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

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№1 (79)

2019

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Науковий журнал

№ 1 (79) 2019

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

Автоматизовані та телематичні системи на транспорті
Екологія та промислова безпека
Економіка та управління
Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси
Залізнична колія та автомобільні дороги
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання
Матеріалознавство
Машинобудування
Рухомий склад і тяга поїздів
Транспортне будівництво

Дніпро

2019

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

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ Пшінько О. М., доктор технічних наук

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ Пічугов С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА Козаченко Д. М., доктор технічних наук

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР Колесникова Т. О., кандидат наук із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:
Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляєв М. М., ДНУЗТ (Україна); Бобровський В. І., ДНУЗТ (Україна); Богдявічус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Бондар Б. Є., ДНУЗТ (Україна); Бондаренко І. О., ДНУЗТ (Україна); Вакуленко І. О., ДНУЗТ (Україна); Головкова Л. С., ДНУЗТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський держаний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., ДНУЗТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., ДНУЗТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнєцов В. Г., ДНУЗТ (Україна); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., ДНУЗТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютькін О. Л., ДНУЗТ (Україна); Шинкаренко В. І., ДНУЗТ (Україна).

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України.
Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.
Видання внесено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки).
Журнал зареєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus та ін.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 25.02.2019 р., протокол № 8

Видавець Дніпровський 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»

© Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2019

Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Научный журнал

№ 1 (79) 2019

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

Автоматизированные и телематические системы на транспорте
Экология и промышленная безопасность
Экономика и управление
Эксплуатация и ремонт средств транспорта
Электрический транспорт, энергетические системы и комплексы
Железнодорожный путь и автомобильные дороги
Информационно-коммуникационные технологии и математическое моделирование
Материаловедение
Машиностроение
Подвижной состав и тяга поездов
Транспортное строительство

Днипро

2019

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

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА	Пшинько А. Н., доктор технических наук
ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА	Пичугов С. А., доктор физико-математических наук
ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА	Козаченко Д. Н., доктор технических наук
ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ	Колесникова Т. А., кандидат наук по социальным коммуникациям

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:
Аврамовис З. З., Белградский университет (Сербия); Бела И., Институт логистики (Венгрия); Беляев Н. Н., ДНУЖТ (Украина); Бобровский В. И., ДНУЖТ (Украина); Богдявичус М., Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса (Литва); Бондар Б. Е., ДНУЖТ (Украина); Бондаренко И. А., ДНУЖТ (Украина); Вакуленко И. А., ДНУЖТ (Украина); Головкова Л. С., ДНУЖТ (Украина); Ефременко В. Г., Приазовский государственный технический университет (Украина); Жуковицкий И. В., ДНУЖТ (Украина); Каливода Я., Чешский технический университет в Праге (Чехия); Капица М. И., ДНУЖТ (Украина); Капустян В. Е., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (Украина); Кершис Р., Каунасский технологический университет (Литва); Кузнецов В. Г., ДНУЖТ (Украина); Марущак П. А., Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя (Украина); Питтман Р., Антимонопольный отдел Департамента юстиции (США); Ракша С. В., ДНУЖТ (Украина); Сладковски А., Силезский технологический университет, (Польша); Суглер Дж., Варшавская школа економики (Польша); Тютькин А. Л., ДНУЖТ (Украина); Шинкаренко В. И., ДНУЖТ (Украина)

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, DOAJ, Index Copernicus и др. Печатается по решению ученого совета университета от 25.02.2019 г., протокол № 8
Издатель	Днипровский 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»

© Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 2019

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

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU

VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACÌONAL'NOGO UNÌVERSITETU ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 1 (79) 2019

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

Automated and Telematic Systems on Transport
Ecology and Industrial Safety
Economics and Management
Operation and Repair of Transport Means
Electric Transport, Power Systems and Complexes
Railroad and Roadway Network
Information and Communication Technologies and Mathematical Modelling
Material Science
Mechanical Engineering
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction

Dnipro

2019

Founder:

DNIPRO NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT
NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN

Chairman of the Editorial Board of the University	Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences
Editor-in-Chief	Pichugov, S. A., Doctor of Physics and Mathematics
Deputy Chief Editor	Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Executive Secretary	Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

EDITORIAL BOARD MEMBERS:
Avramovic Z. Ž. , Faculty of Transport and Traffic Engineering (Serbia); Béla I., Logistics Institute (Hungary); Biliaiev M. M., DNURT (Ukraine); Bobrovskiy, V. I., DNURT (Ukraine); Bodnar B. E., DNURT (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Bondarenko I. O., DNURT (Ukraine); Cygler J., Szkola Glówna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., DNURT (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., DNURT (Ukraine); Kapustyan V. O., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», (Ukraine); Kersys R., Kaunas University of Technology (Lithuania); Kuznetsov V. G., DNURT (Ukraine); Maruschak P. O., Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., DNURT (Ukraine); Shinkarenko V. I., DNURT (Ukraine); Sładkowski A., Politechnika Slaska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., DNURT (Ukraine); Vakulenko I. O., DNURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., DNURT (Ukraine)

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, DOAJ, Index Copernicus, etc. Published according to the Academic Council decision of the University from 25.02.2019, Protocol no. 8
Publisher	Dnipro 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»

© Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

UDC 504.5:[625.7:519.86:614]

M. M. BILIAIEV[1*], T. I. RUSAKOVA[2*]

[1*]Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882
[2*]Dep. «Aerohydrodynamics and Masstransfer», Oles Honchar Dnipro National University, Kazakov St., 18, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 82 05, e-mail rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

DETERMINING ZONES OF CHEMICAL POLLUTION IN THE CITIES AND ASSESSMENT OF CHRONIC DISEASES RISKS

Purpose. The scientific paper is aimed at creating a methodology of chemical pollution zones in the territories of industrial cities and accounting the possibility of assessing the risks of chronic diseases. **Methodology.** The method of numerical calculation of nitrogen dioxide concentration in atmospheric air is based on the solution of three-dimensional impurity transfer equations, which directly comes from a permanently stationary source (industrial enterprise) and a linearly distributed source (highway). The method takes into account the process of chemical transformation of impurities and photolysis in the atmosphere. The numerical model is based on the splitting of model equations and their solution using an implicit difference scheme. **Findings.** The created software allows conducting computational experiments to calculate the areas of atmospheric air pollution with nitrogen dioxide, taking into account the interaction of impurities coming from various types of pollution sources and meteorological para meters. On the basis of the obtained field of nitrogen dioxide concentration, an assessment of the change in the risk of chronic intoxication associated with atmospheric air pollution with nitrogen dioxide over 50 years was carried out. **Originality**. For the first time the regularities of changes in the level of atmospheric air pollution with nitrogen dioxide have been established with due regard to the mutual influence of emissions from the industrial enterprise and highway and their chemical transformation in the atmosphere. The risk of chronic intoxication has been calculated and its changes have been analyzed with due regard to the interaction of emissions from the industrial enterprise and highway, it leads up to 10% of risk increasing. **Practical value.** Authors developed a mathematical model and method of numerical calculation. Software created on their base allows obtaining quickly quantitative results necessary in developing the system for monitoring the man-made loaded regions of the city. The obtained patterns of impurities dispersion allow us to estimate the levels of pollution in urban areas of the city by emissions from industrial enterprises and highways. Accounting of the mutual impact of emissions and the calculation of risks of intoxication allows solving environmental problems arising in the development of transport strategy in cities.

Keywords: industrial enterprise; highway; dispersion of impurities; chemical interaction; risk of disease

Introduction

The atmospheric air of the territories in large cities contains a large amount of anthropogenic impurities: emissions from industrial enterprises, motor vehicles, mini-boiler houses, products of fuel combustion and waste incineration. These impurities are characterized by a constant presence in space, inhomogeneity and uneven distribution. The growth of motor vehicles retains its leadership in urban air pollution, in contrast to emissions from stationary sources, which tend to be sustainably reduced.

For mobile sources of pollution (cars) are characterized: by high rates of growth in the number of cars compared with an increase in the number of stationary sources; their spatial distribution; close proximity to residential areas; higher toxicity of vehicle emissions compared to stationary sources; low location of the source of pollution from the earth's surface, as a result of which the exhaust

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© M. M. Biliaiev, T. I. Rusakova, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

gases of automobiles accumulate in the breathing zone of people and are dispersed more slowly by wind compared to industrial emissions. These features lead to the fact that motor transport creates extensive zones with a steady excess of air pollution standards in cities.

The constant increase in emissions of nitrogen oxides into the air is also connected: with the development of motor transport, tendency of more complete use of fuel, which leads to an increase in *NOx* emissions with increasing temperature at more efficient engine operation; with an increase in the speed of the motor transport, as a result of which *NOx* grows nonlinearly. In this regard, anthropogenic pollution of atmospheric air with nitrogen oxides takes on a critical character in industrial densely populated cities with a large network of highways.

According to the data of the environmental passport of Dnipro city, the main stationary industrial sources of air pollution with *NOx* emissions include several city enterprises (Table 1).

Table 1

The *NOx* emissions of the main enterprises of the city

Name of the property	Total *NOx* emissions, t/year	To the total object emissions, %	To the total emissions (settlement) of the object, %
Prydniprovska TEPS	15 399.971	18.7	84.3
PC «Dnipro Metallurgical Complex»	4 003.362	3.7	62.2
PLC «Dnipro Metallurgical Plant»	1 066,608	11.9	5.8
PC «Interpipe Nyzhnodniprovskyi Tube Rolling Plant»	437.807	28.6	2.4
PLC «Dnipro Coke Chemical Plant»	413.750	32.7	4.1

Analysis of the data of the Central Statistical Office in the Dnipro region showed that the total amount of *NOx* emissions from all stationary sources of pollution in the Dnipro city was about 50.000 tons, and from all types of vehicles about 20.000 tons in 2017.

The peculiarity of air pollution in industrial cities is that there is an interdependence of emissions from various types of sources. The most typical situation is the interaction of emissions from industrial enterprises with emissions from motorways (Fig. 1). The assessment of the pollution level taking into account the emissions interaction is rather difficult task, both from a mathematical point of view and in numerical implementation. The complexity is due to the need to solve the three-dimensional mass transfer equations for impurities that enter the atmosphere from various types of pollution sources, as well as the need to take into account the processes of chemical transformation of impurities in the atmosphere.

When solving this class of problems, studies are carried out to find changes in the concentration in the atmospheric air of impurities received either from stationary sources or from mobile ones with or without consideration of the process of their chemical transformation in the atmosphere [2].

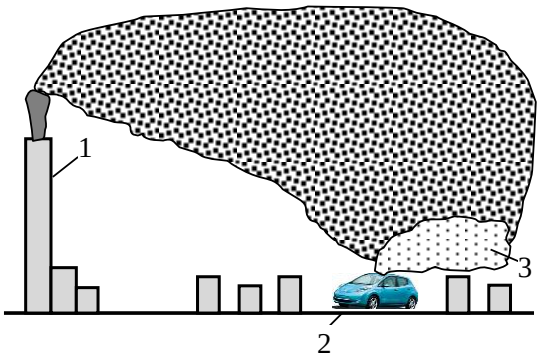


Fig. 1. Scheme of emissions influence:
1 – industrial facility; *2* – the highway;
3 – zone of mutual influence of emissions from *1* and *2*

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© M. M. Biliaiev, T. I. Rusakova, 2019

Both abroad and in Ukraine, calculations are carried out on the basis of empirical or analytical models or on the basis of numerical models of software packages [10–15]. In these works, a number of factors affecting the state of the atmospheric air of the city are considered; effective methods for reducing the man-made load are proposed. Mathematical modelling of the space-time distribution of pollutants from a power plant, which is performed in the FlexPDE software package, is studied in [11]. The efficiency of a system for modeling air pollution and human exposure was estimated on the base of the geographical information system AirGIS [7]. The effect of emission sources on environmental pollution $PM_{2.5}$ [8, 14] has been considered. Background pollution represents the lowest levels of air pollution to which people are constantly exposed, but few studies have focused on modeling this type of pollution [9].

However, the question of the mutual influence of impurities from industrial emissions and highways, while taking into account their chemical transformation in the atmosphere, remains relevant.

In industrial cities, the forecast of risks for the population is of great importance. Risk assessment in case of technogenic accidents is the subject of works by V. I. Golinko, L. V. Drannikova, V. F. Stoetsky [3], works on risk analysis in case of systematic air pollution with hazardous chemicals are dealt with by V. V. Menshikova, A. A. Shvyryaeva, T. B. Zakharova [5], chemical transformation processes are described in H. T. Overman [13]. Obviously, where there is an interaction of impurities of various types of sources (Fig. 1, zone 3), the risk of the disease increases even more, since the residents of this region may not suspect that they are in the zone of influence of several sources of air pollution. You can identify zones on the city map and assess possible risks using mathematical modeling methods. This issue is also important from the point of view of the monitoring system of technologically loaded regions.

