сгорания, при которых коэффициент теплоотдачи имел бы максимальное значение, например, для песка $w=0,5\text{--}2,0$ м/с, для шамота $d_s=2,81$ мм, $w=0,7\text{--}2,5$ м/с. С повышением температуры кипящего слоя до 973–1223 К коэффициент теплоотдачи возрастает в 2,0–2,5 раза и в слое шамота с диаметром частиц $d_t=2,5\text{--}5$ мм составит 300–350 Вт/(м²·К), что значительно выше, чем для слоевых топок. Сравнение расчетных и опытных данных удовлетворительное (рис. 2). Теплоотдача оребренной трубы ($h_p \cdot S_p = 10 \times 20$ мм) на 15–20 % ниже значений теплоотдачи гладкой. При этом измерение температурного режима ребер показало, что температура в вершине ребра высотой 20 мм и выше достигает значений 873–973 К, что для ребер из материала Ст. 20 является недопустимым. Более благоприятен температурный режим ребер высотой 10 мм, температура которых менее 723–673 К.

Повышение температуры кипящего слоя приводит к значительному увеличению плотности теплового потока на поверхности нагрева (рис. 3).

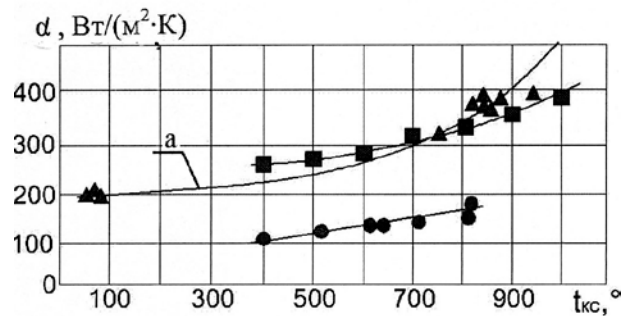


Рис. 2. Зависимость суммарного коэффициента теплоотдачи гладких труб от температуры слоя:
▲ – шамот, $d_s=2,81$ мм; ■ – песок, $d_t=1,0\text{--}1,5$, $t_{\text{ст}}=134\text{--}355^\circ\text{C}$ [12]; ● – шамот, $d_t=2,0\text{--}5,0$ [10];
α – расчет по [2, 18]

Fig. 2. Dependence of the total heat transfer coefficient of smooth pipes on the layer temperature:

- ▲ – chamotte, $d = 2.81$ mm;
- – sand, $d_t = 1.0\text{--}1.5$, $t_{\text{st}} = 134\text{--}355^\circ\text{C}$ [12];
- – chamotte, $d_t = 2.0\text{--}5.0$ [10];
- α – calculation according to [2, 18]

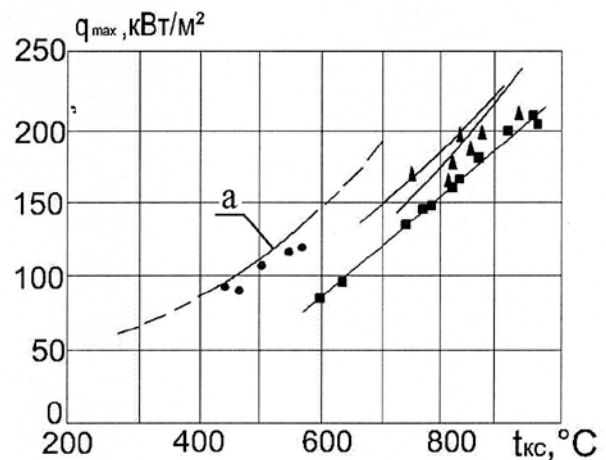


Рис. 3. Зависимость плотности теплового потока от температуры слоя:

- ▲ – гладкая труба, песок, шамот, $d_s=2,81$ мм;
- – поперечное оребрение, $h_p \cdot S_p=10 \cdot 20$; шамот, $d_s=2,81$; α – расчет по [2, 18]

Fig. 3. Dependence of the heat flux density on the layer temperature:

- ▲ – smooth pipe, sand, chamotte, $d_s=2.81$ mm;
- – transverse finning, $h_p \cdot S_p=10 \cdot 20$; chamotte, $d_s=2.81$; α – calculation by [2, 18]

Так, для гладкой трубы плотность теплового потока составляет $q_{\text{max}}^{\text{max}}=0,15\text{--}0,2$ МВт/м² в слое шамота $d_t=2,5\text{--}5,0$ мм при температуре слоя

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

973–1223 К. Теплоперенос оребренных труб выше, и средняя плотность теплового потока на поверхности несущей трубы достигает значений 0,25–0,40 МВт/м². Плотность теплового потока, отнесенная к площади оребренной трубы, равна 0,12–0,25 МВт/м². При этом локальная плотность (например, в основании ребра) может превышать данные значения и вызывать значительные термические напряжения. Поэтому возрастают требования к материалу оребренных поверхностей и к выбору оптимальных геометрических параметров оребрения (в основном к выбору высоты ребер). Существенное влияние на теплоотдачу оказывает температура стенки трубы. Так, в кипящем слое постоянной температуры (973–1223 К) повышение температуры стенки (путем изменения расхода охлаждающей воды) до значений 573–673 К приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи в 1,3–1,5 раза по сравнению со значением α_s при $T_{ст}=253–423$ К. Дальнейшее повышение температуры стенки не приводит к значительному повышению коэффициент теплоотдачи.

Результаты экспериментального исследования теплоотдачи оребренных труб в высокотемпературном кипящем слое при температуре 973–1223 К показаны на рис. 2 и обобщены в виде зависимости аналогично [5].

$$Nu_{po}^{max} = Nu_o^{max} \cdot \eta_{pn} \cdot \varphi^{0.9}. \quad (2)$$

Таким образом, применение оребрения погруженных в кипящий слой горизонтальных труб при $T_{кв}=1023–1273$ К обеспечивает достижение высоких коэффициентов теплообмена, равных 800–900 Вт/(м² К), и увеличивает теплоперенос по сравнению с гладкой трубой в 2,5–3,0 раза.

Исследовалась теплоотдача оребренной ($h_p \cdot S_p = 10 \cdot 20$ мм) и гладкой трубы в пульсирующем слое. Зависимость коэффициента теплоотдачи от средней скорости сжижающего газа в пульсирующем слое носит практически такой же характер, как и для стационарного слоя.

Результаты экспериментов приведены на рис. 4.

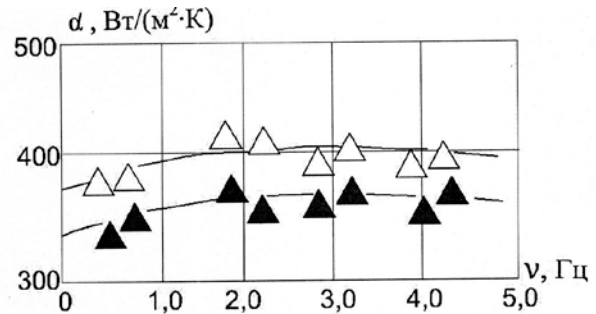


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи оребренной трубы от частоты пульсирующего слоя:

- △ – $\varphi=0.3$; $d_3=2.81$ мм; $h_p \cdot S_p=10 \cdot 20$ мм;
 ▲ – $\varphi=0.8$; $d_3=2.81$ мм; $h_p \cdot S_p=10 \cdot 20$ мм

Fig. 4. Dependence of the heat transfer coefficient of the finned tube on the frequency of the pulsating layer:

- △ – $\varphi=0.3$; $d_3=2.81$ mm; $h_p \cdot S_p=10 \cdot 20$ mm;
 ▲ – $\varphi=0.8$; $d_3=2.81$ mm; $h_p \cdot S_p=10 \cdot 20$ mm

Особенностью пульсирующего слоя является то, что α_{max} наблюдается при скоростях, значительно меньших, чем в кипящем слое. Так, если в кипящем слое с частиц шамота ($d_3=2.81$ мм) значение α_{max} фиксировались при скорости псевдооживления 1,6–1,8 м/с, то в пульсирующем слое значение α_{max} достигались при средней скорости $w_{cp}=0.5$ м/с и скважности потока $\varphi=0.3$. Максимальный коэффициент теплоотдачи оребренной трубы в пульсирующем слое на 20–30 % больше, чем в стационарном кипящем слое. С уменьшением диаметра частиц кипящего слоя от 2,81 до 0,71 мм теплообмен увеличивается в 1,3–1,5 раза.

Коэффициент теплоотдачи практически слабо зависит от частоты пульсаций. Так, если при $\nu=0.5$ Гц $\alpha_{max}=510$ Вт/(м² К), то при $\nu=2.0$ Гц $\alpha_{max}=560–570$ Вт/(м² К). При дальнейшем увеличении частоты пульсаций до 10 Гц коэффициент теплоотдачи уменьшался до 515–520 Вт/(м² К). Таким образом, при пульсирующей подаче газозооушной смеси с частотой 1,0–2,0 Гц коэффициент теплоотдачи возрастает на 10–15 %, при дальнейшем увеличении частоты пульсаций до 10 Гц теплообмен пульсирующего слоя практически не отличается от теплообмена в стационарном кипящем слое. Теплообмен горизонтальных оребренных труб в высокотемпературном пульсирующем слое характеризуется достижением

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

максимальных значений коэффициента теплоотдачи (на 20–30 % выше, чем в стационарном кипящем слое) при более низких значениях средней скорости сжижающего газа; наблюдается зависимость коэффициента теплоотдачи (увеличение на 10–15 %) от частоты пульсаций в диапазоне 1,0–2,0 Гц; с уменьшением скважности пульсаций от 0,8 до 0,3 теплообмен увеличивается на 30–35%, т.е. наиболее существенно интенсификация теплообмена пульсациями при скважности 0,25–0,35; с уменьшением диаметра частиц слоя от $d = 2,81$ мм до $d = 0,71$ мм, при частоте $\nu = 0,5$ Гц и скважности пульсаций $\phi = 0,3$ коэффициент теплоотдачи увеличивается в 1,3–1,5 раза; повышение температуры пульсирующего слоя на 200 °С и стенок трубы на 100 °С приводит к увеличению теплопереноса на 25–30%.

Опытные данные удовлетворительно описываются расчетной зависимостью.

$$Nu_{\max} = 2,75(Re_{\text{ном}}^n)^{0,4}(1 + e^{-\nu} - e^{-2\nu}). \quad (3)$$

Научная новизна и практическая значимость

Работы в данном направлении велись зарубежными исследователями [20–22, 29].

Авторами представлены впервые полученные опытные данные о значениях коэффициентов теплоотдачи оребренных труб в кипящем слое и пульсирующем кипящем слое с крупны-

ми частицами при температуре слоя 800–1100 °С.

Полученные в работе результаты позволяют разрабатывать топочные устройства с низкотемпературным кипящим слоем, путем погружения в слой оребренных трубчатых поверхностей. Опытные данные обобщены и представлены в виде критериев, что удобно для практического использования.

Выводы

Таким образом, теплообмен горизонтальных оребренных труб в высокотемпературном пульсирующем слое характеризуется достижением максимальных значений коэффициента теплоотдачи (на 20–30 % выше, чем в стационарном кипящем слое) при более низких значениях средней скорости сжижающего газа; наблюдается зависимость коэффициента теплоотдачи (увеличение на 10–15 %) от частоты пульсаций в диапазоне 1,0–2,0 Гц; с уменьшением скважности пульсаций от 0,8 до 0,3 теплообмен увеличивается на 30–35 %, т.е. наиболее существенно интенсификация теплообмена пульсациями скважностью 0,25–0,35; с уменьшением диаметра частиц слоя от 2,81 мм до 0,71 мм при частоте 0,5 Гц и скважности пульсаций 0,3 коэффициент теплоотдачи увеличивается в 1,3–1,5 раза; повышение температуры пульсирующего слоя и стенок трубы приводит к увеличению теплопереноса на 25–30 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баскаков, А. П. Котлы и топки с кипящим слоем / А. П. Баскаков, В. В. Мацнев, И. В. Распопов. – Москва : Энергоатомиздат, 1996. – 352 с.
2. Баскаков, А. П. Лучистый теплообмен в кипящем слое при псевдоожижении газом / А. П. Баскаков, Ю. М. Голдобин // Изв. АН СССР. Серия: Энергетика и транспорт. – 1970. – № 4. – С. 163–168.
3. Бокун, И. А. Теплообмен между пульсирующим слоем и поверхностью нагрева / И. А. Бокун, Я. П. Шлапкова // Тез. докл. Минского междунар. форума по тепло- и массообмену / Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 1988. – Т. 5. – С. 54–55.
4. Гальперин, Н. И. О теплообмене между ребристыми трубами и псевдоожиженным слоем зернистого материала / Н. И. Гальперин, В. Г. Айнштейн, И. Н. Тоскубаев // Химия и технология топлив и масел. – 1972. – № 9. – С. 42–43.
5. Забродский, С. С. Высокотемпературные установки с псевдоожиженным слоем / С. С. Забродский. – Москва : Энергия, 1971. – 389 с.
6. Ильченко, А. И. Исследование радиационно-кондуктивного теплообмена в кипящем слое : дис. ... канд. техн. наук / Ильченко А. И. ; АН Белорус. ССР , Ин-т тепло- и массообмена. – Минск, 1968. – 153 с.

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

7. Исследование теплообмена в гладкотрубных и оребренных шахматных пучках труб в топках кипящего слоя и на моделях / В. Г. Мигай, В. Н. Шамякин, В. В. Манцев, И. В. Житомирская // Теплообмен в дисперсных системах. – Минск, 1980. – Т. 6, ч. 1. – С. 94–98.
8. Исследование теплообмена между пульсирующим слоем и поверхностью / З. Н. Головина, Ю. Г. Брук, В. В. Соловьев, Г. П. Кучин // Теория и практика сжигания газа. – Ленинград, 1981. – С. 150–153.
9. Исследование теплообмена шахтных пучков гладких и оребренных труб в кипящем слое / И. В. Житомирская, В. М. Мигай, Н. С. Рассудов, В. Н. Шемякин // Теплоэнергетика. – 1982. – № 1. – С. 49–51.
10. Махорин, К. Е. Теплообмен в высокотемпературном кипящем слое / К. Е. Махорин, В. С. Пикашов, Г. П. Кучин. – Киев : Наук. думка, 1981. – 148 с.
11. Мигай, В. М. Исследование теплообмена оребренных труб в кипящем слое / В. М. Мигай, Н. В. Зозуля, И. В. Житомирская // Энергомашиностроение. – 1984. – № 1. – С. 13–15.
12. Пальченко, Г. И. Теплообмен между горизонтальной оребренной трубой и псевдоожиженным слоем крупных частиц / Г. И. Пальченко, А. И. Тамарин, С. С. Забродский // Теплообмен в дисперсных системах. – Минск, 1980. – Т. 6, ч. 1. – С. 89–98.
13. Пальченко, Г. И. Теплообмен между горизонтальным пучком оребренных труб и псевдоожиженным слоем крупнодисперсного материала / Г. И. Пальченко // Исследование процессов переноса в дисперсных системах. – Минск, 1981. – С. 14–23.
14. Панов, О. М. Исследование локального теплообмена по периметру горизонтальных цилиндров в высокотемпературном кипящем слое : дис. ... канд. техн. наук / Панов О. М.; Уральск. политехн. ин-т. – Свердловск, 1977. – 113 с.
15. Перенос тепла в топке кипящего слоя к горизонтальному шахтному трубному пучку / А. М. Тамарин, Ю. Г. Епиков, Е. С. Рассудов, В. Н. Шемякин // Энергомашиностроение. – 1977. – № 12. – С. 7–8.
16. Рассудов, Н. С. О применении импульсной подачи воздуха в топках с кипящим слоем / Н. С. Рассудов, А. Е. Варламова // Теплоэнергетика. – 1983. – № 1. – С. 62–64.
17. Рахманов, В. Б. Теплообмен в топке с низкотемпературным кипящим слоем при сжигании жидкого и твердого топлива : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.01 / Рахманов В. Б. ; Харьк. политехн. ин-т. – Харьков, 1983. – 205 с.
18. Тоскубаев, И. Н. Исследование теплообмена между ребристыми поверхностями и псевдоожиженным слоем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Тоскубаев И. Н. ; Моск. ин-т тонкой хим. технологии им. М. В. Ломоносова. – Москва, 1974. – 21 с.
19. Харченко, Н. В. Исследование теплообмена между кипящим слоем и погруженным телом при высоких температурах : дис. ... канд. техн. наук / Харченко Н. В. ; Институт газа АН УССР. – Киев, 1964. – 190 с.
20. Effect of anti-wear beams on waterwall heat transfer in a CFB boiler / Linjie Xu, Leming Cheng, Jieqiang Ji, Qinhui Wang // International J. of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 115. – P. 1092–1098. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.085.
21. Effect of furnace pressure drop on heat transfer in a 135 MW CFB boiler / Xuemin Liu, Man Zhang, Junfu Lu, Hairui Yang // Powder Technology. – 2015. – Vol. 284. – P. 19–24. doi: 10.1016/j.powtec.2015.06.019.
22. Experimental and simulation study of heat transfer in fluidized beds with heat production / Z. Li, C. E. T. Janssen, K. A. Buist, N. G. Deen, M. van Sint Annaland, J. A. M. Kuipers // Chemical Engineering Journal. – 2017. – Vol. 317. – P. 242–257. doi: 10.1016/j.cej.2017.02.055.
23. Jolley, J. J. Heat transfer in beds of fluidized solids // Fuel. – 1949. – No. 5, vol. 28. – P. 114–115.
24. Krause, W. B. Heat transfer from horizontal serrated finned tubes in a air-fluidized bed of uniformly sized particles / W. B. Krause, A. R. Peters // Heat transf. – 1983. – Vol. 105. – P. 319–324. doi: 10.1115/1.3245581.
25. Natusch, H. J. Zur Wärmeübertragung an horizontale Längsrippenrohren in Gas / H. J. Natusch, M. Z. Blenke // Fliebbetten Verfahrenstechnik. – 1974. – Vol. 8, no. 10. – P. 287–293.
26. Natusch, H. J. Zur Wärmeübertragung an Rippenrohren in Gas / H. J. Natusch, M. Z. Blenke // Fliebbetten Verfahrenstechnik. – 1973. – Vol. 7, no. 10. – P. 293–296.
27. Neukirchen, B. Gestaltung horizontalen Rohrbündel in Gas – Füllschichtreaktoren nah Wärmetechnischen Gesichtspunkten / B. Neukirchen, M. Blenke // Chem. Ing. Techn. – 1973. – Vol. 45. – P. 307–312.
28. Petre, J. C. Heat Transfer In-bed Heat Exchangers / J. C. Petre, W. A. Treeby, J. A. Buckham // Chem. Eng. Progr. – 1968. – Vol. 64, no. 7. – P. 45–51.
29. Study on heat transfer characteristics of the high temperature reheater tube panel in a 300 MW CFB boiler with fluidized bed heat exchanger / Xiaofeng Lu, Hu Wang, Wenqing Zhang, Quanhai Wang, Jianbin Chen,

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

- Yinhu Kang, Wei Kuang, Shengwei Xin, Changxu Liu, Xiong Xie // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 81. – P. 262–270.
30. The transfer from a horizontal discontinuous finned tube in fluidized bed / W. E. Genetti [et al.] // AIChE. – 1971. – Vol. 67, no. 116. – P. 85–89.

А. О. РЕДЬКО^{1*}, І. О. РЕДЬКО^{2*}

^{1*}Каф. «Теплогазопостачання, вентиляція та використання теплових вторинних енергоресурсів», Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 700 16 40, ел. пошта andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID 0000-0003-2331-7273

^{2*}Каф. «Експлуатація газових і теплових систем», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (050) 400 77 99, ел. пошта germes_s2006@ukr.net, ORCID 0000-0002-9863-4487

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ КИПЛЯЧОМУ ШАРІ

Мета. Дана робота спрямована на експериментальне дослідження теплообміну в високотемпературному киплячому шарі великих частинок для того, щоб забезпечити виконання екологічних вимог до систем теплопостачання. **Методика.** Для вирішення поставленого завдання розроблена експериментальна установка, яка забезпечує проведення досліджень при температурі киплячого шару та пульсуючого киплячого шару в діапазоні 800–1000 °С. Температура киплячого шару досягається шляхом спалювання природного газу і деревних відходів. Як матеріал шару використовувалися пісок та шамот із розміром частинок від 1,0 до 5,0 мм. Коефіцієнт тепловіддачі від шару до поверхні, зануреної у шар, і щільність теплового потоку вимірювалися калориметричним методом при стаціонарному режимі. Досліджувалися гладкі та поперечно оребрені труби з різною висотою й кроком ребер. Досліди у високотемпературному пульсуючому киплячому шарі проводилися при пульсуючому спалюванні природного газу в шарі або в підгратчастій камері, в яку окремо подавалися природний газ та повітря. Частота пульсацій горіння забезпечувалася системою автоматики. Частота спалаху регулювалася в діапазоні від 0,14 до 5 Гц. **Результати.** Представлені результати фізичного моделювання оцінки коефіцієнтів тепловіддачі гладких та оребрених труб у киплячому шарі великих частинок при спалюванні деревних відходів і газоподібного палива. Показано, що коефіцієнт тепловіддачі з підвищенням температури зростає у 2–2,5 рази, та в шарі з діаметром частинок 2,5–5 мм становить 300–350 Вт/(м²/К), що значно вище, ніж для шарових топків. Результати дослідів представлені у вигляді узагальненої залежності, що враховує діаметр частинок і значення коефіцієнта оребрення. Тепловіддача оребрених труб на 15–20 % нижче, ніж гладких труб, але щільність теплового потоку, віднесена до площі оребреної труби, дорівнює 0,12–0,15 МВт/м², що вище, ніж для гладких труб. При пульсуючій подачі палива з частотою 1–2 Гц коефіцієнт тепловіддачі зростає від 10–15 % до 25–30 %. При частоті пульсацій від 2 до 5 Гц коефіцієнт тепловіддачі змінюється від 510 до 570 Вт/(м²/К). При подальшому збільшенні частоти пульсацій коефіцієнт тепловіддачі зменшується і становить 515–520 Вт/(м²/К). Показано суттєвий вплив шпаруватості пульсацій від 0,8 до 0,3: коефіцієнт тепловіддачі збільшується на 30–35 %. Однак, при цьому спостерігається нестійкий режим горіння газоповітряної суміші та викид частинок матеріалу з шару. Результати дослідів представлені у вигляді узагальненої залежності. **Наукова новизна.** Авторами представлені вперше отримані дослідні дані про значення коефіцієнтів тепловіддачі оребрених труб у киплячому шарі та пульсуючому киплячому шарі великих частинок при температурі шару 800–1100 °С. **Практична значимість.** Отримані в роботі результати дозволяють розробляти топкові пристрої з низькотемпературним киплячим шаром шляхом занурення в шар оребрених трубчастих поверхонь. Дослідні дані узагальнені та представлені в критеріальному вигляді, зручному для практичного використання.

Ключові слова: теплообмін; киплячий шар; оребрені поверхні; пульсуючий киплячий шар; тепловіддача; критеріальні рівняння

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

A. O. REDKO^{1*}, I. O. REDKO^{2*}^{1*}Dep. «Heat and Gas Supply and Use of Thermal Secondary Energy Resources», Kharkiv National University of Construction and Architecture, Sumska St., 40, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 700 16 40, e-mail andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID 0000-0003-2331-7273^{2*}Dep. «Gas and Heat Supply», O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshall Baganov St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (050) 400 77 99, e-mail germes_s2006@ukr.net, ORCID 0000-0002-9863-4487**INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER
IN A HIGH-TEMPERATURED FLUIDIZED BED**

Purpose. This paper highlights experimental research of heat exchange in coarse particles to ensure the performance of ecological characteristics of Heat supply system. **Methodology.** The test stand has been developed to solve the defined task. It helps to do the research at the temperature of fluidizing bed and pulsating fluidizing bed at the range 800–1000 °C. The temperature of the fluidized bed was provided by burning natural gas and wood waste. Sand and chamotte with a particle size of 1.0 to 5.0 mm were used as the layer material. The heat-transfer coefficient from the layer to the surface, immersed in the layer, and the density of the heat flux were measured by a calorimetric method under steady-state conditions. Smooth tubes and transversely finned with different height and rib spacing were investigated. Experiments in a high-temperature pulsating fluidized bed were carried out with pulsating combustion of natural gas in a layer or in a sublattice chamber into which natural gas and air were separately supplied. The frequency of combustion pulsations was provided by the automation system. The flash frequency was regulated in the range from 0.14 to 5 Hz. **Findings.** It is presented the results of physical modeling to find out the heat-transfer coefficients of smooth and finned tubes in fluidizing bed of coarse particles in the process of wood waste and gaseous fuel combusting. It is proved that the coefficient of heat transfer increases with increasing temperature by 2–2.5 times in the bed which contains particles diameter of 2.5–5 mm is 300–350 W/(m² K) that is much higher than for layer furnaces. The results of the experiments are presented in the form of a generalized relationship that takes into account the diameter of the particles and the value of the finning coefficient. Heat transfer of finned tubes is 15–20% less than smooth tubes but the density of heat flow referred to the area of a finned tube is 0.12–0.20 MW/m² that is higher than for smooth ones. At pulsating fuel supply with frequency 1–2 Hz the heat-transfer coefficient gets higher from 10–15% till 25–30%. At a ripple frequency of 2 to 5 Hz, the heat-transfer coefficient varies from 510 to 570 W/(m²K). With a further increase in the pulsation frequency, the heat-transfer coefficient decreases and amounts to 515–520 W/(m²K). A significant effect of the ripple pulsation from 0.8 to 0.3 is shown: the heat-transfer coefficient is increased by 30–35%. However, an unstable combustion regime of the gas-air mixture and the ejection of material particles from the layer are observed. The results of the experiments are presented in the form of a generalized relationship. **Originality.** The authors have presented the obtained experimental data about heat-transfer coefficients of finned tubes in fluidizing bed and pulsing fluidizing bed of coarse particles at the temperature of layer 800–1100 °C. **Practical value.** The results obtained at the research help to develop furnace devices with low-temperature fluidizing bed in the process of immersion in a layer of finned tubes layers. The research data is presented in criterion view which is convenient for practical using.

Keywords: heat exchange; fluidizing bed; finned surfaces; pulsating fluidizing bed; heat transfer; criterion equation

REFERENCES

1. Baskakov, A. P., Matznev, V. V., & Raspopov, I. V. (1996). *Kotly i topki s kipiyashchim sloyem*. Moscow: Energoatomizdat.
2. Baskakov, A. P., & Goldobin, Y. M. (1970). Luchistyiy teploobmen v kipiyaschem sloye pri psevdoozhizhenii gazom. *Proceedings of Academy of Sciences. Power Engineering and Transport*, 4, 163–168.
3. Bokun, I. A., & Shlapkova, Y. P. (1988). Teploobmen mezhdu pulsiruyuschim sloyem i poverhnostyu nagreva. In *Proceedings of the Minsk International Forum Heat and Mass Transfer, Minsk, 1988, May 24–27*, 5, (pp. 54–55). Minsk: ITMO im. A. V. Lykova AN BSSR.
4. Galperin, N. I., Aynshteyn, V. G., & Toskubaev, I. N. (1972). O teploobmene mezhdu rebristymi trubami i psevdoozhizhennym sloyem zernistogo materiala. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 9, 42–43.
5. Zabrodskiy, S. S. (1971). *Vysokotemperaturnyye ustanovki s psevdoozhizhennym sloyem*. Moscow: Energia.

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

6. Ilchenko, A. I. (1968). *Issledovaniye radiatsionno-konduktivnogo teploobmena v kipyashchem sloye*. (PhD thesis). Available from A. V. Luikov heat and mass transfer institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk.
7. Migay, V. G., Shamyakin, V. N., Mantsev, V. V., & Zhitomirskaya, I. V. (1980). Issledovaniye teploobmena v gladkotrubnykh i orebrennykh shakhtmatnykh puchkakh trub v topkakh kipyashchego sloya i na modelyakh. In *Heat-Mass Exchange in Disperse Systems*, 6 (1), 94-98.
8. Golovina, Z. N., Brook, Y. G., Solovyev, V. V., & Kuchin, G. P. (1981). Issledovaniye teploobmena mezhdu pulsiruyushchim sloyem i poverkhnostyu. In *Teoriya i praktika szhiganiya gaza*. (pp. 150-153). Leningrad: Nedra.
9. Zhitomirskaya, I. V., Migay, V. M., Rassudov, N. S., & Shemyakin, V. N. (1982). Issledovaniye teploobmena shakhtnykh puchkov gladkikh i orebrennykh trub v kipyashchem sloe. *Teploenergetika*, 1, 49-51.
10. Makhov, K. Y., Pikashov, V. S., & Kuchin, G. P. (1981). *Teploobmen v vysokotemperaturnom kipyashchem sloye*. Kyiv: Naukova Dumka.
11. Migay, V. M., Zozulya, N. V., & Zhitomirskaya, I. V. (1984). Issledovaniye teploobmena orebrennykh trub v kipyashchem sloye. *Energomashinostroeniye*, 1, 13-15.
12. Palchenok, G. I., Tamarin, A. I., & Zabrodskiy, S. S. (1980). Teploobmen mezhdu gorizontally orebrennoy truboy i psevdoozhizhennym sloyem krupnykh chastits. *Teplomassoobmen v dispersnykh sistemakh*, 6 (1), 89-98.
13. Palchenok, G. I. (1981) Teploobmen mezhdu gorizontalnym puchkom orebrennykh trub i psevdoozhizhennym sloem krupnodispersnogo materiala. In *Issledovaniye protsessov perenosa v dispersnykh sistemakh*. (pp. 14-23). Minsk: ITMO AN BSSR.
14. Panov, O. M. (1977). *Issledovaniye lokalnogo teploobmena po perimetru gorizontalnykh tsilindrov v vysokotemperaturnom kipyashchem sloe*. (PhD thesis). Available from Ural Polytechnic Institute, Sverdlovsk.
15. Tamarin, A. M., Epakov, Y. G., Rassudov, E. S., & Shemyakin, V. N. (1977). Perenos tepla v topke kipyashchego sloya k gorizontalnomu shakhtnomu trubnomu puchku. *Energomashinostroyeniye*, 12, 7-8.
16. Rassudov, N. S., & Varlamova, A. E. (1983). O primeneniі impulsnoy podachi vozdukhа v topkakh s kipyashchim sloem. *Teploenergetika*, 1, 62-64.
17. Rakhmanov, V. B. (1983). *Teploobmen v topke s nizkotemperaturnym kipyashchim sloyem pri szhiganiі zhidkogo i tverdogo topliva*. (PhD thesis). Available from Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv.
18. Toskubaev, I. N. (1974). *Issledovaniye teploobmena mezhdu rebristymi poverkhnostyami i psevdoozhizhennym sloyem*. (PhD thesis). Available from Moscow Technological University, Moscow.
19. Kharchenko, N. V. (1964). Issledovaniye teploobmena mezhdu kipyashchim sloyem i pogrzhennym telom pri vysokikh temperaturakh. (PhD thesis). Available from The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv.
20. Xu, L., Cheng, L., Ji, J., & Wang, Q. (2017). Effect of anti-wear beams on waterwall heat transfer in a CFB boiler. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115 (B), 1092-1098. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.085
21. Liu, X., Zhang, M., Lu, J., & Yang, H. (2015). Effect of furnace pressure drop on heat transfer in a 135 MW CFB boiler. *Powder Technology*, 284, 19-24. doi:10.1016/j.powtec.2015.06.019
22. Li, Z., Janssen, T. C. E., Buist, K. A., Deen, N. G., van Sint Annaland, M., & Kuipers, J. A. M. (2017). Experimental and simulation study of heat transfer in fluidized beds with heat production. *Chemical Engineering Journal*, 317, 242-257. doi:10.1016/j.cej.2017.02.055
23. Jolley, J. J. (1949). Heat transfer in beds of fluidized solids. *Fuel*, 28 (5), 114-115.
24. Krause, W. B., & Peters, A. R. (1983). Heat transfer from horizontal serrated finned tubes in a air-fluidized bed of uniformly sized particles. *Journal of Heat Transfer*, 105 (2), 319-324. doi:10.1115/1.3245581
25. Natusch, H. J., & Blenke, M. (1974). Zur Wärmeübertragung an horizontale Längsrippenrohren in Gas. *Fliebbetten Verfahrenstechnik*, 8 (10), 287-293.
26. Natusch, H. J., & Blenke, M. (1973). Zur Wärmeübertragung an Rippenrohren in Gas. *Fliebbetten Verfahrenstechnik*, 7 (10), 293-296.
27. Neukirchen, B., & Blenko, M. (1973). Gestaltung horizontaler Rohrbündel in Gas-Wirbelschichtreaktoren nach wärmetechnischen Gesichtspunkten. *Chemie Ingenieur Technik*, 45 (5), 307-312. doi:10.1002/cite.330450516
28. Petre, J. C., Treeby, W. A., & Buckham, J. A. (1968). Heat Transfer In-bed Heat Exchangers. *Chemical Engineering Progress*, 64 (7), 45-51.

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

29. Wang, H., Lu, X., Zhang, W., Wang, Q., Chen, J., Kang, Y., ..., & Xie, X. (2015). Study on heat transfer characteristics of the high temperature reheater tube panel in a 300 MW CFB boiler with fluidized bed heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 81, 262-270. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.02.025
30. Genetti W.E. et al (1971). The transfer from a horizontal discontinuans finned tube in fluidized bed. *AIChE Symposium Series*, 67 (116), 85-89.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. А. Габринцом (Украина);
д.т.н., проф. И. И. Капцовым (Украина)*

Надійшла до редколегії: 06.06.2017

Принята до друку: 28.09.2017

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.439

В. А. ПОЛЯКОВ^{1*}, Н. М. ХАЧАПУРИДЗЕ^{2*}

^{1*}Отд. № 7, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 232 30 55, эл. почта p_v_a_725@mail.ru, ORCID 0000-0002-4957-8028

^{2*}Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 370 21 86, эл. почта itst@westa-inter.com, ORCID 0000-0003-0682-6068

МОДЕЛЬ ПОДВЕШИВАНИЯ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

Цель. Реализация левитационной силы (ЛС) магнитолевитирующего поезда (МЛП) происходит в процессе взаимодействия магнитных полей сверхпроводящих поездных (СПК) и короткозамкнутых путевых контуров (КПК) левитационного узла (ЛПУ). Исходя из этого, целью настоящего исследования является получение корректного описания такого взаимодействия. **Методика.** На современном этапе основным и наиболее универсальным инструментом анализа и синтеза процессов и систем является их математическое и, в частности, компьютерное моделирование. В то же время радикальные преимущества этого инструмента делают ещё более важной прецизионность выбора конкретной методики проведения исследования. Особую актуальность это имеет по отношению к столь большим и сложным системам, какими являются МЛП. По этой причине в работе особое внимание уделено аргументированному обоснованию выбора селективных особенностей исследовательской парадигмы. **Результаты.** Результаты анализа существующих версий модели реализации ЛС свидетельствуют о том, что каждая из них, наряду с преимуществами, обладает и существенными недостатками. В связи с этим, одним из основных результатов исследования должно явиться построение математической модели реализации указанной силы, сохраняющей преимущества упомянутых версий, но свободной от их недостатков. В работе аргументированно обоснована рациональность применения, для целей исследования ЛС поезда, интегративной холистической парадигмы, ассимилирующей преимущества теорий электрических цепей и магнитного поля. **Научная новизна.** Приоритетность создания такой парадигмы, а также соответствующей версии модели реализации ЛС составляют научную новизну исследования. **Практическая значимость.** Основным проявлением практической значимости работы является возможность, в случае использования её результатов, существенного повышения эффективности динамических исследований МЛП при одновременном снижении их ресурсоёмкости.

Ключевые слова: магнитолевитирующий поезд; математическая модель левитации; интегративная парадигма исследования

Введение

Токи и поля контуров ЛУ МЛП – компоненты единого электромагнитного субпроцесса гиперпроцесса электромеханического преобразования энергии. Моделирование этих компонентов вполне возможно [4] в рамках парадигм теорий электрических цепей и электромагнитного поля. Поэтому существующие версии математической модели подвешивания (ММП) МЛП построены [4, 13, 14] исходя из упомяну-

тых парадигм. Анализ свойств упомянутых версий модели свидетельствует о том, что каждая из них обладает как преимуществами, так и недостатками. Их общая положительная черта – достаточная функциональность. Основной же имманентный недостаток таких версий – нестационарность дифференциальных уравнений, вызванная циклической переменностью их коэффициентов, соответствующих собственным и взаимным индуктивностям дискрет-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ных путевых контуров (ДПК) ЛУ как между собой, так и со сверхпроводящими поездными контурами (СПК), в зависимости от положения поезда. Это существенно затрудняет решение задач описываемой динамики [12], радикально снижая практическую ценность версий модели.

Цель

Изложенное выявляет [5, 8, 11] актуальность создания ММП МЛП, ассимилирующей достоинства имеющихся версий такой модели, но свободной от их недостатков. Синтез такой модели является основной целью настоящей работы.

Методика

Электромеханическое энергопреобразование ЛУ МЛП осуществляется в процессе взаимодействия полей токов СПК и ДПК. Поэтому паттерном левитационной силы (ЛС) поезда является взаимодействие тока элемента СПК с полем токов ДПК. Такое взаимодействие может быть описано выражением закона Ампера [2]:

$$f_{\beta\gamma} = I_{\beta\gamma} \cdot i^{\beta\gamma} \cdot B_{\beta\gamma} \cdot \sin \alpha_{\beta\gamma}, \quad (1)$$

где $f_{\beta\gamma}$ – сила, действующая на γ -тый элемент β -го СПК; $I_{\beta\gamma}, i^{\beta\gamma}, B_{\beta\gamma}, \alpha_{\beta\gamma}$ – длина элемента, ток в нём, индукция поля, в котором элемент находится, а также угол между $i^{\beta\gamma}$ и $B_{\beta\gamma}$.

Расчётные схемы СПК и секций ДПК приняты, соответственно, в виде наборов гальванически не связанных проводящих прямоугольных рамок, а также пар идентичных прямоугольных катушек, соединённых согласно нуль-поточной схеме [4]. Тогда ЛС поезда определена как векторная сумма величин $f_{\lambda\chi} \forall \lambda \in [1, N], \chi \in [1, 4]$, каждая из которых, – это результат взаимодействия тока одного из элементов СПК с полем токов взаимодействующих с ним ДПК. В последнем выражении, N – число упомянутых СПК. Динамика электромагнитного компонента такого взаимодействия определяется уравнениями второго закона Кирхгофа [2]. Подсистема «СПК – ДПК», как правило, вырождена [8] – ёмкостные показатели её элементов пренебрежимо низки.

Потому, в инерциальной системе отсчёта $Q\varepsilon^p \forall p \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$, модель электромагнитного компонента взаимодействия β -го СПК с учитываемыми (в этом взаимодействии) ДПК имеет вид [1, 2]:

$$\sigma_{\rho\beta} = L_{\rho\rho} \cdot \frac{d}{dt} i^\rho + L_{\rho\mu} \cdot \frac{d}{dt} i^\mu + r_\rho \cdot i^\rho$$

$$\forall \rho, \mu \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]; \quad (2)$$

$$\sigma_{\rho\beta} = \sigma_{\rho\beta}^u - \sigma_{\rho\beta}^l; \quad \sigma_{\rho\beta}^k = -\frac{d}{dt} (M_{\rho\beta}^k \cdot i_s^\beta)$$

$$\forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], k = u \vee k = l, \quad (3)$$

где $\sigma_{\rho\beta}^k \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], k = u \vee k = l$ – электродвижущие силы (э. д. с.) в катушках ρ -го ДПК при изменениях сцеплений с их подконтурами потока тока i_s^β цепи β -го СПК; $L_{\rho\rho}, L_{\rho\mu}, r_\rho \forall \rho, \mu \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$ – собственные и взаимные индуктивности, а также активные сопротивления ДПК; χ_β – номер (от начала участка трассы, вдоль которого происходит движение МЛП) последнего ДПК, поперечную осевую линию которого миновала поперечная осевая линия β -го СПК; E – половина числа ДПК, с которыми учитывается электромагнитное взаимодействие каждого СПК; $i^\rho, i^\mu \forall \rho, \mu \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$ – токи ДПК; $M_{\rho\beta}^k \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], k = u \vee k = l$ – взаимные индуктивности между β -ым СПК и катушками взаимодействующих с ним ДПК; t – текущее время.

Благодаря принятым конструкционным мерам [4], значения токов $i_s^\lambda \forall \lambda \in [1, K]$, изменяются достаточно медленно и, на интервалах, соизмеримых со временем наблюдения движения поезда, могут считаться равными между собой и постоянными

$$i_s^\lambda = i_s = \text{const} \quad \forall \lambda \in [1, K], \quad (4)$$

где K – число СПК, установленных на МЛП. Значение же E нужно выбирать так, чтобы по обеим сторонам от каждого β -го СПК в ДПК,

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

предшествующих, а также следующих за учитываемыми, величины

$\sigma_{\rho\beta}^{\kappa} \forall \rho < \chi_{\beta} - E \vee \rho > \chi_{\beta} + E, \kappa = u \vee \kappa = l$ даже в неравновесном состоянии ЛУ, были бы пренебрежимо малы.

СПК и ДПК взаимоподвижны. Поэтому $L_{\rho\rho}, L_{\rho\mu}, M_{\rho\lambda}^{\kappa} \forall \rho, \mu \in [(\chi_{\lambda} - E), (\chi_{\lambda} + E)]$,

$\lambda \in [1, K], \kappa = u \vee \kappa = l$ имеют циклически изменяющиеся во времени значения. Это, в свою очередь, приводит к нестационарности коэффициентов уравнений (2), (3) и, как отмечено, существенно снижает практическую ценность версии модели. С целью устранения указанного недостатка, реализацию слагающих ЛС МЛП следует рассматривать относительно координатных систем, в каждой из которых рассматриваемый СПК и учитываемые во взаимодействии с ним ДПК условно взаимно неподвижны. В таком качестве, удобнее всего принять [11] отсчётные системы

$C_{\lambda} \eta^{\mu} \forall \lambda \in [1, K], \mu \in [1, 3]$, каждая из которых жёстко связана с λ -ым СПК. Инерциальными $C_{\lambda} \eta^{\mu} \forall \lambda \in [1, K], \mu \in [1, 3]$, в общем случае, не являются. В то же время, весьма желательно [7], чтобы уравнения, описывающие динамику электромагнитного компонента взаимодействия СПК с ДПК, имели тензорный характер. Такие уравнения могут быть получены [10], из равенств типа (2) путём замены в них локальных производных $\frac{d}{dt}$ абсолютными $\frac{D}{dt}$, а также перехода в модели (2), (3) к координатам $\eta_{\lambda}^{\mu} \forall \lambda \in [1, K], \mu \in [1, 3]$. Соотношение между упомянутыми производными, как известно, имеет вид [10]:

$$\frac{D}{dt} \eta_{\alpha}^{\mu} = \frac{d}{dt} \eta_{\alpha}^{\mu} + e_{\mu\alpha\nu} \cdot \omega_{\alpha} \cdot \eta_{\alpha}^{\nu} \forall \mu, \nu \in [1, 3], \quad (5)$$

где $e_{\mu\alpha\nu} \forall \mu, \nu \in [1, 3], \omega_{\alpha}$ – символ Леви-Чивита, а также вектор угловой скорости вращения $C_{\alpha} \eta^{\mu} \forall \mu \in [1, 3]$.

После указанной замены, соотношения, полученные из (2), приобретают тензорный характер. Поэтому, в частности, их форма становится инвариантной по отношению к координатам, в которых они записаны. Переход же к ко-

ординатам $\eta_{\alpha}^{\mu} \forall \mu \in [1, 3]$ осуществим согласно выражениям:

$$\eta_{\alpha}^{\mu} = g_{\rho}^{\mu} \cdot \varepsilon^{\rho}$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]; \mu \in [1, 3] \quad (6)$$

где g_{ρ}^{μ} – матрица преобразования координат:

$$g_{\rho}^{\mu} = \frac{\partial \eta_{\alpha}^{\mu}}{\partial \varepsilon^{\rho}}$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]; \mu \in [1, 3]. \quad (7)$$

На оси $\eta_{\alpha}^{\mu} \forall \mu \in [1, 3]$ и $\varepsilon^{\rho} \forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]$ могут проектироваться любые векторные величины, характеризующие электродинамику взаимодействия СПК и ДПК в системах отсчёта соответственно $C_{\alpha} \eta^{\mu} \forall \mu \in [1, 3]$ и $Q \varepsilon^{\rho} \forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]$. В частности, ими могут быть векторы токов, э. д. с. и индукции полей.

Выражения для связей вида

$$\eta_{\alpha}^{\mu} = \eta_{\alpha}^{\mu}(\varepsilon^{\rho})$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]; \mu \in [1, 3] \quad (8)$$

могут быть получены исходя из того, что [5], в процессе описываемого координатного преобразования, его инвариантами являются амплитуды токов в рассматриваемых контурах, а также их э. д. с.

С помощью же матрицы

$$g_{\mu}^{\rho} = \frac{\partial \varepsilon^{\rho}}{\partial \eta_{\alpha}^{\mu}} = (g_{\rho}^{\mu})^T$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]; \mu \in [1, 3], \quad (9)$$

осуществимо обратное преобразование

$$\varepsilon^{\rho} = g_{\mu}^{\rho} \cdot \eta_{\alpha}^{\mu}$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]; \mu \in [1, 3]. \quad (10)$$

В выражениях (3) для $\sigma_{\rho\beta}^{\kappa} \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)], \kappa = u \vee \kappa = l$, $M_{\rho\beta}^{\kappa} \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)], \kappa = u \vee \kappa = l$ существенно зависят, в частности, от взаимного рас-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

положения рассматриваемого β -го СПК и ДПК, взаимодействие с которыми для него рассматривается. Поэтому

$$M_{\rho\beta}^{\kappa} = M_{\rho\beta}^{\kappa}(w_{\beta}) \quad \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)],$$

$$\kappa = u \vee \kappa = l, \quad (11)$$

где w_{β} – координата, определяющая текущее положение рассматриваемого β -го СПК относительно начала отсчёта движения МЛП вдоль оси пути. При этом, поскольку ДПК вдоль трассы движения поезда располагаются регулярно, последние зависимости имеют гармонический характер. В то же время, современные способы измерения позволяют [9] экспериментально-расчётными методами со вполне приемлемой точностью определять значения взаимных индуктивностей контуров магнитосвязанных электрических цепей при различном текущем их пространственном взаиморасположении. Это, в свою очередь, позволяет, используя упомянутые методы, поточно строить искомые зависимости (11) на требуемой сетке w_{β} . Далее, с использованием методов, например, полиномиальной регрессии [6], реализация которых доступна в ряде современных систем компьютерной математики (например, Mathematica), зависимостям вида (11) может, с сохранением достаточно высокой точности содержания, быть придана форма аналитических выражений. Помимо того, с учётом равенств (4), выражения (3) могут быть преобразованы к виду

$$\sigma_{\rho\beta} = \sigma_{\rho\beta}^u - \sigma_{\rho\beta}^l; \quad \sigma_{\rho\beta}^{\kappa} = -i_s \cdot \dot{w}_{\beta} \cdot \frac{d}{dw_{\beta}} M_{\rho\beta}^{\kappa}$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)], \quad \kappa = u \vee \kappa = l, \quad (12)$$

где $\dot{w}_{\beta}$ – скорость продольного (вдоль касательной к оси) движения рассматриваемого β -го СПК относительно пути. Значения $\frac{d}{dw_{\beta}} M_{\rho\beta}^{\kappa} \quad \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)], \quad \kappa = u \vee \kappa = l$ для подстановки в выражения (12) могут быть получены с использованием, созданных описанным путём в форме аналитических выраже-

ний, зависимостей вида (11). Таким образом, каждый из β векторов $\overline{\sigma_{\rho\beta}} \quad \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]$ оказывается определёнными в системе отсчёта $Q\varepsilon^{\rho} \quad \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]$. Далее, с использованием соотношений вида (6) – (8), каждый такой вектор может быть определён в системе $C_{\beta}\eta^{\mu} \quad \forall \mu \in [1, 3]$ проекциями $\sigma_{\mu\beta} \quad \forall \mu \in [1, 3]$.

После преобразований, уравнения, полученные из (2) и (3) путём их трансформации в триэдр $C_{\beta}\eta^{\mu} \quad \forall \mu \in [1, 3]$ с использованием соотношений (5) и (6), приобретают вид

$$\sigma_{\mu\beta} = L_{\mu\mu} \cdot \left(\frac{d}{dt} i^{\mu} + e_{\mu\beta\nu} \cdot \omega_{\beta} \cdot i^{\nu} \right) +$$

$$+ L_{\mu\tau} \cdot \left(\frac{d}{dt} i^{\tau} + e_{\tau\beta\theta} \cdot \omega_{\beta} \cdot i^{\theta} \right) + r_{\mu} \cdot i^{\mu}$$

$$\forall \mu, \nu, \tau, \theta \in [1, 3]; \quad (13)$$

$$\sigma_{\mu\beta} = \mathfrak{G}_{\rho}^{\mu} \cdot \sigma_{\rho\beta}$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]; \mu \in [1, 3]$$

$$\sigma_{\rho\beta} = \sigma_{\rho\beta}^u - \sigma_{\rho\beta}^l;$$

$$\sigma_{\rho\beta}^{\kappa} = -i_s \cdot \dot{w}_{\beta} \cdot \frac{d}{dw_{\beta}} M_{\rho\beta}^{\kappa}$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)], \kappa = u \vee \kappa = l. \quad (14)$$

Уравнения (13) имеют постоянные коэффициенты, являются тензорными и описывают токовую динамику ЛУ МЛП в координатах $i^{\mu} \quad \forall \mu \in [1, 3]$. После их (как правило – численного) разрешения относительно этих переменных, последние, с использованием соотношений (10), могут быть преобразованы в координаты $i^{\rho} \quad \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]$, значения которых определяют реальные токи в цепях ДПК.

Магнитная цепь ЛУ предполагается ненасыщенной [4]. Поэтому она может считаться условно-линейной подсистемой и, следовательно, к ней применим принцип аддитивности. Исходя из этого, результирующее поле токов ДПК в любой точке геометрического простран-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ства $O\Xi_\gamma \forall \gamma \in [\overline{1,3}]$, в котором реально движется СПК относительно ДПК, может описываться как сумма полей, создаваемых в этой точке токами отдельных модулей ДПК:

$$B_{\gamma\beta} = B_{\gamma\rho\beta} \cdot e^\rho; e^\rho = 1;$$

$$\forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \gamma \in [\overline{1,3}], \quad (15)$$

где $B_{\gamma\beta}, B_{\gamma\rho\beta} \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \gamma \in [\overline{1,3}]$ – пространственные компоненты индукции поля, создаваемого всеми (учитываемыми во взаимодействии с β -ым СПК) модулями ДПК, а также отдельными такими модулями в рассматриваемой точке этого пространства. В свою очередь, значения компонентов $B_{\gamma\alpha\beta} \forall \gamma \in [\overline{1,3}]$ для каждого α -ого модуля ДПК, определимы выражениями

$$B_{\gamma\alpha\beta}(i^\alpha) = B_{\gamma\alpha\beta}^u(i^\alpha) - B_{\gamma\alpha\beta}^l(i^\alpha) \forall \gamma \in [\overline{1,3}], \quad (16)$$

где $B_{\gamma\alpha\beta}^k \forall \gamma \in [\overline{1,3}], k = u \vee k = l$ – пространственные компоненты индукции поля токов катушек α -го ДПК (взаимодействующего с β -ым СПК). Выражения для определения значений $B_{\gamma\rho\beta}(i^\rho) \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \gamma \in [\overline{1,3}], k = u \vee k = l$ получены в [3]. Далее, в соотношения вида (16) последовательно подставляются значения токов $i^\rho \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$ и, таким образом, находятся значения $B_{\gamma\rho\beta} \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \gamma \in [\overline{1,3}]$, а затем по ним, согласно (15), – и $B_{\gamma\beta} \forall \gamma \in [\overline{1,3}]$.

Поскольку пространство системы $O\Xi_\gamma \forall \gamma \in [\overline{1,3}]$ – евклидово, то, исходя из его метрики, мгновенное значение модуля вектора пол-

ной индукции поля, создаваемого токами ДПК, взаимодействующих с β -ым СПК, может быть определено выражением

$$B_\beta = \sqrt{B_{\gamma\beta}^{(2)} \cdot e^\gamma}; e^\gamma = 1 \forall \gamma \in [\overline{1,3}]. \quad (17)$$

Результаты

Создана интегративная парадигма моделирования подвешивания МЛП, ассимилирующая достоинства теорий цепей и поля, но свободная от их недостатков. Построена ММП МЛП, не имеющая дефектов предыдущих версий модели. Этим решена задача настоящей части исследования.

Научная новизна
и практическая значимость

Научную новизну исследования составляют приоритетность создания интегративной холистической парадигмы моделирования подвешивания МЛП, а также соответствующей версии модели реализации ЛС. Основным проявлением практической значимости работы является возможность, в случае использования её результатов, существенного повышения эффективности динамических исследований МЛП при одновременном снижении их ресурсоёмкости.

Выводы

Холистичность и интегративность созданной парадигмы исследования позволили существенно повысить качество ММП МЛП, созданной с использованием такой парадигмы. Её использование в процессе динамических исследований МЛП позволит повысить их эффективность и снизить ресурсоёмкость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Арменский, Е. В. Единая теория электрических машин : учеб. пособие / Е. В. Арменский, И. В. Кузина. – Москва : Изд-во Моск. ин-та электрон. машиностроения, 1975. – 256 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – Москва : Высш. шк., 1996. – 578 с.
3. Бирюков, В. А. Магнитное поле прямоугольной катушки с током / В. А. Бирюков, В. А. Данилов // Журнал техн. физики. – 1961. – Т. XXXI, № 4. – С. 428–435.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

4. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией : монография / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев, В. И. Матин, С. А. Сергеев. – Киев : Наук. думка, 2001. – 479 с.
5. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – Москва : Высш. шк., 2001. – 327 с.
6. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Е. Корн. – Москва : Наука, 1973. – 831 с.
7. Крон, Г. Применение тензорного анализа в электротехнике : монография / Г. Крон. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1955. – 275 с.
8. Львович, А. Ю. Электромеханические системы : учеб. пособие / А. Ю. Львович. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1989. – 296 с.
9. Панфилов, В. А. Электрические измерения : учебник / В. А. Панфилов. – Москва : Академия, 2006. – 288 с.
10. Рашевский, П. К. Риманова геометрия и тензорный анализ / П. К. Рашевский. – Москва : Наука, 1967. – 644 с.
11. Сипайлов, Г. А. Электрические машины (специальный курс) : учеб. для вузов / Г. А. Сипайлов, Е. В. Кононенко, К. А. Хорьков. – Москва : Высш. шк., 1987. – 287 с.
12. A Review on Development and Analysis of Maglev Train / G. K. Tandan, P. K. Sen, G. Sahu [et al.] // Intern. J. of Research in Advent Technology. – 2015. – Vol. 3. – Iss. 12. – P. 14–17.
13. Magnetic suspension applications on the railway traction for high speed maglev trains / M. Dumitrescu, V. Ștefan, C. Pleșcan [et al.] // Bulletin of the Transylvania University of Brașov. – 2015. – Vol. 8 (57). – Special Issue No. 1. – P. 233–244.
14. Wairagade, A. K. R. Magnetic Levitation Train / A. K. R. Wairagade, M. B. H. Balapure, P. Ganer // J. for Research. – 2015. – Vol. 01. – Iss. 08. – P. 1–5.

В. О. ПОЛЯКОВ^{1*}, М. М. ХАЧАПУРИДЗЕ^{2*}

^{1*}Від. № 7, Інститут транспортних систем і технологій НАН України, вул. Пісаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 232 30 55, ел. пошта p_v_a_725@mail.ru, ORCID 0000-0002-4957-8028

^{2*}Інститут транспортних систем і технологій НАН України, вул. Пісаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 86, ел. пошта itst@westa-inter.com, ORCID 0000-0003-0682-6068

МОДЕЛЬ ПІДВИШУВАННЯ МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА

Мета. Реалізація левітаційної сили (ЛС) магнітолевітуючого поїзда (МЛП) відбувається у процесі взаємодії магнітних полів надпровідних поїзних (НПК) і короткозамкнених шляхових контурів (КШК) левітаційного вузла (ЛВ). Виходячи із цього, метою цього дослідження є одержання коректного опису такої взаємодії. На сучасному етапі основним і найбільш універсальним інструментом аналізу й синтезу процесів і систем є їх математичне та, зокрема, комп'ютерне моделювання. **Методика.** У той же час радикальні переваги цього інструмента роблять ще більш важливою прецизійність вибору конкретної методики проведення дослідження. Особливу актуальність це має стосовно таких великих і складних систем, якими є МЛП. Із цієї причини у роботі особлива увага приділена аргументованому обґрунтуванню вибору селективних особливостей дослідницької парадигми. **Результати.** Результати аналізу існуючих версій моделі реалізації ЛС свідчать про те, що кожна з них, поряд із перевагами, має й істотні недоліки. У зв'язку з цим, одним із основних результатів дослідження повинна бути побудова математичної моделі реалізації зазначеної сили, що зберігає переваги згаданих версій, але вільної від їх недоліків. У роботі аргументовано обґрунтована раціональність застосування, для цілей дослідження ЛС поїзда, інтегративної холистичної парадигми, що асимілює переваги теорій електричних ланцюгів і магнітного поля. **Наукова новизна.** Пріоритетність створення такої парадигми, а також відповідної версії моделі реалізації ЛС становлять наукову новизну дослідження. **Практична значимість.** Основним проявом практичної значимості роботи є можливість, у випадку використання її результатів, істотного підвищення ефективності динамічних досліджень МЛП при одночасному зниженні їх ресурсоемності.

Ключові слова: магнітолевітуючий поїзд; математична модель левітації; інтегративна парадигма дослідження

V. A. POLYAKOV¹, N. M. KHACHAPURIDZE^{2*}¹Dep. № 7. Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's NAS, Pisarzhevsky St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 232 30 55, e-mail p_v_a_725@mail.ru, ORCID 0000-0002-4957-8028^{2*}Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's NAS, Pisarzhevsky St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 86, e-mail itst@westa-inter.com, ORCID 0000-0003-0682-6068

MAGNETICALLY LEVITATED TRAIN'S SUSPENSION MODEL

Purpose. The implementation of the magnetically levitated train's (MLT) levitation force (LF) occurs during the interaction between fields of superconducting train's (STC) and short-circuited track's contours (STC), which are included in to levitation module (LU). Based on this, the purpose of this study is to obtain a correct description of such interaction. **Methodology.** At the present stage, the main and most universal tool for the analysis and synthesis of processes and systems is their mathematical and, in particular, computer modeling. At the same time, the radical advantages of this tool make even more important the precision of choosing a specific methodology for research conducting. This is particularly relevant in relation to such large and complex systems as MLT. For this reason, the work pays special attention to the reasoned choice of the selective features of the research paradigm. **Findings.** The analysis results of existing versions of LF implementation's models show that each of them, along with the advantages, also has significant drawbacks. In this regard, one of the main results of the study should be the construction of this force implementation's mathematical model, which preserves the advantages of the mentioned versions, but free from their shortcomings. The rationality of application, for the train's LF researching, of an integrative holistic paradigm, which assimilates the advantages of the electric circuit's and magnetic field's theory's, is reasonably justified in work. **Originality.** The scientific novelty of the research – in priority of such a paradigm's and the corresponding version's of the LF's implementation's model's creating. **Practical value.** The main manifestation of the practical significance of the work is the possibility, in the case of using its results, to significantly increase the effectiveness of dynamic MLT research while reducing their resource costing.

Keywords: magnetically levitated train; mathematical model of levitation; integrative paradigm of research

REFERENCES

1. Armenskiy, Y. V., & Kuzina I. V. (1975). *Yedinaya teoriya elektricheskikh mashin* [Monograph]. Moscow: MIEM.
2. Bessonov, L. A. (1996). *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: elektricheskije tsepi* [Monograph]. Moscow: Vysshaya shkola.
3. Biryukov, V. A., & Danilov, V. A. (1961). Magnitnoye pole pryamougolnoy katushki s tokom. *Technical Physics*, XXXI (4), 428-435.
4. Dzenzerskiy, V. A., Omelyanenko, V. I., Vasilev, S. V., Matin, V. I., & Sergeev, S. A. (2001). *Vysokoskorostnoy magnitnyy transport s elektrodinamicheskoy levitatsiey* [Monograph]. Kyiv: Naukova dumka.
5. Kopylov, I. P. (2001). *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* [Monograph]. Moscow: Vysshaya shkola.
6. Korn, G., & Korn, Y. (1973). *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. Moscow: Nauka.
7. Kron, G. (1955). *Primeneniye tenzornogo analiza v elektrotekhnike* [Monograph]. Moscow-Leningrad: Gostekhizdat.
8. Lvovich, A. Y. (1989). *Elektromekhanicheskiye sistemy* [tutorial]. Leningrad: St. Petersburg State University.
9. Panfilov, V. A. (2006). *Elektricheskije izmereniya* [tutorial]. Moscow: Akademiya.
10. Rashevskiy, P. K. (1967). *Rimanova geometriya i tenzornyy analiz*. Moscow: Nauka.
11. Sipaylov, G. A., Kononenko, Y. V., & Khorkov, K. A. (1987). *Elektricheskije mashiny (spetsialnyy kurs)* [tutorial]. Moscow: Vysshaya shkola.
12. Tandan, G. K., Sen, P. K., Sahu, G., Sharma, R., & Bohidar, S. (2015). A Review on Development and Analysis of Maglev Train. *International Journal of Research in Advent Technology*, 3 (12), 14-17.
13. Dumitrescu, M., Ștefan, V., Pleșcan, C., Bobe, C. I., Dragne, G. M., Badea, C. N., Dumitru, G. (2015). Magnetic suspension applications on the railway traction for high speed maglev trains. *Proceeding of the Interna-*

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- tional Scientific Conference «CIBV 2015», October, 30-31, 2015, Brasov, Romania. [Special Issue]. *Bulletin of the Transylvania University of Braşov*, 8 (57), 233-244.
14. Kelwadkar, A., Wairagade, R., Boke, M., Balapure, H., & Ganer, P. (2015). Magnetic Levitation Train. *Journal for Research*, 01 (08), 1-5.

Стаття рекомендована к публікації д.физ.-мат.н., А. А. Зевиним (Україна); д.т.н., проф. И. В. Жуковицким (Україна)

Поступила в редколлегию: 05.06.2017

Принята к печати: 12.09.2017

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

UDC [629.4.015:625.032.434]:531.3

О. Н. REIDEMEISTER¹, V. O. KALASHNYK², O. A. SHYKUNOV^{3*}¹Dep. «Cars and Cars Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail reidemeister@mail.ru, ORCID 0000-0001-7490-7180²Dep. «Cars and Cars Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. La-zaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 793 19 16, e-mail kv47@i.ua, ORCID 0000-0002-8073-4631^{3*}Dep. «Cars and Cars Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. La-zaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail tri_s@ua.fm, ORCID 0000-0002-8256-2634

METHOD OF CONSTRUCTING THE DYNAMIC MODEL OF MOVEMENT OF THE MULTI-MASS SYSTEM

Purpose. The scientific work is intended to develop a methodology for describing the structure of the railway vehicles (they are considered as a system of rigid bodies connected by rigid, elastic and dissipative elements), which would allow us to obtain the equations of motion in an easily algorithmized way. **Methodology.** When constructing the model, authors tend to ensure that its structure reflects the structure of the mechanical system, that is, parts of the model must correspond to parts of the car. In this case, the model takes the form of a hierarchically organized graph whose vertices correspond to the bodies, attachment points of the connecting elements and to the connecting elements themselves, and the edges describe the sets of processes that are related to the incident vertexes. As a rule, these are movements and forces: for the edge between the body and the attachment point they are generalized movements of the body and the general forces acting on it; for the edge between the attachment point and the connecting element - the movements of the point and the forces arising in the element. To each vertex there corresponds a group of equations describing the motion of the system. The nature of the equations depends on the type of the vertex. For the body it is the equations of body motion; for the point - the expressions for the point displacements through generalized displacements of the body and generalized forces acting on the body, through the forces arising in the connecting element; for the connecting element - the expression for the forces arising in it through the deformation of the element. The graph can be regarded as oriented. The direction of the edge is chosen in such a way that for each vertex the values on the right-hand side of the vertex-associated equation would correspond to the incoming edge, and in the left-hand side - to the outgoing edge. **Findings.** A technique for constructing a dynamic model of oscillations of railway vehicles as a system of rigid bodies is developed on the basis of their description using hierarchically organized graphs. The technique was tested to construct a model of spatial oscillations of a 4-axle freight car with an axial load of 25 tons in Simulink package. **Originality.** For the first time, a technique has been developed for describing the structure of a railway vehicle using a hierarchical graph, which makes it possible to obtain equations of motion in an easily algorithmized manner. **Practical value.** The proposed methodological approach will allow, after creating a library of bodies and connecting elements, to significantly reduce the time spent on modeling the oscillations of different vehicles.

Keywords: oscillation model; railway vehicle; multi-mass system; graph

Introduction

At present, the approach to constructing models of car oscillations is well known and tested for assessing the car running qualities and dynamic loading of elements [12]. The car is considered as a set of solid bodies [1], connected by rigid, elastic, viscous, dissipative elements [10, 11, 13]. As a rule, the angles of rotation are considered small values, after which the compilation of the equations of

motion becomes a routine procedure, which it is advisable to deliver into charge of the computer.

Let us consider one of the possible approaches to the solution of this problem, for this we will present a semi-formal way of describing the model and the rules of compiling the equations of motion. Actually, we will not be interested in the solution of the equations, since for these purposes there are universal packages of applied programs Simulink [6], Simscape, OpenModelica, Dymola (the last

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

two packages implement the language of the description of dynamical systems Modelica [9]) and so on.

Purpose

To develop a methodology for describing the structure of the railway vehicles (they are considered as a system of rigid bodies connected by rigid, elastic and dissipative elements), which would allow us to obtain the equations of motion in an easily algorithmized way.

Methodology

When building a model, we strive to ensure that its structure reflects the structure of the mechanical system (car), that is, parts of the model must correspond to parts of the car. In this case, the model takes the form of a hierarchically organized graph whose vertices correspond to the bodies and connecting elements, and the edges describe the sets of processes that are related to the incident to edge vertices [7]. An example of the general structure of the model is shown in Figure 1.

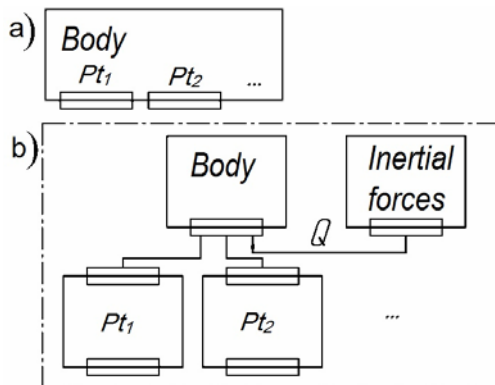


Fig. 1. Car body: *a* – vertex representing, *b* – its internal structure. Pt1 and Pt2 are attachment points of pairs «Centre plate - Centre pad»

As a rule, a set of generalized displacements and corresponding generalized forces correspond to the edge.

For the edge, causality conditions can be defined (for example, if the force is considered as a function of displacements) or not (forces and displacements are related by implicit relations). The difference between the two types of edges is not fundamental and, if desired, one can write down

the formal rules for determining the causality relation.

To describe the model-building rules, we use the inductive approach and consider the basic types of subsystems and the corresponding equations. In doing so, we will try to match the set of equations to the node, and the set of variables to the edge.

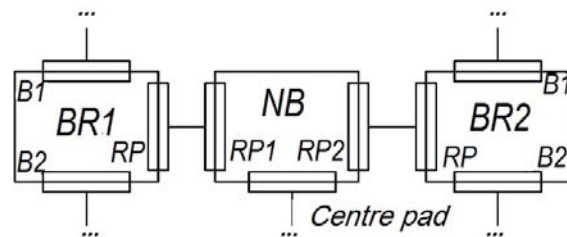


Fig. 2. Fragment of «Bogie» subsystem

Figure 2 shows a fragment of the «Bogie» subsystem, in which the bolster *NB* is connected to the solebars *BR1*, *BR2* with the spring suspension unit *RP1*, *RP2*. The motion of such a subsystem is described by the equations that can be conveniently divided into the following groups:

- 1) Equations of motion of bodies;
- 2) Equations expressing the movement of the attachment points of the connecting elements through the movements of the bodies;
- 3) Equation of the relationship between the deformation of the connecting element and the force that arises in it.

The last group of equations refers to the connecting elements, the first two to the bodies. In view of the fact that the parameters of the equations of the first two groups are different, it is advisable to equip each body with an internal structure, as shown in Fig. 3, using the example of bolster.

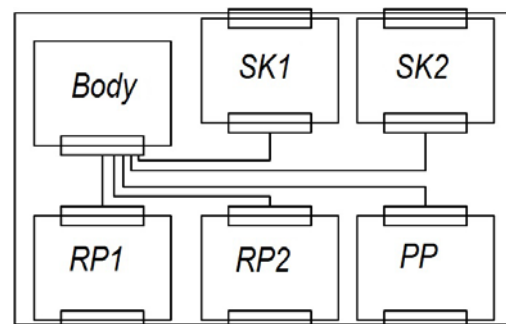


Fig. 3. Bolster.
Internal structure of the node

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

The inner vertex «Body» corresponds to the body motion equations. Internal vertices $RP1$, $RP2$, PP , $SK1$, $SK2$ - to the attachment points of corresponding connecting elements: spring suspension, pair «Centre plate - Centre pad», side bearing. These classes of vertices (for the body, for attachment points of the connecting element and for the connecting element itself) are the basic ones for building the car model. We will dwell in detail on each of them.

The vertex representing the motion equations of the body, whose principal central axes of inertia are parallel to the coordinate axes, is shown in Fig. 4.

This vertex can be incident with several edges, each of which is associated with a set of generalized displacements $q^{(j)}$ and generalized forces $Q^{(j)}$. The edges connect the vertex «Body» with the vertex «Point».

The physical meaning of the processes $q^{(j)}$ – is the generalized displacements of the body.

The vectors $Q^{(j)}$ correspond to generalized forces acting on the body at the j -th point. The body motion equation includes the sums of the components of these vectors, and the motion equations themselves take the form:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= \sum X^{(j)}, \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} &= \sum Y^{(j)}, \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} &= \sum Z^{(j)}, \\ I_x \frac{d^2 \theta}{dt^2} &= \sum \Theta^{(j)}, \\ I_y \frac{d^2 \varphi}{dt^2} &= \sum \Phi^{(j)}, \\ I_z \frac{d^2 \psi}{dt^2} &= \sum \Psi^{(j)}, \end{aligned} \quad (1)$$

where m – body mass, I_x , I_y , I_z – main central moments of inertia.

Variables corresponding to displacements are called variables of the potential type, and processes corresponding to the forces are variables of the current type. These names refer to Kirchhoff's laws

for electrical circuits and to the fact that the movements in the edges incident to one vertex are equated to each other, and the forces are added together.