Metallurgy is one of the most important sectors of the economy, as it allows other industries to develop. PC «Interpipe Nyzhnodniprovskyi Tube Rolling Plant» is the largest manufacturer and supplier of steel pipes for various purposes; the products of this plant are supplied to 50 countries of the world, characterized by high reliability and durability. However, this company has a technological impact on the air, it is among the environmentally-unsafe objects located in the city.

The emissions of nitrogen oxides from «Interpipe Nyzhnodniprovskyi Tube Rolling Plant» are considered, which, according to statistical data, amount to 437.807 tons/year (Table 1). This industrial enterprise occupies an intermediate position among other enterprises of the city in terms of *NOx* emissions, which allows evaluating the mutual influence of emissions from this enterprise and the nearby highway with certain traffic intensity.

Purpose

The main purpose of this research is to develop a mathematical method of numerical calculation for estimating the concentration of impurities in the atmospheric air of a city with the mutual influence of emissions from an industrial enterprise and vehicle emissions taking into account their chemical transformations in the atmosphere and meteorological parameters, on the base of three-dimensional transport equations. On the basis of the received field of *NOx* concentrations, it should carry out an assessment of the risks of chronic intoxication of the population living in the area affected by the selected sources of pollution.

Methodology

When a vehicle is moving and when it is idling, various kinds of pollutants enter the air, which undergo a transformation under the influence of sunlight. Let us consider the main chemical reactions occurring in atmospheric air between nitrogen oxide NO, nitrogen dioxide NO_2 and ozone O_3 :

$$NO_2 + h_\nu \xrightarrow{J} NO + O, \quad (1)$$

$$O + O_2 \rightarrow O_3 \quad (2)$$

$$NO + O_3 \xrightarrow{k_1} NO_2 + O_2, \quad (3)$$

Only the main three reactions (1) – (3) are taken into account, since to calculate the chemical transformation of emissions in the atmosphere, it is necessary to know the rates of their chemical reactions, which are determined experimentally. They were studied in papers [12–13].

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© M. M. Biliaiev, T. I. Rusakova, 2019

To calculate the level of air pollution by these pollutants, it is necessary at the first stage to solve the transport equations for each impurity in the atmosphere:

$$\frac{\partial[NO]}{\partial t}+\frac{\partial u[NO]}{\partial x}+\frac{\partial v[NO]}{\partial y}+\frac{\partial w[NO]}{\partial z}=$$

$$=\frac{\partial}{\partial x}(\mu_x\frac{\partial[NO]}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\mu_y\frac{\partial[NO]}{\partial y})+$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}(\mu_z\frac{\partial[NO]}{\partial z})+$$

$$+Q_{NO}\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)\delta(z-z_0)\,; \quad (4)$$

$$\frac{\partial[NO_2]}{\partial t}+\frac{\partial u[NO_2]}{\partial x}+\frac{\partial v[NO_2]}{\partial y}+\frac{\partial w[NO_2]}{\partial z}=$$

$$=\frac{\partial}{\partial x}(\mu_x\frac{\partial[NO_2]}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\mu_y\frac{\partial[NO_2]}{\partial y})+$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}(\mu_z\frac{\partial[NO_2]}{\partial z})+$$

$$+Q_{NO_2}\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)\delta(z-z_0)\,; \quad (5)$$

$$\frac{\partial[O_3]}{\partial t}+\frac{\partial u[O_3]}{\partial x}+\frac{\partial v[O_3]}{\partial y}+\frac{\partial w[O_3]}{\partial z}=$$

$$=\frac{\partial}{\partial x}(\mu_x\frac{\partial[O_3]}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\mu_y\frac{\partial[O_3]}{\partial y})+$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}(\mu_z\frac{\partial[O_3]}{\partial z}), \quad (6)$$

where Q_{NO} is the intensity of NO emission from the industrial enterprise or transport, Q_{NO_2} is the intensity of NO_2 emission from an industrial enterprise or from motor transport; *u, v, w* – components of the wind speed vector; $\mu=(\mu_x,\mu_y,\mu_z)$ – turbulent diffusion coefficients; x_0, y_0, z_0 – coordinates of the emission source of the pollutant (industrial plant or highway); $\delta(x-x_0)\ \delta(y-y_0)\ \delta(z-z_0)$ – Dirac delta function, which is used to simulate the release of a pollutant. The values of diffusion coefficients are calculated using the formulas: $\mu_x=(0{,}1\div1)\cdot U$, $\mu_y=(0{,}1\div1)\cdot U$, where U is the wind speed, $\mu_z=k\left(\frac{z}{z_1}\right)^m$, where *z* is the height above the level of Earth, z_1 is the height where the wind speed is U, $m\approx1$, $k=0{,}2$ [4, 6].

At the second stage, it is necessary to calculate the chemical transformation of impurities. The process of chemical transformation is calculated on the basis of dependencies:

$$\frac{d[NO]}{dt}=-k_1[NO]\ [O_3]+J_{NO_2}[NO_2], \quad (7)$$

$$\frac{d[NO_2]}{dt}=-k_1[NO]\ [O_3]-J_{NO_2}[NO_2], \quad (8)$$

$$\frac{d[O_3]}{dt}=-k_1[NO]\ [O_3]+J_{NO_2}[NO_2]. \quad (9)$$

Chemical reactions and photolysis are interrelated in the atmosphere. The photolysis rate J_{NO_2}, [s^{-1}] and reaction rate constant k_1, [ppb^{-1}s^{-1}], depending on temperature, are determined by expressions:

$$J_{NO_2}=8{,}14\cdot10^{-3}(0{,}97674+8{,}37\cdot10^{-4}\cdot$$

$$\cdot(T-273{,}15)++4{,}5173\cdot10^{6}\cdot(T-273{,}15)^2), \quad (10)$$

$$k_1=44{,}05\cdot10^{-3}\exp(-\frac{1370}{T}). \quad (11)$$

Nitrogen dioxide decomposes to produce nitric oxide, and latter is oxidized by ozone. As a result of the series of consecutive reactions, one molecule of nitric oxide contributes to the destruction of an average of 10 ozone molecules. NO_2 is more toxic than NO. The scale of NO transformation is 10 km per 1 hour, and NO_2 – 100-200 km per 2 days. To assess the level of air pollution with nitrogen dioxide, taking into account the mutual influence of emissions from industrial enterprises and the highway, it is necessary to solve equations (7) – (9) together. The setting of boundary conditions for solving the transport equations is considered in the works of Marchuk G.I., Samarsky A.A.

As you know, risk is a category of market economy, which is a multi-dimensional concept.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© M. M. Biliaiev, T. I. Rusakova, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Risk classification is carried out depending on the main reason for the occurrence of risks: natural, man-made, environmental, commercial. From the point of view of applying the concept of risk in its analysis and management of technological safety, important categories are: individual, potential territorial, social, collective risks.

To describe the risk of chronic intoxication (including the risk of cancer) associated with air pollution, a linear-exponential model is often used [1].

$$R_p = 1 - \exp\left[-0{,}174 \cdot \left(\frac{C}{MPC_{ad} \cdot K_p}\right)^{\beta} \cdot t\right], \quad (12)$$

where R_p is the risk, C is the concentration of a substance that has an impact over time t; β – coefficient taking into account the particular toxic properties of substances; MPC_{ad} – maximum permissible daily average concentration of the chemical substance in the air of populated areas, mg/m^3. This concentration should not have a direct or indirect adverse effect on a person with indefinite inhalation (years). Nitrogen oxides are moderately hazardous substances, they have the 3rd hazard class. Recommended by Alymov V. T., Tarasova N. P. for calculating risk parameter values: $\beta = 1$, $K_p = 4{,}5$.

For the numerical solution of the impurity transfer equation (4) – (6) with respect to the highway and the industrial facility, an implicit difference scheme is used. The essence of this scheme is that the model equations are split into equations of a simpler form. At each step of splitting, the unknown values of the concentrations of nitric oxide NO, nitrogen dioxide NO_2 and ozone O_3 are calculated using the running account method [2, 4, 6]. In each difference cell to calculate the process of chemical transformation, i.e. to solve equations (7) – (9), the Euler method is used. The process of modeling air pollution NO, NO_2, O_3, is reduced to a sequential solution at each time step of equations (4) – (6) and (7) – (9).

As a result of mathematical and numerical modeling, the computer program «Transformation» was developed to conduct computational experiments. Performing calculations using this program is based on the following information: wind speed and direction; the state of the atmosphere; coordinates of pollution sources (industrial facility and motorway); emission intensity of the pollutant; chemical transformation factors; factors included in the model, according to risk assessment.

According to the Dnieper Region Weather Archive, the average direction of the wind directions for the year is the eastern direction (from where it blows) is 15 %.

Findings

The industrial facility PC «Interpipe Nyzhnodniprovskyi Tube Rolling Plant», the NO_x emission intensity of which is Q=14,076 g/s, and the Slobozhansky Avenue highway, which is located in 710 meters from the emission sources (pipes) of the enterprise, are considered. The intensity of the movement of vehicles on the considered section of the road is 300 auto/min with eight straight lines, the relative number of cars per 1 m of the highway is 0,45 auto/m, with NOx emissions per 1 m Q_{avt}=0,012 g/s.

The size of the computational area is 3,5 km by 1,2 km, the wind speed from the east was U =7 m/s. The isolines of NO_2 concentration are shown at the level of z=12 m.

Calculations were made to estimate the level of concentration NO_2 in the atmospheric air, taking into account the impurity only from an industrial enterprise (Fig. 2). In the zone of pollution fall: plant territory – 90 %, Stoletov St. – 80 %, Bazhov St. and Voyennaya St. – 70 %, Izumrudnaya St. and Sapernaya St. – 60 %, Karazin St. and Lugovskaya St. – 50 %, Rostovskaya St. and Tramwaynaya St. – 40 %, Proskurovskaya St. and Lesya Ukrainka St. – 30 %, Svetlaya St. and Radistov St. – 20 %, Yaselnaya St. and Manuylovsky Avenue – 10 %, Karun St. – 5 %.

Fig. 3 shows the zone of pollution, which is formed under the influence of the highway. The following streets in the zone of pollution: Bazhov St. and Voyennaya St. – 80 %, Izumrudnaya St. and Sapernaya St. – 70 %, Karazin St. and Lugovskaya St. – 60 %, Rostovskaya St. and Tramwaynaya St. – 40 %, Proskurovskaya St. and Lesya Ukrainka – 30 %, Svetlaya St. and Radistov St. – 10–20 %, Yaselnaya St. – 5 %.

Fig. 4 shows the zone of pollution, taking into account the mutual influence of emissions from an

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© M. M. Biliaiev, T. I. Rusakova, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

industrial enterprise and the highway. Starting from the first source (plant), a plume of pollution is drawn along the direction of movement of air masses, the percentage of impurities gradually decreases. Having reached the highway, the NO_2 concentration begins to increase again, as the plume of pollution from the second source, taking into account the principle of superposition, is superimposed on the one that is already present in the atmospheric air, the NO_2 concentration of impurities and the pollution zone increases. The concentration of nitrogen dioxide varies according to this dependence: the territory of the plant – 90 %, Stoletov St. – 80 %, Bazhov St. and Voyennaya St. – 80-90 %, Izumrudnaya St. and Sapernaya St. – 70 %, Karazin St. and Lugovskaya St. – 60 %, Rostovskaya St. and Tramwaynaya St. – 50 %, Proskurovskaya St. and Lesya Ukrainka St. – 40 %, Svetlaya St. and Radistov St. – 30 %, Yaselnaya St. and Manuylovsky Avenue – 20 %, Karuna St. – 10 %, Amur-Havanskaya st. – 5 %.