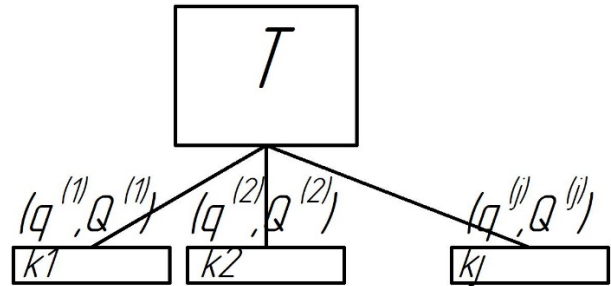


Fig. 4. Vertex «Body motion equations»

The vertex representing the «Point» (Figure 5) is responsible for transforming the displacements and forces acting on the body (superscript «0») into the displacements of the point and the force applied to it (superscript «1»). The parameters of the vertex are the coordinates of the point x_p , y_p , z_p in the coordinate system, whose origin is in the center of gravity of the body. At small angles of rotation, the expressions that determines the relationship between the values $q^{(0)}$, $Q^{(0)}$ and $q^{(1)}$, $Q^{(1)}$ take the form:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x^{(1)} \\ y^{(1)} \\ z^{(1)} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x^{(0)} \\ y^{(0)} \\ z^{(0)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -z_p & y_p \\ z_p & 0 & -x_p \\ -y_p & x_p & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta^{(0)} \\ \varphi^{(0)} \\ \psi^{(0)} \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} \theta^{(1)} \\ \varphi^{(1)} \\ \psi^{(1)} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \theta^{(0)} \\ \varphi^{(0)} \\ \psi^{(0)} \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} X^{(0)} \\ Y^{(0)} \\ Z^{(0)} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} X^{(1)} \\ Y^{(1)} \\ Z^{(1)} \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} \Theta^{(0)} \\ \Phi^{(0)} \\ \Psi^{(0)} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \Theta^{(1)} \\ \Phi^{(1)} \\ \Psi^{(1)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -z_p & y_p \\ z_p & 0 & -x_p \\ -y_p & x_p & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^{(1)} \\ Y^{(1)} \\ Z^{(1)} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

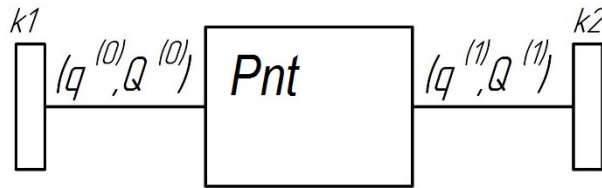


Fig. 5. Vertex «Point»

The «Connecting element» connects the «Points» of two «Bodies», Figure 6.

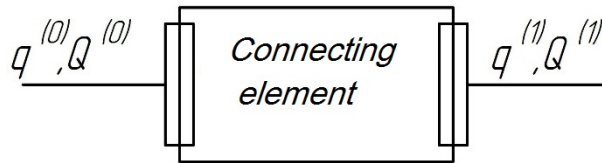


Fig. 6. Vertex «Connecting element»

The deformation of the connecting element is the difference

$$\Delta q = q^{(1)} - q^{(0)}. \quad (3)$$

The force Q , arising in the connecting element depends on the deformation Δq . The expression for the force depends on the type of the connecting element. For example, for a linear spring of rigidity C , operating in a vertical direction

$$\begin{aligned} X &= Y = 0, \\ Z &= C \cdot \Delta z, \\ \theta &= \varphi = \psi = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

It is convenient to assume that the force Q acts on the Body-0 from the side of the Body-1. In this case $Q^{(0)} = Q$, $Q^{(1)} = -Q$.

By combining the described types of vertices, it is possible to present in a compact and visual form a model of car oscillations, suitable for direct formation of the motion equations.

Let us consider the implementation of the described approach for building a model in the Simulink package. In this case, the body, point and connecting element are conveniently represented as subsystems. As an example, Figure 7 shows the Simulink scheme for the subsystem «Bolster».

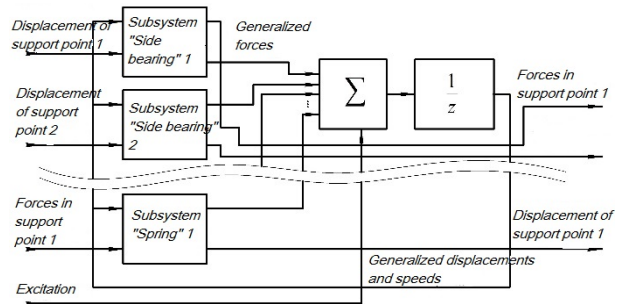


Fig. 7. Subsystem «Bolster» in Simulink model

A non-trivial matter is the question of comparing each edge with the direction of signal propagation, which is chosen so that for explicit expression of some values through other the argument is the input, and the function is the output.

Having examined the expression (2), we see that the directions for displacements and the directions for forces in one edge are opposite to each other. The direction of propagation for different signals is given in Table 1.

Table 1

Directions of signal propagation

Vertex class	Process	Direction
Body	$q^{(j)}$	output
	$Q^{(j)}$	input
Point	$q^{(0)}$	input
	$Q^{(0)}$	output
	$q^{(1)}$	output
	$Q^{(1)}$	input
Connecting element	$q^{(0)}, q^{(1)}$	input
	$Q^{(0)}, Q^{(1)}$	output

Findings

The use of the proposed method resulted in creation of a freight car model, which consists of a body and two bogies. The bogies were considered as a construction consisting of the following subsystem-elements [2, 3]:

- wheel sets with box;
- solebars;
- bolster;

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- springs of the central spring unit (each two-row spring separately);
- friction vibration dampers;
- axle-box suspension;
- centre pad;
- side bearing.

Each of these subsystems is independent and can be replaced with the condition of preserving the geometric parameters of the connection points of the element. This feature of the model is convenient to use for changing the parameters in order to select their optimal values.

The bodies, with the exception of bolsters and bogie solebars, have 6 degrees of freedom; the angles of rotation are small. To better estimate the dynamic loading of the bogie cast parts, the detailed models of spring suspension (up to individual springs and friction wedges, which are considered as separate bodies of the system) and axle box were developed.

The model will be used to evaluate the dynamic loading of bogie elements of the car with an axial load of 25 tons [8], in order to clarify the loads arising during operation [4, 5, 14]. Vertical forces acting in the axle box when the car moves along a straight section of the track at 120 km/h speed are shown in Figure 8.

Originality and practical value

For the first time, a methodical approach to creating dynamic models of railway vehicles based on their description using hierarchically organized graphs was proposed.

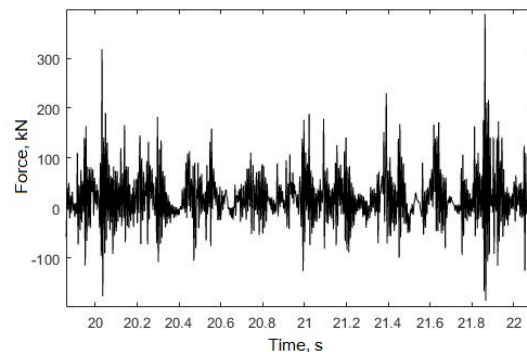


Fig. 8. Vertical forces in the axle box of gondola car with axle load of 25 tons, speed of 120 km/h

This methodological approach will allow, after creating a library of bodies and connecting elements, to significantly reduce the time spent on modeling the oscillations of different vehicles.

Conclusions

A technique has been developed for describing the structure of a railway vehicle using a hierarchical graph, which makes it possible to obtain equations of motion in an easily algorithmized manner. The vehicle is a system of rigid bodies connected by rigid, elastic and dissipative elements. The technique was tested to construct a model of spatial oscillations of a 4-axle freight car in the Simulink package. Directions of further development: creation of the library of bodies and connecting elements, detailed presentation of the geometry of track, the models of track superstructure and wheel-rail interaction.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Виттенбург, Й. Динамика систем твердых тел / Й. Виттенбург. – Москва : Мир, 1980. – 294 с.
2. Динамические качества грузовых вагонов, имеющих тележки с диагональными связями / Е. П. Блохин, К. Т. Алпысбаев, Р. Б. Грановский [и др.] // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. Володимира Даля. – 2012. – № 5, ч. 1. – С. 12–16.
3. Определение допускаемых скоростей движения грузовых вагонов по железнодорожным путям колеи 1520 мм / В. Д. Данович, В. В. Рыбкин, С. В. Мямлин, А. Г. Рейдемейстер, А. П. Трякин, Н. В. Халипова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 2. – С. 77–86.
4. Определение параметров пространственного нагружения литых деталей тележки 18-9855 при проведении стендовых испытаний / Д. В. Шевченко, Т. С. Куклин, А. М. Орлова [и др.] // Техника железных дорог. – 2016. – № 1 (33). – С. 68–74.
5. Рейдемейстер, А. Г. Способы увеличения прочности боковых рам трехэлементных тележек / А. Г. Рейдемейстер, А. А. Шикун // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 141–149. doi: 10.15802/stp2015/55351.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

6. Черных, И. В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем [Electronic resource] / И. В. Черных. – Available at: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php>. – Title from the screen. – Accessed : 31.08.2017.
7. Borutzky, W. Bond graph methodology: development and analysis of multidisciplinary dynamic system models / W. Borutzky. – Sankt Augustin : Springer Science & Business Media, 2009. – 662 p.
8. Bubnov, V. M. Dynamic performance of freight cars on bogies model 18-1711 / V. M. Bubnov, S. V. Myamlin, N. B. Mankevych // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 4 (46). – С. 118–126. doi: 10.15802/stp2013/16616.
9. Fritzson, P. Introduction to modeling and simulation of technical and physical systems with Modelica / P. Fritzson. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2011. – 211 p.
10. Handbook of railway vehicle dynamics / Edited by S. Iwnicki. – Boca Raton : CRC press, 2006. – 526 p.
11. Knothe, K. Rail vehicle dynamics / K. Knothe, S. Stichel. – Cham : Springer, 2017. – 321 p.
12. Shabana, A. A. Dynamics of multibody systems / A. A. Shabana. – Cambridge : Cambridge university press, 2013. – 374 p.
13. Shabana, A. A. Railroad vehicle dynamics: a computational approach / A. A. Shabana, K. E. Zaazaa, H. Sugiyama. – Boca Raton : CRC press, 2007. – 343 p.
14. Shykunov, O. A. Three-Element Bogie Side Frame Strength / O. A. Shykunov // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 183–193. doi: 10.15802/stp2017/92535.

О. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР¹, В. О. КАЛАШНИК², О. А. ШИКУНОВ^{3*}

¹Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровській національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта reidemeister@mail.ru, ORCID 0000-0001-7490-7180

²Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровській національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 793 19 16, ел. пошта kv47@i.ua, ORCID 0000-0002-8073-4631

^{3*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровській національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта tri_s@ua.fm, ORCID 0000-0002-8256-2634

МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ РУХУ БАГАТОМАСОВИХ СИСТЕМ

Мета. У науковій роботі необхідно розробити методику опису структури залізничних екіпажів (розглядаються як система твердих тіл, з'єднаних жорсткими, пружними та дисипативними елементами), яка дозволила б отримати рівняння руху способом, що легко алгоритмізується. **Методика.** При побудові моделі автори прагнуть до того, щоб її структура відображала структуру механічної системи, тобто частини моделі повинні відповідати частинам вагона. При цьому модель набуває форму ієрархічно організованого графа, вершини якого відповідають тілам, точкам кріплення з'єднувальних елементів та самим з'єднувальним елементам, а ребра описують сукупності процесів, які мають відношення до інцидентних ребру вершин. Як правило, це переміщення та сили: для ребра між тілом і точкою кріплення – узагальнені переміщення тіла та діючі на нього узагальнені сили; для ребра між точкою кріплення й з'єднувальним елементом – переміщення точки і сили, що виникають в елементі. Кожній вершині відповідає група рівнянь, що описують рух системи. Характер рівнянь залежить від типу вершини. Для тіла – рівняння руху тіла; для точки – вирази переміщення точки через узагальнені переміщення тіла й узагальнених сил, що діють на тіло, через сили, що виникають у з'єднувальному елементі; для з'єднувального елемента – вирази для сил, що виникають в ньому, через деформації елемента. Граф може розглядатися як орієнтований. Напрямок ребра обирають таким чином, щоб для кожної вершини величини, що стоять у правій частині зіставлених вершині рівнянь, відповідали ребру, що входить, а в лівій – виходить. **Результати.** Розроблено методику побудови динамічної моделі коливань залізничних екіпажів як системи твердих тіл на основі їх опису за допомогою ієрархічно організованих графів. Методика випробувана для побудови моделі просторових коливань 4-вісного вантажного вагона з осьовим навантаженням 25 тс в пакеті Simulink. **Наукова новизна.** Вперше розроблено методику

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

опису структури залізничного екіпажу за допомогою ієрархічного графа, яка дозволяє отримати рівняння руху способом, що легко алгоритмізується. **Практична значимість.** Запропонований методичний підхід дозволить, після створення бібліотеки тіл та з'єднувальних елементів, значно скоротити витрати часу на моделювання коливань різних екіпажів.

Ключові слова: модель коливань; залізничний екіпаж; багатомасова система; граф

А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР¹, В. А. КАЛАШНИК², А. А. ШИКУНОВ^{3*}

¹Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта reidemeister@mail.ru, ORCID 0000-0001-7490-7180

²Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 793 19 16, эл. почта kv47@i.ua, ORCID 0000-0002-8073-4631

^{3*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта tri_s@ua.fm, ORCID 0000-0002-8256-2634

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ МНОГОМАССОВОЙ СИСТЕМЫ

Цель. В научной работе необходимо разработать методику описания структуры железнодорожных экипажей (рассматриваются как система твердых тел, соединенных жесткими, упругими и диссипативными элементами), которая позволила бы получить уравнения движения легко алгоритмизируемым способом.

Методика. При построении модели авторы стремятся к тому, чтобы ее структура отражала структуру механической системы, то есть части модели должны соответствовать частям вагона. При этом модель приобретает форму иерархически организованного графа, вершины которого соответствуют телам, точкам крепления соединительных элементов и самим соединительным элементам, а ребра описывают совокупности процессов, которые имеют отношение к инцидентным ребру вершинам. Как правило, это перемещения и силы: для ребра между телом и точкой крепления – обобщенные перемещения тела и действующие на него обобщенные силы; для ребра между точкой крепления и соединительным элементом – перемещения точки и силы, возникающие в элементе. Каждой вершине соответствует группа уравнений, описывающих движение системы. Характер уравнений зависит от типа вершины. Для тела – уравнения движения тела; для точки – выражения перемещений точки через обобщенные перемещения тела и обобщенных сил, действующих на тело, через силы, возникающие в соединительном элементе; для соединительного элемента – выражения для сил, возникающих в нем, через деформации элемента. Граф может рассматриваться как ориентированный. Направление ребра выбирают таким образом, чтобы для каждой вершины величины, стоящие в правой части сопоставленных вершине уравнений, соответствовали входящему ребру, а в левой – исходящему.

Результаты. Разработана методика построения динамической модели колебаний железнодорожных экипажей как системы твердых тел на основе их описания с помощью иерархически организованных графов. Методика опробована для построения модели пространственных колебаний 4-осного грузового вагона с осевой нагрузкой 25 тс в пакете Simulink. **Научная новизна.** Впервые разработана методика описания структуры железнодорожного экипажа с помощью иерархического графа, которая позволяет получить уравнения движения легко алгоритмизируемым способом. **Практическая значимость.** Предложенный методический подход позволит, после создания библиотеки тел и соединительных элементов, значительно сократить затраты времени на моделирование колебаний различных экипажей.

Ключевые слова: модель колебаний; железнодорожный экипаж; многомассовая система; граф

REFERENCES

1. Vittenburg, Y. (1980). *Dinamika sistem tverdykh tel*. Moscow: Mir.
2. Blokhin, Y. P., Alpsbaev, K. T., Granovskiy, R. B., Dzichkovskiy, Y., Krivchikov, A., Fedorov, Y. F. (2012). Dinamicheskie kachestva gruzovykh vagonov, imeyushchikh telezhki s diagonalnymi svyazymi. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 5 (1), 12-16.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. Danovich, V. D., Rybkin, V. V., Myamlin, S. V., Reydemeyster, A. G., Tryakin, A. P., Khalipova, N. V. (2003). Determination of permissible speeds of freight cars on railroad tracks 1520 mm. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2, 77-86.
4. Shevchenko, D. V., Kuklin, T. S., Orlova, A. M., Savushkin, R. A., Dmitriev, S. V., & Belyankin, A. V. (2016). Opredeleniye parametrov prostranstvennogo nagruzheniya litykh detaley telezhki 18-9855 pri provedenii stendovykh ispytaniy. *Railway Equipment Magazine*, 1 (33), 68-74.
5. Reidemeister, O. H., & Shykunov, O. A. (2015). Strength increase methods of the side frame of the bogie in three-piece trucks. *Science and Transport Progress*, 5 (59), 141-149. doi:10.15802/stp2015/55351
6. Chernykh, I. V. (n.d.). *Simulink: Instrument modelirovaniya dinamicheskikh system. MATLAB.Exponenta!* Retrieved from <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php>
7. Borutzky, W. (2010). Bond graph methodology: development and analysis of multidisciplinary dynamic system models. Sankt Augustin: Springer Science & Business Media. doi:10.1007/978-1-84882-882-7
8. Bubnov, V. M., Myamlin, S. V., & Mankevych, N. B. (2013). Dynamic performance of freight cars on bogies model 18-1711. *Science and Transport Progress*, 4 (46), 118-126. doi:10.15802/stp2013/16616
9. Fritzson, P. (2011). *Introduction to modeling and simulation of technical and physical systems with Modelica*. Hoboken: John Wiley & Sons. doi:10.1002/9781118094259
10. Iwnicki, S. (Ed.). (2006). *Handbook of railway vehicle dynamics*. Boca Raton: CRC press.
11. Knothe, K., & Stichel, S. (2017). *Rail vehicle dynamics*. Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-45376-7
12. Shabana, A. A. (2013). *Dynamics of multibody systems*. Cambridge: Cambridge university press.
13. Shabana, A. A., Zaazaa, K. E., & Sugiyama, H. (2007). *Railroad vehicle dynamics: A computational approach*. Boca Raton: CRC press.
14. Shykunov, O. A. (2017). Three-element bogie side frame strength. *Science and Transport Progress*, 1 (67), 183-193. doi:10.15802/stp2017/92535

Prof. S. V. Myamlin, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); PhD Tech., Senior Research Associate T. V. Sheleiko (Ukraine) recommended this article to be published

Received: May 17, 2017

Accessed: Sept. 21, 2017

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.012.41

Г. М. ГАСІЙ^{1*}

^{1*}Каф. «Конструкції з металу, дерева та пластмас», Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Першотравневий просп., 24, Полтава, Україна, 36011, ел. пошта grigoriigm@gmail.com, ORCID 0000-0002-1492-0460

ДИНАМІКА РОЗВИТКУ, СУТНІСТЬ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОСТОРОВИХ СТРУКТУРНО-ВАНТОВИХ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Мета. У будівництві з'явилася необхідність створення нових конструкцій, зокрема просторових систем покриття, застосування яких сприятиме економії матеріалів й зменшенню трудомісткості технологічних процесів монтажу та виготовлення. Узагальнивши результати попередньо проведеного теоретичного дослідження існуючих типів просторових конструкцій, у роботі потрібно знайти перспективні напрями розвитку нових конструкцій, які були б позбавлені недоліків аналогів із одночасним забезпеченням економічного ефекту за рахунок раціонального використання матеріалів та енергозбереження. **Методика.** Для досягнення поставленої мети було виконано дослідження конструктивних рішень різних просторових систем – аналіз вітчизняних та закордонних патентних баз, результатів експериментальних випробувань та теоретичних досліджень. **Результати.** Висвітлено основні етапи розвитку нового типу просторової конструкції – просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції; наведено інформацію про особливості її будови. Просторові структурно-вантові сталезалізобетонні конструкції – абсолютно новий вид просторових несучих систем, які завдяки оригінальному конструктивному рішення мають широку галузь застосування. Базовим елементом створених конструкцій є модульний елемент, який має форму наскрізної піраміди та складається з плити й трубчастих стрижнів. Модульні елементи виробляються в заводських умовах. З просторових модулів можуть виготовлятися прямолінійні та криволінійні конструкції, а також різні несучі системи та їх комбінації. **Наукова новизна.** Автором сформульовано концепцію оригінальних конструктивних форм та їх несучих елементів. Запропоновано і створено нові види просторових структурно-вантових конструкцій для будівель та споруд різного призначення. **Практична значимість.** Розроблені структурно-вантові конструкції мають широку галузь застосування: вони можуть використовуватися для промислового та цивільного будівництва. Застосування створених конструкцій при будівництві будівель і споруд дозволяє отримати значний економічний ефект за рахунок раціонального використання матеріалів та заощадження енергоресурсів на стадії виготовлення й монтажу.

Ключові слова: пластина; труба; стрижень; модуль; верхній пояс; нижній пояс

Вступ

З урахуванням стану сучасної будівельної галузі та гострої потреби в нових ресурсоекономічних і енергоощадних конструкціях логічним і закономірним вирішенням проблеми є розроблення нових конструктивних рішень.

Просторові структурно-вантові сталезалізобетонні конструкції – новий вид просторових несучих систем з оригінальним конструктив-

ним рішенням, основне застосування яких – покриття будівель і споруд різного призначення, у тому числі великопролітних ангарів аеропортів, машинних галерей, депо, доків, споруд гірничої та металургійної промисловості, спортивних арен, стадіонів [3] тощо.

Огляд останніх джерел і публікацій показав, що з-поміж нині існуючих ефективних конструкцій найчастіше виділяють просторові рішення та композитні конструкції, особливість

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

яких полягає у поєднанні плит зі стрижневими елементами [1, 2].

Зважаючи на викладене, ідея об'єднати новим способом в одну цілісну конструкцію традиційні елементи – плити і стрижні, є оригінальною.

Мета

Розробити нову концепцію оригінальних та ефективних просторових конструкцій і їх несучих елементів та вирішити проблему їх створення.

Методика

Для досягнення поставленої мети та встановлення перспективних напрямів розвитку нових конструкцій було проведено ґрунтовний та всебічний аналіз різноманітних конструктивних рішень просторових систем, вітчизняних та закордонних патентних баз, результатів експериментальних випробувань та теоретичних досліджень.

Результати

Просторові структурно-вантові сталезалізобетонні конструкції об'єднують у собі переваги структурних, висячих і композитних конструкцій. Відмінною рисою, яка виокремлює просторову структурно-вантову сталезалізобетонну конструкцію з-поміж інших в окремий вид є її будова. Будова конструкції дозволяє максимально ефективно і раціонально використовувати міцнісні властивості будівельних матеріалів.

Отриманню такої конструкції передувала довготривала робота з пошуку оптимальних способів поєднання різнотипних елементів та шляхів удосконалення існуючих конструктивних рішень. Динаміку розвитку просторових сталезалізобетонних структурно-вантових конструкцій можна відобразити узагальненою блок-схемою (рис. 1).

Першим кроком у зміцненні намірів створити новий вид конструкцій та першим етапом у їх розвитку було отримання узагальнюючих відомостей про особливості, переваги та недоліки існуючих конструкцій будівель і споруд різного призначення. До конструкцій, які привернули увагу, належать сталезалізобетонні

конструкції та просторові системи. З огляду на вимоги, які висувуються до сучасних будівельних конструкцій, з-поміж всього різноманіття конструктивних рішень згаданих видів конструкцій, перспективними є сталезалізобетонні плити, структурні плити і вантові системи.

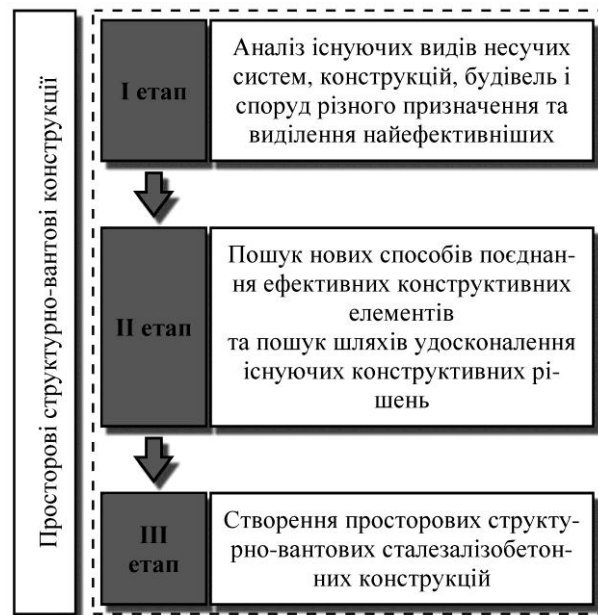


Рис. 1. Узагальнена блок-схема розвитку просторових структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій

Fig. 1. Generalized block scheme of the development of steel and concrete composite cable space frames

Сталезалізобетонні конструкції, завдяки поєднанню міцнісних властивостей сталі і бетону є надійними, жорсткими та мають високу несучу здатність. До того ж в таких конструкціях реалізовано принцип раціонального використання матеріалів. Останнім часом сталезалізобетонні конструкції з-поміж інших видів конструкцій зазнають найчастіших удосконалень і модифікацій конструктивних рішень та форм перерізів. Зважаючи на це, їх галузь застосування постійно розширюється. Ефективно застосовуються сталезалізобетонні конструкції і для зведення просторових несучих системи, зокрема покриттів, а результати огляду існуючих просторових сталезалізобетонних покриттів та їх досліджень є цьому підтвердженням [6, 9, 11–14].

Що стосується структурних плит, то до їх переваг відносять: просторову роботу; здат-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ність перерозподіляти внутрішні зусилля; стійкість до динамічних навантажень та локальних пошкоджень. При цьому такі конструкції є порівняно легкими, дозволяють перекривати значні прольоти, мають архітектурну виразність, а елементи таких конструкцій працюють на осові зусилля, що беззаперечно сприяє раціональному використанню матеріалів [4].

Стосовно вантових конструкцій слід зазначити, що вони мають аналогічні переваги, що і структурні, а саме: низьку вагу; можливість перекривати значні прольоти; роботу елементів на осові зусилля, при чому лише розтягу [10].

Проаналізувавши досвід застосування, результати експериментальних і теоретичних досліджень та особливості роботи таких конструкцій, було зроблено висновок про доцільність пошуку шляхів позбавлення від їх недоліків з метою створення нових ефективних поєднань конструктивних елементів.

Процес пошуку нових способів поєднання несучих елементів та удосконалення існуючих конструктивних рішень сформував другий етап розвитку просторових структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій. На цьому етапі, окрім прямих спроб винайти новий спосіб поєднання конструктивних елементів та принципи їх взаємного розташування у просторі, основна увага була приділена аналізу недоліків розглядуваних конструкцій та шляхів їх вирішення.

Першочерговим завданням при розробленні нової конструкції шляхом удосконалення існуючих було вирішення спільної для більшості досліджуваних конструкцій проблеми, яка полягала в надмірній складності вузлових з'єднань. Актуальність вирішення цього питання визначається ще й тим, що несуча здатність та надійність вузлів визначає загальну несучу здатність та надійність конструкції в цілому. У сталезалізобетонних конструкціях ця проблема полягає в необхідності застосування різноманітних анкерних засобів [5] у перерізах сполучення сталевих деталей та бетону, а це загалом обтяжує і ускладнює конструкцію. Інколи для забезпечення сумісної роботи сталевих елементів та бетону в комбінованих сталезалізобетонних конструкціях виникає необхідність застосування сталевих профілів, зокрема двотаврових, до яких приварюються анкерні засоби, що збільшує вагу конструкції. У конструкціях та-

кого типу спільну роботу сталевих елементів та бетону також можна забезпечити шляхом сумісного бетонування, внаслідок чого утворюються інтегровані системи. Саме такий спосіб забезпечення сумісної роботи сталевих частин конструкції і бетону, зокрема сталевих стрижневих елементів і залізобетонних плит, є перспективним напрямком розвитку нових конструкцій.

У структурних плитах складність вузлових з'єднань є надзвичайно гострим питанням, оскільки вона визначає загальну складність, вагу, вартість та трудомісткість зведення таких покриттів. Спираючись на результати аналізу досліджень вузлових з'єднань структурних плит, встановлено, що найефективнішим рішенням вузла з'єднання є конструкція із застосуванням коннекторів, які виготовлені у вигляді фасонних деталей, але при цьому необхідно знайти їх оптимальну конфігурацію, яка дозволить звести до мінімуму загальну довжину зв'язного шва чи кількість болтів у з'єднанні.

У вантових конструкціях основним недоліком є їх деформація та здатність до провисання від власної ваги при похилому положенні та великій довжині, тому перспективним напрямком модифікації таких конструкцій є пошук оптимальної довжина елементів та ефективного положення в просторі. Цього можна досягти шляхом поєднання вантових елементів із жорсткими в комбінованих конструкціях. Корисним у вирішенні цього питання також може бути світовий досвід проектування архітектурних форм та конструкцій, в яких успішно застосовуються елементи, що за функціональним призначенням схожі з вантами. Найвідомішими представниками таких конструкцій є системи тансегріті [15]. У таких системах реалізується ідеальне використання властивостей конструктивних елементів. Це системи, які складаються з гнучких і жорстких стрижнів, відповідно гнучкі сприймають лише розтяг, а жорсткі – стиск. Очевидно, що ідея тансегріті може бути корисною в розробленні нових будівельних конструкцій.

Щодо пошуку нових форм та способів поєднання конструктивних елементів, основна увага була приділена стрижневим і плитним елементам та їхнім комбінаціям.

Загалом, конструкції, які позбавлені згаданих недоліків шляхом удосконалення, розгля-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

далися як нові конструктивні рішення, які слугували основою для створення просторових структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій.

Узагальнюючи отримані дані двох перших етапів, був чітко сформований прообраз майбутньої конструкції. Перш за все, це конструкція, одним зі складових елементів якої повинен бути стрижневий елемент, який працюватиме лише на осьові зусилля. Залежно від того, які будуть діяти зусилля: стиску чи розтягу, стрижень може бути жорстким або гнучким. Прообраз нової конструкції за положенням стрижневих елементів у просторі представляє двопоясну трубчасту стрижневу решітку (рис. 2). Однак, зважаючи на те, що розроблена решітка за будовою нагадувала існуючі структурні конструкції, то виникла необхідність проведення модифікацій і удосконалень, які б дозволили стве-

рджувати про розроблення нової конструкції. Першою була ідея структурних сталезалізобетонних конструкцій, які виготовлялися б у вигляді структурних плит з монолітною залізобетонною плитою. Проаналізувавши можливість такого вдосконалення зроблено висновок, що такий підхід дозволяє знизити витрати сталі за рахунок заміни сталевих елементів верхнього пояса на залізобетонні. Ефективність такого рішення підтверджується ще й тим, що у двопоясних конструкціях елементи верхнього пояса працюють на стиск, а як відомо, бетон добре працює на такий вид зусиль, тому раціональніше б у такому випадку застосовувати саме його. Отже, першим удосконаленням прообразу нових просторових структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій була заміна верхнього стрижневого трубчастого пояса на плитні залізобетонні елементи.

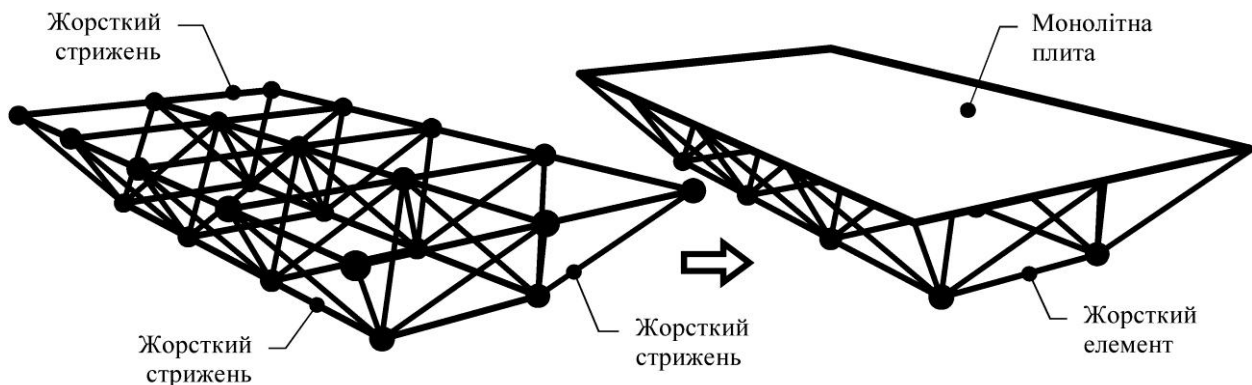


Рис. 2. Удосконалення стрижневої решітки

Fig. 2. Improvement of the rod lattice

Відштовхуючись від ідеї заміни елементів одного типу на елементи іншого типу (у залежності від виду внутрішніх зусиль), було прийнято рішення провести модифікацію нижнього пояса шляхом заміни жорстких трубчастих стрижнів на гнучкі, оскільки елементи нижнього пояса у конструкціях такого типу працюють на розтяг, то у такому випадку раціональніше застосовувати саме гнучкі елементи. Таким чином було розроблено плитно-стрижневу систему з гнучкими і жорсткими елементами, яка повністю відповідає положенням розробленої концепції нової конструкції. Однак, така систе-

ма не була гнучкою до формоутворення криволінійних поверхонь і мала утруднену технологію зведення, тому подальшим кроком у розвитку просторових структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій був поділ розробленої плитно-стрижневої конструкції на модульні елементи заводського виготовлення (рис. 3). Таким чином було розроблено новий вид будівельних конструкцій – просторові структурно-вантові сталезалізобетонні конструкції [8]. Заключною стадією створення таких конструкцій була розробка вузлових з'єднань.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

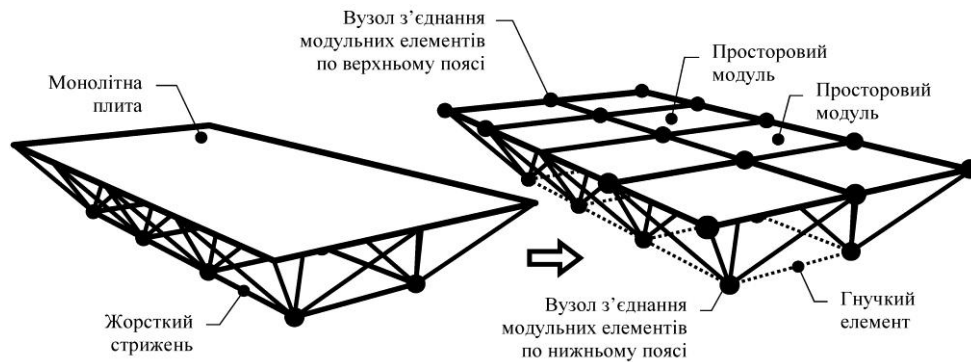


Рис. 3. Створення просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції

Fig. 3. Creation of steel and concrete composite cable space frames

Отже, розроблена конструкція є збірною двопоясною системою, що складається з просторових сталезалізобетонних модулів і гнучких елементів. Верхній пояс виготовляється з плит, які залежно від армування можуть бути залізобетонними, армоцементними чи сталезалізобетонними. Нижній пояс виготовляється у вигляді вант, що призначені сприймати лише зусилля розтягу. Особливістю розроблених конструкцій є те, що вони поєднують у собі переваги композитних, структурних і вантових конструкцій, а також при їх зведенні немає потреби в улаштуванні покрівлі, оскільки верхній пояс одночасно виконує дві функції: несучу і огорожувальну, тому внутрішній простір будівлі надійно захищений від атмосферних та інших зовнішніх впливів.

Наукова новизна та практична значимість

Основна ідея розроблених конструкцій полягає в набутті ними високих міцнісних характеристик та техніко-економічних показників за рахунок поєднання ефективних конструктивних рішень, елементи яких працюють тільки на стискання або тільки на розтягнення. В основі розроблених конструкцій закладено використання принципу модульності елементів, тобто застосування багаторазово повторювальних конструктивних елементів повного заводського виготовлення.

Мета розробки просторових структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій полягала в отриманні за рахунок об'єднання переваг та позбавлення недоліків найближчих аналогів нових конкурентоздатних рішень розробки пок-

риттів будівель і споруд, у тому числі різноманітних оболонки та інших просторових форм.

Сутність розроблених конструкцій полягає у новому способі поєднання конструктивних елементів, у результаті чого досягається суміщення несучої і огорожувальної функцій, скорочення термінів будівництва, раціональна просторова робота та жорсткість, здатність до розбирання та повторного збирання без руйнування елементів чи вузлів конструкції.

Слід також зазначити, що розроблені конструкції мають простіший спосіб забезпечення сумісної роботи елементів, ніж звичайні сталезалізобетонні конструкції; менш складні у виготовленні й улаштуванні вузлові з'єднання, ніж традиційні структурні конструкції; меншу деформативність, ніж вантові конструкції. До того ж розроблені конструкції є архітектурно виразними, мають низьку вагу, є ресурсоекономічними [7], ніж інші види конструкцій при аналогічних розмірах та несучій здатності.

Застосовуючи розроблені конструкції, можна зводити покриття різних розмірів і форм.

Висновки

На основі узагальнених даних, що отримані у результаті аналізу теоретичних та експериментальних досліджень існуючих конструктивних рішень, їх особливостей проектування та конструювання, переваг та недоліків, було запропоновано концепцію нових ефективних несучих систем, у відповідності до якої розроблено новий вид конструкцій – просторові структурно-вантові сталезалізобетонні конструкції.

За результатами теоретичних досліджень розроблених конструкцій було встановлено їх

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ефективність, порівняно з аналогами, виявлено ряд технологічних і конструктивних переваг, які відображені в наступних висновках:

1. До основних конструктивних особливостей просторових структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій відноситься те, що вони є модульними збірними системами, в яких реалізовано принцип раціонального використання матеріалів завдяки оригінальному поєднанню несучих стрижневих і плитних елементів та ефективному використанні їх фізико-механічних властивостей, зокрема просторове поєднання у суцільну конструкцію жорстких стиснутих та гнучких розтягнутих стрижнів. Окрім цього, до їх особливостей належить багатofункціональність елементів конструкції, зокрема

суміщення несучої та огорожувальної функцій у верхньому поясі.

2. До переваг технологічно характеру просторових структурно-вантових конструкцій відносяться: проста будова конструкції та не складна конструкція болтових вузлів з'єднання; проста технологія виготовлення модульних елементів та монтажу конструкції, яка не передбачає застосування складних та вартісних ріштувань та опалубних робіт.

Важливим є те, що для виготовлення нових конструкцій окрім сталі та бетону можуть використовуватися абсолютно різні види матеріалів (природні, композитні, полімерні).

Запропонована концепція та розроблені рішення захищені патентами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вибранець, Ю. Ю. Міцність і деформативність комбінованих металевих систем, об'єднаних у сумісну роботу зі залізобетонною плитою : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Вибранець Юрій Юрійович ; Нац. ун-т «Львівська політехніка». – Львів, 2016. – 158 с.
2. Краснов, С. М. Удосконалення систем прогонних будов пішохідних мостів при динамічному впливі : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Краснов Сергій Миколайович ; Харк. нац. ун-т буд-ва й архітектури. – Харків, 2015. – 268 с.
3. Стороженко, Л. И. Особенности конструкции и технологии монтажа новых пространственных сталежелезобетонных структурно-вантовых покрытий / Л. И. Стороженко, Г. М. Гасий, С. А. Гапченко // Восточно-европ. журн. передовых технологий. – 2014. – № 1 (70), т. 4. – С. 67–72. doi: 10.15587/1729-4061.2014.26041.
4. Chilton J. Space grid structures / J. Chilton. – Boston : Architectural Press, 2000. – 180 p.
5. Dan, D. Theoretical and experimental study on composite steel–concrete shear walls with vertical steel encased profiles / D. Dan, A. Fabian, V. Stoian // J. of Constructional Steel Research. – 2011. – Vol. 67. – Iss. 5. – P. 800–813. doi: 10.1016/j.jcsr.2010.12.013.
6. Experimental studies on corrugated steel-concrete composite slab / H. S. Abbas, S. A. Bakar, M. Ahmadi, Z. Haron // Gradevinar. – 2015. – Vol. 67, No. 3. – P. 225–233. doi: 10.14256/JCE.1112.2014.
7. Gasii, G. Estimate of technical and economic benefits of a new space composite structure / G. Gasii, O. Hasii, O. Zabolotskyi // MATEC Web of Conferences. – 2017. – № 116. doi: 10.1051/mateconf/201711602014.
8. Gasii, G. M. Types of steel and concrete composite cable space frames / G. M. Gasii // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 6 (66). – P. 158–165. doi: 10.15802/stp2016/90514.
9. Johnson, R. P. Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns, and Frames for Buildings / R. P. Johnson. – 3rd ed. – Oxford : Blackwell, 2004. – 252 p.
10. Krishna, P. Cable-suspended roofs: second edition / P. Krishna, P. N. Godbole. – New Delhi : McGraw-Hill Companies, 2013. – 304 p.
11. Nathan, W. A Composite Structural Steel and Prestressed Concrete Beam for Building Floor Systems / W. Nathan. – Lincoln : University of Nebraska, 2012. – 112 p.
12. Oehlers, D. J. Composite Steel and Concrete Structures: Fundamental Behavior / D. J. Oehlers, M. A. Bradford. – Oxford : Elsevier, 2013. – 588 p.
13. Perera S. V. T. J. Shear capacity of composite deck slabs with concrete filled steel tubes : Ph.D thesis / S. V. T. J. Perera ; University of Moratuwa. – Moratuwa, 2008. – 59 p.
14. Tang, R. Q. The static study on steel truss concrete slab composite structure / R. Q. Tang, Y. Huang // J. of Guizhou University. – 2013. – Vol. 5. – 23 p.
15. Zhang, J. Y. Tensegrity Structures: Form, Stability, and Symmetry / J. Y. Zhang, M. Ohsaki. – Tokyo : Springer Japan, 2015. – 300 p. doi: 10.1007/978-4-431-54813-3.

Г. М. ГАСИЙ^{1*}

^{1*}Каф. «Конструкции из металла, дерева и пластмасс», Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Первомайский просп., 24, Полтава, Украина, 36011, эл. почта grigoriigm@gmail.com, ORCID 0000-0002-1492-0460

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ, СУЩНОСТЬ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУРНО-ВАНТОВЫХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Цель. В строительстве появилась необходимость создания новых конструкций, в частности пространственных систем покрытия, применение которых будет способствовать экономии материалов и уменьшению трудоемкости технологических процессов монтажа и изготовления. Обобщив результаты предварительно проведенного теоретического исследования существующих типов пространственных конструкций, в работе необходимо найти перспективные направления развития новых конструкций, которые были бы лишены недостатков аналогов с одновременным обеспечением экономического эффекта за счет рационального использования материалов и энергосбережения. **Методика.** Для достижения поставленной цели были выполнены исследования конструктивных решений различных пространственных систем – анализ отечественных и зарубежных патентных баз, результатов экспериментальных испытаний и теоретических исследований. **Результаты.** Освещены основные этапы развития нового типа пространственной конструкции – пространственной структурно-вантовой сталежелезобетонной конструкции; приведена информация об особенностях ее строения. Пространственные структурно-вантовые сталежелезобетонные конструкции – совершенно новый вид пространственных несущих систем, благодаря оригинальному конструктивному решению имеют широкую область применения. Базовым элементом созданных конструкций является модульный элемент, имеющий форму сквозной пирамиды и состоящий из плиты и трубчатых стержней. Модульные элементы производятся в заводских условиях. С пространственных модулей могут изготавливаться прямолинейные и криволинейные конструкции, а также различные несущие системы и их комбинации. **Научная новизна.** Автором сформулирована концепция оригинальных конструктивных форм и их несущих элементов. Предложены и созданы новые виды пространственных структурно-вантовых конструкций для зданий и сооружений различного назначения. **Практическая значимость.** Разработанные структурно-вантовые конструкции имеют широкую область применения: они могут использоваться для промышленного и гражданского строительства. Применение созданных конструкций при строительстве зданий и сооружений позволяет получить значительный экономический эффект за счет рационального использования материалов и сбережения энергоресурсов на стадии изготовления и монтажа.

Ключевые слова: пластина; труба; стержень; модуль; верхний пояс; нижний пояс

G. M. GASII^{1*}

^{1*}Dep. «Structures from Metal, Wood and Plastics», Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Pershotravnevyi Av., 24, Poltava, Ukraine, 36011, e-mail grigoriigm@gmail.com, ORCID 0000-0002-1492-0460

DEVELOPMENT, ESSENCE AND SCOPE OF APPLICATION OF STEEL AND CONCRETE COMPOSITE CABLE SPACE FRAMES

Purpose. In construction there is a need to create new structures, including spatial coverage systems, the use of which will save materials and reduce the complexity of assembling processes and manufacturing. Summarizing the results of preliminary theoretical study of existing types of spatial structures, purpose of the article is to find perspective directions for the development of new structures, which would be deprived of the drawbacks of analogues while ensuring the economic effect due to the rational use of materials and energy saving. **Methodology.** To achieve this purpose, the research of constructive solutions of various spatial systems was carried out. There were analyzed domestic and foreign patent databases and the results of experimental tests and theoretical studies. **Findings.** The main stages of development for a new type of spatial structure (steel and concrete composite cable space

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

frames) are highlighted. Information on the features of its structure is given. Steel and concrete composite cable space frames are a completely new type of spatial bearing systems, which, due to the original constructive decision, have a wide field of application. The basic element of created designs is the modular element that has the shape of a thorough pyramid and consists of a plate and tubular rods. Modular elements are manufactured in factories. Flat and curved designs, as well as various bearing systems and their combinations can be made from modulus. **Originality.** The author has formulated a concept of original constructive forms and their supporting elements. New types of spatial structural and cable structures for buildings and constructions of different purposes were proposed and created. **Practical value.** Designed steel and concrete composite cable space frames have a wide field of application, they can be used for industrial and civil construction. The use of created structures in the construction of buildings and structures can provide a significant economic effect due to the rational use of materials and energy saving at the stage of manufacturing and installation.

Keywords: plate; tube; rod; module; top chord; bottom chord

REFERENCES

1. Vybranets, Y. Y. (2016). *Strength and strain of combined metal systems, composite with concrete plate*. (PhD thesis). Available from Lviv Polytechnic National University.
2. Krasnov, S. N. (2015). *Enhancement of pedestrian superstructure under dynamic influence*. (PhD thesis). Available from Kharkiv National University of Construction and Architecture.
3. Storozhenko, L. I., Gasii, G. M., & Gapchenko, S. A. (2014). Design features and technology of installation of new spatial constructions of composite grid-cable coverings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 1(70), 67-72. doi:10.15587/1729-4061.2014.26041
4. Chilton, J. (2000). *Space grid Structures*. Boston: Architectural Press.
5. Dan, D., Fabian, A., & Stoian, V. (2011). Theoretical and experimental study on composite steel-concrete shear walls with vertical steel encased profiles. *Journal of Constructional Steel Research*, 67 (5), 800-813. doi:10.1016/j.jcsr.2010.12.013
6. Abbas, H. S., Bakar, S. A., Ahmadi, M., & Haron, Z. (2015). Experimental studies on corrugated steel-concrete composite slab. *Gravevinar*, 67 (3), 225-233. doi:10.14256/JCE.1112.2014
7. Gasii, G., Hasii, O., & Zabolotskyi O. (2017). Estimate of technical and economic benefits of a new space composite structure. *MATEC Web of Conferences*, 116. doi:10.1051/mateconf/201711602014
8. Gasii, G. M. (2016). Types of steel and concrete composite cable space frames. *Science and Transport Progress*, 6 (66), 158-165. doi:10.15802/stp2016/90514
9. Johnson, R. P. (2004). *Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns, and Frames for Buildings*, (3d ed.). Oxford: Blackwell.
10. Krishna, P., & Godbole, P. N. (2013). *Cable-suspended roofs*, (2nd ed.). New Delhi: McGraw-Hill Companies.
11. deWit, N. (2012). *A Composite Structural Steel and Prestressed Concrete Beam for Building Floor Systems*. (Master's thesis). Lincoln: University of Nebraska.
12. Oehlers, D. J., & Bradford, M. A. (2013). *Composite Steel and Concrete Structures: Fundamental Behavior*. Oxford: Elsevier.
13. Perera, S. V. T. J. (2008). *Shear capacity of composite deck slabs with concrete filled steel tubes*, (PhD thesis). Available from University of Moratuwa, Sri Lanka.
14. Tang, R. Q., & Huang, Y. (2013). The static study on steel truss concrete slab composite structure. *Journal of Guizhou University*, 5.
15. Zhang, J. Y., & Ohsaki, M. (2015). *Tensegrity Structures: Form, Stability, and Symmetry*. Tokyo: Springer Japan. doi:10.1007/978-4-431-54813-3

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. Л. І. Стороженко (Україна);
д.т.н., проф. Д. О. Банніковим (Україна)

Надійшла до редколегії: 06.06.2017

Прийнята до друку: 12.09.2017

UDC 624.137

D. Y. IHNATENKO^{1*}, V. D. PETRENKO^{2*}, O. L. TIUTKIN^{3*}INTERACTION OF SOIL-CEMENT PILE SUPPORTING STRUCTURES
WITH THE BODY OF A LANDSLIDE

^{1*}Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (093) 442 36 63, e-mail dola1992@i.ua, ORCID 0000-0001-6805-6703

^{2*}Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0002-5902-6155

^{3*}Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 925 38 28, e-mail tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

Purpose. Analysis and comparison of the landslide slope finite element model calculation results of the appliance of soil-cement piles, depending on the variation of the retaining structure rigidity, makes it possible to evaluate the effectiveness of their application and the cooperative work of piles with the displacement body. It also makes it possible to make a conclusion about the advantages of using this anti-landslide protection method of the slope.

Methodology. Analysis of geomorphological data obtained from the results of laboratory studies of soils on the slope section is considered. Creation of a three-dimensional finite-element slope model according to the constructed sections and depths of the soil layers. Calculation of the nonlinear problem of finite element modeling of the slope with applying of soil-cement piles of various rigidity. **Findings.** The obtained results of calculating the finite element model of the landslide slope, and the analysis of the stress-strain state of the construction with soil-cement piles has been carried out. **Originality.** Despite the widespread of using soil-cement piles as enclosing structures for the construction of foundation pits and reinforcement of foundations of emergency structures, special attention should be paid to the study of the expediency of using soil-cement retaining pile structures on landslide areas.

Practical value. It is known that soil-cement retaining piles are expediently in use as a protective element, which interacts quite well with the ground environment due to its structure of the initial material. Using of modern computer programs of finite element modeling makes it possible to calculate the efficiency of the use of soil-cement piles and to determine the parameters of the necessary retaining structure according to the given geological structure of the slope, and also, depending on its shape and the physical characteristics of the soils, to compare the performance of different protective landslide structures types.

Key words: soil-cement retaining pile; shear; anti-landslide retaining structure; landslide slopes

Introduction

Engineering and geological conditions for the construction of multi-stored residential complexes are not always sufficiently favorable in the conditions of Dnipro city development. In some cases, such construction requires additional engineering surveys and calculations. Especially when it comes to the development of engineering and geological protection landslide area of the slope, where it has been planned to construct the building. In this case, to prevent the threat of landslides, such measures are necessary and mandatory. In other words, the designers are faced with the task of developing

retaining structures, restraining the slope, possibly moving and sliding which can lead to a catastrophe [1–2].

Since the prerequisites of landslides can sometimes be absent or hidden at first sight, when everything seems to be in order and there is no danger of a shift next to the construction site, but subsequently under certain circumstances there are changes that contribute to the development of certain conditions, the effect of which subsequently can lead to worse consequences than in the beginning.

In fact, this problem is even more complex. Disregarding the prediction of this situation in advance – it is possible to make a mistake in the cal-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

culation. Because of sudden groundwater level rising and it must always be taken into account, the physical characteristics of some soils can be changed, and it may be threat by a large-scale catastrophe. Especially such a threat arises in the spring during the snow melting, when the water drainage system and utilities require increased attention and supervision by the municipal service of the city. [4, 5, 7].

Geographically, the right bank of the Dnipro is located on 4 hills, which are divided by 15 ravines and more than 40 ravines that have landslide areas. The total length of the network of ravines is more than 120 km and covers an area of about 5 thousand hectares. Under such conditions it is necessary to constantly monitor the state of engineering networks in the city, and to respond in a timely manner to any changes. [6, 12, 14]

The object of the study is the territory of the Krasnopovstanskaya ravine on Zhukovsky Street in the area of houses No. 16 – 24 in the city of Dnipro. On the adjacent territory, where the construction of a multifunctional complex of civil and residential purposes is located with landscaping, previously landslide processes took place. For a more complete understanding of the features of the area, the survey materials have been collected and studied, which have been conducted within the study area.

The area, which is considered in engineering-geological terms, has been studied quite well. Since 1980 to the present time, GP «DniproDIITS» (State Institute of Engineering and Technical Surveys), together with other survey and design and survey organizations conducted engineering and geological surveys for the design and construction of various public facilities.

Engineering and geological surveys included such types of works as well drilling, trench hole trenching, ground pressure testing, experimental filtration, laboratory studies of soils and groundwa-

ter, stability calculations of the Krasnopovstanskaya ravine, drilling and setting up of observational wells on the slopes of the girder.

Laboratory studies of soils were carried out in accordance with the current regulatory documents, in the geotechnical laboratory of the State Enterprise «DniproDIITS», in December 2007, which passed state accreditation (certificate of certification No. HR – 082/2007, validity 18.06.2007 – 18.06. 2010).

Purpose

The purpose of this study is to analyze and substantiate the parameters of soil-cement pile retaining structures on the basis of the results of a comparative finite element simulation of the nonlinear stability problem of the landslide-dangerous section of the Krasnopovstansky gully slope, as well as the determination of optimal parameters of soil-cement piles according to the results of a study of the mechanics of landslide processes in the territory. [3, 13].

Methodology

Calculation of the stability of landslide-prone slopes was carried out in the program complex «LIRA-SAPR 2016». Geological elements of the soil were assigned the finite element type FE 271-276 (volumetric physically nonlinear FEs for simulating one-sided soil work on compression with allowance for displacement). Soil-cement piles are modeled by rod elements of rigidity of circular cross section, diameter 0.6 m. The plot, viewed with one pile in the task has 29389 finite elements with the number of unknowns of 95254. The length of the pile is 6.5 m. [8, 10].

The modulus of deformation of the soil-cement pile was adopted at 68 MPa, according to practical research data.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

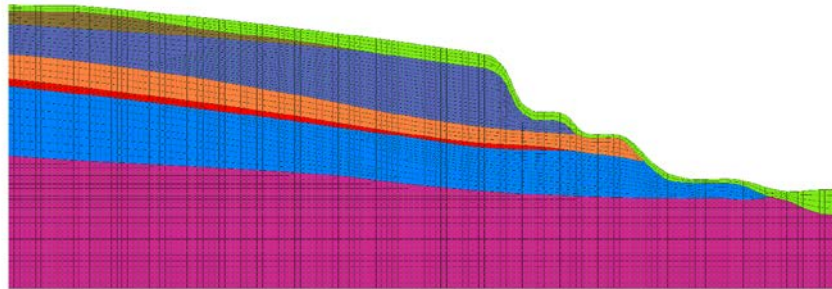


Fig. 1. The finite element model of the landslide slope is considered. The engineering geological layers 1-7 are represented in different colours in order of increasing depth

Table 1

Calculated values of physical indices and strength of soils at $\alpha = 0.95$

Number of EGE	Specific weight γ , kN/m^3		Cut fast, not consolidated, with natural moisture		Cut fast not consolidated, with full water saturation		The cut on the pre- pared surface («Die» in «spot»)		Module ground deformation on the primary loading branch, MPa
	with natural moisture	in water-saturated condition	The degree of water content $S_r < 0.8$		The degree of water content $S_r > 0.8$				
			internal friction angle φ , degree	Specific grip c , kPa	internal friction angle φ , degree	Specific grip c , kPa	internal friction angle φ , degree	Specific grip c , kPa	
1	16.33	18.37	25	125.0	13	109.0	7	20.0	7.2
3	15.36	18.07	26	18.0	15	10.0	—	—	8.6
4	15.48	18.22	24	16.0	16	4.0	—	—	11.0
5	17.73	18.86	25	110.0	17	56.0	10	21.0	15.3
6	18.16	19.21	26	100.0	13	72.0	10	22.0	14.2
7	18.94		22	51.0	21	68.0	9	12.0	11.4

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Findings

The task was calculated in three stages in the «Mounting» processor.

1) The stage «Soil». Reflects the operation of the system without a pile device in conditions where the slope is in a state of equilibrium. Soils are in a state of natural humidity.

2) The stage «Placing piles.» Vertical displace-

ments from the sediment of the ground mass are reset. Soils are in a state of natural humidity. The soil-cement pile has been mounted. The pile's own weight acts on the soil mass.

3) The stage «Work piles.» Reflects the work of the pile in conditions of complete water saturation of all soil layers except for the deep one, which is located below the thalweg of the girder.

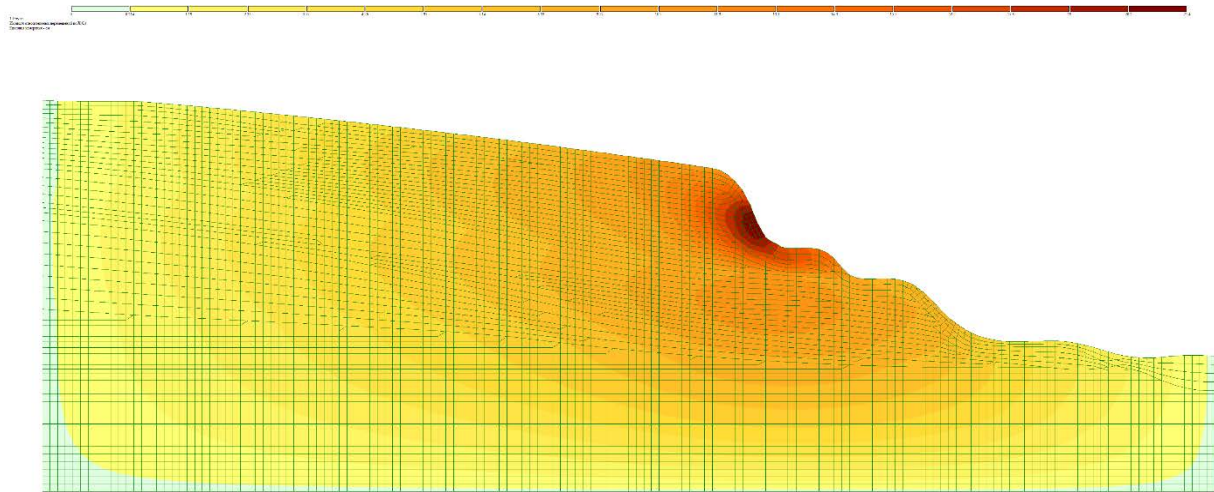


Fig. 2. Stage 1. The system without placing a retaining structure. The maximum value for the X axis is 21.4 cm

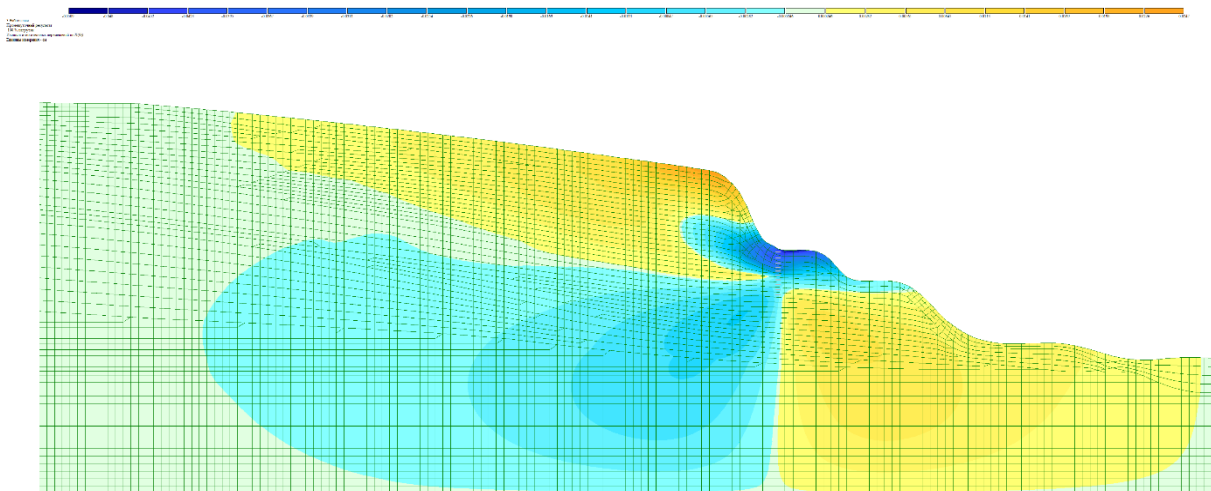


Fig. 3. Moving of the system after the installation of a soil-cement pile with a diameter of 0.6 m, the length of the pile 6.5 m. Soils in the water-saturated state, the situation simulates a possible displacement. The maximum value for the X axis is 0.025 cm

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

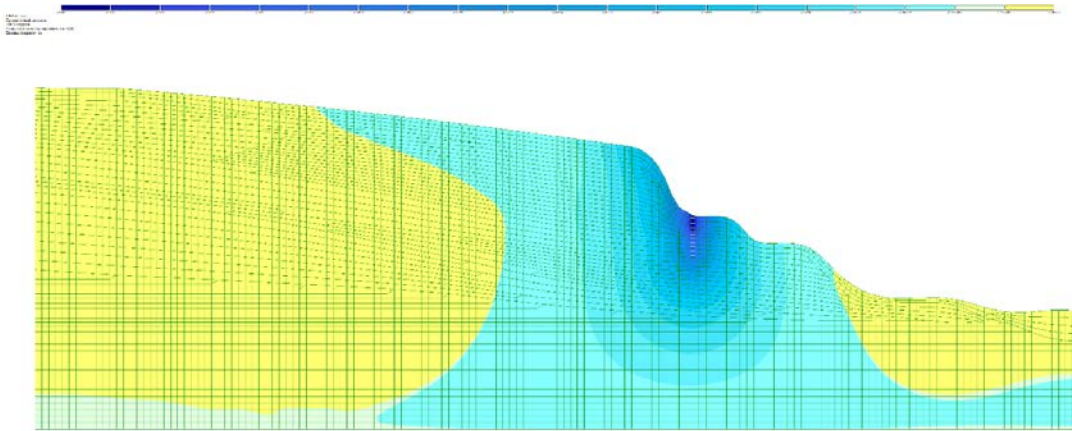


Fig. 3. Vertical displacements of the system after the installation of a soil-cement pile with a diameter of 0.6 m, the length of the pile is 6.5 m. The maximum value along the Z axis is -0.14 cm. (Stage 2)

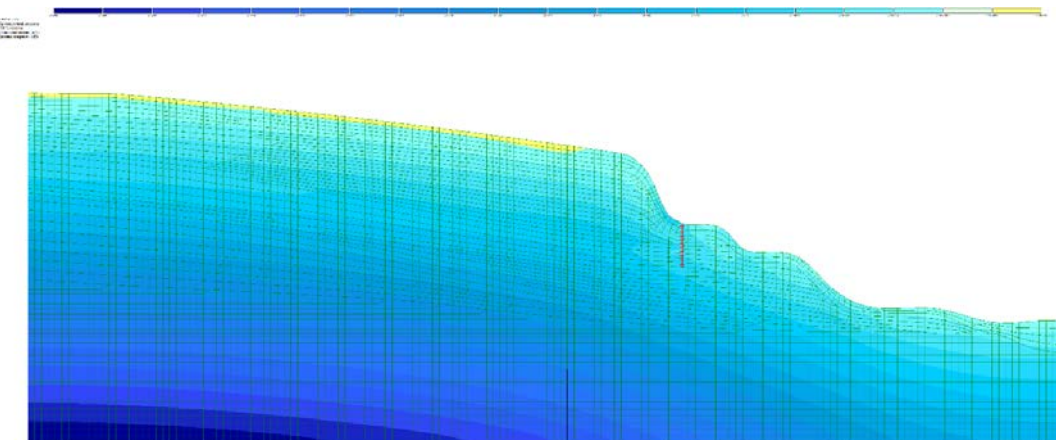


Fig. 4. The isosphere of stresses N_z . The maximum value is 0.494 MPa

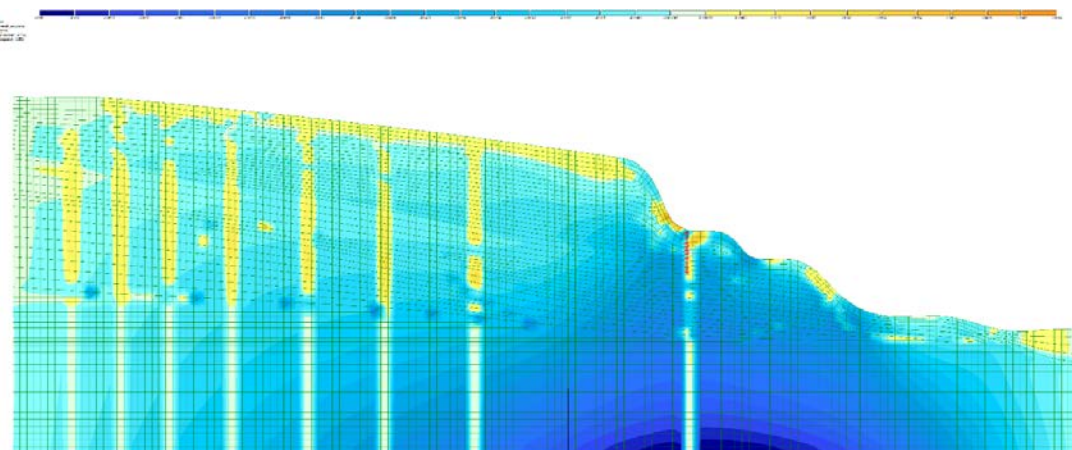


Fig. 5. The isosphere of stresses τ_{xy} . The maximum value is 0.109 MPa

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Originality and practical value

Despite the widespread use of soil-cement piles as enclosing structures for the construction of foundation pits and reinforcement of the foundations of emergency structures, special attention should be paid to the study of the feasibility of using soil-cement retaining pile structures on landslide areas. It is known that primer-cement piles are expediently used as a protective element, which interacts quite well with the ground environment due to its structure of the starting material. The use of modern computer programs of finite element modeling makes it possible to calculate the effectiveness of the use of soil-cement piles and to determine the parameters of the necessary supporting structure according to the given geological structure of the slope, and also, depending on its shape and the physical characteristics of the soils, to compare the performance of different types of protective landslide structures.

Conclusions

Based on the calculations performed, the following findings can be drawn:

1. The use of soil-cement retaining pile as retaining structures on landslide-prone areas makes it possible to prevent lateral processes if work has

been performed based on a preliminary calculation of the nonlinear stability problem. The piles should be arranged in such a way that they can be technologically carried out, that is, the site should be close to the horizontal surface in the terrain for the operation of machinery. The length of the piles should be determined by calculation and taken in such a way that the pile passes the slip surface of a possible displacement and is submerged below, in a stable layer of soil, at least one third of the total length of the pile.

2. The results of the calculated parameters and the bearing capacity of the piles always depend on the given conditions and the initial data of the problem. An error in geological data can lead to erroneous results and a mismatch of the work of the calculation model in reality.

3. The accuracy of calculations of this model for the number of 300 iterations is 10.09%. That is, with a displacement of 0.025 cm, the error of the results is ± 0.0025 mm, which is sufficient for this task.

4. With the help of finite element modeling it is possible to solve the practical problem of any complexity, regardless of the variety of geological conditions and the shape of the slope. However, it cannot be to say about other methods of calculating landslide processes in that way.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Гинзбург, Л. К. Противооползневые сооружения : монография / Л. К. Гинзбург. – Днепропетровск : Лира ЛТД, 2007. – 188 с.
2. ДБН В.1.1-24:2009. Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення. – Чинний від 2010–07–01. – Київ : Держстандарт України, 2010. – 69 с.
3. Дорфман, А. Г. Исследование устойчивости склонов / А. Г. Дорфман, А. Я. Туровская // Вопросы геотехники : межвуз. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 1975. – № 24. – С. 132–156.
4. Кіріак, К. К. Обґрунтування технологічних параметрів ін'єкційного закріплення зсувонебезпечних ґрунтових структур : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.15.09 / Кіріак Костянтин Костянтинович ; ДВНЗ «Дніпропетр. нац. гірн. ун-т». – Дніпропетровськ, 2013. – 17 с.
5. Ковров, А. С. Геомеханическое обоснование параметров устойчивых откосов карьеров в сложноструктурном массиве мягких пород : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.09 / Ковров Александр Станиславович. – Днепропетровск, 2011. – 175 с.
6. Ковров, О. С. Оцінка впливу гідрогеологічних характеристик ґрунтів на стійкість природних схилів для прогнозу зсувів / О. С. Ковров // Екологічна безпека. – 2013. – Вип. 1. – С. 72–76.
7. Оползни. Исследование и укрепление / под ред. Р. Шустера, Р. Кризека. – Москва : Мир, 1981. – 368 с.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

8. Оцінка стійкості природних схилів методами математичного моделювання в програмі «ОТКОС» / В. Д. Петренко, О. Л. Тюткін, О. І. Дубінчик, В. Р. Кільдєєв // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2015. – Вип. 8. – С. 23–32.
9. Строкова, Л. А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов / Л. А. Строкова // Изв. Томск. политехн. ун-та. – 2008. – Т. 313, № 1. – С. 69–74.
10. Федоровский, В. Г. Метод расчета устойчивости откосов и склонов / В. Г. Федоровский, С. В. Курилло // Геоэкология. – 1997. – № 6. – С. 95–106.
11. Albataineh, N. Slope stability analysis using 2D and 3D methods / N. Albataineh. – Ohio, United States : The university of Akron, 2006. – 126 p.
12. Griffiths, D. V. Slope stability analysis by finite elements / D. V. Griffiths, P. A. Lane // Geotechnique. – 1999. – Vol. 49, No. 3. – P. 387–403. doi: 10.1680/geot.1999.49.3.387.
13. Petrenko, V. D. Estimation of Subgrade Strengthening Influence Using Soilcement Elements / V. D. Petrenko, O. L. Tiutkin, I. O. Sviatko // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 4 (64). – С. 161–168. doi: 10.15802/stp2016/78254.
14. Petrenko, V. D. The application of injection – grouting for strengthening of the weak subgrade foundations / V. D. Petrenko, I. O. Sviatko, D. O. Yampolskyu // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения : сб. науч. тр. / Приднепров. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2014. – Вип. 77. – С. 144–147.

Д. Ю. ІГНАТЕНКО^{1*}, В. Д. ПЕТРЕНКО^{2*}, А. Л. ТЮТКІН^{3*}

^{1*}Каф. «Мости та тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (093) 442 36 63, ел. пошта dola1992@i.ua, ORCID 0000-0001-6805-6703

^{2*}Каф. «Мости та тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, ел. пошта petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0002-5902-6155

^{3*}Каф. «Мости та тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 925 38 28, ел. пошта tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

ВЗАЄМОДІЯ ГРУНТОЦЕМЕНТНИХ ПАЛЬОВИХ ПІДПІРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ТІЛОМ ЗСУВУ

Мета. Наукова робота має за мету аналіз та порівняння результатів розрахунку кінцево-елементної моделі зсувонебезпечного схилу з влаштуванням ґрунтоцементних паль залежно від зміни жорсткості підпірної конструкції. Дослідження дозволить оцінити ефективність їх застосування, сумісну роботу паль із тілом зсуву та зробити висновок щодо доцільності використання даного методу протизсувного захисту схилу. **Методика.** Дослідниками проведений аналіз геоморфологічних даних, отриманих за результатами лабораторних досліджень ґрунтів на ділянці схилу. Створена об'ємна кінцево-елементна модель схилу згідно побудованих розрізів та глибин залягання шарів ґрунту. Здійснений розрахунок нелінійної задачі кінцево-елементного моделювання схилу з влаштуванням ґрунтоцементних паль різної жорсткості. **Результати.** Авторами отримані результати розрахунку кінцево-елементної моделі зсувонебезпечного схилу, проведено аналіз напружено-деформованого стану конструкції з ґрунтоцементних паль. **Наукова новизна.** Незважаючи на широке застосування ґрунтоцементних паль у якості захисних конструкцій для влаштування котлованів та посилення фундаментів аварійних споруд, особливу увагу слід приділити дослідженню доцільності застосування ґрунтоцементних підпірних пальових конструкцій на зсувонебезпечних ділянках. **Практична значимість.** Відомо, що ґрунтоцементні палі доцільно застосовувати як захисний елемент, який досить добре взаємодіє із ґрунтовим середовищем завдяки своїй структурі вихідного матеріалу. Використання сучасних комп'ютерних програм кінцево-елементного моделювання дозволяє провести

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

розрахунок ефективності застосування ґрунтоцементних паль та визначити параметри необхідної підпірної конструкції згідно даної геологічної структури схилу. Також можливо, залежно від форми та зміни фізичних характеристик ґрунтів, порівняти роботу різних типів захисних протизсувних конструкцій.