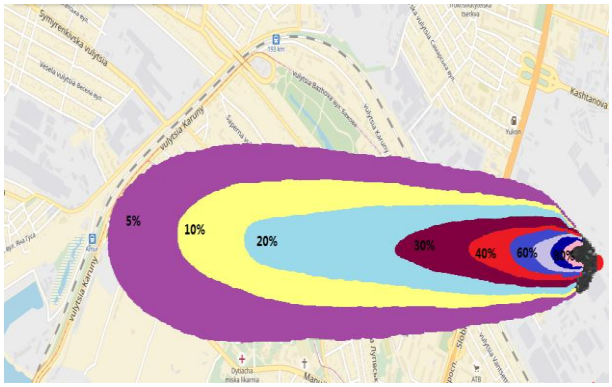


Fig. 2. Nitrogen dioxide pollution zone, one source of pollution – industrial enterprise

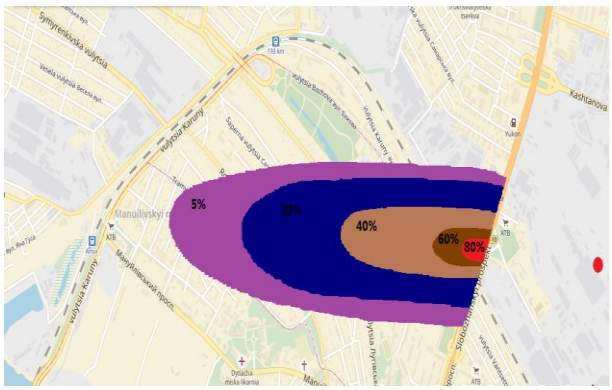


Fig. 3. Nitrogen dioxide pollution zone, one source of pollution – highway

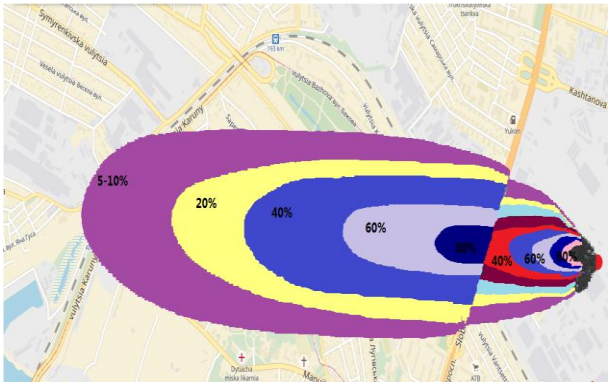


Fig. 4. Nitrogen dioxide pollution zone, two sources of pollution – industrial enterprise and highway.

Fig. 2–4 show the concentration values, which are presented as a percentage of the maximum concentration at this time t=52,5 min: C_{max}=0,0928 mg/m^3 (Fig. 2) – *NOx* emissions are taken into account only from an industrial enterprise C_{max}=0.0359 mg/m^3 (Fig. 3) – *NOx* emissions are taken into account only from the highway, C_{max}=0,1279 mg/m^3 (Fig. 4) – emissions from two pollution sources are taken into account.

The found impurity concentration field allowed us to estimate the change in the risk of chronic intoxication associated with atmospheric air pollution with nitrogen dioxide over 50 years (Fig. 5). The calculation of the risk of chronic diseases was carried out according to model (12), the calculation was considered the concentration of nitrogen dioxide. The risk calculation was performed for points located at a distance of about 30 m from the highway.

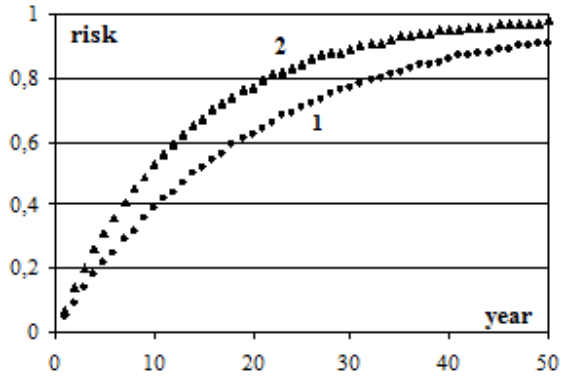


Fig. 5. Changes in the risk of chronic intoxication with nitrogen dioxide:
1 – without taking into account emission highway;
2 – taking into account emissions highway

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© M. M. Biliaiev, T. I. Rusakova, 2019

Fig. 5 shows that the mutual influence NO_2 emissions from highway and plant lead to the increasing of the chronic diseases risk by 10 %. Thus, it is necessary to develop measures to reduce the risk of disease in this area.

Originality and practical value

For the first time in the paper:

1. The patterns of changing the level of atmospheric air pollution with nitrogen dioxide were established, taking into account one point source of pollution – an industrial enterprise and one linear source of pollution – a highway. A qualitative picture of the field of nitrogen dioxide concentration was obtained taking into account the mutual influence of emissions from an industrial enterprise, the highway and their chemical transformation in the atmosphere.
2. The risk of chronic intoxication has been calculated and its changes have been analyzed taking into account the interaction of emissions from an industrial enterprise and the highway, it has been shown that this leads to an increase in risk of 10 %.
3. A mathematical method was developed for numerical calculation of the pollutant concentration field taking into account the interaction of emissions of various types of pollution sources. Based on it, software has been created that allows to quickly obtain quantitative results necessary in developing a system for monitoring man-made loaded regions of the city.

The obtained patterns of dispersion of impurities allow us to estimate the levels of pollution of the city's territory by emissions from industrial enterprises and highways. Accounting for the mutual influence of emissions and the calculation of risks of intoxication allows solving environmental problems arising in the development of transport strategy in cities and assessing the level of intoxication of workers of the external auction, whose working areas are located in the zone of influence of several pollution sources.

Conclusions

As a result of research, the following results were obtained:

– a mathematical method was developed for the numerical calculation of the concentration of impurities in the atmosphere on the basis of three-dimensional mass transfer equations;

– the method allows to calculate the concentration level separately for a permanently operating point source of pollution or for a linearly distrib uted source of pollution, and taking into account their mutual influence;

– software was developed to carry out computational experiments on the calculation of nitrogen dioxide pollution zones for a single pollution source - an industrial enterprise or a highway, taking into account two sources of admixture;

– the developed method allows to carry out an assessment of the risk of chronic intoxication associated with atmospheric air pollution with nitrogen dioxide for 50 years based on the calculated concentration field.

The development perspective of this direction is the creation of a model that takes into account the leakage of impurities into the buildings.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Алымов, В. Т. Техногенный риск. Анализ и оценка : учеб. пособие для вузов / В. Т. Алымов, Н. П. Тарасова. – Москва : Академкнига, 2004. – 118 с.
2. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
3. Меньшиков, В. В. Анализ риска при систематическом загрязнении атмосферного воздуха опасными химическими веществами : учеб. пособие / В. В. Меньшиков, А. А. Швыряев, Т. В. Захарова. – Москва : Изд-во МГУ, 2003. – 245 с.
4. Прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния городских автомагистралей / Н. Н. Беляев, Т. И. Русакова, В. Е. Колесник, А. В. Павличенко // Наук. вісн. Нац. гірн. ун-ту. – 2016. – № 1. – С. 90–98.
5. Стоецкий, В. Ф. Оценка риска при авариях техногенного характера / В. Ф. Стоецкий, В. И. Голинько, Л. В. Дранишников // Наук. вісн. Нац. гірн. ун-ту. – 2014. – № 3. – С. 117–124.
6. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© M. M. Biliaiev, T. I. Rusakova, 2019

7. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 48–54. doi: 10.15802/stp2016/60953
8. Evaluation of the Danish AirGIS air pollution modeling system against measured concentrations of PM2.5, PM10, and black carbon / U. A. Hvidtfeldt, M. Ketzel, M. Sørensen, O. Hertel, J. Khan, J. Brandt, O. Raaschou-Nielsen // Environmental Epidemiology. – 2018. – Vol. 2. – Iss. 2. doi: 10.1097/EE9.0000000000000014
9. Gómez-Losada, Á. Modelling background air pollution exposure in urban environments: Implications for epidemiological research / Álvaro Gómez-Losada, José Carlos M. Pires, Rafael Pino-Mejías // Environmental Modelling & Software. – 2018. – Vol. 106. – P. 13–21. doi: 10.1016/j.envsoft.2018.02.011
10. Liu, C.-H. Numerical study on the ozone formation inside street canyons using a chemistry box model / Chun-Ho Liu, Dennis Y. C. Leung // Journal of Environmental Sciences. – 2008. – Vol. 20. – Iss. 7. – P. 832–837. doi: 10.1016/s1001-0742(08)62134-8
11. Mărunţălu, O. Mathematical model for air pollutants dispersion emitted by fuel combustion / Oliver Mărunţălu, Gheorghe Lăzăroiu, Dana Andreya Bondrea // U.P.B. Sci. Bull., Series D. – 2015. – Vol. 77. – Iss. 4. – P. 229–236.
12. Merah, A. Modeling and Analysis of NO_x and O_3 in a Street Canyon / A. Merah, A. Noureddine // Der Pharma Chemica. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 19. – P. 66–72.
13. Overman, H. T. Simulation model for NOx distribution in a street canyon with air purifying pavement : Master thesis / H. T. Overman ; University Twente. – Enschede, Netherlands, 2009. – 107 p.
14. Source influence on emission pathways and ambient PM2.5 pollution over India (2015–2050) / C. Venkataraman, M. Brauer, K. Tibrewal [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2018. – Vol. 18. – Iss. 11. – P. 8017–8039. doi: 10.5194/acp-18-8017-2018
15. Zhong, J. Modelling the dispersion and transport of reactive pollutants in a deep urban street canyon: Using large-eddy simulation / J. Zhong, X.-M. Cai, W. J. Bloss // Environmental Pollution. – 2015. – Vol. 200. – P. 42–52. doi: 10.1016/j.envpol.2015.02.009

М. М. БІЛЯЄВ[1*], Т. І. РУСАКОВА[2*]

[1*]Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882
[2*]Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпровський національний університет імені О. Гончара, вул. Козакова, 18, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, ел. пошта rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

ВИЯВЛЕННЯ ЗОН ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В МІСТАХ Й ОЦІНКА РИЗИКІВ ХРОНІЧНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ

Мета. Наукова робота має за мету створення методології виявлення зон хімічного забруднення на територіях промислових міст і врахування можливості оцінки ризиків хронічних захворювань. **Методика.** Метод чисельного розрахунку концентрації діоксиду азоту в атмосферному повітрі базується на вирішенні тривимірних рівнянь переносу домішки, яка безпосередньо надходить від постійно діючого стаціонарного джерела (промислового підприємства) і лінійно розподіленого джерела (автомагістралі). Методика враховує процес хімічного перетворення домішки і фотолізу в атмосфері. Чисельна модель ґрунтується на розщепленні модельних рівнянь і їх розв’язанні за допомогою неявної різницевої схеми. **Результати.** Створено програмне забезпечення, що дозволяє проводити обчислювальні експерименти з розрахунку зон забруднення атмосферного повітря діоксидом азоту з урахуванням взаємовпливу домішки, що надходить від різних типів джерел забруднення, з урахуванням метеорологічних параметрів. На основі отриманого поля концентрації діоксиду азоту проведена оцінка зміни ризику хронічної інтоксикації, пов’язаного із забрудненням атмосферного повітря діоксидом азоту протягом 50 років. **Наукова новизна.** Уперше встановлено закономірності зміни рівня забруднення атмосферного повітря діоксидом азоту з урахуванням взаємовпливу викидів промислового підприємства й автомагістралі і їх хімічного перетворення в атмосфері. Виконано розрахунок ризику хронічної інтоксикації й проведено аналіз його зміни з урахуванням взаємовпливу викидів промислового підприємства й автомагістралі, показано, що це призводить до зростання ризику на 10 %. **Практична значимість.** Розроблена математична модель і методика чисельного розрахунку, створене на їх

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© M. M. Biliaiev, T. I. Rusakova, 2019

основі програмне забезпечення дозволяють оперативно отримувати кількісні результати, необхідні під час розробки системи моніторингу техногенно навантажених регіонів міста. Отримані закономірності розсіювання домішки дозволяють оцінити рівні забруднення урбанізованих територій міста викидами промислових підприємств й автомагістралей. Облік взаємовпливу викидів і розрахунок ризиків інтоксикації дозволяє вирішувати екологічні задачі, що виникають під час розробки транспортної стратегії в містах.

Ключові слова: промислове підприємство; автомагістраль; розсіювання домішки; хімічна взаємодія; ризик захворювання

Н. Н. БЕЛЯЕВ[1*], Т. И. РУСАКОВА[2*]

[1*]Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882
[2*]Каф. «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днипровский национальный университет имени О. Гончара, ул. Казакова, 18, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, эл. почта rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

ВЫЯВЛЕНИЕ ЗОН ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ГОРОДАХ И ОЦЕНКА РИСКОВ ХРОНИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Цель. Научная работа своей целью имеет создание методологии выявления зон химического загрязнения на территориях промышленных городов и учет возможности оценки рисков хронических заболеваний. **Методика.** Метод численного расчета концентрации диоксида азота в атмосферном воздухе основывается на решении трехмерных уравнений переноса примеси, которая непосредственно поступает от постоянно действующего стационарного источника (промышленного предприятия) и линейно распределенного источника (автомагистрали). Методика учитывает процесс химической трансформации примеси и фотолиза в атмосфере. Численная модель основывается на расщеплении модельных уравнений и их решении с помощью неявной разностной схемы. **Результаты.** Создано программное обеспечение, позволяющее проводить вычислительные эксперименты по расчету зон загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота с учетом взаимовлияния примеси, поступающей от различного типа источников загрязнения, с учетом метеорологических параметров. На основе полученного поля концентрации диоксида азота проведена оценка изменения риска хронической интоксикации, связанного с загрязнением атмосферного воздуха диоксидом азота на протяжении 50 лет. **Научная новизна.** Впервые установлены закономерности изменения уровня загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота с учетом взаимовлияния выбросов промышленного предприятия и автомагистрали и их химической трансформации в атмосфере. Выполнен расчет риска хронической интоксикации и проведен анализ его изменения с учетом взаимовлияния выбросов промышленного предприятия и автомагистрали, показано, что это приводит к росту риска на 10 %. **Практическая значимость**. Разработанная математическая модель и методика численного расчета, созданное на их основе программное обеспечение позволяют оперативно получать количественные результаты, необходимые в разработке системы мониторинга техногенно нагруженных регионов города. Полученные закономерности рассеивания примеси позволяют оценить уровни загрязнения урбанизированных территорий города выбросами промышленных предприятий и автомагистралей. Учет взаимовлияния выбросов и расчет рисков интоксикации позволяет решать экологические задачи, возникающие при разработке транспортной стратегии в городах.