Ключові слова: ґрунтоцементна паля; зсув; протизсувна підпірна конструкція; зсувонебезпечний схил

Д. Ю. ИГНАТЕНКО^{1*}, В. Д. ПЕТРЕНКО^{2*}, А. Л. ТЮТКИН^{3*}

^{1*}Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (093) 442 36 36, эл. почта dola1992@i.ua, ORCID 0000-0001-6805-6703

^{2*}Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, эл. почта petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0002-5902-6155

^{3*}Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (096) 925 38 28, эл. почта tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ СВАЙНЫХ ПОДПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ТЕЛОМ ОПОЛЗНЯ

Цель. Научная работа своей целью имеет анализ и сравнение результатов расчета конечно-элементной модели оползнеопасного склона с устройством ґрунтоцементных свай в зависимости от изменения жесткости подпорной конструкции. Исследование позволит оценить эффективность их применения, совместную работу свай с телом оползня и сделать вывод о целесообразности использования данного метода противооползневой защиты склона. **Методика.** Исследователями был проведен анализ геоморфологических данных, полученных по результатам лабораторных исследований ґрунта на участке склона. Создана объемная конечно-элементная модель склона согласно построенных разрезов и глубин залегания слоев почвы. Произведен расчет нелинейной задачи конечно-элементного моделирования склона с устройством ґрунтоцементных свай различной жесткости. **Результаты.** Авторами получены результаты расчета конечно-элементной модели оползнеопасного склона, проведен анализ напряженно-деформированного состояния конструкции с ґрунтоцементными сваями. **Научная новизна.** Несмотря на широкое применение ґрунтоцементных свай в качестве ограждающих конструкций для устройства котлованов и усиление фундаментов аварийных сооружений, особое внимание следует уделить исследованию целесообразности применения ґрунтоцементных подпорных свайных конструкций на оползнеопасных участках. **Практическая значимость.** Известно, что ґрунтоцементные сваи целесообразно применять как защитный элемент, который достаточно хорошо взаимодействует с ґрунтовой средой благодаря своей структуре исходного материала. Использование современных компьютерных программ конечно-элементного моделирования позволяет провести расчет эффективности применения ґрунтоцементных свай и определить параметры необходимой подпорной конструкции согласно данной геологической структуре склона. Также возможно, в зависимости от формы и изменения физических характеристик ґрунтов, сравнить работу разных типов защитных противооползневых конструкций.

Ключевые слова: ґрунтоцементная свая; оползень; противооползневая подпорная конструкция; оползнеопасный склон

REFERENCES

1. Ginzburg, L. K. (2007). *Protivoopolznevyye sooruzheniya* [Monograph]. Dnepropetrovsk: Lira LTD.
2. Inzhenernyi zakhyst terytorii, budynkiv i sporud vid zsuiv ta obvaliv. Osnovni polozhennia, DBN V.1.1-24:2009 (2010).
3. Dorfman, A. G., & Turovskaya, A. Y. (1975). Issledovanie ustoychivosti sklonov. *Voprosy geotekhniki*, 24, 132-156.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

4. Kiriya, K. K. (2013). *Justification technological parameters of injection landslide stabilization of soil structure*. (PhD thesis). Available from National Mining University, Dnipropetrovsk.
5. Kovrov, O. S. (2011). *Geomechanical justification of stable open-pit slopes parameters in complex structure massif of soft rocks*. (PhD thesis). Available from National Mining University, Dnipropetrovsk.
6. Kovrov, O. S. (2013). Evaluation of the influence of soil hydrogeological properties on stability natural slopes for the forecasting landslides. *Ecological Safety*, 1, 72-76.
7. Schuster, R., & Krizek, R. (Eds.). (1981). *Landslides. Analysis and Control*. (A. A. Varga, R. R. Tizdel, Trans.). Moscow: Mir.
8. Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Dubinchik, O. I., & Kildieiev, V. R. (2015). Assess the stability of natural slopes of mathematical modeling in the «Otkos». *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 8, 23-32.
9. Strokova, L. A. (2008). Opredeleniye parametrov dlya chislennogo modelirovaniya povedeniya gruntov. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 313 (1), 69-74.
10. Fedorovskiy, V. G., Kurillo, S. V. (1997). Metod rascheta ustoychivosti otkosov i sklonov. *Geoekologiya*, 6, 95-106.
11. Albataineh, N. (2006). *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*. (MS Thesis). Ohio, United States: The University of Akron. Retrieved from https://etd.ohiolink.edu/rws_etd/document/get/akron1153719372/inline
12. Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 49 (3), 387-403. doi:10.1680/geot.1999.49.3.387
13. Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., & Sviatko, I. O. (2016). Estimation of Subgrade Strengthening Influence Using Soilcement Elements. *Science and Transport Progress*, 4 (64), 161-168. doi:10.15802/stp2016/78254
14. Petrenko, V. D., Sviatko, I. O., & Yampolsky, D. O. (2014). The application of injection – grouting for strengthening of the weak subgrade foundations. *Construction, materials science, mechanical engineering. Series: Innovative lifecycle technology of housing and civil, industrial and transportation purposes*, 77, 144-147.

Prof. M. B. Kurhan, Dr. Sc. (Ukraine); Prof. S. M. Hapieiev, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: May 11, 2017

Received: Sep. 28, 2017

UDC 656.224.027

O. H. MARINICHENKO^{1*}

^{1*}Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 183 96 41, e-mail aleksey.marinichenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-9296-9614

DYNAMIC BEHAVIOR OF TWO-SPAN CONTINUOUS CONCRETE BRIDGES UNDER MOVING OF HIGH-SPEED TRAINS

Purpose. The scientific work provides a comparison of the results of the movement of a high-speed passenger train across the bridge, obtained as a result of finite element modeling in the SAP2000 software package, and real tests of a double-span concrete railway bridge. Analysis of the rigid characteristics of flying structures. **Methodology.** The numerical method presented in this study shows valid results concerning the dynamic analysis of the behavior of bridges in conditions of high-speed train traffic. The factors influencing the dynamic behavior of bridges under moving loads, the influence of design parameters and rolling stock, as well as the interaction of the train and spans are determined. The system was used in the form of moving concentrated forces simulating the axes of the train. **Findings.** Maximum movements and accelerations were obtained as a result of the dynamic calculation for different speeds of the train and compared with practical tests. The correctness of the model of a span structure with regard to continuous ferroconcrete spans was verified. **Originality.** Within the framework of the work, the latest test results were used, including those with speeds calculated on the prospect of rail passenger traffic. For these tests, a model of a span structure was developed. **Practical value.** The results of the research can be used to plan the introduction of high-speed train traffic on existing and planned flying structures of reinforced concrete bridges. An approach to the design of span structures that will be effective when passing high-speed passenger trains is implemented.

Keywords: dynamic interaction; concrete bridges; continuous bridge; high-speed train; SAP2000

Introduction

Grain is one of the main export goods of Ukraine. Over the period from 2006 to 2016, the share of its value in the total value of goods exported from Ukraine increased from 3.5 to 16.5%. In 2015/2016 marketing year among grain exporters, Ukraine, with an indicator of 38.7 million tons, took the third place, behind the United States (78.5 million tons) and the European Union (52.2 million tons). Argentina (36.2 million tons), the Russian Federation (34.6 million tons), Canada (27.7 million tons) and other countries [1, 3] exported significant volumes of grain. One of the ways to increase the competitiveness of domestic grain in the world market is to build an effective logistics system. For Ukraine, this task is especially important, as the share of logistics costs in the cost of domestic grain is about 35%; for comparison, the share of logistics costs in the grain cost in the European Union is 12–16%, the United States – 9% [2]. In 2016 in Ukraine, about 97% of grain exports were made through seaports, while 63% of grain cargo was delivered to sea ports by

rail. Therefore, increasing the efficiency of grain cargo transporting by rail and water transportation is one of the key tasks that must be addressed to reduce logistics costs. The need to develop logistic schemes for the grain delivery to ports with the participation of rail transport is also conditioned by the need to increase Ukraine's energy independence. The railway transport of Ukraine performs about 90% of the turnover of electric power with the use of domestic energy carriers. On the contrary, 72% of oil products consumed in Ukraine are used for the needs of motor transport; while 80% of oil products are imported by Ukraine [5]. Following the increase of train weight and speed and, the lightening of bridge weight, the load induced by the moving train gained importance among the various external loads applied to bridge. Therefore, taking into account the bridges of the Korean high-speed train (KHST), as trains will run at speed of 350 km/h (in the future, this speed is planned to be increased up to 400 km/h), vibration analysis of bridges shall acquire more and more importance. In addition, when axle loads are repetitively applied at regular interval, as it is the

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

case for trains, frequencies of the applied wheel load and of the bridge may coincide, favoring occurrence of resonance vibration in the bridge.

Purpose of the study

Significant progress in reducing costs of the transportation of grain was achieved in the USA and Canada in the late 20th, early XXI century. Changes in grain logistics in the US began in 1972-1973 in response to a sharp increased demand for grain in the world market [7]. These changes led to a change in the quantity, capacity and the location of elevators throughout the countries, improving the technology of grain transportation by rail and their tariff systems. Similar changes have occurred since the 1980s in Canada. Before the reform process, the logistics system for the delivery of grain by the North American Railways was working similar to Ukrainian railways. Empty wagons for transportation of grain were sent to technical stations, where were making groups from 1 to 25 cars loading stations. After loading the cars were sent to technical stations for compiling trains in accordance with the layout plan. In 1965, US began to use the technology of grain transportation for export to seaports by route transport [7]. Efficiency of grain transportation along the routes: with a decrease in the cost of the station, the more rational use of the capacity of wagons and throughput of the railways. At the same time, this technology requires the development of access roads and carrying capacity of elevators [10, 11, 12].

Methodology

Loads spaced at regular interval and bridge crossing at a given speed act as a repeated load, called beating, appears on the bridge. When the frequency of this repeated load approaches the natural frequency of the bridge, resonance of the bridge occurs. The axle loads of the considered 2P (18 ton) HSLM – (High Speed Load Model) coaches hit the bridge repeatedly and may induce resonance. In the case of the KHST running at high-speed, risk of resonance occurrence is larger than classical trains, and verification of vibration problems in the high-speed railway bridge is required during its design to guarantee the safety of the crossing train, which one is subordinated to strict crossing conditions. There-

fore, performing dynamic analysis that investigates resonance of the bridge induced by the bridge–train interaction constitutes an essential element of the design [7, 8, 9]. It is necessary to define the critical speed as the train speed for which resonance of the bridge occurs. Such critical speed is defined and based on the notion of resonance phenomenon due to regularly spaced loads moving at a constant speed and can be expressed as follows. The critical speeds corresponding to the dynamic characteristics of the bridge and the effective beating interval are summarized in Fig. 3. Structures operating at resonance show extremely sensitive dynamic responses according to their damping level. Following, the selection of damping becomes essential when dealing with resonance problems. In this study, the damping ratio of the actual bridge has been determined by means of field test using a rotary exciter. For details about the damping ratio used in this study refer to the Ministry of Construction & Transportation, the Ministry of Commerce, Industry and Energy, and the Ministry of Science and Technology [11]. The damping assumed for the dynamic analysis considered the Rayleigh damping using the measured actual damping. Field tests have been performed from August to September of 2001 in the experimental section of the KHST located in the construction area 5-2 of the Kyeong-bu high-speed railway line. The tested bridge is a PSCbox bridge. It is the Yeon-Jae Bridge, which characteristics make it representative of the bridges adopted for the KHST. The KHST has been designed for a maximum design speed of 350 km/h and is, actually, running at a maximum speed of 300 km/h in the experimental section situated at a distance of about 117 km far away to the South from Seoul. Field tests have been performed twice in two years under identical conditions, except the passengers' loading of the passenger coaches.

Findings

The obtained results indicate that the vertical interval shifts u_z (deflections) with simultaneous load taking into account spatial dynamic behavior structure and speed of cargo movement is non-linear dependence on the magnitude of the track eccentricity. In all calculations relatively high shifts were obtained at loading speed of 200 km/h. The greatest range of extrema of vertical shifts is observed at eccentricity $e_y = 50$ mm; in other cases

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

u_z amplitude variations are relatively low amplitude. The lateral displacement equations u_y have maximum if the amount of shift of the track $E_y = 10$ mm. The range of maximum displacements in longitudinal direction at loading speed of 100 km/h can be considered as motionless. Further increase in speed (up to 260-270 km/h) is accompanied by significant increase of u_x displacements and maximum amplitude of the longitudinal structure.

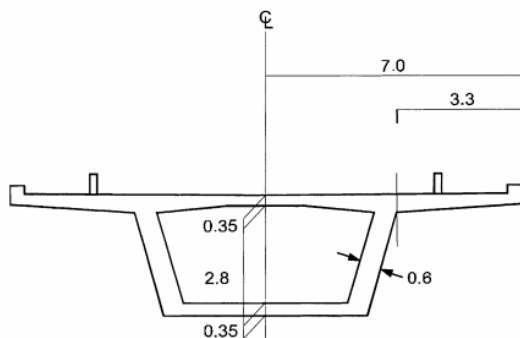


Fig. 1. Concrete span construction

Offset Value reduces and returns to the initial values in speed is 400 km/h. As a rule, the track magnitude of the eccentricity practically does not affect the longitudinal and torsional oscillations span of the bridge.

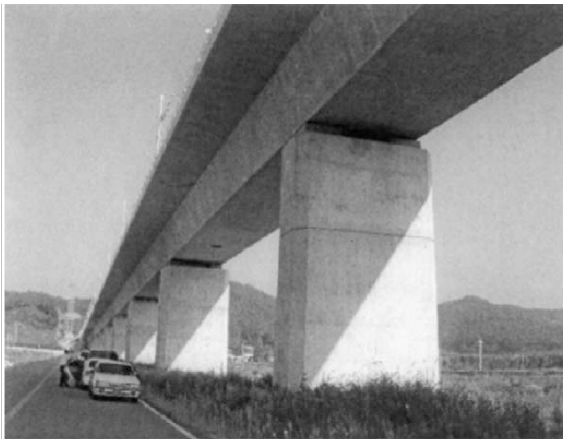


Fig. 2. View on Yeon-Jae Bridge for KHST

As the lifetime of railway bridges should be greater than 100 years for economic reasons, it is necessary to take into account long term considerations for choosing the traffic loads. Once having made a decision about future loads to be taken into account, there is no real problem in designing completely new bridges and for these bridges it is important to understand that heavier loads do not

significantly influence the costs of bridges. Greater problems arise however when it is necessary to upgrade existing lines and existing bridges need to be modified. In 1991, the ERRI (European Rail Research Institute) expert group D192 started research work into long term considerations on bridge loading and carried out a profitability study with a view to determine the effect of higher axle loads on the overall costs of bridges. They found that additional investment costs of only 3% were occurred when taking a 40% higher design load. Therefore, $\alpha = 1.33$ should be adopted for new bridges. This result is confirmed by a study within this EU-project «DETAILS»: Even if taking a factor $\alpha = 2.00$, that means 100% higher design load, the additional investment costs incurred reach only 10 %.

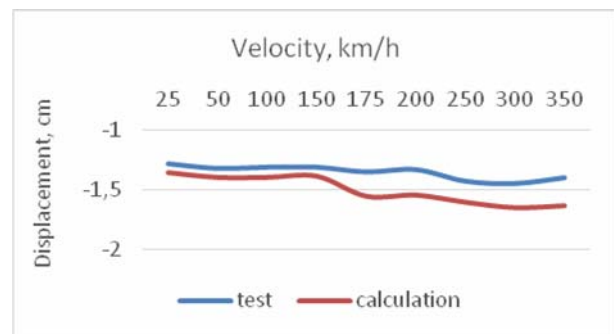


Fig. 3. Comparison of the calculations at SAP2000 and real test of the train movement under the bridge (2x40 m)

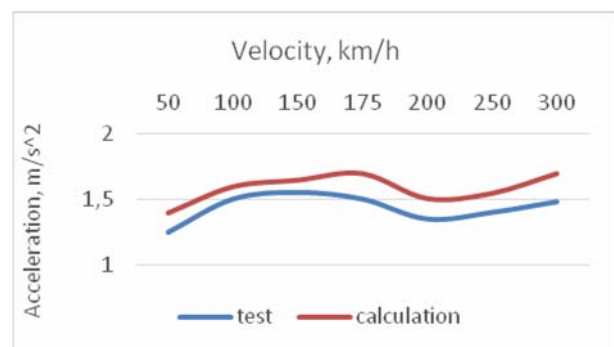


Fig. 4. Comparison of the calculations at SAP2000 and real test of the train movement under the bridge (2x40 m)

The Details project aimed at investigating the uncertainties concerning the real structural behavior of composite HSR bridges (i.e. resonance phenomena, train-bridge interaction effects, global and local dynamic loads, fatigue behavior, model-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ing techniques, traffic spectra and exercise conditions) in order to improve the technical knowledge on the actual structural performance of such composite solutions. To this aim, an innovative global approach for the structural assessment was developed and calibrated on suitable case studies, representative of steel-concrete composite solutions currently adopted in European high-speed railway lines. Results permitted to elaborate final guidelines, were reported in chapter 15, for a reliable assessment of existing bridges and the design of new ones. In particular, developed guidelines cover the following aspects of bridge engineering:

1. Experimental dynamic testing of composite bridges, i.e. indications for a correct identification of natural vibration modes and resonance phenomena considering the quality of experimental input data, the typology of excitation sources and the numerical procedures adopted for structural identification.

2. Evaluation of train-bridge interaction effects, i.e. general observations on train bridge dynamic interaction phenomena, descriptions of modeling techniques currently adopted to represent vehicle and structure dynamic properties, specific recommendations for a correct assessment of composite bridges under high speed-train passages.

3. Finite element (FE) modeling of composite bridges, i.e. integrated approaches, consisting of developing and updating numerical FE bridge models on the basis of experimental structural identifications, for a correct representation of the real dynamic behavior of composite bridges considering also the influence of secondary components and boundary conditions.

4. Recommendations for the design of railway bridges in accordance with the rules of the Eurocode, Specific instructions related to the Eurocode standards for the optimal design of the railway Bridges relative to the class of fatigue of bridge components, gain factors of vertical loads in accordance with effective rail traffic, permissible bridge deformations and vertical displacements.

In modeling the dynamic behavior of spatial rod system, some nonlinear components of motion nodes can be lost without taking into account moments of inertia of the nodes. In Euler-Lagrange differential equations of the relationship between angular velocity and angular acceleration, the node in the components is relative to the main axes of

inertia, characterizing the connection between vertical, horizontal and torsional vibrations of the structure, as well as energy distribution in the system.

When resonance phenomena may influence significantly the dynamic performance of the bridge, suitable procedures for the correct evaluation of dynamic response and structural load distribution are needed. The moving load approach and the train-bridge dynamic interaction approach are two of the most adopted techniques for this purpose [1.4].

Originality and practical value

In this work, I performed dynamic measurements on the part of the Evon bridge, and also with the reactionary values from the Yonjaye bridge, the pre-stressed beam bridge. This bridge is along the Gyeong-bu high-speed rail. Then I compared results with standard dynamic performance values specified by the Eurocode and Korean high-speed rail. To determine dynamic performance of the bridges, I measured and analyzed the following elements: maximum vertical acceleration and maximum vertical displacement. Most measurements were within the control values. However, on the Yonjai Bridge some acceleration response is greater than the regulation value.

Conclusions

The steel composite bridge showed higher values of displacement and angles of rotation in comparison with the bridge of the pre-stressed beams. However, the acceleration response showed lower values. This result was not the effect of resonance, which occurs when a train passes through a steel composite bridge. Therefore, the component that monitors dynamic performance of the bridge is not included to calculation. Differences in the material of the bridge did not lead to differences in the dynamic characteristics of the bridges. Since the dynamic responses experimentally obtained in this study were the data obtained when the train moves at a working speed, complementing numerical analyzes I carry out with different train speeds and damping factors. As expected, the dynamic deviation can be amplified more than twofold when the speed of the train reaches a critical speed. In addition, the dynamic gain varies with the damping coefficient. The measured damping

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ratio has a certain amount of dispersion and calculated maximum dynamic response varies considerably due to the input damping coefficient. Future

studies will be directed to determine the coefficient of input damping taking into account the distribution of the measured damping coefficient.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Гибаленко, А. Н. Оценка живучести металлоконструкций при моделировании факторов эксплуатации / А. Н. Гибаленко, Т. С. Трофимчук // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 2 (62). – С. 119–128. doi: 10.15802/stp2016/67327.
2. Ефимов, П. П. Проектирование мостов / П. П. Ефимов. – Омск : Дантэя, 2006. – 111 с.
3. Інструкція з визначення умов пропуску рухомого складу по металевих та залізобетонних залізничних мостах / Гол. упр. колійн. госп-ва Укрзалізниці. – Київ : М-во трансп. України, 2002. – 301 с.
4. Пат. 109806 Україна, МПК Е 01 D 1/00, Е 01 D 19/00, Е 01 D 101/30. Вузол спірання поздовжньої балки на поперечну / Марочка Віталій Владиславович, Ключник Сергій Владиславович ; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № u 2016 01940 ; заявл. 29.02.2016 ; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17.
5. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин [Electronic resource] : зб. наук. ст. / Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. – Київ, 2015. – 816 с. – Available at: <http://patonpublishinghouse.com/rus/compilations/resurs2015>. – Title from the screen. – Accessed : 30.10.2017.
6. Шульман, З. А. Испытания и мониторинг инженерных сооружений / З. А. Шульман, И. З. Шульман. – Днепропетровск : ЛИРА, 2013. – 536 с.
7. Gibalenko, A. N. Design requirements to structural steel durability based on level of industrial facility corrosion hazard / A. N. Gibalenko, V. Korolov, J. Filatov // Aktualnie problemy konstrukcji metalowych : Abstr. II Polish-Ukrainian International Conference APMK (27.11–28.11.2014) / University of Technology. – Gdansk, 2014. – P. 98–102.
8. Kim, S. I. Dynamic performances of a railway bridge under moving train load using experimental modal parameters / S. I. Kim, N. S. Kim // Intern. J. of Structural Stability and Dynamics. – 2010. – Vol. 10. – Iss. 1. – P. 91–109. doi: 10.1142/s0219455410003397.
9. Miller, K. J. Structural integrity – whose responsibility? / K. J. Miller // Proceedings of the I MECH E, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. – 2003. – Vol. 217. – Iss. 1. – P. 1–21. doi: 10.1243/14644200360539391.
10. Ovchinnikov, P. Sing of finite element modeling for determination of buckling possibility in lengthwise stiffeners of orthotropic plate for bridge spans under operational load / P. Ovchinnikov, S. Klyuchnik // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 5. – С. 130–135.
11. Rust, I. Sicherheit technischer Anlagen – Eine sozial wissenschaftliche Analyse des Umgangs mit Risiken in Ingenieurpraxis und Ingenieurwissenschaft / Ina Rust ; Kassel university. – Kassel, 2004. – 394 p.
12. Weltshev, M. Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage / M. Weltshev, S. Schwarzer, F. Otremba // Chemical Engineering Transactions. – 2013. – Vol. 31. – P. 559–564. doi: 10.3303/CET1331094.
13. Zhang, F. Patent activity analysis of vibration-reduction control technology in high-speed railway vehicle systems in China / F. Zhang, X. Zhang // Scientometrics. – 2014. – Vol. 100. – Iss. 3. – P. 723–740. doi : 10.1007/s11192-014-1318-3.

О. Г. МАРИНІЧЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 183 96 31, ел. пошта aleksey.marinichenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162

ДИНАМІЧНА ПОВЕДІНКА ДВОПРОГІННИХ НЕРОЗРІЗНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ МОСТІВ ПІД ВПЛИВОМ РУХУ ШВИДКІСНИХ ПОЇЗДІВ

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Мета. Наукова робота передбачає порівняння результатів руху високошвидкісного пасажирського поїзда по мосту, отриманих внаслідок моделювання методом кінцевих елементів у програмному комплексі SAP2000, та реальних випробувань двопрогінного залізобетонного залізничного моста. А також аналіз жорсткісних характеристик прогонових будов. **Методика.** Система чисельного методу, представлена в цьому дослідженні, показує обґрунтовані результати, що стосуються динамічного аналізу поведінки мостів в умовах швидкісного руху поїздів. Визначено фактори, що впливають на динамічну поведінку мостів при рухомих навантаженнях, вплив проектних параметрів та рухомого складу, а також взаємодія поїзда й прольотів. Система використана у вигляді рухомих зосереджених сил, що моделюють осі поїзда. **Результати.** Були отримані максимальні переміщення й прискорення в результаті динамічного розрахунку для різних швидкостей руху поїзда та порівняні з практичними випробуваннями. Перевірена коректність моделі прогонової будови щодо нерозрізних залізобетонних прогонових будов. **Наукова новизна.** В рамках роботи використані новітні результати випробувань, в тому числі зі швидкостями, розрахованими на перспективу залізничних пасажирських перевезень. За даними випробування була розроблена і модель прогонової будови. **Практична значимість.** Результати досліджень можуть використовуватися для планування впровадження високошвидкісного руху поїздів за існуючими та проєктованими пролітними будовами залізобетонних мостів. Виконано підхід до розробки конструкцій прогонових будов, які будуть ефективні при пропуску високошвидкісних пасажирських поїздів.

Ключові слова: динамічна взаємодія; бетонні мости; нерозрізний міст; швидкісний поїзд; SAP2000

А. Г. МАРИНИЧЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 183 96 31, эл. почта aleksey.marinichenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162

ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДВУХПРОЛЁТНЫХ НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ

Цель. Научная работа предусматривает сравнение результатов движения высокоскоростного пассажирского поезда по мосту, полученных вследствие моделирования методом конечных элементов в программном комплексе SAP2000, и реальных испытаний двухпролётного железобетонного железнодорожного моста. А также анализ жесткостных характеристик пролётных строений. **Методика.** Система численного метода, представленная в этом исследовании, показывает обоснованные результаты, касающиеся динамического анализа поведения мостов в условиях скоростного движения поездов. Определены факторы, влияющие на динамическое поведение мостов при движущихся нагрузках, влияние проектных параметров и подвижного состава, а также взаимодействие поезда и пролетов. Система использована в виде движущихся сосредоточенных сил, моделирующих оси поезда. **Результаты.** Были получены максимальные перемещения и ускорения в результате динамического расчёта для разных скоростей движения поезда и сравнены с практическими испытаниями. Проверена корректность модели пролётного строения касательно неразрезных железобетонных пролётных строений. **Научная новизна.** В рамках работы использованы новейшие результаты испытаний, в том числе со скоростями, рассчитанными на перспективу железнодорожных пассажирских перевозок. По данным испытания была разработана и модель пролётного строения. **Практическая значимость.** Результаты исследований могут использоваться для планирования внедрения высокоскоростного движения поездов по существующим и проектируемым пролётным строениям железобетонных мостов. Выполнен подход к разработке конструкций пролётных строений, которые будут эффективны при пропуске высокоскоростных пассажирских поездов.

Ключевые слова: динамическое взаимодействие; железобетонные мосты; неразрезной мост; высокоскоростной поезд; SAP2000

REFERENCES

1. Gibalenko, O. M., & Trofymchuk, T. S. (2016). Metal structures survivability assessment when simulating service conditions. *Science and Transport Progress*, 2(62), 119-128. doi:10.15802/stp2016/67327
2. Yefimov, P. P. (2006). *Proektirovaniye mostov*. Omsk: Danteya.
3. Ukrzaliznytsia. (2002). *Instruktsiia z vyznachennia umov propusku rukhomoho skladu po metalevykh ta zalizobetonnykh zaliznychnykh mostakh*. Kyiv: Ministry of Infrastructure of Ukraine.
4. Marochka, V. V., & Kliuchnyk, S. V. (2016). *UA Patent No. 109806*. Ukrainian Intellectual Property Institute (UKRPATENT)
5. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. (2015). *Service life and safety of structures, buildings and machinery*. Kyiv: Paton Publishing House. Retrieved from <http://patonpublishinghouse.com/rus/compilations/resurs2015>
6. Shulman, Z. A., & Shulman, I. Z. (2013). *Ispytaniya i monitoring inzhenernykh sooruzheniy*. Dnipropetrovsk: LIRA.
7. Gibalenko, A. N., Korolov, V., & Filatov, J. (2014). Design requirements to structural steel durability based on level of industrial facility corrosion hazard. *Proceedings of the II Polish-Ukrainian International Conference Aktualnie problemy konstrukcji metalowych (APMK)*, November, 27-28, 2014, Gdansk. Gdansk: University of Technology.
8. Kim, S. I., & Kim, N. S. (2010). Dynamic performances of a railway bridge under moving train load using experimental modal parameters. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 10 (1), 91-109. doi:10.1142/s0219455410003397
9. Miller, K. J. (2003). Structural integrity – whose responsibility? *Proceedings of the I MECH E, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 217 (1), 1-21. doi:10.1243/14644200360539391
10. Ovchinnikov, P., & Kliuchnyk S. (2014). Using of finite element modeling for determination of buckling possibility in lengthwise stiffeners of orthotropic plate for bridge spans under operational load. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 5, 130-135.
11. Rust, I. (2004). *Sicherheit technischer Anlagen – Eine sozial wissenschaftliche Analyse des Umgangs mit Risiken in Ingenieurpraxis und Ingenieur wissenschaft*. (Doctoral dissertation). Kassel University, Germany.
12. Weltshev, M., Schwarzer, S., & Otremba, F. (2013). Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage. *Chemical Engineering Transactions*, 31, 559-564. doi:10.3303/CET1331094
13. Zhang, F., & Zhang, X. (2014). Patent activity analysis of vibration-reduction control technology in high-speed railway vehicle systems in China. *Scientometrics*, 100 (3), 723-740. doi:10.1007/s11192-014-1318-3

Associate Prof. O. L. Tiutkin, D. Sc. (Tech.) (Ukraine); Prof V. V. Kuliabko, D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Received: July 03, 2017

Accessed: Oct. 20, 2017

UDC 624.6.04

V. O. SAMOSVAT^{1*}, ZHANG RONGLING², O. O. HOLOLOBOVA³, S. Y. BURIYAK⁴^{1*}Dep. «School of Civil Engineering», Lanzhou Jiaotong University, Anning West Rd. 88, Anning District, Lanzhou City, Gansu Province, China, 730070, tel. +86 (156) 931 722 74, e-mail 2087934080@qq.com, ORCID 0000-0002-4062-0509²Dep. «School of Civil Engineering», Lanzhou Jiaotong University, Anning West Rd. 88, Anning District, Lanzhou City, Gansu Province, China, 730070, tel. +86 (093) 149 386 26, e-mail mogzrlggg@163.com, ORCID 0000-0002-6576-4138³Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan, St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail gololobova_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196⁴Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan, St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.+38 (056) 373 15 04, e-mail er.buriyak@gmail.com, ORCID 0000-0002-8251-785X

FEATURES OF DESIGN OF TIED-ARCH BRIDGES WITH FLEXIBLE INCLINED SUSPENSION HANGERS

Purpose. Investigation and analysis of the hanger arrangement and the structural stability of a Network arch bridge – a tied-arch bridge with inclined hangers that cross each other at least twice. It is also necessary to make a comparative analysis with other types of hanger arrangements. **Methodology.** The authors in their research investigated a large number of parameters to determine their influence in the force distribution in the arch. Eventually they determined optimal values for all parameters. These optimal values allowed developing a design guide that leads to optimal arch design. When solving this problem, the authors used three-dimensional finite element models and the objective was to determine the most suitable solution for a road bridge, with a span of 100 meters, consisting of two inclined steel arches, located on a road with two traffic lanes, subjected to medium traffic. The virtual prototype of the model is performed by finite element simulator Midas Civil. **Findings.** In this study, for the bridge deck, a concrete tie appears to be the best solution considering the structural behavior of network arches, but economic advantages caused by easier erection may lead to steel or a composite bridge deck as better alternatives. Design requirements and local conditions of each particular bridge project will decide the most economic deck design. **Originality.** To ensure passenger comfort and the stability and continuity of the track, deformations of bridges are constricted. A network arch is a stiff structure with small deflections and therefore suitable to comply with such demands even for high speed railway traffic. A network arch bridge with a concrete tie usually saves more than half the steel required for tied arches with vertical hangers and concrete ties. **Practical value.** Following the study design advice given in this article leads to savings of about 60 % of structural steel compared with conventional tied arch bridges with vertical hangers.

Key words: tied-arch bridge; vertical hangers; inclined hangers; arch; theories of hangers system; number of hangers; angle of hangers

Introduction

This paper discusses aspects of designing of «network arch» type tied-arch bridge superstructures with the polygonal top chord and flexible inclined hangers. The P. Tveit and B. Brunn – F. Schanack theories are explained. In addition, the authors present results of their own research on synthesis and classification of foreign practices and recommendations as to design of such systems.

Current trends in the engineering of artificial structures are largely driven by the increasingly stringent requirements for their reliability, carrying capacity, durability, cost effectiveness and

aesthetic qualities [3, 5]. Concurrently, designed structures must be sufficiently adaptable to streamlined practical implementation at construction, operation and necessary maintenance. The above listed requirements condition need for the use and development of new innovative solutions both at design and construction of artificial structures. The first arch bridge with multiple crossing hangers was designed by Per Tveit and was built in 1963 in Steinkjer in Norway spanning 80 m, see Figure 1 [10, 11].

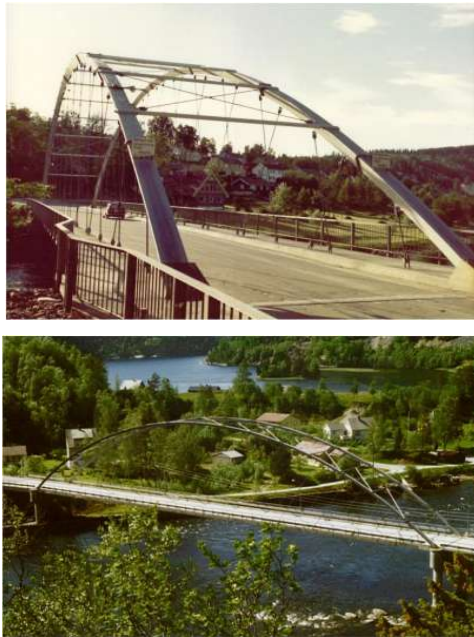


Fig. 1. Network arch at Steinkjer (first) and Bolstadstraumen (second)

In that same year, another two network arches were constructed. The Bolstadstraumen bridge spanning 84 m was also designed by Per Tveit and built in Norway (Fig. 1). Also the Fehmarnsund bridge in Germany spanning 248 m (Fig. 2). The Fehmarnsund bridge is clearly a class bigger than the two Norwegian bridges, not only in span, but also in load carrying capacity. This bridge accommodates two road lanes and a single railway track.



Fig. 2. Fehmarnsund bridge

Purpose

A network arch bridge is a tied arch bridge with inclined hangers intersecting at least twice [3, 5, 10]. Compared with regular tied arch bridges, i.e. those with vertical hangers, the network arch bridge exhibits low moments in both of the chords, which typically leads to important material savings. In Figure 3 it can be seen that the network arch tends to behave like a simple beam, due to its higher stiffness, leading to small deflections. As Figures show, partial loading on half of the span will lead to deflections on the upper and lower chord in the arch with vertical hangers while the arch with inclined hangers only observes deflections on the lower chord.