Ключевые слова: промышленное предприятие; автомагистраль; рассеивание примеси; химическое взаимодействие; риск заболевания

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: uchebebnoe posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
3. Menshikov, V. V., Shvyryaev, A. A., & Zakharova, T. V. (2003). *Analiz riska pri sistematicheskom zagryaznenii atmosfernogo vozdukha opasnymi khimicheskimi veshchestvami: uchebnoe posobie*. Moscow: Izdatelstvo MGU. (in Russian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© M. M. Biliaiev, T. I. Rusakova, 2019

4. Biliaiev, N. N., Rusakova, T. I., Kolesnik, V. Ye., & Pavlichenko, A. V. (2016). The predicted level of atmospheric air pollution in the city area affected by highway. *Scientific Bulletin of National Mining University, 1,* 90-98. (in Russian)
5. Stoetsky, V. F., Golinko, V. I., & Dranishnikov, L. V. (2014). Risk assessment in man-caused accidents. *Scientific Bulletin of National Mining University, 3,* 117-124. (in Russian)
6. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede.* Kyiv: Naukova Dumka. (in Russian)
7. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress, 1(61),* 48-54. doi: 10.15802/stp2016/60953 (in English)
8. Hvidtfeldt, U. A., Ketzel, M., Sørensen, M., Hertel, O., Khan, J., Brandt, J., & Raaschou-Nielsen, O. (2018). Evaluation of the Danish AirGIS air pollution modeling system against measured concentrations of PM2.5, PM10, and black carbon. *Environmental Epidemiology, 2(2).* doi: 10.1097/ee9.0000000000000014 (in English)
9. Gómez-Losada, Á., Pires, J. C. M., & Pino-Mejías, R. (2018). Modelling background air pollution exposure in urban environments: Implications for epidemiological research. *Environmental Modelling & Software, 106,* 13-21. doi: 10.1016/j.envsoft.2018.02.011 (in English)
10. Liu, C.-H., & Leung, D. Y. C. (2008). Numerical study on the ozone formation inside street canyons using a chemistry box model. *Journal of Environmental Sciences, 20(7),* 832-837. doi: 10.1016/s1001-0742(08)62134-8 (in English)
11. Mărunţălu, O., Lăzăroiu, G., & Bondrea, D. A. (2015). Mathematical model for air pollutants dispersion emitted by fuel combustion. *U.P.B. Sci. Bull., Series D, 77(4),* 229-236. (in English)
12. Merah, A., & Noureddine, A. (2017). Modeling and Analysis of NO_x and O_3 in a Street Canyon. *Der Pharma Chemica, 9(19),* 66-72. (in English)
13. Overman, H. T. (2009). *Simulation model for NO_x distribution in a street canyon with air purifying pavement.* (Master thesis). University Twente, Enschede, Netherlands. (in English)
14. Venkataraman, C., Brauer, M., Tibrewal, K., Sadavarte, P., Ma, Q., Cohen, A., … Wang, S. (2018). Source influence on emission pathways and ambient PM2.5 pollution over India (2015–2050). *Atmospheric Chemistry and Physics, 18(11),* 8017-8039. doi: 10.5194/acp-18-8017-2018 (in English)
15. Zhong, J., Cai, X.-M., & Bloss, W. J. (2015). Modelling the dispersion and transport of reactive pollutants in a deep urban street canyon: Using large-eddy simulation. *Environmental Pollution, 200,* 42-52. doi: 10.1016/j.envpol.2015.02.009 (in English)

Received: Sep. 21, 2018
Accepted: Jan. 15, 2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© M. M. Biliaiev, T. I. Rusakova, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

УДК 629.42:614.842.4

В. В. КОВАЛЕНКО[1*]

[1*]Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 489 07 72, ел. пошта kovalenkovv@upp.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ КОНСТРУКЦІЙ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КІЛ НА ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖ НА ЛОКОМОТИВАХ

Мета. Робота спрямована на виявлення впливу невідповідності хімічного складу конструкцій високовольтних кіл на механізм виникнення пожежі на локомотиві ВЛ-80к. **Методика.** Під час дослідження зразків матеріалів контактних затискачів застосовані макро- та мікроструктурний, фрактографічний, аналітичний аналізи. **Результати.** Аналітичний аналіз стану деталей дав змогу виявити первинні причини займання трансформаторного масла й подальшого повного вигоряння секції електровозу. Установлено, що зруйновані контактні затискачі мали такий хімічний склад, що не відповідає конструкторсько-технічній документації. Утворена під час руйнування затискачів контактів дуга між краями макротріщин не призвела до відключення основного високовольтного реле, а внаслідок великої потужності сприяла загорянню великого об'єму трансформаторного масла, яке знаходилося знизу затискачів контактів. Таке загоряння може також виникнути внаслідок послаблення від вібрації з'єднань силового кола локомотива. Попередити подібні випадки загоряння можна за допомогою ідентифікації критичних температур нагрівання контактів високовольтної камери, контакторної й резисторної груп для негайного укріплення або заміни з'єднання. **Наукова новизна.** У роботі застосовано комплексний аналітичний і технічний підхід до виявлення причин виникнення пожежі на електровозі ВЛ-80к. Оцінено типовий механізм виникнення пожежі й максимальну кількість факторів, які могли вплинути на передчасне руйнування затискачів контактів. Показано, що сукупність факторів, які негативно вплинули на експлуатаційні характеристики затискачів контактів, одночасно досягла так званої «критичної маси» внаслідок нагрівання означених дефектних деталей. Упровадження додаткових факторів сигналізації про наднормове нагрівання досліджених та інших важливих деталей і конструкцій локомотивів дозволить попередити виникнення пожеж, вчасно ідентифікувати невідповідність хімічного складу деталей конструкторсько-технічній документації, а також виявляти зазори в з'єднаннях електричних кіл, які виникли або внаслідок недостатнього затягування, або ослаблення з'єднань у процесі вібрації під час руху локомотивів. **Практична значимість.** Запропонована додаткова сигналізація сприятиме збереженню не тільки парку локомотивів ПАТ «Укрзалізниця», а й життя та здоров'я працівників локомотивних бригад.

Ключові слова: електровоз ВЛ-80к; затискачі контактів; трансформаторне масло; передчасне руйнування; пожежа; хімічний склад; шкідливі домішки

Вступ

Більшість техногенних аварій у світі пов'язано із застосуванням у конструкціях та деталях неякісного металу або металу неналежного типу [1, 3]. Те ж саме можна сказати про матеріали, які застосовують на залізничному транспорті, у тому числі на найважливіших і найвідповідальніших ділянках електричних кіл тягового рухомого складу.

На жаль, зношеність локомотивного парку України, дефіцит деталей для експлуатованого близько 40 років рухомого складу призводить до неналежного ставлення до дотримання державних стандартів щодо хімічного складу цих деталей [11].

Якщо додати до цього неналежний стан залізничних колій у нашій країні, що сприяє утворенню значних вібрацій у конструкціях, можна впевнено говорити про типовий механізм виникнення пожеж на локомотивах. Він пов'язаний із послабленням контактів і виникненням дуги на ділянках утворення мікро- або макрощілин в електричному колі. І це дуже небезпечно не лише для роками використовуваного парку локомотивів, а й для нових, щойно закуплених ПАТ «Укрзалізниця» локомотивів фірми General

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158183
© В. В. Коваленко, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Electric Transportation [11]. Тут небезпека випливає з того, що вібрації, які в процесі пересування по наших коліях виникатимуть у цих локомотивах, можуть утворювати зазори в кріпленнях елементів електричних кіл. Утворені мікро- й макрозазори в кріпленнях електричних кіл сприяють виникненню електричної дуги, яка у свою чергу підігріває матеріал кріплень спочатку на помірну температуру, а потім сприяє його розплавленню, навіть якщо кріплення виготовлені з належного типу сплаву [1, 3, 8–16].

Задля збереження матеріальних цінностей, вартість яких, до речі, становить десятки мільйонів гривень, а також уникнення людських жертв від пожеж, які, за статистикою ПАТ «Укрзалізниця», здебільшого виникають унаслідок дії електричної дуги, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ) пропонує систему протипожежної сигналізації. Ця система дозволяє завчасно попередити виникнення пожеж унаслідок дії електричної дуги.

Мета

Основною метою дослідження є виявлення механізму виникнення пожежі на електровозі ВЛ-80К, причиною якої стала невідповідність хімічного складу контактних затискачів високовольтної камери.

Методика

Для досягнення зазначеної мети було проведено:

– ідентифікацію фазових і структурних складових у наданих зразках матеріалів контактних затискачів;

– дослідження розмірів часток і об’ємного відсотка структурних складових матеріалу зразків, а також його структурної однорідності матеріалів контактних затискачів.

Зі зразків матеріалу контактних затискачів електровоза ВЛ-80К були виготовлені шліфи, які травили в соляній кислоті для виявлення мікроструктури.

Мікроструктурний та мікрорентгеноспектральний аналізи проведено за допомогою растрового електронного мікроскопа JSM-64901LV фірми JEOL (Японія) з енергодисперсійним спектрометром INCA Penta FETx3 (OXFORD Instruments) та персональним комп’ютером у режимі прискорюваної напруги 10–20 кВ, сили електричного струму 3x10–10 А, збільшенні x80…x11 000 за контрасту у вторинних (SEI) і відображених (BEI) електронах.

Результати

Досліджені затискачі було виготовлено з латуней. Серед мідних сплавів латуні застосовуються найбільш широко. Структуру й властивості латуней визначає діаграма стану Cu–Zn.

У системі Cu–Zn відбуваються 5 перитектичних перетворень, у результаті яких виникають 5 фаз: δ, β, γ, ε, η. Розчинність цинку в міді дуже велика й виявляє незвичайну температурну залежність: зі зниженням температури розчинність зростає і складає 32,5 % за 905 °С, 36 % – за 600 °С і 39 % – за кімнатної температури. За температури близько 400 °С розчинність цинку в міді різко падає.

Стійкість проміжних фаз β, γ, ε визначають їхні електронні концентрації. Так, β – твердий розчин на базі сполуки CuZn характеризується електронною концентрацією 3/2. При цьому електронну концентрацію визначають, як відношення кількості валентних електронів у сполуці до кількості атомів сполуки, тобто у сполуці CuZn це відношення становить 3/2.

Упорядковане розташування атомів β-розчину зберігається лише за температур, не вищих 454…468 °С [5, 6, 7].

Розглянемо мікроструктурний склад зразка, що зруйнований розтріскуванням (рис. 1). У матриці α-твердого розчину (рис. 1, спектри 7, 8, 9) поблизу зони розтріскування по границях зерен як α-фази, так і великих (більше ніж 30 мкм) включень залізо-кремнієвої фази (рис. 1, спектри 4, 5, 6) розташовані легкоплавкі свинцеві евтектики (рис. 1, спектри 1, 2, 3), що мають, залежно від концентрації свинцю, температуру плавлення від 325 °С в разі вмісту свинцю 92,5 % (мас) до 954 °С за його меншої концентрації [5, 6, 7]. Враховуючи, що свинець та олово мають велику схильність до ліквації, як концентраційні градієнти свинцевих та олов’янистих включень, так і топографія їх розподілення виключно по границях зерен або фаз свідчать про можливість

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158183
© В. В. Коваленко, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

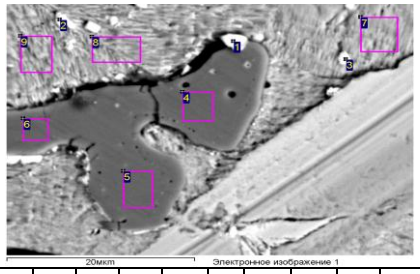
початку підплавлення вже за температур, близьких до 400 °С, і наявність зони крихкості в α-сплавів в інтервалі 300–700 °С [5, 6, 7]. Це також є однією з причин низької корозійної стійкості в напруженому стані зазначених сплавів.

Від'ємні значення концентрації елементів в інтегрованому спектрі пояснюються тим, що вони нижчі за фоновий рівень, визначений приладом.

По границях зерен також наявні олов'янисті евтектоїди (рис. 2, спектри 1, 2, 3). Їх товщина становить 20 мкм, а довжина 100 мкм. δ-фаза в евтектоїді α + δ представлена крихким з'єднанням Cu31Sn8, що має блакитний колір. Наявність подібного хімічного складу сприяє виникненню розосередженої усадочної раковини. Температура евтектоїдного перетворення дорівнює 520 °С [5, 6, 7].

Поблизу евтектоїда (рис. 2) наявна зона з підвищеною концентрацією миш'яку, олова, заліза, нікелю, кремнію, свинцю (рис. 2, спектри 4, 5, 6).

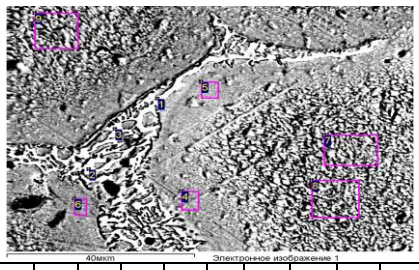
Розподіл хімічних елементів у структурі зразка латуні, що розтріскався, наведено на рис. 3. Із нього видно, що залізо-кремнієві включення по границях α-твердого розчину дорівнюють у діаметрі максимум 10 мкм і додатково містять кисень.



Спектр	Al	Si	P	S	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sn	Pb
1	-0,03	5,13	-0,13	-1,19	-0,24	16,4	1,04	24,4	3,71	0,2	0,26	-0,06	50,52
2	0,11	1,14	-0,01	-0,42	0,06	1,17	0,13	55,23	11,13	-0,08	-0,07	0,03	31,56
3	0,16	0,86	0,03	-0,28	0,03	0,67	0,38	65,35	14,31	0,47	0,36	0,2	17,46
4	0,07	14,3	0,08	0,03	0,05	78,7	3,32	2,96	1,04	-0,32	-0,05	0,1	-0,27
5	-0,14	14,7	0,02	0,01	0,24	77,96	3,68	3,13	0,91	-0,13	-0,44	0,12	-0,06
6	-0,06	16,7	-0,05	-0,03	0,2	74,05	3,32	4,56	1,38	-0,18	-0,19	0,11	0,19
7	0,14	1,07	0,08	0,03	0,01	0,44	0,09	79,05	18,09	0,29	0,34	0,4	-0,01
8	0,06	0,92	0,07	0,02	-0,11	0,81	0,32	79,84	17,4	0,03	0,12	0,45	0,08
9	0,19	1	-0,02	0,01	0,08	0,56	0,33	78,82	17,39	0,52	0,4	0,32	0,42

Рис. 1. Мікроструктура й фазовий хімічний склад матеріалу розтрісканого зразка контактного затискача

Fig. 1. Microstructure and phase chemical composition of the material of the cracked sample of the contact clamp



Спектр	Al	Si	P	S	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sn	Pb
1	0,07	1,64	0,07	-0,01	0,03	0,09	0,1	73,73	15,44	0,13	0,04	8,29	0,38
2	0,15	1,65	0,02	0,04	0,03	0,17	0,1	71,42	14,36	0,16	0,34	11,49	0,09
3	0,01	1,51	0,09	-0,09	-0,1	-0,08	0,21	73,3	15,18	-0,04	-0,16	10,18	-0,01
4	0,15	1,8	0,04	-0,02	0,05	0,23	0,46	78,34	17,01	0,19	0,29	1,26	0,2
5	0,04	1,66	0,1	-0,04	-0,04	0,11	0,43	78,62	17,5	0,13	0,18	1,2	0,12
6	0,01	1,88	-0,04	-0,01	0,02	0,23	0,35	78,47	17,42	0,25	0,07	1,17	0,18
7	0,11	0,98	0,08	-0,01	0,06	0,25	0,39	79,37	18,39	0,08	0,17	0	0,12
8	-0,01	1,15	-0,07	0,02	0	0,58	0,1	79,2	17,86	0,11	0,06	0,31	0,68
9	0,16	1	-0,05	0,14	0,04	0,33	0,13	79,66	17,74	0,38	0,13	0,2	0,14

Рис. 2. Мікроструктура й фазовий хімічний склад матеріалу розтрісканого зразка контактного затискача

Fig. 2. Microstructure and phase chemical composition of the material of the cracked sample of the contact clamp

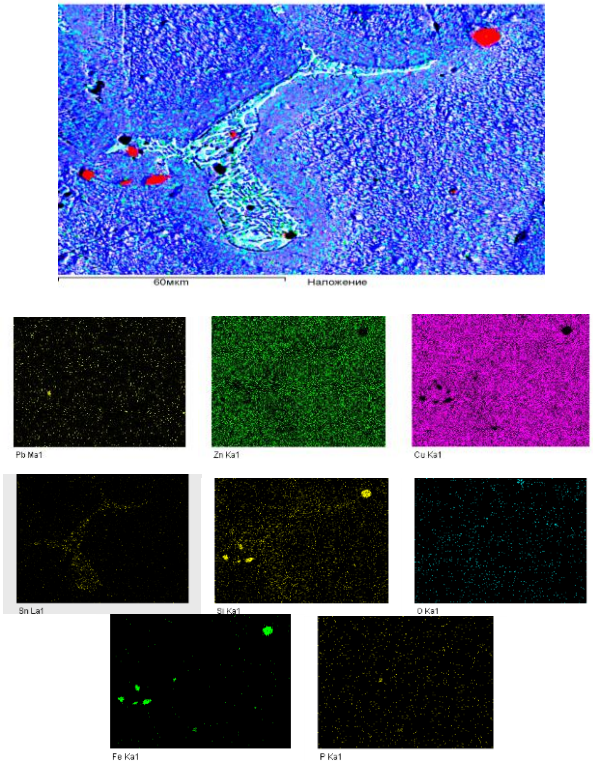


Рис. 3. Розподіл хімічних елементів у мікроструктурі сплаву розтрісканого контактного затискача

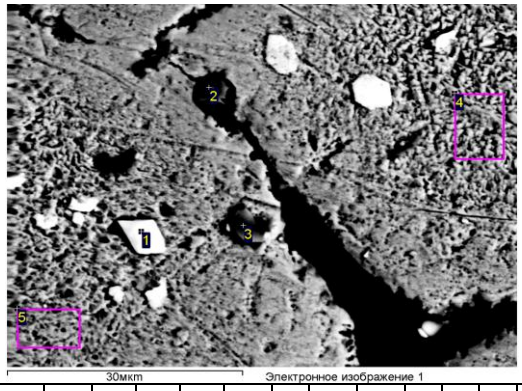
Fig. 3. Distribution of chemical elements in the alloy microstructure of the cracked contact clamp

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158183
© В. В. Коваленко, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Виявлені залізо-кремнієві включення наявні безпосередньо в області зародження тріщини (рис. 4), що дозволяє зробити висновок про те, що вони були однією з причин розтріскування.



Спектр	Al	Si	P	S	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sn	Pb
1	0,17	0,33	-0,13	-1,57	-0,01	0,18	0,18	25,73	3,88	0,16	0,15	0,18	70,75
2	0	19,83	0,22	0,01	0,3	61,63	3	12,05	2,94	0,19	0,02	0,11	-0,3
3	0,2	0,74	-0,12	0,11	0,04	0,17	0,06	74,84	21,11	0,1	0,14	0,59	2,01
4	-0,01	1,09	-0,03	0,04	0,03	0,5	0,3	78,63	18,42	0,51	0,05	0,43	0,05
5	0,12	1,09	-0,01	-0,02	-0,02	0,29	0,29	78,08	18,67	0,3	0,28	0,39	0,54

Рис. 4. Мікроструктура зразка контактного затискача в області розтріскування

Fig. 4. Microstructure of the contact clamp sample in the cracking region

Подальший аналіз евтектоїдних включень, які оточують залізо-кремнієві, показує наявність у них сегрегацій фосфору, які разом із кремнієвими включеннями найбільш істотно знижують електропровідність сплаву (рис. 5). У середині залізо-кремнієвих включень (рис. 5) можна побачити оксидну складову. А кисень належить до числа найбільш шкідливих домішок, які суттєво знижують механічні й технологічні властивості латуні.

Таким чином, розтрісканий зразок контактного затискача не відповідає конструкторсько-технічній документації не лише за хімічним, а й за структурним станом, що в основному є наслідком ліквацiйних процесів під час кристалізації сплаву. Цьому сприяє наявність усіх найбільш шкідливих домішок (свинцю, сірки й кисню) та велика (більше ніж 2,6 %) сумарна кількість елементів, що найбільш схильні до ліквації – олова й кремнію, за максимального значення цієї суми в стандарті – 0,5 %. Означені елементи утворюють легкоплавкі евтектики й евтектоїди, що розташовуються по границях α-твердого розчину й знижують фізико-механічні й технологічні характеристики сплаву. Крім того, додатковим негативним фактором є забрудненість сплаву глобулярними залізо-кремнієвими включеннями, сегрегації яких спостерігаються в областях зародження тріщин.

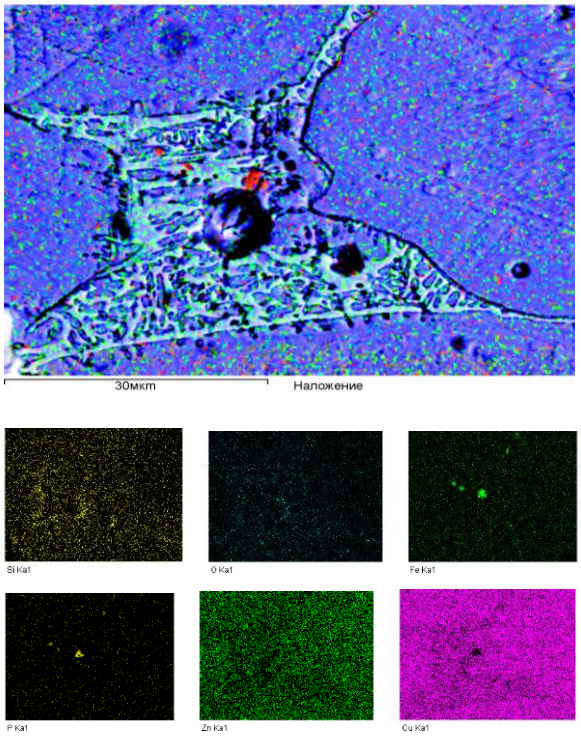


Рис. 5. Розподіл хімічних елементів на границі кристалів α-твердого розчину

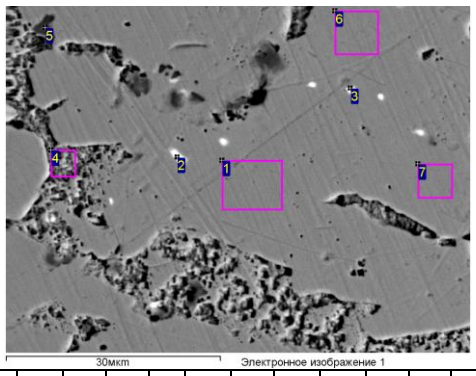
Fig. 5. Distribution of chemical elements on the boundary of crystals of the α-solid solution

Розглянемо мікроструктуру оплавленого зразка контактного затискача (рис. 6). З рисунку видно, що мікроструктура представлена α-твердим розчином (спектр 1), включеннями свинцевої фази (спектри 2, 3), залізо-кремнієвими включеннями (спектр 5) й областями спільного росту фаз α + β' (спектр 4). Цей сплав не містить великих евтектичних та евтектоїдних фаз по границях зерен, що сприяє формуванню більш однорідної структури. Але не виключено, що до оплавлення вони були присутні в досліджуваному зразку, але в результаті випарювання й попереднього розплавлення зникли зі структури сплаву.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158183
© В. В. Коваленко, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

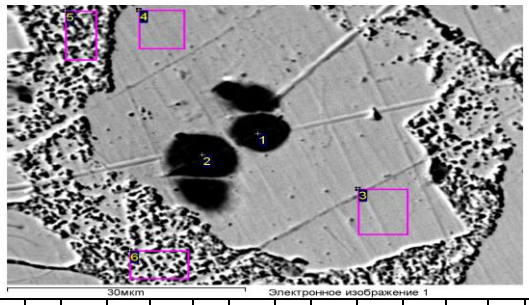


Спектр	Al	Si	P	S	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sn	Pb
1	-0,04	-0,09	-0,06	0,08	0,14	0,18	0,24	62,07	37,48	-0,01	-0,09	0,03	0,07
2	0,06	0,14	-0,07	-0,8	0,01	0,01	-0,01	27,98	18,31	0,24	0,41	-0,22	53,93
3	0,01	0,03	-0,04	-0,6	0,1	0,11	0,11	43,43	26,29	-0,05	-0,31	0,05	30,87
4	0,22	0,14	0,02	0,05	0,07	0,03	0,2	56,25	42,33	0,04	-0,1	0,48	0,26
5	-0,06	10,28	2,66	0	2,74	60,42	0,23	12,51	8,91	-0,16	-0,35	-0,34	3,16
6	0,15	-0,01	0	0,03	0,01	0,3	0,09	62,08	37,19	0,04	-0,17	0,05	0,23
7	0,17	0,05	-0,03	-0,09	0,08	0,09	0,13	62,36	37,1	-0,23	0,08	0,02	0,26

Рис. 6. Мікроструктура й фазовий хімічний склад оплавленого зразка контактного затискача

Fig. 6. Microstructure and phase chemical composition of the molten sample of the contact clamp

Ідентифікацію крупних, до 10 мкм, залізо-кремнієвих включень та інших фазових складових представлено на рис. 7. Залізо-кремнієві включення, незалежно від розміру, мають сприятливу область розташування в середині зерен α-твердого розчину, що попереджає розвиток тріщин поблизу цих включень.