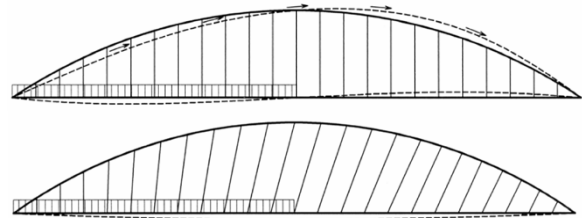


Fig. 3. Tied arch with one set of inclined hangers submitted to partial loading

As a consequence, in the arch with vertical hangers, bending is a decisive factor when it comes to the choice of the cross-section of the chords. In the network arch, bending will only occur due to local loading, and therefore the arch and the tie are only subjected to axial forces.

At the practical engineering of such type structures, engineer faces the necessity of solution of the following problems:

- Definition of optimum design parameters of the arch, in particular, outline shape, rise height, construction;
- Choice of hanger net construction scheme;
- Determination of reasonable hanger inclination angle;
- Calculation of the most rational number of hangers;
- Analysis of solution cost-effectiveness as compared to superstructures with vertical hangers;

This paper presents selection of information both from foreign practice of this type bridge designing and construction, and from the author's own researches. It outlines and formulates general principles of designing the superstructures with the inclined hangers and provides general recommen-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

dations for the practical designing of such super-structures.

Methodology

An analysis was made for a road bridge with 100 meters span consisting of two circular hollow steel arches with a radius of 82 meters and a maximum height of 17 meters, connected at ends by circular hollow section tie-beams. The arches are inclined inward 15 degrees after the tie-beam axis. Arches are connected at the bottom by means of variable height double T section crossbeams positioned at equal distance of 5 meters and at the top are connected by means of circular hollow sections bracings. A reinforced concrete top slab linked by elastic connectors to the crossbeams completes the composite deck. The virtual prototype of the model is performed by finite element simulator, Midas Civil.

Findings

Vertical Hanger System (Langer System)

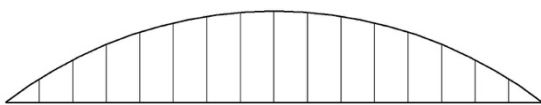


Fig. 4. Tied arch bridge with Langer configuration of hangers

In this configuration the compression forces in the arch increases with the number of hangers as shown in Figure 6. It was observed that with increasing number of hangers, compression increases in the arches, while the hanger's axial efforts decrease as in Figure 5.

Bending moment decreases with the increasing number of hangers, and this difference is remarkable when the number of hangers is lower and the bending moments in the arch grow rapidly as shown in Figure 7.

The tie beam axial efforts variations do not appear in the system with vertical hangers, but the hanger number variation significantly influences the bending moment in the beam because the hangers play the role of elastic supports for tie beam as in Figure 8.

In this configuration the bending moment dictate the arch sections and the best results for the 100 meters span studied was found for the 20 hanger configuration.

As a consequence, in the arch with vertical hangers, bending is a decisive factor when it comes to the choice of the cross-section of the chords.

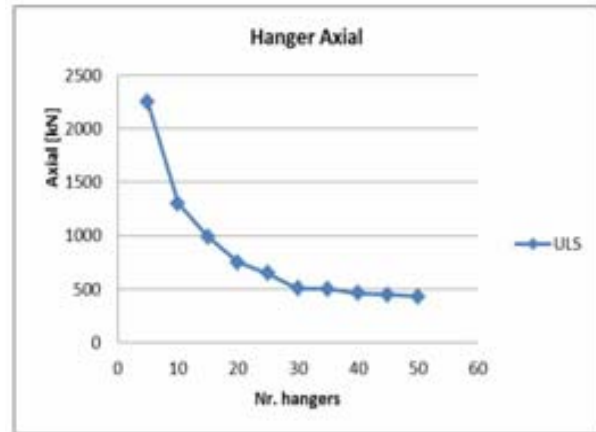


Fig. 5. Variation of axial force in hangers in vertical system depending on the hanger number

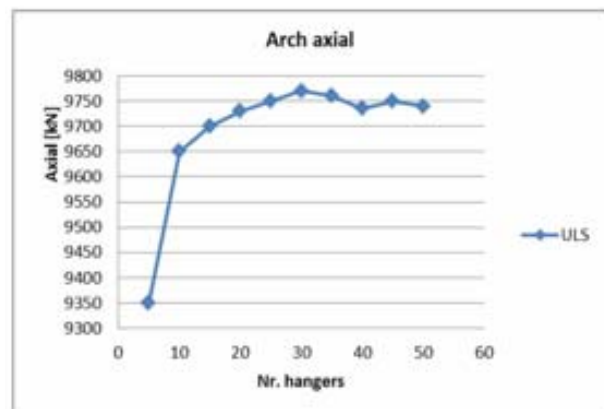


Fig. 6. Variation of axial force in arch in vertical system depending on the hanger number

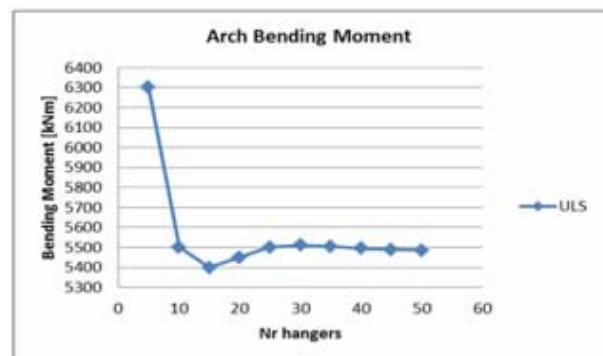


Fig. 7. Bending moment variation in arch in vertical system depending on the hanger number

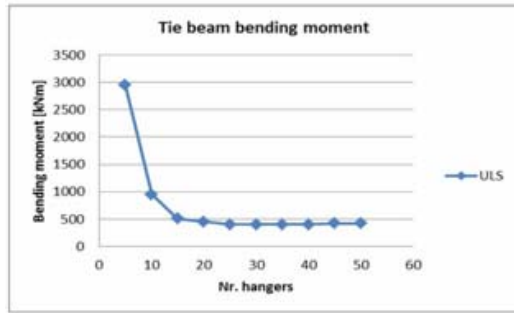


Fig. 8. Bending moment variation in tie beam in vertical system depending on the hanger number

Inclined Hanger System with Constant Slope (P. Tveit theory, Nielsen System)

P. Tveit theory, this method follows the same concept as the previous one [9, 10]. In this case, however, the slope of each hanger varies following, for instance, a linear function like $\Delta\varphi = \alpha \cdot x + \beta$, where x is the number of the hanger, α and β are the parameters that make the hanger arrangement vary along the length of the arch [4, 5, 10]. A general case is illustrated in Figure 9. Assigning a constant slope is a particular case of this configuration, when α is taken as 0.

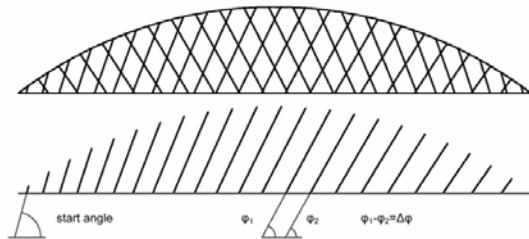


Fig. 9. Tveit net construction scheme

The construction of reverse hangers is carried in inversed manner. Thus the hanger inclination angle variation is considered positive from the right to the left; in the shown scheme, hanger inclination angle becomes steeper from the left to the right [7].

To simplify the manufacturing process and for a uniform distribution of the moment, and to reduce the buckling length in many cases the hangers are disposed at equal distances along the arc [8]. In this case, the unknowns are the locations of nodes on the tie beam. An alternative is to arrange the hangers at equal distances along the tie beam and the arc node locations are the unknowns.

In this system, the hangers are disposed at equal distances along the arches. Angle with the horizontal plane was set 40 degrees.

As shown in Figure 11, relaxed hangers number is relatively high in this arrangement. As with the horizontal angle is greater, the higher the number of the relaxed hangers. In each case analyzed the hangers at the ends were always relaxed.

In Figure 14 we can see that arch compression tends to decrease with the increasing angle to the horizontal plane. This is explained by the fact that more inclined hangers are less tensioned, due to the small horizontal component of the force. The range most effective for this opening is between 60 to 80 degrees. Bending moments in arches shown in Figure 12. Indicate that the suspensions above 75 degrees inclinations involve large bending moments in arches.

In Figure 15 we can see that tie beam axial force tend to increase with the increasing angle while bending moment shown in Figure 13 is influenced only by the angles over 70 degrees.

As a conclusion to this configuration, the lighter the bridge, more inclined hangers are necessary and more hangers are relaxed. Still, this configuration determines sections that lead to about 40% smaller material consumption than in the vertical arrangement of hangers.

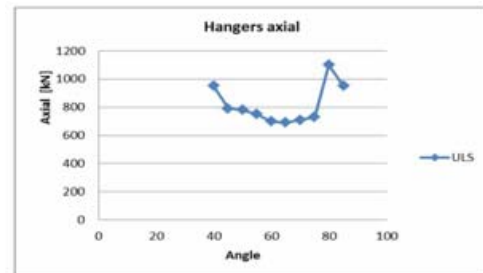


Fig. 10. Variation of axial force in hangers in NIELSEN system depending on the angle

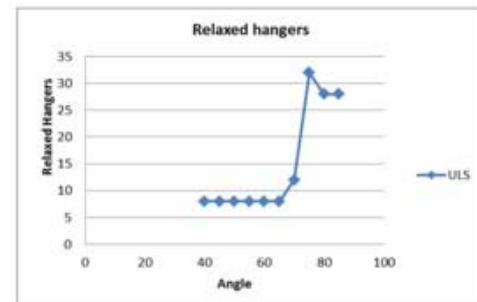


Fig. 11. Number of relaxed hangers in NIELSEN system depending on the angle

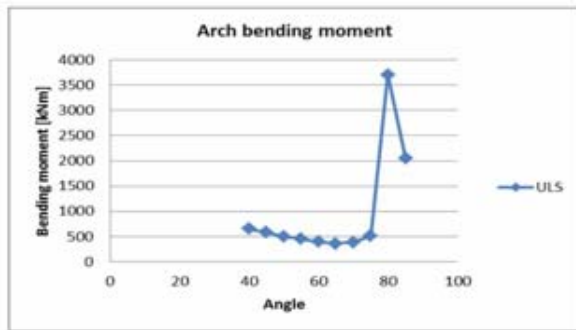


Fig. 12. Bending moment variation in arch in NIELSEN system depending on the angle

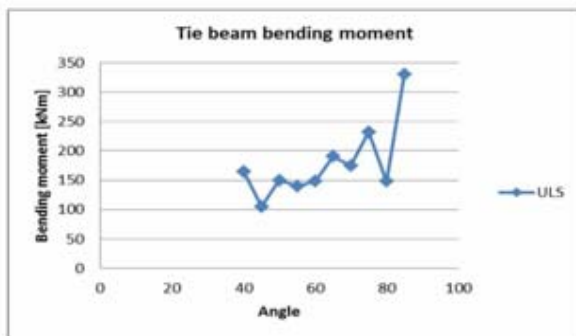


Fig. 13. Bending moment variation in tie beam in NIELSEN system depending on the angle

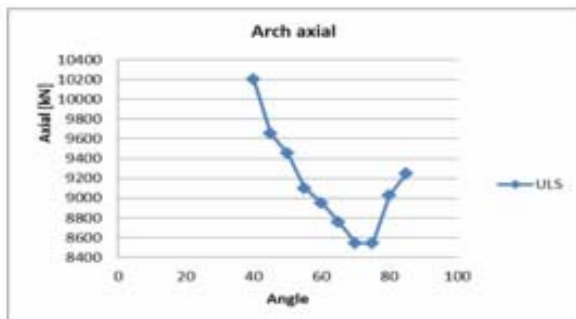


Fig. 14. Axial force variation in arch in NIELSEN system depending on the angle

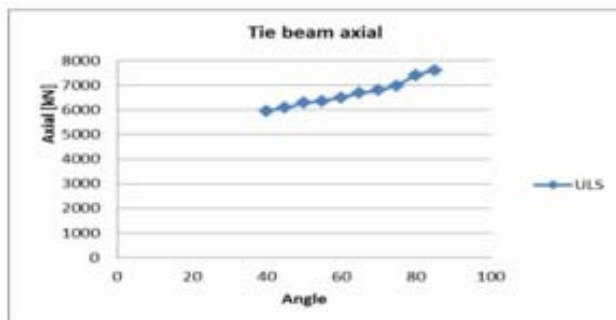


Fig. 15. Axial force variation in tie beam in NIELSEN system depending on the angle

Inclined Hanger System with Variable Slope (B. Brunn and F. Schanack theory, Nielsen System)

B. Brunn and F. Schanack theory is based on the arch thrust line and implies the constant value of hanger inclination angle [1, 2, 5]. This model shows that if the forces in each hanger were approximately equal, the «resulting force» would lie on the radii of the arch circle Figure 16.

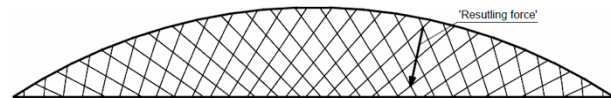


Fig. 16. B. Brunn and F. Schanack net construction scheme

Hence, and in order to simulate a similar structural behavior in the network arch configuration, Brunn and Schanack have defined that the first intersection between hangers below the arch should aim the radii of the arch circle [1, 2]. This way, the only variable involved is the angle between hangers when they cross each other, as illustrated in Figure 17. Here, the hangers are placed with equal space along the upper chord. Throughout this investigation, the angle marked in grey will be the key variable.

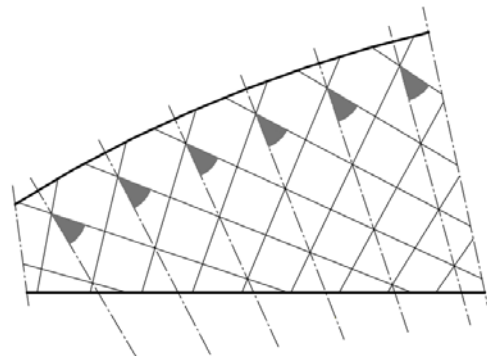


Fig. 17. The variable involved

In this system, each set of hangers starting at angle start and then increase or decrease along the bridge. In this study it was considered a first angle of 55 degrees and a variation of 0.5 degrees/hanger.

Fig. 22 shows that maximum axial force in the arch tends to be smaller as the inclination is greater. Bending moment results from the analysis show that the more inclined hangers, the smaller bending moment as in Figure 20.

The hanger angle variation does not appear to significantly influence the tie beam axial force

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Figure 23. Bending moments along the beam decreases with increasing angle in Figure 21.

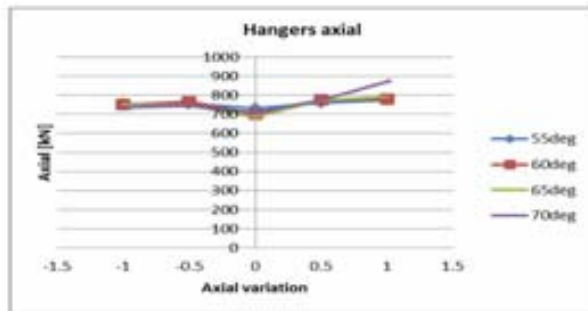


Fig. 18. Axial force variation in hangers in inclined hanger system with variable slope depending on the angle variation

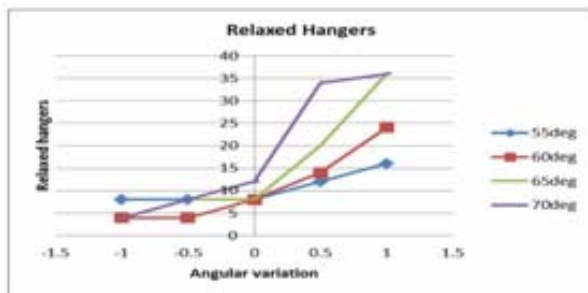


Fig. 19. Number of relaxed hangers in inclined hanger system with variable slope depending on the angle variation

Unlike hanger system with constant inclination, for this span were obtained unfavorable results, which in turn lead to larger sections, namely higher costs. However, comparing to a system with vertical hangers, in this configuration we get a 30% lighter structure and relaxation of the hangers remains the problem.

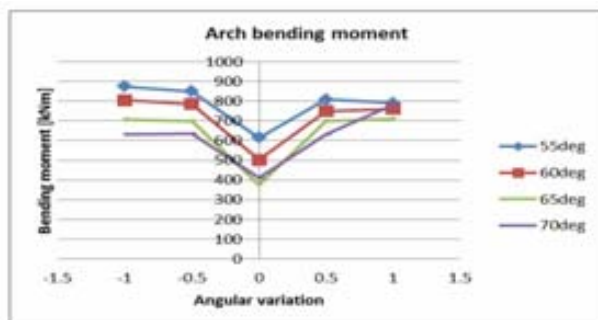


Fig. 20. Bending moment variation in arch in inclined hanger system with variable slope depending on the angle variation

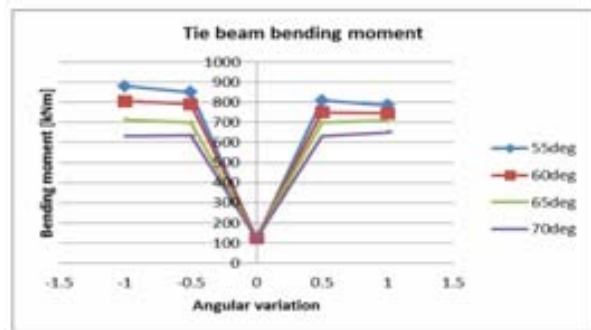


Fig. 21. Bending moment variation in tie beam in inclined hanger system with variable slope depending on the angle variation

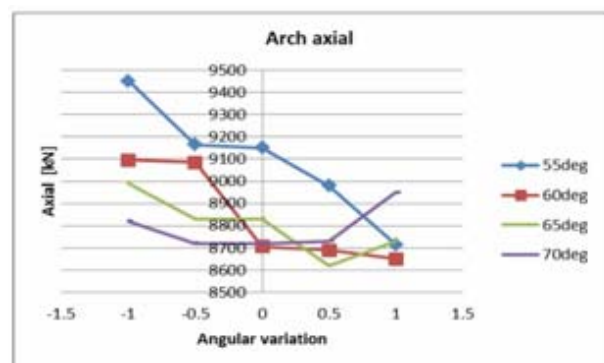


Fig. 22. Axial force variation in arch in inclined hanger system with variable slope depending on the angle variation

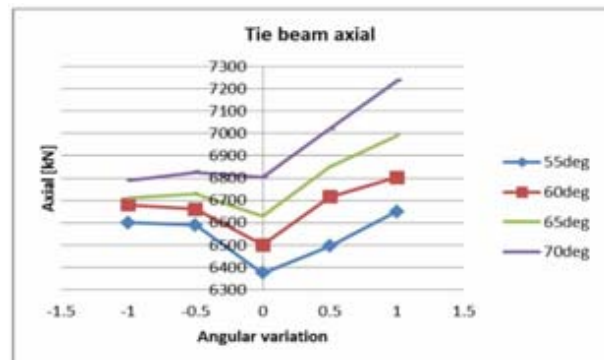


Fig. 23. Axial force variation in tie beam in inclined hanger system with variable slope depending on the angle variation

Originality and practical value

The research conducted by author shows that both nets could be recommended for the practical implementation, and difference between the values of strength criteria of superstructure elements makes about 5%. It may be said that the Brunn-Schanack net provides somewhat less stress value

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

over the top chord (since it generally provides steeper hanger inclination angles), while the Tveit net allows reduction of maximum stresses in hangers and bottom chord of superstructure.

Conclusions

Hanger inclination angles

Following key parameter at the superstructure design is value of hanger inclination angles with respect to the top chord. Considering fatigue, a crossing angle slightly bigger than 45° will give best results, whereas small maximum internal forces occur for angles of about 55° . Results of the research conducted by author show that the best recommended range of values of hanger inclination angle with respect to the top chord makes $55\text{--}70$ degrees.

Too small angles ($<45\text{--}50^\circ$) result in increased forces in hangers, in addition, at the extreme shallow inclination angles, net is overly condensed to the middle of superstructure, which in turn impairs its static performance.

When angle values tend to 90° , the system shows increase in strain-stress state indices of superstructure elements (due to the system tendency to work as the configuration with vertical hangers).

Number of hangers

Important criterion of the inclined ties system performance evaluation is determination of number of hangers, panel pitch over the top chord. Figure 25 shows the curve of effective superstruc-

ture element stress coefficient vs. number of hangers.

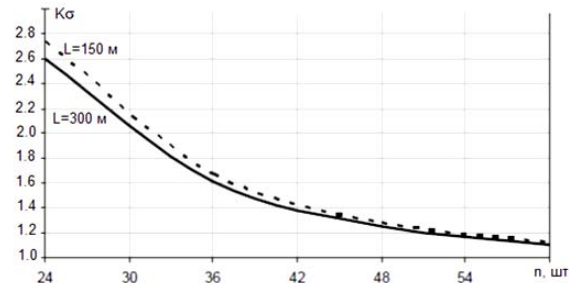


Fig. 24. Curve of superstructure strain-stress state indices vs. number of hangers

Relationship between the number of hangers and superstructure strain-stress state is not linear, but rather hyperbolic with expressed asymptote. Further reduction of number of hangers results in increase in the rate of change of superstructure strain-stress state criteria. The hangers and hanger connections 100 m network arch should be equipped with about 48 hangers per arch plane, which has economical and structural reasons. The extra costs caused by additional hangers and their connections have to be balanced against the material costs that can be saved due to smaller internal forces in arches and tie.

Generally, tied-arch bridge superstructures with the inclined hangers are very efficient systems, and under most circumstances, these can successfully compete with other superstructure configurations even in case of relatively long (400–600 m) span length.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Brunn, B. Calculation of a double track railway network arch bridge applying the European standards / B. Brunn, F. Schanack. – Dresden, Germany : TU-Dresden, 2003. – 320 p.
2. Brunn, B. Network arches for railway bridges / B. Brunn, F. Schanack, U. Steimann // Arch Bridges IV. Advances in Assessment, Structural Design and Construction. – Barcelona, 2004. – P. 671–680.
3. Pfaffinger, M. Determination of load lines for train crossings on a tied archbridge / M. Pfaffinger, M. Mensinger, M. Haslbeck // Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure : Proc. of the Fifth Intern. Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (16–19 October). – Delft, 2016. – P. 216–217.
4. Ren, W.-X. Experimental and Analytical Modal Analysis of Steel Arch Bridge / W.-X. Ren, T. Zhao, I. E. Harik // Journal of Structural Engineering. – 2004. – Vol. 130. – Iss. 7. – P. 1022–1031. doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2004)130:7(1022).
5. Sasek, L. Getting on the Network. Innovation in arch design / L. Sasek // BRIDGE Design & Engineering. – 2005. – Vol. 11, No. 40. – P. 39–40.
6. Schanack, F. Analysis of the structural performance of network arch bridges / F. Schanack, B. Brunn // The Indian Concrete Journal. – 2009. – Vol. 83. – P. 7–13.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

7. Teich, S. Fatigue Optimization in Network Arches / S. Teich // Arch Bridges IV. Advances in Assessment, Structural Design and Construction. – Barcelona, 2004. – P. 691–700.
8. Teich, S. The network arch bridge, an extremely efficient structure. Structural behavior and construction / S. Teich // IABSE Symposium Report. – 2011. – Vol. 92. – Iss. 1. – P. 1–9. doi: 10.2749/222137806796205776.
9. Tveit, P. An Introduction to the Optimal Network Arch. Structural Engineering International / P. Tveit. – Structural Engineering International. – 2007. – Vol. 17, No. 2. – P. 184–187. doi: 10.2749/101686607780680727.
10. Tveit, P. Optimal design of network arches / P. Tveit // Towards a Better Built Environment: Innovation, Sustainability, Information Technology : Proceedings of Symposium. – Melbourne, Australia, 2002. – P. 55–65.
11. Tveit, P. Optimal network arches save 50 to 70% of the steel / P. Tveit // IABSE Conf. Proc. – Zurich, 2005. – P. 401–408. doi: 10.2749/222137805796271594.
12. Yang, J. Vibration of hangers on a tied-arch bridge due to vehicles / J. Yang, J. Li // Mechanic Automation and Control Engineering : Proceedings of the International Conference (26–28 June). – Wuhan, China, 2010. doi: 10.1109/MACE.2010.5536164.

В. А. САМОСВАТ^{1*}, ЧЖАН РОНЛИН², О. А. ГОЛОЛОВА³, С. Ю. БУРЯК⁴

^{1*}Каф. «Гражданское строительство», Ланьчжоуский транспортный университет, Аннин Вест Роуд, 88, Ланьчжоу, пров. Ганьсу, Китай, 730070, тел. +86 (156) 931 722 74, эл. почта 2087934080@qq.com, ORCID 0000-0002-4062-0509

²Каф. «Гражданское строительство», Ланьчжоуский транспортный университет, Аннин Вест Роуд, 88, Ланьчжоу, пров. Ганьсу, Китай, 730070, тел. +86 (093) 149 386 26, эл. почта mogzrlggg@163.com, ORCID 0000-0002-6576-4138

³Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел.+38(056) 373 15 04, эл. почта gololobova_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

⁴Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел.+38 (056) 373 15 04, эл. почта ser.buryak@gmail.com, ORCID 0000-0002-8251-785X

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ АРОЧНЫХ МОСТОВ С ГИБКИМИ НАКЛОННЫМИ ПОДВЕСКАМИ

Цель. В научной работе предполагается провести исследование и анализ конструкции подвесок: а именно – устойчивости арочных комбинированных мостовых систем с гибкими наклонными подвесками, которые пересекают друг друга как минимум дважды. Также необходимо сделать сравнительный анализ с другими видами конструкций подвесок. **Методика.** В работе авторами исследуется большое количество параметров, определяющих их влияние на распределение усилий в арке. В итоге для всех параметров определяются оптимальные значения. На основе этих оптимальных значений разрабатываются рекомендации к проектированию, которые послужат оптимизации проектирования арочной системы. Для исследования этой проблемы авторы используют трехмерную модель конечных элементов и экспериментальным путем определяют наиболее подходящее решение для автомобильного моста с пролетом 100 метров, состоящего из двух стальных арок, расположенных на дороге с двумя полосами движения, и среднего трафика. Расчет виртуального прототипа модели осуществляется методом конечных элементов в программном комплексе Midas Civil. **Результаты.** В исследовании балки моста бетонная затяжка представляется лучшим решением, учитывая работу конструкции сетчатых арок. Но экономические преимущества, основанные на облегченном монтаже, могут привести к тому, что стальная или композитная балки моста будут более выгодной альтернативой. Проектные требования и местные условия каждого конкретного моста будут определять лучший экономический эффект при проектировании. **Научная новизна.** Для обеспечения комфортности пассажиров, стабильности и непрерывности движения пути уменьшаются деформации мостовых конструкций. Сетчатая арка представляет собой жесткую конструкцию с небольшими отклонениями и поэтому удовлетворяет требованиям даже для высокоскоростных железнодорожных дорог. Сетчатые арочные мосты с бетонной затяжкой обычно экономят более половины стали, необходимой для связки арки с вертикальными подвесками и бетонной затяжкой. **Практическая значимость.** По результатам данного исследования конструктивные рекомендации, указанные в статье, приводят к экономии около 60 % конструкционной стали, по сравнению с обычными комбинированными арочными мостами с вертикальными подвесками.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Ключевые слова: сетчатый арочный мост; вертикальные подвески; наклонные подвески; арка; теории систем подвесок; количество подвесок; угол наклона подвесок

В. О. САМОСВАТ^{1*}, ЧЖАН РОНЛИН², О. О. ГОЛОЛОБОВА³, С. Ю. БУРЯК⁴

^{1*}Каф. «Цивільне будівництво», Ланьчжоуський транспортний університет, Аннин Вест Роуд, 88, Ланьчжоу, пров. Ганьсу, Китай, 730070, тел. +86 (156) 931 722 74, ел. пошта 2087934080@qq.com, ORCID 0000-0002-4062-0509

²Каф. «Цивільне будівництво», Ланьчжоуський транспортний університет, Аннин Вест Роуд, 88, Ланьчжоу, пров. Ганьсу, Китай, 730070, тел. +86 (093) 149 386 26, ел. пошта mogzrlggg@163.com, ORCID 0000-0002-6576-4138

³Каф. «Автоматика, телемеханіка і зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта gololobova_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

⁴Каф. «Автоматика, телемеханіка і зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта ser.buryak@gmail.com, ORCID 0000-0002-8251-785X

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ АРОЧНИХ МОСТІВ ІЗ ГНУЧКИМИ ПОХИЛИМИ ПІДВІСКАМИ

Мета. В науковій роботі передбачається провести дослідження і аналіз конструкції підвісок: а саме – стійкості арочних комбінованих мостових систем із гнучкими похилими підвісками, які перетинають один одного як мінімум двічі. Також необхідно зробити порівняльний аналіз із іншими видами конструкцій підвісок. **Методика.** У роботі авторами досліджується велика кількість параметрів, які визначають їх вплив на розподіл зусиль в арці. У підсумку для всіх параметрів визначаються оптимальні значення. На основі цих оптимальних значень розробляються рекомендації щодо проектування, які слугуватимуть оптимізації проектування арочної системи. У дослідженні цієї проблеми автори використовують тривимірну модель кінцевих елементів та експериментальним шляхом визначають найкраще рішення для автомобільного мосту з прольотом 100 метрів, що складається з двох сталевих арок, розташованих на дорозі з двома смугами руху, та середнього трафіку. Розрахунок віртуального прототипу моделі здійснюється методом кінцевих елементів у програмному комплексі Midas Civil. **Результати.** У дослідженні балки моста бетонна затяжка представляється кращим рішенням, враховуючи роботу конструкції сітчастих арок. Але економічні переваги, засновані на полегшеному монтажі, можуть призвести до того, що стальна або композитна балки моста будуть кращою альтернативою. Проектні вимоги та місцеві умови кожного конкретного мосту будуть визначати кращий економічний ефект при проектуванні. **Наукова новизна.** Для забезпечення комфортності пасажирів, стабільності та безперервності руху шляху зменшуються деформації мостових конструкцій. Сітчаста арка являє собою жорстку конструкцію з невеликими відхиленнями і тому задовольняє вимогам навіть для високошвидкісних залізничних доріг. Сітчасті арочні мости з бетонною затяжкою зазвичай економлять більше половини сталі, необхідної для зв'язку арки з вертикальними підвісками та бетонною затяжкою. **Практична значимість.** За результатами даного дослідження конструктивні рекомендації, наведені в статті, призводять до економії близько 60 % конструкційної сталі, в порівнянні зі звичайними комбінованими арочними мостами з вертикальними підвісками.

Ключові слова: сітчастий арочний міст; вертикальні підвіски; похилі підвіски; арка; теорії систем підвісок; кількість підвісок; кут нахилу підвісок

REFERENCES

1. Brunn, B., & Schanack, F. (2003). Calculation of a double track railway network arch bridge applying the European standards. Germany: TU-Dresden.
2. Brunn, B., Schanack, F., & Steimann, U. (2004). Network arches for railway bridges. In P. Roca, & C. Molins, (Eds.). *Arch Bridges IV, Advances in Assessment, Structural Design and Construction*. (pp. 671-680). Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering.
3. Pfaffinger, M., Mensinger, M., & Haslbeck, M. (2016). Determination of load lines for train crossings on a tied archbridge. In J. Bakker, D. M. Frangopol, & K. van Breugel, (Eds.). *Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure: Proceedings of the Fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2016), 16-19 October 2016, Delft, the Netherlands*. (pp. 216-217). London: CRC Press/Balkema.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

4. Ren, W.-X., Zhao, T., & Harik, I. E. (2004). Experimental and analytical modal analysis of steel arch bridge. *Journal of Structural Engineering*, 130 (7), 1002-1031. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:7(1022)
5. Sasek, L. (2005). Getting on the Network. Innovation in arch design. *BRIDGE Design & Engineering*, 11 (40), 39-40.
6. Schanack, F., & Brunn, B. (2009). Analysis of the structural performance of network arch bridges. *The Indian Concrete Journal*, 83, 7-13.
7. Teich, S. (2004). Fatigue Optimization in Network Arches. In P. Roca, & C. Molins, (Eds.). *Arch Bridges IV, Advances in Assessment, Structural Design and Construction*. (pp. 691-700). Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering.
8. Teich, S. The network arch bridge, an extremely efficient structure. Structural behavior and construction / S. Teich // IABSE Symposium Report. – 2011. – Vol. 92. – Iss. 1. – P. 1–9, doi: 10.2749/222137806796205776
9. Tveit, P. (2007). An Introduction to the Optimal Network Arch. *Structural Engineering International*, 17 (2), 184-187. doi:10.2749/101686607780680727
10. Tveit, P. (2002). Optimal design of network arches. *Proceedings of the Symposium Towards a Better Built Environment – Innovation, Sustainability, Information Technology, Melbourne, Australia, 11-13 September, 2002*, 55-65.
11. Tveit, P. (2005). Optimal network arches save 50 to 70% of the steel. In *IABSE Symposium Report* (pp. 401-408). Zurich: IABSE. doi:10.2749/222137805796271594
12. Yang, J., & Li, J. (2010). Vibration of hangers on a tied-arch bridge due to vehicles. *Proceedings of the International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, 26-28 June 2010, Wuhan, China. doi:10.1109/MACE.2010.5536164

Prof. Yu Lu Song, Dr. Sc. (Chine); Prof. V. I. Havryliuk, Dr. Sc. (Phys.-Math.) (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: June 14, 2017

Received: Sept. 27, 2017

УДК 624.04

С. М. СТОВПНИК^{1*}, А. Л. ГАН^{2*}, Є. А. ЗАГОРУЙКО^{3*}, Л. В. ШАЙДЕЦЬКА^{4*}

^{1*}Каф. «Геобудівництво та гірничі технології», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», вул. Борщагівська, 115/3, Київ, Україна, 03056, тел. +38 (067) 848 59 77, ел. пошта stansto@i.ua, ORCID 0000-0001-5664-8680

^{2*}Каф. «Геобудівництво та гірничі технології», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», вул. Борщагівська, 115/3, Київ, Україна, 03056, тел. +38 (097) 653 05 66, ел. пошта gan@geobud.kiev.ua, ORCID 0000-0003-0832-1338

^{3*}Каф. «Геобудівництво та гірничі технології», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», вул. Борщагівська, 115/3, Київ, Україна, 03056, +38 (063) 614 41 01, ел. пошта zagoruyko@geobud.kiev.ua, ORCID 0000-0003-2710-3934

^{4*}Каф. «Геобудівництво та гірничі технології», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», вул. Борщагівська, 115/3, Київ, Україна, 03056, тел. +38 (067) 447 59 14, ел. пошта shaydetskaya_lubov@ukr.net, ORCID 0000-0002-6593-0255

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ВПЛИВУ НА ТЕХНОЛОГІЧНУ СТІЙКІСТЬ МЕТРОТУНЕЛЮ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ В НАМИВНИХ МАСИВАХ

Мета. На основі аналізу результатів комп'ютерного моделювання та лабораторних досліджень у науковій роботі необхідно встановити залежність впливу змін гідравлічного рівня ґрунтових вод на стійкість обробки тунелів метрополітену за рахунок розвитку деформацій оточуючого намівного масиву. **Методика.** Методичну основу комплексу досліджень складають аналіз та узагальнення відомих наукових результатів та практичного досвіду прогнозування і попередження деформацій обробок тунелів та оточуючого ґрунтового масиву, а також комп'ютерне моделювання критичного напружено-деформованого стану обробки тунелю при зміні гідравлічного рівня ґрунтових вод. **Результати.** В процесі технологічного спорудження та під дією безнапірних підземних вод при експлуатації тунелів ліній метрополітену мілкового закладання стійкість суцільно-секційної обробки забезпечується завдяки рівномірному гідростатичному обтисканню обробки, при цьому осідання тунелю знаходяться в межах допустимих значень. Результати досліджень показують, що при зміні рівня підземних вод по обидва боки тунелю може виникати різний гідростатичний тиск. При цьому з'являється перерозподіл напружень ґрунтового масиву навколо поперечного перерізу тунелю, а це, в свою чергу, призводить до виникнення додаткових нерівномірних деформацій та розкриття тріщин обробки тунелю під час експлуатації. **Наукова новизна.** Авторами роботи вперше встановлено вплив зміни гідростатичного тиску, що може виникати внаслідок коливання рівня підземних вод, на суцільно-секційну обробку тунелів ліній метрополітену мілкового закладання через вторинне осідання ґрунту. Визначені умови виникнення вторинного осідання ґрунту та встановлено характер протікання деформацій у період експлуатації тунелів мілкового закладання. **Практична значимість.** На стадії проектування ліній метрополітену мілкового закладання необхідно враховувати можливість нерівномірного осідання від дії гідростатичного тиску в період експлуатації. Це дозволить уникнути додаткових деформацій у сезонний період, зменшити кількість поточних ремонтів, підвищити надійність та збільшити термін експлуатації конструкцій обробки тунелів.