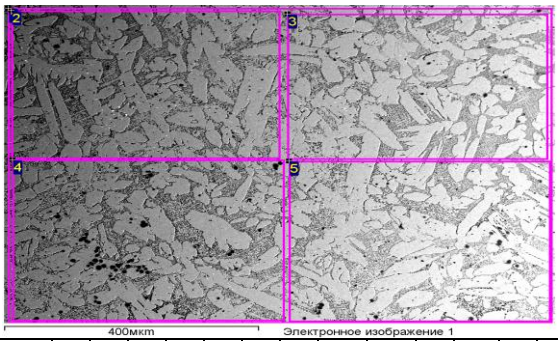
Спектр	Al	Si	P	S	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sn	Pb
1	0,21	12,98	0,08	0,02	0,94	80,45	0,53	2,59	2,35	0,07	-0,02	0,1	-0,29
2	0,04	13,21	0,14	-0,07	0,92	80,73	0,17	2,22	2,63	-0,19	-0,18	0,08	0,29
3	0,16	-0,03	0,04	0,04	0,12	0,19	0,27	61,54	36,99	0,37	0,35	0	-0,04
4	0,04	0,03	-0,02	0	0,09	0,2	0,26	60,71	38,71	0,19	-0,06	0,14	-0,29
5	0,2	0,08	-0,04	-0,01	0,11	0,1	0,13	53,66	45,16	0,25	0,12	0,14	0,12
6	0,03	0,04	0,06	0,05	0,07	0,05	0,12	53,93	45,33	0,16	-0,14	0,17	0,13

Рис. 7. Мікроструктура зразка контактного затискача оплавленого

Fig. 7. Microstructure of the molten sample of the contact clamp

На рис. 8 представлено мікроструктуру сплаву, що оплавлений. Із нього видно, що зерна α-твердого розчину складають 50 об'ємних відсотків, а суміш α + β' фаз, яка займає подібний об'єм, сприяє підвищенню міцності сплаву. У сплаві наявна незначна кількість олова, тому олов'янисті евтектоїди повністю відсутні. Розмір зерен не перевищує 50 мкм.

Таким чином, розплавлений зразок контактного затискача має більш однорідну структуру з більшою кількістю й розміром залізо-кремнієвих включень, які розташовані в середині зерен α-твердого розчину та меншою мірою впливають на фізико-хімічні характеристики сплаву. Але загальний вміст цинку знижує температуру плавлення до 902 °С [5] і сприяє проходженню низки перетворень під час нагрівання сплаву, що додатково підвищує електричний опір і нагріває сплав у процесі експлуатації.



Спектр	Al	Si	P	S	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sn	Pb
3	0,16	0,03	0,04	0,04	0,12	0,19	0,27	61,54	36,99	0,37	0,35	0	-0,04
4	0,04	0,03	0,02	0	0,09	0,2	0,26	60,71	38,71	0,19	-0,06	0,14	-0,29
5	0,2	0,08	0,04	0,01	0,11	0,1	0,13	53,66	45,16	0,25	0,12	0,14	0,12

Рис. 8. Мікроструктура й хімічний склад оплавленого зразка контактного затискача

Fig. 8. Microstructure and chemical composition of the molten sample of the contact clamp

Для попередження виникнення пожеж у результаті дії електричної дуги в електричних колах локомотивів, зокрема в зруйнованому пожежею електровозі ВЛ-80К, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна пропонує застосувати систему запобіжної сигналізації за власним патентом України [8]. Сигналізування про зростання температури з'єднань електричних кіл вище за визначену

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158183
© В. В. Коваленко, 2019

критичну величину, дозволяє попередити випадки пожеж, які є найбільш масовими на локомотивах українських залізниць.

Наукова новизна та практична значимість

Для попередження руйнування контактних затискачів й виникнення пожежі на локомотивах на ранніх стадіях розвитку несправностей, автор цієї роботи уперше пропонує впровадити додаткові сигнальні й контрольні системи.

Проведені дослідження дозволяють рекомендувати у регламентні роботи з технічного діагностування тягового рухомого складу, для продовження строку його експлуатації [9, 10], одноразово внести додаткові роботи з діагностування температурного стану контакторної й резисторної груп. Указані заходи допоможуть попередити передчасний вихід локомотивів із ладу, а також виникнення пожеж.

Висновки

1. У роботі проведено теоретичний, нормативно-технічний, візуальний, металографічний, мікроструктурний, мікрорентгеноспектральний, спектральний та рентгеноспектральний аналізи пошкоджених зразків контактних затискачів, а також аналіз стану електричної схеми електровоза на можливість виникнення пожежі.

2. Дослідження хімічного складу зразків показало, що жоден із застосованих у виготовленні контактних затискачів сплавів не відповідає вимогам технічної документації.

3. Мікроструктурний і мікрорентгеноспектральний аналізи дозволили ідентифікувати структурні складові сплавів і виявити значну забрудненість розтрісканого сплаву шкідливими домішками (свинцем, сіркою, киснем) і великими (до 10 мкм) глобулярними залізокремнієвими включеннями, що містять кисень.

4. Невідповідність хімічного складу контактних затискачів технічній конструкторській документації може спричинити як незаплановане спрацювання блоку диференційних реле БРД на відключення струму в процесі експлуатації електровозів, що може створити аварійну ситуацію на залізничному транспорті, так і стати причиною виникнення пожежі на електровозах. Усе вищезгадане напряму впливає на безпеку руху поїздів, у випадку невідповідності чинним нормам якості може стати причиною як техногенної аварії, так і загибелі людей на транспорті. Тому система захисту електричних ланцюгів тягового рухомого складу, запропонована й запатентована ДНУЗТ, відповідає нагальним технічним потребам залізничного транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горобець, В. Л. Дослідження причин виникнення пожеж на локомотивах / В. Л. Горобець, В. В. Коваленко // Залізн. трансп. України. – 2018. – № 4. – С. 52–58.
2. Горобець, В. Л. Дослідження причин передчасного руйнування колінчастого вала тепловоза 2ТЕ 116 / В. Л. Горобець, В. В. Коваленко // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 4 (76). – С. 101–110. doi: 10.15802/stp2018/141140
3. Горобец, В. Л. Система защиты подвижного состава от пожаров / В. Л. Горобец, В. В. Коваленко. – Локомотив-інформ. – 2018. – № 12. – С. 21–23.
4. ГОСТ 15527-2004. Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки [Електронний ресурс]. – Введ. 2005–07–01. – Режим доступу: http://docs.cntd.ru/document/1200037477 – Назва з екрана. – Перевірено : 24.01.2019.
5. Захаров, А. М. Диаграммы состояния двойных и тройных систем : учеб. пособие для вузов / А. М. Захаров. – Москва : Металлургия, 1990. – 240 с.
6. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка / Ю. М. Лахтин. – Москва : Машиностроение, 1983. – 359 с.
7. Лившиц, Б. Г. Металлография : учебник для вузов / Б. Г. Лившиц. – Москва : Металлургия, 1990. – 336 с.
8. Пат. Україна, МПК G 08 B 17/10. Система захисту електричних ланцюгів тягового рухомого складу / Коваленко В. В., Горобець В. Л., Заяць Ю. Л., Ткаченко Є. В. ; заявник та патентовласник Дніпропетр.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158183
© В. В. Коваленко, 2019

нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № u201605128 ; заявл. 11.05.2016 ; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24. – 5 с.
9. Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового рухомого складу (електровозів, тепловозів, електро та дизель-поїздів) : Наказ М-ва трансп. та зв'язку України від 30.06.2010 № 093. – Київ : Укрзалізниця, 2010. – 25 с.
10. Электровоз ВЛ80к. Руководство по эксплуатации. – Москва : Транспорт, 1978. – 432 с.
11. Мельник, В. Что дадут Украине американские тепловозы [Електронний ресурс] / В. Мельник // Бизнес цензор. – 2018. – Режим доступу: https://biz.censor.net.ua/r3044084 – Назва з екрана. – Перевірено : 24.01.2019.
12. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement / C. Gachot, A. Rosenkranz, S. M. Hsu, H. L. Costa // Wear. – 2017. – Vol. 372–373. – P. 21–41. doi: 10.1016/j.wear.2016.11.020
13. An experimental study of the load and heat influence from combustion on enginefriction / H. Allmaier, C. Knauder, S. Salhofer, F. M. Reich, E. Schalk, H. Ofner, A. Wagner // International Journal of Engine Research. – 2015. – Vol. 17. – Iss. 3. – P. 347–353. doi: 10.1177/1468087415579784
14. Priebsch, H. H. Simulation of the Oil Film Behaviour in Elastic Engine Bearings Considering Pressure and Temperature Dependent Oil Viscosity / H. H. Priebsch, J. Krasser // Tribology Series. – 1997. – Vol. 32. – P. 651–659. doi: 10.1016/S0167-8922(08)70490-5
15. Wong, V. W. Overview of automotive engine friction and reduction trends – Effects of surface, material, and lubricant-additive technologies / V. W. Wong, S. C. Tung // Friction. – 2016. – Vol. 4. – Iss. 1. – P. 1–28. doi: 10.1007/s40544-016-0107-9
16. Zammit, J.-P. Thermal coupling and energy flows between coolant, engine structure and lubricating oil during engine warm up / J.-P. Zammit, P. J. Shayler, I. Pegg // Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition (VTMS10). – Sawston : Woodhead Publishing, 2011. – P. 177–188. doi: 10.1533/9780857095053.3.177

В. В. КОВАЛЕНКО[1*]

[1*]Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 489 07 72, эл. почта kovaenkovv@upp.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЦЕПЕЙ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПОЖАРОВ НА ЛОКОМОТИВАХ

Цель. Работа направлена на выявление влияния несоответствия химического состава конструкций высоковольтных кругов на механизм возникновения пожара на локомотиве ВЛ-80к. **Методика.** Во время исследования образцов материалов контактных зажимов применены макро- и микроструктурный, фрактографический, аналитический анализы. **Результаты.** Аналитический анализ деталей позволил выявить первичные причины возгорания трансформаторного масла и последующего полного выгорания секции электровоза. Установлено, что разрушенные контактные зажимы имели такой химический состав, который не соответствует конструкторско-технической документации. Образованная при разрушении зажимов контактов дуга между краями макротрещин не привела к отключению основного высоковольтного реле, а вследствие большой мощности способствовала возгоранию большого объема трансформаторного масла, которое находилось снизу зажимов контактов. Такое возгорание может также возникнуть вследствие ослабления от вибрации соединений силовой цепи локомотива. Предупредить подобные случаи возгорания можно с помощью идентификации критических температур нагрева контактов высоковольтной камеры, контакторной и резисторной групп для немедленного укрепления или замены соединения. **Научная новизна**. В работе применен комплексный аналитический и технический подход к выявлению причин возникновения пожара на электровозе ВЛ-80к. Оценен типичный механизм возникновения пожара и максимальное количество факторов, которые могли повлиять на преждевременное разрушение зажимов

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158183
© В. В. Коваленко, 2019

контактов. Показано, что совокупность факторов, которые негативно повлияли на эксплуатационные характеристики зажимов контактов, одновременно достигла так называемой «критической массы» в результате нагрева указанных дефектных деталей. Внедрение дополнительных факторов сигнализации о сверхурочном нагреве исследованных и других важных деталей и конструкций локомотивов позволит предупредить возникновение пожаров, вовремя идентифицировать несоответствие химического состава деталей конструкторско-технической документации, а также выявлять зазоры в соединениях электрических цепей, возникшие либо вследствие недостаточной затяжки, либо ослабления соединений в процессе вибрации во время движения локомотивов. **Практическая значимость.** Предложенная дополнительная сигнализация будет способствовать сохранению не только парка локомотивов ОАО «Укрзализныця», но и жизни и здоровья работников локомотивных бригад.