Ключові слова: стійкість масиву; напружено-деформований стан; гідродинамічний вплив; обробка тунелю; намівний масив

Вступ

Велику кількість українських міст утворено по берегах водойм. Від середини XX століття розвиток великих міст відбувався через розширення забудови у тому числі і наміванням ґрунтових масивів у межах річкової пойми. При

цьому транспортне сполучення в новоутворених мікрорайонах забезпечується лініями метрополітену мілкового закладання. Аналіз раніше проведених досліджень [1–3, 5] показує, що характерними ознаками намівних ґрунтів водонасичених піщаних масивів є нерівномірність фракційного складу з наявністю значної кількості пилюватих часток,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

абсолютний гідростатичний розподіл напружень та практично відсутнє зчеплення між частками ґрунту, які знаходяться у суспензованому стані. Сукупність цих, змінних у часі, факторів призводить до безперервного перерозподілу напружень у масиві, у наслідок чого погіршується стійкість водонасичених ґрунтів, виникають додаткові деформації, які впливають на підземні споруди.

Тому дослідження гідродинамічного впливу на стійкість підземних споруд метрополітенів мілкого закладання є актуальною задачею.

Мета

Для встановлення впливу змін гідравлічного рівня ґрунтових вод на стійкість обробки тунелів метрополітену була поставлена задача дослідження експлуатаційної надійності метротунелів в умовах водонасичених піщаних ґрунтів при безперервному функціонуванні магістральних транспортних потоків, що характерно для мегаполісів.

Методика

Для отримання теоретичних даних авторами виконано узагальнення відомих з літератури результатів досліджень динамічного впливу на технологічну стійкість обробок тунелів метрополітенів мілкого закладання [1–10].

Методичну основу комплексу досліджень склали: аналіз наукових результатів та практичного досвіду прогнозування деформацій обробок тунелів в залежності від напружено-деформованого стану оточуючого ґрунтового масиву, комп'ютерне моделювання критичного розвитку переміщень обробки тунелю при зміні гідравлічного рівня ґрунтових вод.

Результати

Ущільнення міської забудови та аварійні ситуації на гідротехнічних комунікаціях суттєво змінюють первісні гідрогеологічні умови техногенного масиву, які суттєво відрізняються від гідрологічних даних на стадії проектування метрополітену. У наслідок цього виникають порушення експлуатації діючого метрополітену, які, на прикладі Оболонської гілки Київського метрополітену, можуть

приводити до втрати герметичності гідроізоляції та супроводжуватись потраплянням води та виносом ґрунтів у тунель.

Для прогнозування майбутньої експлуатаційної надійності ділянок метрополітену, що знаходяться в подібних умовах, було виконано моделювання напружено-деформованого стану обробки під дією перетоків ґрунтових вод.

Детально проаналізовані умови ділянки Сирецько–Печерської лінії в межах Харківського відгалуження. У намівному масиві, представленому переважно водонасиченими пісками, оскільки, супіски та суглинки присутні в незначній кількості, виявлена незначна ділянка заторфованості (рис.1).

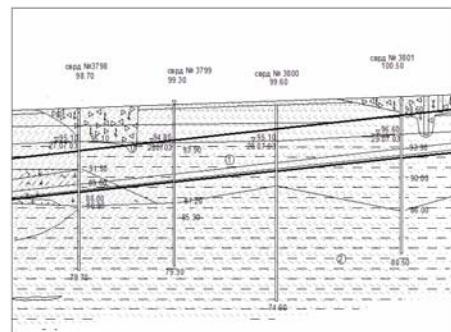


Рис. 1. Інженерно-геологічні умови метротунелю мілкого закладання Сирецько–Печерської лінії

Fig. 1. Engineering and geological conditions for the metro-tunnel of shallow depth, Syretsko-Pechersk line

Фізико-механічні характеристики ґрунтів цієї ділянки лінії метрополітену наведені в таблиці 1.

Особливістю умов цієї ділянки є змінний рівень перетинання підземним потоком вертикального перерізу тунелю (від перевищення на 1,2 м над перекриттям до перепаду на висоті 4,4 м від рівня лоткової частини тунелю).

Безпосередньо в масиві тунель розташований похило (під ухилом 4‰) при змінній глибині (1,8–5,2 м) від денної поверхні. Конструкція тунелю представлена стандартизованою суцільносекційною обробкою (ССО) у вигляді залізобетонної прямокутної конструкції коробового перерізу (рис. 2).

За допомогою програмних засобів були змодельовані стадії технологічного процесу спорудження метротунелю траншейним

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

способом, які включають: забивку шпунтового огороження, осушення котловану за допомогою водопониження рівня ґрунтових вод на період будівництва, виймання ґрунтів до рівня лоткової частини, монтування обробки ССО, зворотне засипання та вилучення шпунтів.

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунтів

Table 1

Physical and mechanical characteristics of soils

Вид ґрунту		Щільність ґрунту ρ_0 , т/м ³	Щільність сухого ґрунту ρ_d , т/м ³	Коефіцієнт фільтрації, K_f , м/добу	Кут внутрішнього тертя φ'' , град	Питоме зчеплення, c'' , МПа	Модуль деформації, E_0 , МПа
1	Пісок дрібний мало вологий середньої щільності	1,72	1,65	5,0	32	0,002	20
2	Пісок середньої крупності насичений водою, щільний	1,95	1,66	35	32	0,001	30

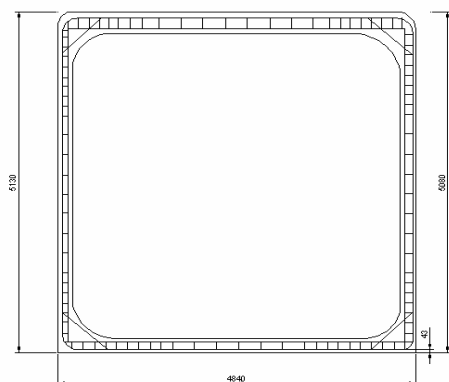


Рис. 2. Конструкція обробки ССО тунелю мілко́го закладання

Fig. 2. The construction design of tunnel ESP of shallow depth

Послідовне моделювання технології робіт дозволило отримати параметри розподілу напружено-деформованого стану ґрунтів навколо конструкції з врахуванням інтегральної дії напруг на кожному етапі робіт, яке суттєво відрізняється від первісного природного. Одним з елементів суттєвого впливу на розподіл напруг є можливість залишення окремих шпунтин (за досвідом «ПАТ «Київметробуд» доля вилучених паль не перевищує 30–40 %).

На останньому етапі відновлювалась дія гідростатичного тиску ґрунтових вод та оцінювався напружено-деформований стан масиву. Було встановлено, що стійкість стін котловану суттєво порушувалась, тому передбачено додавання в конструкцію огороження котловану розпірних елементів.

Далі за допомогою нормативного програмного комплексу «SCAD» були створені кілька комп'ютерних моделей з врахуванням нерівномірного тиску ґрунтових вод та ймовірним підмивом з іншого боку. Конструкція обробки змодельована елементом – плитою, основа під лотковою частиною секції тунелю моделюється коефіцієнтом постеля (вінклерова основа), навантаження від ґрунту та підземних вод на стіни секції задано рівномірно-розподіленим тиском. Величина підмиву змінювалась в межах 0–30 %.

Відповідно до отриманого розподілу навантажень визначені показники напружено-деформованого стану конструкції обробки (рис. 3).

Слід зазначити, що гідростатичне обтискання конструкції ґрунтовими водами забезпечує рівномірний перерозподіл напруг в ній, без виникнення критичних станів, а загальне осідання конструкції не перевищує 3,8 мм. Таким чином встановлено, що вплив безнапірного горизонту ґрунтових вод на стійкість конструкції є обмеженим.

За наявності гідравлічного градієнту в масиві виникає направлена фільтрація, напрямком якої обумовлюється різницею глибин рівня води. Найбільш складним представляється випадок, коли підземні потоки протікають перпендикулярно осі тунелю. Відповідний аналіз гідрогеологічних умов дозволив припустити можливість виникнення

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

барражного ефекту на ділянці перетинання підземного потоку і споруди тунелю.

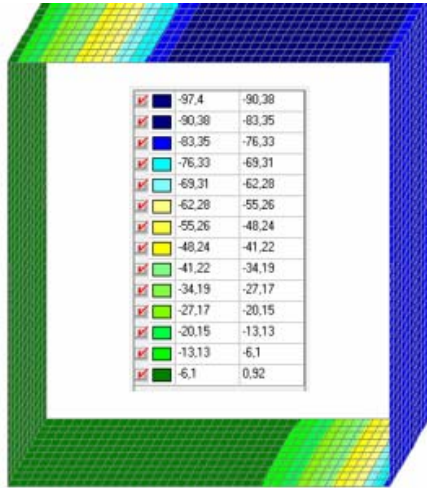


Рис. 3. Вертикальні деформації конструкції обробки при 30 %-му підмиву, мм

Fig. 3. Vertical deformations of the construction design at 30% of washout, mm

Внаслідок цього виникає локальний перепідйом ґрунтових вод уздовж бокової стінки тунелю, який може призвести до переливання частини потоку через склепіння обробки і подальшого спадання рівня води з протилежної сторони тунелю. Ця робоча гіпотеза була прийнята з певними припущеннями для визначення додаткових нерівномірних деформацій споруди.

Згідно з цією гіпотезою була створена комп'ютерна модель з урахуванням вимивання ґрунту з-під основи тунелю. У результаті моделювання було встановлено, що на ділянці тунелю, яка перекривається підземним потоком, виникають додаткові деформації нерівномірного осадження тунелю (рис. 4, 5).

Цей ефект підтверджено при повторному перерахунку напруженого стану обробки за програмою «SCAD», який показав, що перетоки води через перекриття обробки призводить до розмивання ґрунтової основи під протилежною до напрямку потоку стінкою обробки, у результаті чого виникає нерівномірне навантаження на лоткову частину тунелю, що посилює розмив основи.

Наступне зменшення площі обпирання в основі тунелю викликає концентрацію експлуатаційних напруг на одній стороні

обробки (рис. 6.). А це, у свою чергу, призводить до нерівномірної осадки тунелю.

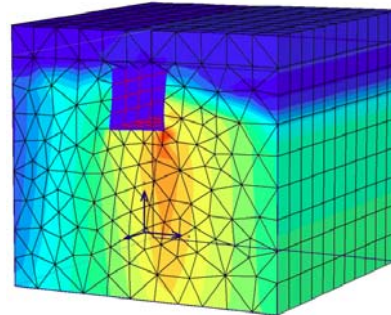


Рис. 4. Характер нерівномірної осадки тунелю

Fig. 4. Nature of the uneven settlement of the tunnel

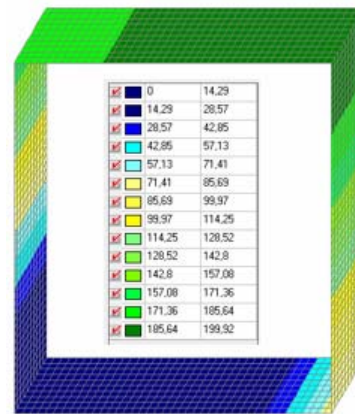


Рис. 5. Сумарні деформації осадження тунелю при 30 %-му підмиву, мм

Fig. 5. Total deformations of the tunnel precipitation at 30% of washout, mm

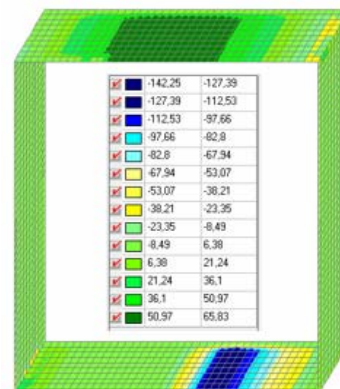


Рис. 6. Нерівномірний напружений стан обробки при розмиванні основи при 30 %-му підмиву, т·м/м

Fig. 6. Uneven stress state of the treatment when the water erosion of base at 30% of washing-out, t·m/m

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

За результатами розрахунків була побудована залежність можливого крену від утвореного нерівномірного перепаду рівня підземних вод по обидва боки тунелю (рис. 7).

З рисунку 7 видно, що відхилення тунелю при розмиванні основи носить нелінійний характер. При чому в самих екстремальних умовах, коли з одного боку намівні ґрунти повністю знаходяться у водонасиченому стані, а з іншого боку водонасиченні ґрунти знаходяться на рівні підшви тунелю (тобто перед переливом через склепіння обробки), без розмиву підшви відхилення тунелю від осі становить 62,09 мм. Відповідно зі збільшенням ступеню розмивання ґрунту в основі тунелю, крен буде збільшуватись і становить: при 10 % розмиві основи відхилення тунелю 81,23 мм; при 20 % – 118,08 мм; при 30 % – 175,83 мм; при 40 % – 260,26 мм.

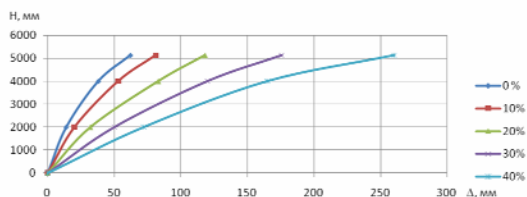


Рис. 7. Відхилення тунелю від вертикальної осі в залежності від градієнта уклону рівня підземних вод

Fig. 7. Deviation of the tunnel from the vertical axis depending on the gradient of groundwater level

Наукова новизна та практична значимість

Авторами роботи вперше встановлено залежність відхилення тунелю метрополітену мілкового закладання від вертикальної осі від градієнта уклону рівня підземних вод, що виникає за рахунок розмивання ґрунтової

основи під протилежною до напрямку потоку стінки обробки. Цей процес призводить до вторинного осідання, носить нелінійний характер і для нестійких намівних ґрунтів м. Києва коливається (у межах від 62,09 мм до 260,26 мм в залежності від ступеня розмиву підшви тунелю).

Визначені умови виникнення вторинного осідання тунелю метрополітену, яке виникає внаслідок нерівномірного навантаження на лоткову частину тунелю (за рахунок локального перепадів ґрунтових вод уздовж бокової стінки тунелю), та встановлено характер протікання деформацій в період експлуатації тунелів мілкового закладання.

На стадії проектування ліній метрополітену мілкового закладання необхідно враховувати можливість нерівномірного осідання від дії гідростатичного тиску в період експлуатації. Це дозволить уникнути додаткових деформацій у сезонний період, зменшити кількість поточних ремонтів та підвищити надійність і термін експлуатації конструкцій обробки тунелів.

Висновки

1. У процесі технологічного спорудження та під дією безнапірних підземних вод стійкість суцільносекційної обробки забезпечується завдяки рівномірному гідростатичному обтисканню обробки, а осідання при цьому знаходяться в межах допустимих значень.

2. У місцях перетину підземного потоку і споруди тунелю можуть виникати перетікання води через перекриття тунелю з наступним одностороннім розмиванням грантової основи, що призводить до втрати поперечної стійкості споруди і, як наслідок, до виникнення небезпечних концентрацій напруг в бічній і лотковій частині обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Протосеня, А. Г. Метод прогноза напряженного состояния обделки перегонных тоннелей для инженерно-геологических условий г. Ханоя / А. Г. Протосеня, До Нгок Тхай // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о земле. – 2017. – Вып. 1. – С. 145–152.
2. Стовпник, С. Н. Исследование взаимодействия цельносекционной обделки мелкого заложения с водонасыщенным намыльным массивом при динамическом влиянии метropоезда / С. Н. Стовпник, Р. В. Пазюк // Строительство и архитектура : материалы междунар. науч.-практ. конф. (26–27 ноября 2015 г.). – Ростов-на-Дону, 2015. – Т. I. – С. 390–399.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

3. Стовпник, С. М. Напружено-деформований стан обробки тунелю метрополітену мілкового закладання в водонасичених пісках / С. М. Стовпник, С. В. Бородай, В. Г. Кравець // Енергетика. Екологія. Людина : Третя наук.-техн. конф. (14 квітня 2011 р.). – Київ, 2011. – С. 112–114.
4. Al-Baali, M. A Note on Using Partitioning Techniques for Solving Unconstrained Optimization Problems on Parallel Systems / M. Al-Baali, C. Triki // SQU Journal for Science. – 2015. – Vol. 20, no. 2. – P. 12–18. doi: 10.24200/squjs.vol20iss2pp12-18.
5. Berset, N. Engineering Geology of Underground Excavation – Lötschberg Base Tunnel Case Study. Pt. 2 / N. Berset. – Zürich : ETH Zurich, 2016. – 51 p.
6. Comprehensive Prediction of Fissure Water in Extra-Long Deep Tunnel and Its Application [Електронний ресурс] / L. Li, S. Shi, S. Li, Z. Xu, Z. Zhou // Chinese Journal of Underground Space and Engineering. – 2013. – Vol. 9, no. 3. – Режим доступу: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotat-BASE201303024.htm. – Назва з екрана. – Перевірено : 27.10.2017.
7. Frequency anomaly of groundwater level before major earthquakes in Taiwan / T.-K. Yeh, C.-H. Chen, C.-H. Wang, S. Wen // Proc. of the Intern. Association of Hydrological Sciences (PIAHS) (12 Nov. 2015). – 2015. – Vol. 372. – P. 101–104. doi:10.5194/piahs-372-101-2015.
8. Infiltration into two-layered soil: the Green-Ampt and Averyanov models revisited. Transport in Porous Media / Ali Al-Maktoumi, A. Kacimov, S. Al-Ismaily, H. Al-Busaidi, S. Al-Saqri // Transport in Porous Media. – 2015. – Vol. 109. – Iss 1. – P. 169–193. doi:10.1007/s11242-015-0507-8.
9. Modelling of transient water table response to managed aquifer recharge: A Lagoon in Muscat, Oman / A. R. Kacimov, V. Zlotnik, A. Al-Maktoumi, R. Al-Abri // Environmental Earth Sciences Journal (Springer). – 2016. Vol. 75. – Iss. 4. – P. 318. doi:10.1007/s12665-015-5137-5.
10. Porewater pressure control on subglacial soft sediment remobilization and tunnel valley formation: A case study from the Alnif tunnel valley (Morocco) / E. Ravier, J.-F. Buoncristiani, M. Guiraud [et al.] // Sedimentary Geology. – 2014. – Vol. 304. – P. 71–95. doi: 10.1016/j.sedgeo.2014.02.005.

С. М. СТОВПНИК^{1*}, А. Л. ГАН^{2*}, Е. А. ЗАГОРУЙКО^{3*}, Л. В. ШАЙДЕЦКАЯ^{4*}

^{1*}Каф. «Геостроительство и горные технологии», Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», ул. Борщаговская, 115/3, Киев, Украина, 03056, тел. +38 (067) 848 59 77, эл. почта stansto@i.ua, ORCID 0000-0001-5664-8680

^{2*}Каф. «Геостроительство и горные технологии», Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», ул. Борщаговская, 115/3, Киев, Украина, 03056, тел. +38 (097) 653 05 66, эл. почта gan@geobud.kiev.ua, ORCID 0000-0003-0832-1338

^{3*}Каф. «Геостроительство и горные технологии», Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», ул. Борщаговская, 115/3, Киев, Украина, 03056, тел. +38 (063) 614 41 01, эл. почта zagoruiko@geobud.kiev.ua, ORCID 0000-0003-2710-3934

^{4*}Каф. «Геостроительство и горные технологии», Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», ул. Борщаговская, 115/3, Киев, Украина, 03056, тел. +38 (067) 447 59 14, эл. почта shaydetskaya_lubov@ukr.net, ORCID 0000-0002-6593-0255

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ МЕТРОТОННЕЛЯ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ В НАМЫВНЫХ МАССИВАХ

Цель. На основе анализа результатов компьютерного моделирования и лабораторных исследований в научной работе необходимо установить зависимость влияния изменений гидравлического уровня грунтовых вод на устойчивость обработки тоннелей метрополитена за счет развития деформаций окружающего намывного массива. **Методика.** Методическую основу комплекса исследований составляют анализ, обобщение известных научных результатов и практического опыта прогнозирования, предупреждения деформаций обработок тоннелей и окружающего грунтового массива, а также компьютерное моделирование критического напряженно-деформированного состояния обработки тоннеля при изменении гидравлического уровня грунтовых вод. **Результаты.** В процессе технологического сооружения и под действием безнапорных подземных вод при эксплуатации тоннелей линий метрополитена мелкого заложения устойчивость сплошь-секционной обработки обеспечивается благодаря равномерному гидростатическому обжатию, при этом осадки тоннеля находятся в пределах допустимых значений.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Результаты исследований показывают, что при изменении уровня подземных вод с обеих сторон тоннеля может возникать разное гидростатическое давление. При этом появляется перераспределение напряжений грунтового массива вокруг поперечного сечения тоннеля, а это, в свою очередь, приводит к возникновению дополнительных неравномерных деформаций и раскрытия трещин обработки тоннеля во время эксплуатации. **Научная новизна.** Авторами работы впервые установлено влияние изменения гидростатического давления, которое может возникать вследствие колебания уровня подземных вод на сплошь-секционную обработку тоннелей линий метрополитена мелкого заложения за счет вторичного оседания грунта. Определены условия возникновения вторичного осадка грунта и установлен характер протекания деформаций в период эксплуатации тоннелей мелкого заложения. **Практическая значимость.** На стадии проектирования линий метрополитена мелкого заложения необходимо учитывать возможность неравномерной осадки от действия гидростатического давления в период эксплуатации. Это позволит избежать дополнительных деформаций в сезонный период, уменьшить количество текущих ремонтов, повысить надежность и увеличить срок эксплуатации конструкций обработки тоннелей.

Ключевые слова: устойчивость массива; напряженно-деформированное состояние; гидродинамическое влияние; обработка тоннеля; намывной массив

S. M. STOVPNYK^{1*}, A. L. HAN^{2*}, E. A. ZAHORUIKO^{3*}, L. V. SHAIDETSKA^{4*}

^{1*}Dep. «Geochemistry and Mining Technologies», National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute», Borschagivska St., 115/3, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. +38 (067) 848 59 77, e-mail stansto@i.ua, ORCID 0000-0001-5664-8680

^{2*}Dep. «Geochemistry and Mining Technologies», National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Borschagivska St., 115/3, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. +38 (097) 653 05 66, e-mail gan@geobud.kiev.ua, ORCID 0000-0003-0832-1338

^{3*}Dep. «Geochemistry and Mining Technologies», National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Borschagivska St., 115/3, Kyiv, Ukraine, , 03056, tel. +38 (063) 614 41 01, e-mail zagoruyko@geobud.kiev.ua, ORCID 0000-0003-2710-3934

^{4*}Dep. «Geochemistry and Mining Technologies», National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute», Borschagivska St., 115/3, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. +38 (067) 447 59 14, e-mail shaydetskaya_lubov@ukr.net, ORCID 0000-0002-6593-0255

RESEARCH OF HYDRAULIC IMPACT ON THE TECHNOLOGICAL STABILITY OF SHALLOW METROTUNNEL IN DREDGING MASSIVES

Purpose. On the basis of the results analysis of the computer simulation and laboratory studies it is necessary to determine the changes impact dependence of the hydraulic level of groundwater on the tunnels processing stability in the underground due to the deformations development of the surrounding dredging massif. **Methodology.** The methodological basis of the research complex consists of the analysis, generalization of known scientific results and practical experience of forecasting and preconditioning of deformations of tunnel and surrounding soil mass processing, as well as computer simulation of the critical stress-strain state of the tunnel processing at changes in the hydraulic level of groundwater. **Findings.** In the process of technological construction and under the non-pressure groundwaters impact, when operating tunnels of subway lines of shallow foundation, the stability of all-section machining is ensured due to the uniform hydrostatic reduction of processing. At this the sediments are within the permissible values. The results of the research show that different levels of hydrostatic pressure can occur when the groundwater level changes from both sides of the tunnel. At the same time, there is a redistribution of stresses of the soil mass around the cross section of the tunnel, which, in turn, leads to the appearance of additional non-uniform deformations and the opening of cracks in the tunnels during operation. **Originality.** The authors of the work firstly established the effect of changes in hydrostatic pressure, which may arise due to fluctuations in the level of groundwater on the whole-section processing of tunnels of metro lines of shallow foundation due to secondary sedimentation. The conditions of occurrence of the secondary sediment have been determined and the nature of the deformation course has been established during the operation of the shallow subway. **Practical value.** At the stage of designing the metro lines of the shallow foundation, it is necessary to take into account the possibility of uneven precipitation from the action of hydrostatic pressure during operation. This will avoid additional deformations during

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

the seasonal period, reduce the number of current repairs, increase reliability and the useful life of the tunnel processing structures.

Keywords: stability of the massif; stress-strain state; hydrodynamic effect; processing of a tunnel; dredging massif

REFERENCES

1. Protosenya, A. G., & Thai, Do Ngoc (2017). Method of forecasting interstation tunnel lining stress condition for geological conditions of Hanoi. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*, 1, 145-152.
2. Stovpnyk, S. N., & Pazyuk, R. V. (2015). Investigation of the interaction of a single-section decoration of a shallow formation with a water-saturated dipping massif under the dynamic influence of the metro-train. *Proceedings of the International Conference on Construction and architecture-2015, Rostov-on-Don, November 26-27, 2015* (pp. 390-393). Rostov-on-Don: Editorial and Publishing Center RSSU.
3. Stovpnyk, S. N., Borodai, S. V., & Kravets, V. G. (2011). The stressed-deformed state of the underground tunnel processing of shallow watering in water-saturated sands. *Proceedings of the Third scientific and technical conference «Power engineering. Ecology. Man», April 14, 2011, Kyiv* (pp. 112-114). Kyiv: NTUU KPI.
4. Al-Baali, M., & Triki, C. (2015). A Note on Using Partitioning Techniques for Solving Unconstrained Optimization Problems on Parallel Systems. *SQU Journal for Science*, 20 (2), 12-18. doi:10.24200/squjs.vol20iss2pp12-18
5. Berset, N. (2016). *Engineering Geology of Underground Excavation - Lötschberg Base Tunnel Case Study Part 2*. Zürich: ETH Zurich.
6. Li, L., Shi, S., Li, S., Xu, Z., & Zhou, Z. (2013). Comprehensive Prediction of Fissure Water in Extra-Long Deep Tunnel and Its Application. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 3, 024.
7. Yeh, T.-K., Chen, C.-H., Wang, C.-H., Wen, S. (2015). Frequency anomaly of groundwater level before major earthquakes in Taiwan. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 101-104. doi:10.5194/piahs-372-101-2015
8. Al-Maktoumi, A., Kacimov, A., Al-Ismaily, S., Al-Busaidi, H., & Al-Saqri, S. (2015). Infiltration into two-layered soil: the Green-Ampt and Averyanov models revisited. *Transport in Porous Media*, 109(1), 169-193. doi:10.1007/s11242-015-0507-8
9. Kacimov, A. R., Zlotnik, V., Al-Maktoumi, A., & Al-Abri, R. (2016). Modelling of transient water table response to managed aquifer recharge: A Lagoon in Muscat, Oman. *Environmental Earth Sciences*, 75(4). doi:10.1007/s12665-015-5137-5
10. Ravier, E., Buoncristiani, J.-F., Guiraud, M., Menzies, J., Clerc, S., Goupy, B., & Portier, E. (2014). Porewater pressure control on subglacial soft sediment remobilization and tunnel valley formation: A case study from the Alnif tunnel valley (Morocco). *Sedimentary Geology*, 304, 71-95. doi: 10.1016/j.sedgeo.2014.02.005

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. С. В. Зайченком (Україна);
д.т.н., доц. О. Л. Тютюніним (Україна)

Надійшла до редколегії: 06.06.2017

Прийнята до друку: 12.09.2017

УДК 662.613.13

Н. А. СТОРОЖУК^{1*}, Т. М. ПАВЛЕНКО^{2*}, А. Р. АББАСОВА^{3*}

^{1*}Каф. «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (050) 607 48 77, эл. почта storozhukpsacea@gmail.com, ORCID 0000-0002-3132-8864

^{2*}Каф. «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (066) 574 20 57, эл. почта tmj@ukr.net, ORCID 0000-0003-4325-7562

^{3*}Научно-исследовательская лаборатория, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (050) 743 39 37, эл. почта abbasova003@gmail.com, ORCID 0000-0001-9643-5305

ОСОБЕННОСТИ ЗОЛЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
КАК ЗАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ БЕТОНОВ

Цель. Научная работа посвящена разработке научно-технических основ производства и использования бетонов на основе зол ТЭС. **Методика.** Исследованы свойства золы ТЭС, а также особенности ее поведения в бетонной смеси в качестве мелкого заполнителя. Показано, что в золобетоне гидролиз и гидратация цемента происходят в окружении активной среды – золы, имеющей огромную удельную поверхность. Это существенно влияет на ход указанных процессов и качество получаемых бетонов. Предложена новая технология применения зол ТЭС для приготовления бетонной смеси. Испытаны виброуплотненные и вибровакуумированные бетоны оптимального состава на шлаке и золе, а также на гранитном щебне и золе. Для сравнения приведены характеристики обычных бетонов (на гранитном щебне и кварцевом песке). **Результаты.** Результаты испытаний показали возможность получения бетонов классов С20/25–С25/30 на основе шлаков и зол ТЭС при умеренных расходах цемента. Показано, что бетоны на традиционных заполнителях имеют меньшую прочность, чем бетоны, где в качестве мелкого заполнителя использована зола. Результаты выполненных исследований способствуют увеличению объемов использования золы в строительстве, что решает проблему заполнителей, а также утилизации отходов ТЭС. **Научная новизна.** Разработаны новый способ и технология использования зол ТЭС в бетонах. Золобетонная смесь имеет рациональную подвижность, при которой достигается наибольшая прочность вакуумзолобетона. Эта прочность по сравнению с прочностью виброуплотненного золобетона из бетонной смеси с подвижностью П1 больше в 2 и более раза. **Практическая значимость.** Приведены физико-химические свойства золы ТЭС как заполнителя для бетонов. Показано существенное отличие золы от обычных заполнителей. Обоснована химическая активность золы. Предложены особые условия твердения цемента в случае использования золы как заполнителя для бетонов. Обоснованы преимущества золы перед традиционным заполнителем. Результаты исследований способствуют массовому применению зол ТЭС в строительстве, получению изделий из предложенных бетонов низкой стоимости с высокими физико-механическими свойствами. Особенно высока эффективность золы как заполнителя в вибровакуумированных бетонах.

Ключевые слова: зола ТЭС; свойства; заполнители; бетон; формование; вибровакуумирование

Введение

Утилизация золы и шлаков тепловых электростанций является одной из важнейших экологических проблем [12, 14–16]. Вблизи мощных тепловых электростанций накопились сотни миллионов тонн этих материалов, что наносит существенный вред окружающей среде. Одним из путей решения этой проблемы является использование так называемых лежалых зол и шлаков в строительстве как составляю-

щих бетонов и строительных растворов [3, 5, 10].

Цель

Разработка высокоэффективных технологий использования зол ТЭС в бетонах.

Методика

Авторами исследованы свойства золы ТЭС, влияющие на свойства бетонов на ее основе,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

а также разработана технология применения зол ТЭС для приготовления бетонной смеси.

Минералогический состав золы зависит от вида используемого на ТЭС топлива и условий его сжигания. В ней содержится метакаолин, кварц различных модификаций, γ -глинозем, муллит, различные соединения железа, сернистые соединения и другие вещества, но уже в очень незначительном количестве [1]. Минералогический состав золы предопределяет их активность, химический состав и некоторые другие свойства.

Истинная плотность отдельных фракций зол в большей части топлива может колебаться в пределах от 2 до 5 г/см³. Большая плотность отдельных составляющих золы объясняется тем, что в ней преобладают частицы, состоящие в основном из соединений железа или минералов, со значительной плотностью. Разная истинная плотность частичек золы, полученных при сжигании одного и того же топлива, связана с различным химическим составом отдельных фракций. В. Х. Кикас установил, что легкие фракции с истинной плотностью менее 2,4 г/см³ содержат большое количество кремнезема и глинозема и почти не содержат свободной извести. Гидро модуль этих фракций очень низкий. С увеличением истинной плотности золы возрастает и ее гидро модуль. Наилучшими вяжущими свойствами обладают фракции с истинной плотностью 3,1–3,3 г/см³, составляющие около 10 % золы.

Несмотря на большое различие в показателях истинной плотности отдельных фракций золы, обычно среднее значение истинной плотности всей пробы золы для различных видов угля колеблется в узких пределах – 2,2–2,4 г/см³ [13].

Плотность золы в насыпном состоянии колеблется в пределах 600–1 300 кг/м³ и во многом зависит от температуры сжигания топлива. Наибольшую плотность имеет сухая зола. При небольшом увлажнении плотность золы резко снижается, а при дальнейшем увеличении влажности – постепенно возрастает (рис. 1). При виброуплотнении плотность сухой золы повышается примерно на 10 %, а влажной – на 25–30 %.

Углеродистая составляющая золы достаточно хорошо изучена. Имеется большое количество

публикаций по этой проблеме. Нами приведены некоторые из них.

В Западно-Сибирском филиале Академии строительства и архитектуры СССР для исследования характера метаморфизма, который претерпевает уголь при сгорании в топках котлов ТЭС, были выполнены химические, термографические и микроструктурные анализы молотого каменного угля, несгоревших частиц и минеральной части золы [9, 11]. Исследованиями доказано, что в золе несгоревшие частицы – это частицы кокса и полукокса. Очень хорошо исследовано влияние несгоревших частиц на свойства золобетонов, в том числе на морозостойкость. Получены вполне удовлетворительные результаты.

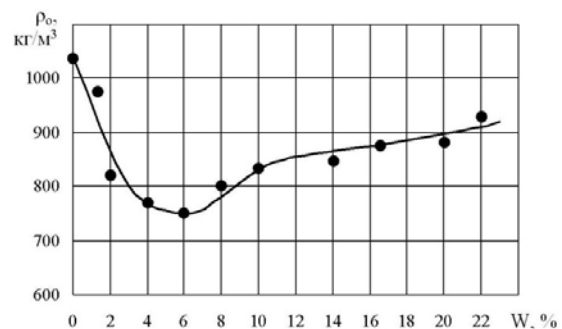


Рис. 1. Плотность золы в зависимости от ее влажности

Fig. 1. Density of ash depending on its humidity

Гидравлическую активность аморфных компонентов зол можно разделить на два основных вида:

- гидравлическая активность аморфизованного глинистого вещества;
- гидравлическая активность шлакового стекла.

При сгорании органической части топлива глинистые примеси, которые входят в минеральную часть топлива, дегидратируются и аморфизируются. Температурные интервалы дегидратации глинистого вещества зависят от его минералогического состава. Первоначально выделяется основная часть воды без разрушения кристаллической решетки минерала. После этого полученный материал отличается по физическим свойствам от исходного минерала, имеет искаженную кристаллическую структуру и повышенную реакционную способность.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Дальнейшее нагревание приводит к окончательному обезвоживанию и разрушению кристаллической решетки глинистого минерала, в результате чего образуется аморфный материал, состоящий из очень дисперсной механической смеси окислов кремния, алюминия, железа, магния и др. Одновременно за счет реакций в твердой фазе кристаллизуются: магнезиальная шпинель $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, силлиманит, магнетит или гематит и позднее муллит и кристобалит. Как отмечалось ранее, в высокоглиноземистых (каолининовых) глинах возможно образование $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ [2].