Ключевые слова: электровоз ВЛ-80к; зажимы контактов; трансформаторное масло; преждевременное разрушение; пожар; химический состав; вредные примеси

V. V. KOVALENKO[1*]

[1*]Dep. «Life Safety», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 489 07 72, e-mail kovalenkovv@upp.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

INFLUENCE RESEARCH OF CHEMICAL COMPOSITION OF HIGH-VOLTAGE CIRCUIT DESIGNS ON THE FIRE BREAK-OUT AT THE LOCOMOTIVES

Purpose. The work is aimed at identifying the influence of the incompatibility of chemical composition of the high-voltage circuits designs on the mechanism of fire break-out at the VL-80k locomotive. **Methodology**. Macro- and microstructural, fractographic, analytical analyses were applied during the research of the samples of contact clamps materials. **Findings.** Analytical analysis of the parts of electric locomotive made it possible to identify the primary causes of circuit-breaker oil ignition followed by a complete burnout of the locomotive section. It was established that the destroyed contact clamps had a chemical composition that does not meet the requirements of design and technical documentation. The arc formed between the edges of macro-cracks during the destruction of the contact clamps did not lead to the disconnection of the main high-voltage relay, and due to the high power contributed to the ignition of a large amount of circuit-breaker oil, which was located below the contact clamps. Such ignition may also occur as a result of the weakening of the locomotive power circuit caused by the vibration. One can prevent such cases of ignition by identifying critical heating temperatures of the contacts of high-voltage cabinet, contactor and resistor groups to immediately strengthen or replace the connection. **Originality.** A comprehensive analytical and technical approach was applied in identifying the causes of fire at the VL-80k electric locomotive. A typical fire break-out mechanism and a maximum number of factors that could affect the premature destruction of the contact clamps were investigated. It is shown that a set of factors that negatively affected the performance characteristics of the contact clamps, simultaneously reached the so-called "critical mass" as a result of heating of these defective parts. The introduction of additional signaling factors for supercritical heating of the investigated and other important parts and designs of locomotives will prevent fires at the locomotives. It will help timely to identify the inconsistency of the chemical composition of the parts of the design and technical documentation, as well as to find out the gaps in the electrical connections that were formed either due to the insufficient tightening, or due to the weakening of connections in the process of vibration during the movement of locomotives. **Practical value.** The proposed additional signaling will contribute not only to the preservation of the locomotive fleet of Ukrzaliznytsia OJSC, but also to the rescue of locomotive brigades.

Keywords: electric locomotive VL-80k; contact clamps; circuit-breaker oil; premature destruction; fire; chemical composition; harmful impurities

REFERENCES

1. Horobets, V. L., & Kovalenko, V. V. (2018). Doslidzhennia prychyn vynyknennia pozhezh na lokomotyvakh. *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, *4*, 52-58. (in Ukrainian)
2. Horobets, V. L., & Kovalenko, V. V. (2018). Investigation of premature destruction causes of locomotive

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158183
© В. В. Коваленко, 2019

2TE116 crankshaft. *Science and Transport Progress, 4(76),* 101-110. doi: 10.15802/stp2018/141140 (in Ukrainian)

3. Gorobets, V. L., & Kovalenko, V. V. (2018). Sistema zashchity podvizhnogo sostava ot pozharov. *Lokomotyv-inform, 12,* 12-14. (in Russian)
4. Pressure treated copper zinc alloys (brasses). Grades. GOST 15527-2004. Retrieved from http://docs.cntd.ru/document/1200037477 (in Russian)
5. Zakharov, A. M. (1990). *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh i troynykh sistem: uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moscow: Metallurgiya. (in Russian)
6. Lakhtin, Y. M. (1983). *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka*. Moscow: Mashinostrenie. (in Russian)
7. Livshits, B. G. (1990). *Metallografiya: uchebnik dlya vuzov*. Moscow: Metallurgiya. (in Russian)
8. Kovalenko, V. V., Horobets, V. L., Zaiats, Y. L., & Tkachenko, Y. V. (2016). *UA Patent No. 112526.* Kyiv: Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (Ukrpatent). (in Ukrainian)
9. *Polozhennia pro planovo-poperedzhuvalnu systemu remontu i tekhnichnoho obsluhovuvannia tiahovoho rukhomoho skladu (elektrovoziv, teplovoziv, elektro ta dyzel-poizdiv).* № 093. (2010). (in Ukrainian)
10. *Elektrovoz VL80k. Rukovodstvo po ekspluatatsii*. Moscow: Transport. (in Russian)
11. Melnik, V. (2018). Chto dadut Ukraine amerikanskie teplovozy. *Biznes tsenzor.* Retrieved from https://biz.censor.net.ua/r3044084 (in Russian)
12. Gachot, C., Rosenkranz, A., Hsu, S. M., & Costa, H. L. (2017). A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. *Wear, 372-373,* 21-41. doi: 10.1016/J.WEAR.2016.11.020 (in English)
13. Allmaier, H., Knauder, C., Salhofer, S., Reich, F., Schalk, E., Ofner, H., & Wagner, A. (2015). An experimental study of the load and heat influence from combustion on engine friction. *International Journal of Engine Research, 17(3),* 347-353. doi: 10.1177/1468087415579784 (in English)
14. Priebsch, H. H., & Krasser, J. (1997). Simulation of the Oil Film Behaviour in Elastic Engine Bearings Considering Pressure and Temperature Dependent Oil Viscosity. *Tribology Series, 32*, 651-659. doi: 10.1016/s0167-8922(08)70490-5 (in English)
15. Wong, V. W., & Tung, S. C. (2016). Overview of automotive engine friction and reduction trends – Effects of surface, material, and lubricant-additive technologies. *Friction, 4(1),* 1-28. doi: 10.1007/s40544-016-0107-9 (in English)
16. Zammit, J.-P., Shayler, P. J., & Pegg, I. (2011). Thermal coupling and energy flows between coolant, engine structure and lubricating oil during engine warm up. In *Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition (VTMS10)* (pp. 177-188). Sawston: Woodhead Publishing. doi: 10.1533/9780857095053.3.177 (in English)

Надійшла до редколегії: 12.09.2018
Прийнята до друку: 19.01.2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158183
© В. В. Коваленко, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

УДК 656.07; 338.47

О. А. ХОДОСКИНА[1*], Ю. В. МАТЮШКОВА[2]

[1*]Каф. «Экономика транспорта», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (529) 730 35 91, эл. почта for_diplomnic@mail.ru, ORCID 0000-0003-2254-9638
[2] Каф. «Экономика транспорта», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (525) 531 93 97, эл. почта girlfriendsxx@mail.ru, ORCID 0000-0003-1210-8417

РОЛЬ ОБНОВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ

Цель. Основной целью работы является повышение эффективности работы станции Гомель путем внедрения автоматизированной системы коммерческого осмотра поездов и вагонов (АСКО ПВ), а также разработка вариантов оптимизации работы железнодорожной станции в целом. **Методика.** В ходе исследования применены методы научного поиска, статистического анализа, синтеза, элементы теории моделирования систем для изучения иерархических структур, возникающих при определении причинно-следственных связей в выявлении неблагоприятных факторов работы станции. **Результаты.** Ключевая роль сортировочных станций в эксплуатационной работе объясняется выполнением основной работы по формированию и расформированию поездов, от которой в значительной степени зависит необходимый парк вагонов для выполнения заданного объема перевозок, скорость доставки грузовых отправок. Поэтому работа сортировочных станций оказывает существенное влияние на расходы железных дорог, качество транспортного обслуживания, удовлетворение спроса на перевозки и доходы отрасли. Следовательно, повышение эффективности работы сортировочных станций способствует достижению оптимальных эксплуатационных и экономических показателей для отрасли в целом. Рассмотрены пути оптимизации работы станции, определены инновационные пути совершенствования технологического процесса сортировочной станции в целом, выявлена практическая значимость обновления существующей операционной системы, ее целесообразность и эффективность, рассчитан логистический эффект от внедрения системы АСКО ПВ путем детального изучения её работы, выявления преимуществ и недостатков. **Научная новизна**. На основании изучения методических источников и научных разработок в области технологических особенностей и совершенствования работы грузовых станций на методическом уровне определены основные направления оптимизации работы сортировочной станции Гомель, являющиеся наиболее перспективными. Определены и структурированы причины, влияющие на простой вагонов на сортировочной станции, и сформированы соответствующие организационные мероприятия для уменьшения простоя. **Практическая значимость.** Проведенное аналитическое исследование и предложенные пути решения выявленных проблем позволят усовершенствовать технологию и повысить качество коммерческого осмотра, создать безопасные условия и улучшить охрану труда приемщиков поездов, а также будут способствовать повышению эффективности работы рассмотренной железнодорожной станции в технологическом и экономическом плане.

Ключевые слова: станция; основные средства; операционная система; коммерческая неисправность; оптимизация

Введение

Железнодорожный транспорт в Республике Беларусь занимает значительное место. Он осуществляет более 80 % объема грузовых и порядка 50 % пассажирских перевозок, выполняемых транспортом общего пользования [4]. Являясь основой системы транспорта, железная дорога обладает чрезвычайно важным экономическим, политическим, оборонным и социальным значением. Объекты транспортной инфраструктуры –

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© О. А. Ходоскина, Ю. В. Матюшкова, 2019

это железнодорожные пути общего пользования, железнодорожные станции, в том числе вокзалы; устройства железнодорожного электроснабжения, сети связи, системы сигнализации, централизации и блокировки, информационные комплексы, система управления движением поездов, объекты и системы водоснабжения и водоотведения, иные капитальные строения (здания, сооружения), устройства и оборудование, непосредственно предназначенные для обеспечения перевозочного процесса на железнодорожном транспорте общего пользования.

Огромная роль в перевозочном процессе принадлежит сортировочным станциям, от устойчивой работы которых зависит деятельность железнодорожных направлений и Белорусской железной дороги в целом. Около 70 % времени своего оборота вагон находится на станциях, и именно на них имеются основные резервы сокращения оборота вагонов, своевременного и качественного обеспечения перевозок [1, 6, 7, 9].

Вместе с тем на сегодняшний день трудно представить какую-либо сферу народного хозяйства без использования информационных технологий. Не является исключением и железная дорога – специализированное программное обеспечение используется и при организации движения поездов, и при осуществлении маневровой работы, ремонтов и т. д. Рассмотрим место операционной системы в работе станции на примере внеклассной двухсторонней сортировочной станции Гомель, на которой внедрена автоматизированная система коммерческого осмотра поездов и вагонов (АСКО ПВ).

Цель

Основной целью работы является повышение эффективности работы станции Гомель путем внедрения автоматизированной системы коммерческого осмотра поездов и вагонов (АСКО ПВ), а также разработка вариантов оптимизации работы железнодорожной станции в целом.

Методика

В ходе исследования применены методы научного поиска, статистического анализа, синтеза, элементы теории моделирования систем для изучения иерархических структур, возникающих при определении причинно-следственных связей в выявлении неблагоприятных факторов работы станции.

Результаты

Станция Гомель является внеклассной двухсторонней сортировочной станцией и предназначена для расформирования и формирования грузовых поездов, операций по их коммерческому и техническому обслуживанию, подготовки грузовых вагонов под погрузку, грузовых операций с вагонами, формирования и обслуживания поездов для перевозки пассажиров: международных, межрегионального и регионального сообщений. С целью выявления и устранения коммерческих неисправностей, угрожающих безопасности движения поездов и сохранности перевозимых грузов, используют пункты коммерческого осмотра (ПКО), на которых производят осмотр грузовых поездов, вагонов и контейнеров. В связи с этим важным элементом работы станции является обеспечение требуемого уровня использования информационных технологий и соответствующих программных продуктов. Это наглядно можно рассмотреть на примере пунктов коммерческого осмотра поездов, вагонов и контейнеров. Их создают на входных пограничных передаточных станциях Белорусской железной дороги и на технических станциях её отделений таким образом, чтобы был обеспечен осмотр всех поступающих и отправляемых поездов, вагонов и контейнеров.

Для совершенствования хозяйствования сортировочной станции реализуют мероприятия, направленные на снижение простоя вагонов (транзитных с переработкой), поскольку простой вагона – это основной интегральный показатель работы станции.

На рис. 1 в виде диаграммы Исикавы представлены причины, влияющие на простой вагонов на сортировочной станции.

Анализ работы сортировочной станции показывает, что простой вагонов обусловлен в основном двумя причинами: непроизводительными потерями и несовершенством технологического процесса. Таким образом, возможны два пути оптимизации работы:

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© О. А. Ходоскина, Ю. В. Матюшкова, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

1) сведение к минимуму непроизводительного простоя вагонов;

2) внедрение инновационных технологий, направленных на совершенствование технологического процесса сортировочной станции в целом.