При дальнейшем повышении температуры начинается спекание аморфизованного глинистого вещества за счет появления легкоплавких эвтектик на контактах аморфных фаз разного состава, а затем происходит плавление аморфизованного вещества.

Указанные особенности фазовых превращений глинистого вещества минеральной части угля при его сжигании приводят к появлению в золах различных по составу и свойствам фаз, объединенных условно в следующие три группы:

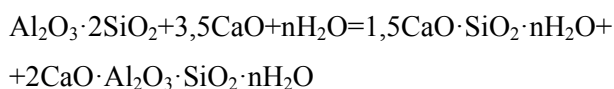
1) не полностью дегидратированное и аморфизованное глинистое вещество, сохраняющее искаженную кристаллическую решетку и способное к регидратации; для каолининовых глин такая фаза носит название метакаолинита;

2) аморфизованное, но не спекшееся вещество, которое характеризуется весьма развитой удельной поверхностью и состоит в основном из очень дисперсной механической смеси аморфного кремнезема и глинозема;

3) спекшееся и частично (с поверхности агрегатов) остекленное вещество, имеющее значительно меньшую удельную поверхность.

Фазы первой группы (особенно метакаолинит) характеризуются наибольшей гидравлической активностью по сравнению с другими.

Идентификацию продуктов взаимодействия между известью и веществами в указанных фазах в нормальных условиях провел В. Стрэтлинг [2]. Применяя оптические, химические и рентгенографические методы исследования, он установил наличие следующей реакции между метакаолинитом и известью:



Что касается гидравлической активности шлакового стекла, то необходимо отметить следующее. В этом стекле основным стеклообразующим компонентом является кремнезем. В соответствии с общепринятыми теориями строения стекла обычно считают, что шлаковое стекло представляет собой микронеоднородный материал, состоящий из участков однородной структуры, связанных прослойками аморфного неоднородного вещества.

Экспериментальные исследования последних лет показывают, что для силикатных расплавов характерна тенденция к агрегации структурных элементов – ионных группировок сходного состава, приводящих к метастабильной ликвации расплава. Такие ионные группировки в зависимости от их состава и строения названы Р. М. Мюллером аморфитами или кристаллитами [2]. Аморфиты не являются зародышами кристаллов. Но иногда в своем составе они могут их иметь.

Размеры аморфитов колеблются в широких пределах и могут достигать нескольких микронов. Кристаллиты имеют значительно меньшие размеры. По результатам рентгеноструктурных исследований размеры кристаллитов в натриево- и кальциевосиликатных стеклах не превышают 10–25 нм.

Результаты исследований показывают, что в золах тепловых электростанций в аморфитах происходит концентрация катионов двухвалентного железа, кальция и магния. Значительно реже в роли катионов фигурируют алюминий и трехвалентное железо. Основность вещества аморфита, как правило, выше основности входящих в их состав минералов [2, 4].

Анионы, входящие в состав аморфитов и в решетку кристаллитов, представлены кремне(алюмо)кислородными группами (SiO_4^{4-}) , $(\text{Si}_2\text{O}_7^{6-})$ или $(\text{Al}_2\text{SiO}_7^{4-})$ и $(\text{SiO}_2^-)_n$.

Аморфиты, преобладающие в составе шлаковых стекол, имеют рыхлую субмикроструктуру и относительно высокую проницаемость, обусловленную наличием пустот между ионными группировками. Поэтому они очень легко гидратируются и гидролизуются. Эти соображения подтверждаются повышенной реакционной способностью стекол, соответствующих по составу минералам шлаков, и состоящих главным образом из аморфитов.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Гидравлическая активность кристаллитов в стекле, исходя из имеющихся результатов исследований, также превышает активность соответствующих минералов, при этом направление процессов гидратации или гидролиза и характер гидратных новообразований не изменяются.

Активность промежуточного аморфного вещества шлакового стекла определяется соотношением глинозема и кремнезема. Чем больше в нем глинозема, тем легче, быстрее оно гидратируется в щелочной или сульфатно-щелочной среде.

Кремнеземистое промежуточное вещество реагирует с гидратом окиси кальция медленнее, чем глиноземисто-кремнеземистое (при одинаковых условиях твердения).

В общем случае шлаковое стекло является материалом, содержащим упорядоченные участки, близкие по составу (аморфиты) и строению (кристаллиты) с очень высокой удельной поверхностью, а также неупорядоченные глиноземисто-кремнеземистые прослойки между такими участками.

Таким образом, при использовании золы как заполнителя для бетонов, цемент находится в особых условиях. В обычном бетоне цемент подвергается гидролизу и гидратации в условиях окружения его относительно крупным заполнителем – малоактивной средой с незначительной удельной поверхностью. Цемент в этом случае твердеет в продуктах собственного гидролиза. В противоположность этому, при золе как заполнителе, гидролиз и гидратация цемента происходит в окружении активной среды – золы, имеющей огромную удельную поверхность, что существенно влияет на ход этих процессов и качество получаемых бетонов [6, 17].

Результаты

При проведении исследований испытаны виброуплотненные и вибровакуумированные бетоны оптимального состава на шлаке и золе, а также на гранитном щебне и золе. Для сравнения приведены характеристики обычных бетонов (на гранитном щебне и кварцевом песке). Подвижность бетонной смеси характеризовалась осадкой конуса – ОК = 3–4 см. Из каждого вида бетонной смеси формовали образцы размером 15×15×7 см для определения плотности и прочности бетона в возрасте 28 суток при

следующих режимах и способах уплотнения. Из подвижной бетонной смеси образцы формовали вибрационным способом продолжительностью 25–30 с, вибровакуумированные – после предварительного виброуплотнения (продолжительностью 10–15 с), подвергали вакуумированию при разрежении 0,7 (полный вакуум принят за единицу) продолжительностью 6 мин. В процессе вакуумирования применяли периодическое вибрирование (два приема по 10–12 с через каждые 2 мин).

Составы бетонов и результаты их испытания приведены в табл. 1.

Результаты испытаний показали возможность получения бетонов классов С20/25–С25/30 на основе шлаков и зол ТЭС при умеренных расходах цемента. Данные показывают, что бетоны на традиционных заполнителях имеют меньшую прочность, чем бетоны, в которых в качестве мелкого заполнителя использована зола.

Особенно необходимо отметить актуальность массового использования золы в качестве мелкого заполнителя для бетонов. Это связано не только с необходимостью утилизации огромных объемов данного материала в отвалах, но и с существующим в настоящее время дефицитом традиционного мелкого заполнителя. Решению проблемы утилизации отходов ТЭС способствует использование золы уноса для производства золобетонов.

При выполнении исследований нами учтены разработки японских ученых М. Кокубу и Д. Ямада [7, 8]. Они для повышения эффективности использования золы предложили ее предварительно перемешивать с водой до образования шлама с отношением воды к золе около 50 %. Это повысило однородность свойств бетона и облегчило контроль его качества. При этом может быть применена даже смесь двух различных видов золы. Поскольку подобным способом можно подготавливать золы во времени схватывающиеся и уплотняющиеся, имеющие в составе агрегаты, микро- и макроконгломераты, предлагаемый технологический прием имеет очень большое практическое значение. Кроме того, при этом заметно улучшается удобообрабатываемость золобетонных смесей и долговечность бетона. По мнению авторов указанных работ, причинами улучшения удобообрабатываемости и долговечности бетона

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

при применении так называемого «шламового метода» является разобшение водой отдельных частиц золы путем разрушения агрегатов, мик-

ро- и макроконгломератов. Кроме этого удаляется воздух, заключенный в порах между частицами золы.

Таблица 1

Состав, плотность и прочность золошлаковых и обычных бетонов

Table 1

Composition, density and strength of ash-and-slag and ordinary concretes

Вид бетона	В/Ц	Расход материалов, кг/м ³						Виброуплотненный бетон		Вибровакуумированный бетон	
		Цемент	Зола	Шлак	Щебень	Песок	Вода	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
На шлаке и золе	0,67	314	224	1 441	–	–	209	2 188	23,8	2 226	31,8
На гранитном щебне и золе	0,62	339	241	–	1 558	–	212	2 350	26,6	2 430	38,5
На гранитном щебне и кварцевом песке	0,63	340	–	–	1 250	670	182	2 442	24,3	2 473	32,4

Базируясь на этих результатах, предложенная нами технология приготовления золобетонной смеси сводится к следующему. В роторном смесителе готовят зольный шлам с водозольным соотношением 0,5 (с учетом переменной влажности золы, поступающей из отвала). Затем в приготовленный шлам дозируют цемент и, (при необходимости) дополнительное количество воды, затем приготавливают золобетонную смесь необходимой пластичности. При формовании изделий из такой смеси методом вибровакуумирования излишняя вода затвердения удаляется. В результате этого получают хорошо уплотненный золобетон с высокой структурной прочностью, позволяющей производить немедленную распалубку, и прочностью в возрасте 28 суток.

Ниже приведены результаты наших экспериментальных исследований по оптимизации состава золобетонной смеси для вакуумирования по предлагаемой технологии. Использовали золобетонную смесь состава 1:4 (цемент: зола). За счет изменения расхода воды подвижность золобетонной смеси изменяли в широких пределах (от ОК = 2–3 см до ОК = 12–14 см). Из такой смеси формовали образцы вибровакуумированием и (для сравнения) вибрационным способом. Виды образцов, режимы уплотнения

были те же, что и в предыдущих исследованиях. При формовании образцов из жесткой смеси продолжительность уплотнения вибрированием составляла 60–65 с.

Полученные результаты исследований приведены в табл. 2. Из приведенных данных видно, что рациональной подвижностью золобетонной смеси для вакуумирования является ОК = 8–10 см. При такой подвижности достигается наибольшая прочность вакуумзолобетона. Эта прочность, по сравнению с прочностью золобетона из подвижной бетонной смеси, больше ее в 2 и более раза. Виброуплотненный золобетон получен с максимальной прочностью из смеси с жесткостью 15–20 с. Следует отметить, что прочность вакуумзолобетона на 30–40 % больше, чем у виброуплотненного бетона из жесткой смеси.

Научная новизна и практическая значимость

Авторами разработаны новые способ и технология использования зол ТЭС в бетонах. Результаты исследований способствуют массовому применению зол ТЭС в строительстве, получению изделий из предложенных бетонов низкой стоимости с высокими физико-механическими свойствами.

Таблица 2

Плотность и прочность виброуплотненных и вибровакуумированных золобетонов

Table 2

Density and strength of vibrated and vibrovacuumized ash concrete

Вид бетонной смеси	Виброуплотненный бетон			Вибровакуумированный бетон			
	В/Ц	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа	Количество извлеченной воды, л/м ³	В/Ц	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа
Подвижные смеси, ОК (см):							
2...3	1,93	1 586	6,2	95	1,53	1 620	11,9
5...6	2,12	1 577	4,9	112	1,58	1 631	13,1
8...9	2,31	1 569	2,9	126	1,62	1 642	14,4
11...12	2,41	1 560	–	133	1,69	1 635	14,2
13...14	2,52	1 553	–	136	1,72	1 628	13,9
Жесткие смеси, жесткость (сек.):							
5...6	1,53	1 590	9,0	–	–	–	–
10...15	1,46	1 605	9,8	–	–	–	–
17...20	1,40	1 620	9,1	–	–	–	–
22...25	1,33	1 616	8,8	–	–	–	–

Выводы

Приведенные физико-химические свойства золы ТЭС как заполнителя для бетонов, доказывают существенное отличие золы от обычных заполнителей и обосновывают химическую активность золы. Особые условия твердения

цемента в случае использования золы как заполнителя для бетонов доказывают преимущества золы перед традиционным заполнителем, чем достигается значительное повышение прочности. Отмечена высокая эффективность золы в вибровакуумированных бетонах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баранов, А. Т. Золобетон ячеистый и плотный / А. Т. Баранов, Г. А. Бужевич. – Москва : Стройиздат, 1960. – 226 с.
2. Бетоны и изделия из шлаковых и зольных материалов / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, Б. Н. Виноградов [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1969. – 392 с.
3. Буравчук, Н. И. Использование техногенного сырья в технологии бетонов / Н. И. Буравчук // World Science : сб. тр. конф. (29–30 июня 2016 г., Карловы Вары – Москва). – Киров, 2016. – С. 34–45.
4. Волженский, А. В. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов / А. В. Волженский, И. А. Иванов, Б. Н. Виноградов. – Москва : Стройиздат, 1984. – 250 с.
5. Высококачественные модифицированные бетоны с использованием вяжущего на основе реакционноактивного минерального компонента / С.-А. Ю. Муртазаев, М. Ш. Саламанова, Р. Г. Бисултанов, Т. С.-А. Муртазаева // Строительные материалы. – 2016. – № 8. – С. 74–79.
6. Ефективний спосіб використання золи ТЕС в будівництві / М. В. Савицький, І. А. Соколов, М. А. Сторожук, А. Р. Аббасова // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепров. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2016. – Вып. 91. – С. 133–140.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

7. Кокубу, М. Зола и зольные цементы (основной доклад) / М. Кокубу // Пятый междунар. конгресс по химии цемента (7–11 октября 1968 г., Токио) / сокр. пер. с англ. и ред. О. П. Мчедлова-Петросяна, Ю. М. Бутта, В. И. Сатарина, А. И. Бойковой. – Москва, 1973. – С. 405–416.
8. Кокубу, М. Цементы с добавкой золы-уноса (основной доклад) / М. Кокубу, Д. Ямада ; под общ. ред. А. С. Болдырева // Шестой междунар. конгресс по химии цемента : труды. – Москва, 1976. – Т. 3 : Цементы и их свойства. – С. 83–94.
9. Попов, Н. А. Характеристика несгоревших частиц в золах ТЭС / Н. А. Попов, Н. А. Иванов // Труды / Западно-Сибирский филиал АН СССР. – Новосибирск, 1961. – Вып. 5 – С. 342–347.
10. Савицкий, Н. В. Вакуумбетон – особый вид бетона / Н. В. Савицкий, Т. М. Павленко, А. Р. Аббасова // Бетон и железобетон. – 2016. – № 2. – С. 21–25.
11. Федьнин, Н. И. Об особенностях несгоревшего топлива в золах ТЭС и его влияния на свойства золобетонов / Н. И. Федьнин // Строительные материалы. – 1963. – № 4. – С. 9–12.
12. Хлопицький, О. О. Стан, проблеми та перспективи переробки золошлакових відходів теплоелектростанцій України / О. О. Хлопицький // ScienceRise. – 2014. – Т. 4, № 2 (4). – С. 23–28. doi: 10.15587/2313-8416.2014.28511
13. Эффективные зольные цементы на основе летучих зол твердых топлив / В. Х. Кикас, Э. И. Пиксарв, А. А. Хайн, И. А. Лаул // Шестой междунар. конгресс по химии цемента. – Москва, 1976. – Т. 3. – С. 112–114.
14. A comprehensive review on the applications of coal fly ash / Z. T. Yao, J. H. Tang, Y. Q. Xi, X. S. Ji, L. Q. Ge, M. S. Xia, P. K. Sarker // Earth-Science Reviews. – 2015. – Vol. 141 – P. 105–121.
15. A new quantification method based on SEM-EDS to assess fly ash composition and study the reaction of its individual components in hydrating cement paste / P. T. Durdziński, C. F. Dunant, M. Ben Haha, K. L. Scrivener // Cement and Concrete Research. – 2015. – Vol. 73. – P. 111–122. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.02.008.
16. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash / I. Ismail, S. A. Bernal, J. L. Provis, R. San Nicolas, J. S. J. Van Deventer, S. Hamdan // Cement and Concrete Composites. – 2014. – Vol. 45. – P. 125–135. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.006.
17. Savitskyi, N. Properties of thermal power plants ash and concretes made on its basis / N. Savitskyi, T. Pavlenko, A. Abbasova // Theoretical Foundations of Civil Engineering. – Warsaw, 2014. – Vol. 22. – P. 33–38.

М. А. СТОРОЖУК^{1*}, Т. М. ПАВЛЕНКО^{2*}, А. Р. АББАСОВА^{3*}

^{1*}Каф. «Технологія будівельних матеріалів, виробів та конструкцій», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (050) 607 48 77, ел. пошта storozhukpsacea@gmail.com, ORCID 0000-0002-3132-8864

^{2*}Каф. «Технологія будівельних матеріалів, виробів та конструкцій», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (066) 574 20 57, ел. пошта tmj@ukr.net, ORCID 0000-0003-4325-7562

^{3*}Науково-дослідна лабораторія, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (050) 743 39 37, ел. пошта abbasova003@gmail.com, ORCID 0000-0001-9643-5305

ОСОБЛИВОСТІ ЗОЛИ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЯК ЗАПОВНЮВАЧА ДЛЯ БЕТОНІВ

Мета. Наукова робота присвячена розробці науково-технічних основ виробництва та використання бетонів на основі зол ТЕС. **Методика.** Досліджено властивості золи ТЕС, а також особливості її поведінки в бетонній суміші як дрібного заповнювача. Показано, що в золобетоні гідроліз та гідратація цементу відбуваються в оточенні активного середовища – золи, що має величезну питому поверхню. Це істотно впливає на хід зазначених процесів і якість одержуваних бетонів. Запропонована нова технологія застосування зол ТЕС для приготування бетонної суміші. Випробувані віброустільнені та вібровакуумовані бетони оптимального складу на шлаку і золі, а також на гранітному щебені і золі. Для порівняння наведені характеристики звичайних бетонів (на гранітному щебені й кварцовому піску). **Результати.** Результати випробувань показали можливість отримання бетонів класів C20/25...C25/30 на основі шлаків і зол ТЕС при помірних витратах цементу. Показано, що бетони на традиційних заповнювачах мають меншу міцність, ніж бетони, в яких

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

в якості дрібного заповнювача використана зола. Результати виконаних досліджень сприяють збільшенню обсягів використання золи в будівництві, що вирішує проблему заповнювачів, а також утилізації відходів ТЕС. **Наукова новизна.** Розроблено нові способи та технологія використання зол ТЕС в бетонах. Золобетонна суміш має раціональну рухливість, при якій досягається найбільша міцність вакуумзолобетону. Ця міцність в порівнянні з міцністю віброущільненого золобетону з бетонної суміші з рухливістю П1 вище в 2 та більше рази. **Практична значимість.** Наведено фізико-хімічні властивості золи ТЕС як заповнювача для бетонів. Показано суттєву відмінність золи від звичайних заповнювачів. Обґрунтована хімічна активність золи. Показано особливі умови твердіння цементу в разі використання золи як заповнювача для бетонів. Наведено переваги золи перед традиційним заповнювачем. Результати досліджень сприяють масовому застосуванню зол ТЕС в будівництві, отриманню виробів із запропонованих бетонів низької вартості з високими фізико-механічними властивостями. Особливо висока ефективність золи як заповнювача у вібровакуумованих бетонах.

Ключові слова: зола ТЕС; властивості; заповнювачі; бетон; формування; вібровакуумування

M. A. STOROZHUK^{1*}, T. M. PAVLENKO^{2*}, A. R. ABBASOVA^{3*}

^{1*}Dep. «Technology of Building Materials, Products and Constructions», State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskiy St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (050) 607 48 77, e-mail storozhukpsacea@gmail.com, ORCID 0000-0002-3132-8864

^{2*}Dep. «Technology of Building Materials, Products and Constructions», State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskiy St., Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (066) 574 20 57, e-mail tmj@ukr.net, ORCID 0000-0003-4325-7562

^{3*}Scientific Research Laboratory, State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskiy St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (050) 743 39 37, e-mail abbasova003@gmail.com, ORCID 0000-0001-9643-5305

FEATURES OF ASH OF THERMAL POWER PLANTS AS AGGREGATE FOR CONCRETES

Purpose. The scientific work is dedicated to development of scientific-technical bases of production and application of concrete on the basis of ashes of thermal power plants (TPP). **Methodology.** The properties of TPP ash, as well as the peculiarities of its behavior in a concrete mix as a fine aggregate, have been studied. It is shown that the hydrolysis and hydration of cement occur in the active environment of ash, which has a huge specific surface area. This significantly affects the course of these processes and the quality of the concrete produced. A new technology of application of ash of TPP for preparation of concrete mixes is offered. Vibrated and vibrovacuumized concretes of optimum composition from slag and ash, as well as from granite crushed stone and ash, are tested. The characteristics of ordinary concrete (from granite crushed stone and quartz sand) are given to compare. **Findings.** The results of the tests showed the possibility of obtaining concretes of class C20/25...C25/30 on the basis of slag and ash of TPP at a limited consumption of cement. It is shown that the concrete with traditional aggregates has a lower strength than the concrete, which has ash as fine aggregate. This research results contribute to the increased use of ash in construction that solves the problem of aggregates as well as thermal power plants waste recycling. **Originality.** New method and technology of application of TPP ashes in concrete are developed. Ash concrete mix has rational flowability, which produces the greatest strength of ash vacuum concrete. This strength is twice or more as large as the strength of vibrated ash concrete mix with flowability S1. **Practical value.** The physico-chemical properties of TPP ash as aggregate for concrete are presented. Significant difference of ash from ordinary aggregates is shown. Chemical activity of the ash is justified. The special conditions of cement hardening in the case of using ash as aggregate for concrete are presented. The advantages of ash over traditional aggregate are shown. The research results contribute to the mass application of TPP ash in construction and obtaining the products from the proposed concrete of low cost with high physical-mechanical properties. Ash as an aggregate has a particularly high efficiency in vibrovacuumized concrete.

Key words: ash of thermal power plants; properties; aggregates; concrete; moulding; vibrovacuumizing

REFERENCES

1. Baranov, A. T., & Buzhevich, G. A. (1960). *Zolobeton yacheistyy i plotnyy*. Moscow: Stroyizdat.
2. Volzhenskiy, A. V., Burov, Y. S., Vinogradov, B. N., & Gladkikh, K. V. (1969). *Betony i izdeliya iz shlakovykh i zolnykh materialov*. Moscow: Stroyizdat.
3. Buravchuk, N. I. (2016). Ispolzovaniye tekhnogennogo syrya v tekhnologii betonov. In *Proceeding of the World Science, June 29-30, Karlovy Vary-Moscow* (pp. 34-45). Warsaw: RS Global.
4. Volzhenskiy, A. V., Ivanov, I. A., & Vinogradov, B. N. (1984). *Primeneniye zol i toplivnykh shlakov v proizvodstve stroitelnykh materialov*. Moscow: Stroyizdat.
5. Murtazaev, S.-A. Y., Salamanova, M. S., Bisultanov, R. G., & Murtazaeva, T. S.-A. (2016). High-Quality Modified Concretes with the Use of a Binder on the Basis of a Reaction-Active Mineral Component. *Stroitelnyye materialy*, 8, 74-79.
6. Savitskiy, M. V., Sokolov, I. A., Storozhuk, M. A., & Abbasova, A. R. (2016). The effective method to use the ash of thermal power plants in construction. *Construction, Materials Science, Mechanical Engineering. Series: Innovative lifecycle technology of housing and civil, industrial and transportation purposes*, 91, 133-140.
7. Kokubu, M. (1968). Zola i zolnye tsementy. In *Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968, October 7-11*. Tokyo: Cement Association of Japan.
8. Kokubu, M., Yamada, D. (1976). Tsementy s dobavkoy zoly-unosa (osnovnoy doklad). In A. S. Boldyrev (Ed.), *Proceedings of the International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow, 1974, September 23-27* (pp. 83-94). Moscow: JSC NIICEMENT.
9. Popov, N. A., & Ivanov, N. A. (1961). Kharakteristika nesgorevshikh chastits v zolakh TES. *Trudy Zapadno-Sibirskogo filiala AN SSSR*, 5, 342-347.
10. Savitskiy, N. V., Pavlenko, T. M., & Abbasova, A. R. (2016). Vakuumbeton – osobyby vid betona. *Beton i zhelezobeton*, 2, 21-25.
11. Fedynin, N. I. (1963). Ob osobennostyakh nesgorevshogo topliva v zolakh TES i yego vliyaniya na svoystva zolobetonov. *Stroitelnyye materialy*, 4, 9-12.
12. Khlopitskiy, O.O. (2014). State, problems and prospects of ash-slag waste recycling of Ukrainian thermal power stations. *ScienceRise*, 4, 2 (4), 23-28. doi:10.15587/2313-8416.2014.28511
13. Kikas, V. K., Piksarv, E. I., Khayn, A. A., & Laul, I. A. (1976). Effektivnyye zolnye tsementy na osnove letuchikh zol tverdykh topliv. In A. S. Boldyrev (Ed.), *Proceedings of the International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow, 1974, September 23-27* (pp. 112-114). Moscow: JSC NIICEMENT.
14. Yao, Z. T., Tang, J. H., Xi, Y. Q., Ji, X. S., Ge, L.Q., Xia, M. S., & Sarker, P. K. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*, 141, 105-121.
15. Durdziński, P. T., Dunant, C. F., Ben Haha, M., & Scrivener, K. L. (2015). A new quantification method based on SEM-EDS to assess fly ash composition and study the reaction of its individual components in hydrating cement paste. *Cement and Concrete Research*, 73, 111-122. doi:10.1016/j.cemconres.2015.02.008
16. Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., Nicolas, R. S., Hamdan, S., & van Deventer, J. S. J. (2014). Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 45, 125-135. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.09.006
17. Savitskiy, N., Pavlenko, T., Abbasova, A. (2014). Properties of thermal power plants ash and concretes made on its basis. *Theoretical Foundations of Civil Engineering*, 22, 33-38.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Н. И. Нетесой (Украина); д.т.н., проф. С. А. Щербаком (Украина)

Поступила в редколлегию: 09.06.2017

Принята к печати: 05.09.2017

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Л. Ф. ДОЛИНА, П. Б. МАШИХІНА, А. О. КАРПО, А. А. МІЩЕНКО ВОДНІ РЕАЛІЇ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ	7
--	---

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

І. М. ЦАРЕНКОВА РОЗВИТОК СИСТЕМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ ПО АВТОМОБІЛЬНІЙ ДОРОЗІ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПІВ ЛОГІСТИКИ	19
--	----

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

А. О. СУЛИМ, С. О. МУЖИЧУК, П. О. ХОЗЯ, О. О. МЕЛЬНИК, В. В. ФЕДОРОВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ШТАТНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ З СИСТЕМАМИ РЕКУПЕРАЦІЇ.....	28
--	----

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

А. М. МУХА, М. О. КОСТІН, О. Я. КУРИЛЕНКО, Г. В. ЦІПЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	48
--	----

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

С. Т. ДЖАББАРОВ ВРАХУВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ ПРИ ВСТАНОВЛЕННІ МАКСИМАЛЬНО-ПЕРЕДБАЧЕНИХ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ПОТЯГУ	61
--	----

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

І. О. ВАКУЛЕНКО, С. О. ПЛІТЧЕНКО, Н. Г. МУРАШОВА ВПЛИВ СТРУКТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ НА ГОРІННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ.....	71
---	----

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

А. О. РЕДЬКО, І. О. РЕДЬКО ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ КИПЛЯЧОМУ ШАРІ	79
--	----

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

В. О. ПОЛЯКОВ, М. М. ХАЧАПУРІДЗЕ МОДЕЛЬ ПІДВІШУВАННЯ МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА	91
--	----

О. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР, В. О. КАЛАШНИК, О. А. ШИКУНОВ МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ РУХУ БАГАТОМАСОВИХ СИСТЕМ	99
--	----

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Г. М. ГАСІЙ ДИНАМІКА РОЗВИТКУ, СУТНІСТЬ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОСТОРОВИХ СТРУКТУРНО- ВАНТОВИХ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ	107
---	-----

Д. Ю. ІГНАТЕНКО, В. Д. ПЕТРЕНКО, А. Л. ТЮТЬКІН ВЗАЄМОДІЯ ГРУНТОЦЕМЕНТНИХ ПАЛЬОВИХ ПІДПІРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ТІЛОМ ЗСУВУ	115
---	-----

О. Г. МАРИНІЧЕНКО ДИНАМІЧНА ПОВЕДІНКА ДВУПРОГОНОВИХ НЕРОЗРІЗНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПРОГОНІВ ПІД ВПЛИВОМ РУХУ ШВИДКІСНИХ ПОЇЗДІВ	124
--	-----

В. О. САМОСВАТ, ЧЖАН РОНЛИН, О. О. ГОЛОЛОВА, С. Ю. БУРЯК ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ АРОЧНИХ МОСТІВ ІЗ ГНУЧКИМИ ПОХИЛИМИ ПІДВІСКАМИ.....	131
--	-----

С. М. СТОВПНИК, А. Л. ГАН, Є. А. ЗАГОРУЙКО, Л. В. ШАЙДЕЦЬКА ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ВПЛИВУ НА ТЕХНОЛОГІЧНУ СТІЙКІСТЬ МЕТРОТУНЕЛЮ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ В НАМИВНИХ МАСИВАХ.....	141
--	-----

М. А. СТОРОЖУК, Т. М. ПАВЛЕНКО, А. Р. АББАСОВА ОСОБЛИВОСТІ ЗОЛИ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЯК ЗАПОВНЮВАЧА ДЛЯ БЕТОНІВ	149
---	-----

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

Л. Ф. ДОЛИНА, П. Б. МАШИХИНА, А. А. КАРПО, А. А. МИЩЕНКО ВОДНЫЕ РЕАЛИИ В УКРАИНЕ И МИРЕ	7
---	---

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

И. М. ЦАРЕНКОВА РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ ПО АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГЕ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ЛОГИСТИКИ	19
--	----

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

А. А. СУЛИМ, С. А. МУЖИЧУК, П. А. ХОЗЯ, А. А. МЕЛЬНИК, В. В. ФЕДОРОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ШТАТНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА С СИСТЕМАМИ РЕКУПЕРАЦИИ	28
--	----

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ

А. Н. МУХА, Н. А. КОСТИН, Е. Я. КУРИЛЕНКО, Г. В. ЦИПЛЯ ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	48
--	----

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ

С. Т. ДЖАББАРОВ УЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ МАКСИМАЛЬНО-ДОПУСТИМЫХ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОЕЗДА	61
--	----

МАТЕРИАЛОЗНАВСТВО

И. А. ВАКУЛЕНКО, С. А. ПЛИТЧЕНКО, Н. Г. МУРАШОВА ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ НА ГОРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ	71
---	----

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТРАНСПОРТ

А. А. РЕДЬКО, И. А. РЕДЬКО ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ КИПАЮЩЕМ СЛОЕ	79
--	----

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

В. А. ПОЛЯКОВ, Н. М. ХАЧАПУРИДЗЕ МОДЕЛЬ ПОДВЕШИВАНИЯ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА	91
--	----

А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР, В. А. КАЛАШНИК, А. А. ШИКУНОВ МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ МНОГОМАССОВОЙ СИСТЕМЫ	99
--	----

ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Г. М. ГАСИЙ ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ, СУЩНОСТЬ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУРНО- ВАНТОВЫХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	107
--	-----

Д. Ю. ИГНАТЕНКО, В. Д. ПЕТРЕНКО, А. Л. ТЮТЬКИН ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ СВАЙНЫХ ПОДПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ТЕЛОМ ОПОЛЗНЯ	115
---	-----

А. Г. МАРИНИЧЕНКО ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДВУХПРОЛЁТНЫХ НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЁТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ	124
--	-----

В. А. САМОСВАТ, ЧЖАН РОНЛИН, О. А. ГОЛОЛОВА, С. Ю. БУРЯК ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ АРОЧНЫХ МОСТОВ С ГИБКИМИ НАКЛОННЫМИ ПОДВЕСКАМИ	131
--	-----

С. М. СТОВПНИК, А. Л. ГАН, Е. А. ЗАГОРУЙКО, Л. В. ШАЙДЕЦКАЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ МЕТРОТОННЕЛЯ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ В НАМЫВНЫХ МАССИВАХ	141
--	-----

Н. А. СТОРОЖУК, Т. М. ПАВЛЕНКО, А. Р. АББАСОВА ОСОБЕННОСТИ ЗОЛЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ КАК ЗАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ БЕТОНОВ	149
---	-----

CONTENTS

TRANSPORT ECOLOGY

L. F. DOLINA, P. B. MASHYKHINA, A. A. KARPO, A. A. MISHCHENKO WATER REALITY IN UKRAINE AND THE WORLDWIDE.....	7
--	---

ECONOMICS AND MANAGEMENT

I. M. TSARENKOVA DEVELOPMENT OF CARGO TRANSPORTATION SYSTEM BY ROAD ON THE BASIS OF LOGISTICS PRINCIPLES	19
--	----

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

A. O. SULYM, S. O. MUZHYCHUK, P. O. KHOZYA, O. O. MELNYK, V. V. FEDOROV STUDY ON ENERGY EXCHANGE PROCESSES IN NORMAL OPERATION OF METRO ROLLING STOCK WITH REGENERATIVE BRAKING SYSTEMS	28
---	----

ELECTRIC TRANSPORT

A. M. MUKHA, M. O. KOSTIN, O. Y. KURYLENKO, H. V. TSYPLIA ENHANCING THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF DIRECT CURRENT DRIVE BASED ON USE OF SUPERCONDENSER POWER STORAGE UNITS	48
---	----

RAILWAY TRACK

S. T. DJABBAROV CONSIDERATION OF AERODYNAMIC IMPACT IN SETTING THE MAXIMUM PERMISSIBLE SPEEDS OF HIGH-SPEED TRAIN	61
---	----

MATERIAL SCIENCE

I. O. VAKULENKO, S. O. PLITCHENKO, N. G. MURASHOVA INFLUENCE OF STRUCTURAL PARAMETERS OF LOW-CARBON STEEL ON ELECTRIC ARC BURNING	71
---	----

INDUSTRIAL TRANSPORT

A. A. REDKO, I. A. REDKO INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER IN A HIGH-TEMPERATURED FLUIDIZED BED	79
---	----

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

V. A. POLYAKOV, N. M. KHACHAPURIDZE MAGNETICALLY LEVITATED TRAIN'S SUSPENSION MODEL.....	91
O. H. REIDEMEISTER, V. O. KALASHNYK, O. A. SHYKUNOV METHOD OF CONSTRUCTING THE DYNAMIC MODEL OF MOVEMENT OF THE MULTI-MASS SYSTEM.....	99

TRANSPORT CONSTRUCTION

G. M. GASII DEVELOPMENT, ESSENCE AND SCOPE OF APPLICATION OF STEEL AND CONCRETE COMPOSITE CABLE SPACE FRAMES	107
--	-----

D. Y. IHNATENKO, V. D. PETRENKO, O. L. TIUTKIN INTERACTION OF SOIL-CEMENT PILE SUPPORTING STRUCTURES WITH THE BODY OF A LANDSLIDE.....	115
--	-----

O. H. MARINICHENKO DYNAMIC BEHAVIOR OF TWO-SPAN CONTINUOUS CONCRETE BRIDGES UNDER MOVING OF HIGH- SPEED TRAINS.....	124
---	-----

V. O. SAMOSVAT, ZHANG RONGLING, O. O. HOLOBOVA, S. Y. BURIK FEATURES OF DESIGN OF TIED-ARCH BRIDGES WITH FLEXIBLE INCLINED SUSPENSION HANGERS	131
---	-----

S. M. STOVPNYK, A. L. HAN, E. A. ZAHORUIKO, L. V. SHAIDETSKA RESEARCH OF HYDRAULIC IMPACT ON THE TECHNOLOGICAL STABILITY OF SHALLOW METROTUNNEL IN DREDGING MASSIVES.....	141
---	-----

M. A. STOROZHUK, T. M. PAVLENKO, A. R. ABBASOVA FEATURES OF ASH OF THERMAL POWER PLANTS AS AGGREGATE FOR CONCRETES	149
---	-----

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/>

Д л я н о т а т о к

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

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

№ 5 (71) 2017

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – А. І. Миргородська
Комп'ютерне верстання – А. О. Каїра, О. В. Поминова
Літературна обробка – Ю. Г. Дішкант

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 18,72. 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**

№ 5 (71) 2017

(на українском, 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. 18,72. 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

No. 5 (71) 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 18,72. 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