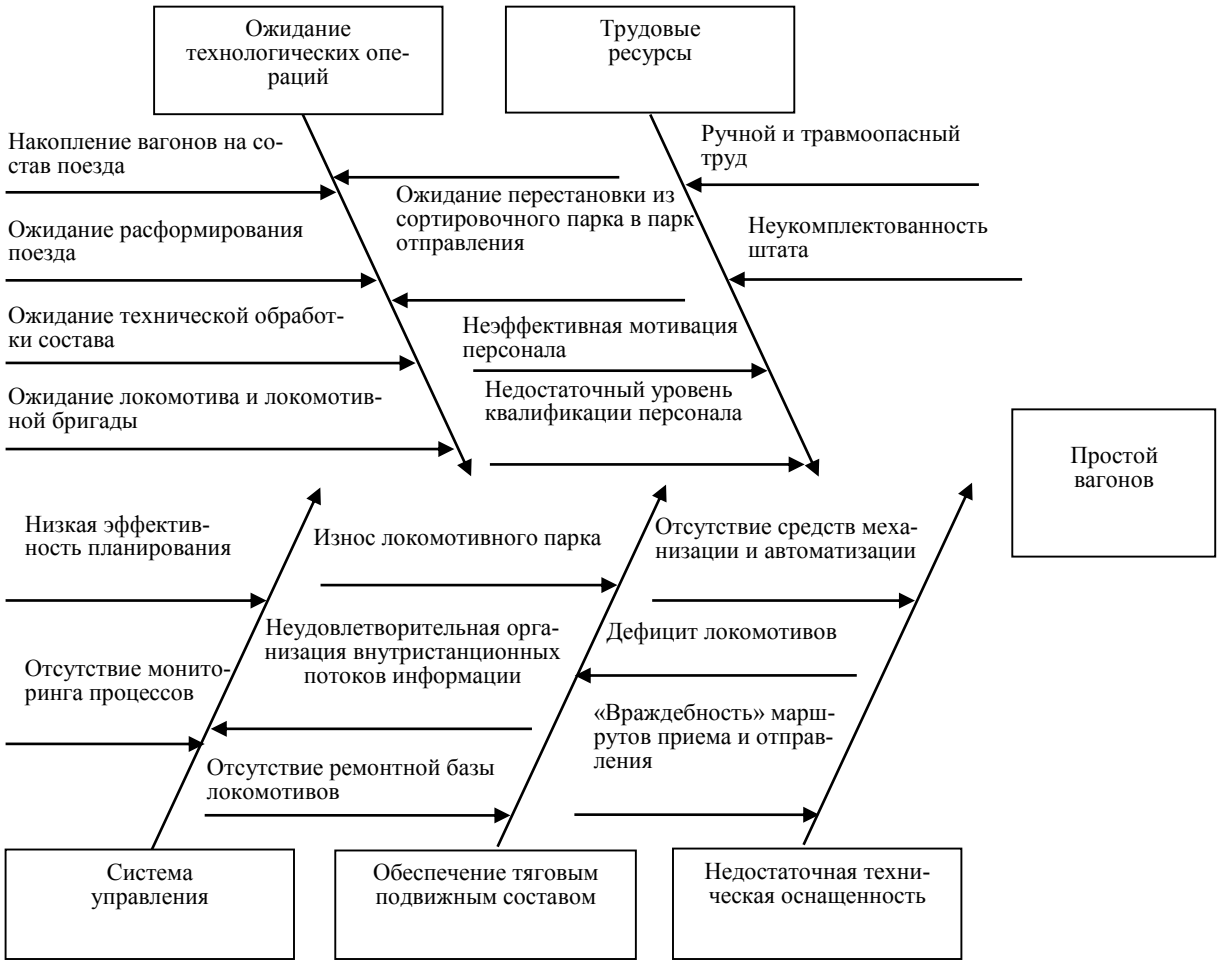


Рис. 1. Диаграмма Исикавы: причины простоя вагонов на сортировочной станции

Fig. 1. Ishikawa Chart: causes of car detention at the marshalling yard

В табл. 1 и 2 показано, что способствует возникновению непроизводительных затрат, и перечислены организационные мероприятия, направленные на снижение непроизводительных потерь сортировочной станции.

Соответствующая иерархическая структура (рис. 2) позволяет наглядно представить перечень организационных мер, необходимых для устранения неблагоприятных факторов, способствующих возникновению непроизводительных простоев на сортировочной станции.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© О. А. Ходоскина, Ю. В. Матюшкова, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Таблица 1

Наиболее значимые факторы, обуславливающие простой вагонов на станции

Table 1

The most significant options causing a car detention at the station

Причины простоя		Факторы
Накопление вагонов на состав поезда	Ф1	Неравномерность прибытия поездов в расформирование, невысокое количество поездов, прибывающих в расформирование
Ожидание расформирования состава	Ф2	Неравномерность прибытия поездов, занятость путей в сортировочном парке
Ожидание перестановки из сортировочного парка в парк отправления	Ф3	Невыполнение графика движения поездов, технологические окна на перегонах
Ожидание обработки в парке приема	Ф4	Отсутствие надлежащего штата работников
Ожидание обработки в парке отправления	Ф5	Отсутствие надлежащего штата работников
Несвоевременное прибытие в парк приема	Ф6	Неудовлетворительное выполнение графика движения поездов, технологические окна, неравномерность работы станций узла
Ожидание локомотива в парке отправления	Ф7	Неудовлетворительная работа диспетчерского аппарата, неудовлетворительное техническое состояние локомотивного парка

Таблица 2

Организационные мероприятия по снижению непроизводительных потерь

Table 2

Organizational measures to reduce unproductive losses

Причины простоя		Организационные меры
Накопление вагонов на состав поезда	М1	Пересмотр плана формирования поездов
	М2	Выполнение графика движения поездов
Ожидание расформирования состава	М3	Автоматизация сортировочных процессов
	М2	Выполнение графика движения поездов
	М4	Автоматизация движения маневровых локомотивов
Ожидание перестановки из сортировочного парка в парк отправления	М5	Содержание в норме локомотивного парка
	М2	Выполнение графика движения поездов
	М4	Автоматизация движения маневровых локомотивов
Ожидание обработки в парке приема	М6	Введение системы электронного документооборота

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© О. А. Ходоскина, Ю. В. Матюшкова, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Продолжение табл. 2

Continuation of Table 2

Причины простоя		Организационные меры
Ожидание обработки в парке приема	М6	Введение системы электронного документооборота
Ожидание обработки в парке отправления	М6	Введение системы электронного документооборота
Несвоевременное прибытие в парк приема	М2	Выполнение графика движения поездов
	М7	Автоматизация планирования работы станций узла
Ожидание локомотива в парке отправления	М8	Строительство пункта технического осмотра локомотивов на станции
	М9	Выдача локомотивов под поезда в исправном состоянии
	М10	Улучшение качества работы диспетчерского аппарата

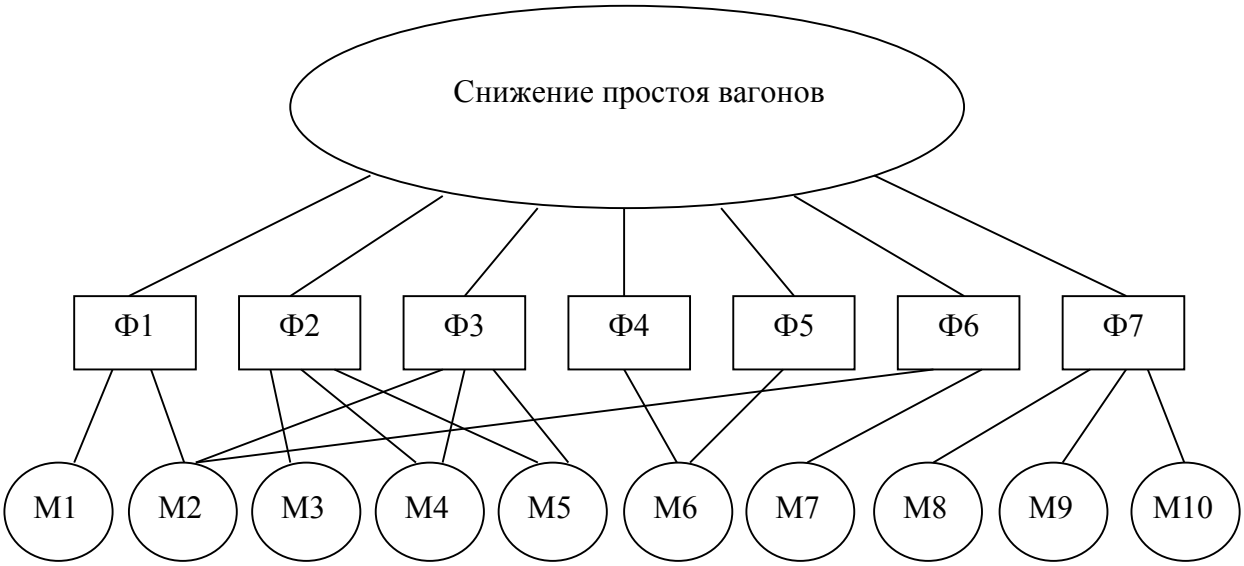


Рис. 2. Иерархическая структура «Цель – факторы – организационные меры»

Fig. 2. Hierarchical structure «Purpose – options – organizational measures»

Другим направлением повышения эффективности работы сортировочной станции является внедрение инноваций с целью совершенствования технологического процесса в целом [2, 3, 5, 10, 12].

Инновационными предложениями, реализация которых будет способствовать дальнейшему техническому развитию сортировочной станции и повышению эффективности ее функционирования, являются:

– постоянное совершенствование организационных и технических мероприятий, направленных на улучшение эксплуатационных показателей работы станции;

– постоянное увеличение количества формирования поездов дальних назначений, сокращение переработки вагонов на сортировочных горках;

– повышение веса и длины грузовых поездов для экономии энергоресурсов на тягу поездов;

– развитие информационного обеспечения перевозочного процесса (системы ДИСПАРК, АСОУП и др.) с полной автоматизацией ин-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© О. А. Ходоскина, Ю. В. Матюшкова, 2019

формационного обеспечения диспетчерского аппарата для организации более точного планирования и контроля за выполнением планов погрузки, выгрузки, подходом и наличием вагонов на станциях и подъездных путях в реальном времени;

– удлинение приемо-отправочных путей основных технических станций;

– совершенствование технологии местной работы, направленной на получение максимальной эффективности перевозочного процесса исходя из соотношения наличия технических средств к объемам выполняемой работы;

– четкая организация планирования работы станции.

Еще одним инновационным подходом является применение метода совершенствования маневровой работы крупных сортировочных станций, в основе которого лежит принцип качественной подготовки и повышения квалификации оперативного персонала в условиях виртуальной реальности. Реализация данного принципа позволяет повысить безопасность производственных процессов на железнодорожном транспорте за счет обучения работников сортировочных станций с использованием тренажеров горочного комплекса, базирующихся на трехмерном аудиовизуальном моделировании.

Экономический эффект от внедрения тренажера связан с повышением уровня квалификационной подготовки оперативного персонала горки. Его использование ведет к снижению вероятности возникновения аварийных ситуаций и случаев производственного брака.

Дополнительный экономический эффект от внедрения тренажера состоит в сокращении потерь, связанных с повреждением вагонов и находящихся в них грузов, простоем поездов в ожидании расформирования, сходом подвижного состава, повреждением верхнего строения путей горочной горловины. Кроме того, повышается надежность функционирования системы расформирования и, как следствие, увеличивается уровень экологической безопасности.

Одним из современных комплексов выявления коммерческих неисправностей на ПКО, позволяющих производить осмотр вагонов дистанционно, является автоматизированная система коммерческого осмотра поездов и вагонов (АСКО ПВ). Сейчас АСКО ПВ – это комплекс устройств, предназначенных для визуального контроля и регистрации состояния поездов, вагонов и грузов в процессе движения, визуального контроля качества крепления грузов, контроля соблюдения габаритности погрузки, улучшения условий труда и повышения уровня личной безопасности работников, занятых осмотром вагонов.

Система АСКО ПВ представляет собой электронные габаритные ворота, оснащённые системой телевизионного контроля (видеокамерами). Система обеспечивает выполнение задач по осмотру вагонов и контейнеров на предмет правильности загрузки и сохранности грузов, а также выявляет отдельные неисправности вагонов. В процессе осмотра вагон (поезд) проходит через электронные ворота на скорости до 40 км/ч. Изображение автоматически передаётся оператору пункта коммерческого осмотра, который обрабатывает, распечатывает и передаёт его приёмщику. При подходе поезда дежурный по станции передает информацию по прямой телефонной или парковой громкоговорящей связи оператору (приемщику поездов) о подходе поезда к системе АСКО ПВ с указанием номера и индекса поезда, наименования перегона, с которого производят прием, времени прибытия и номера пути, на который его принимают. Оператор АСКО ПВ вводит полученную информацию о поезде в систему АСКО ПВ.

Указанная система может работать в автоматическом режиме приема информации о составе из локальной сети станции. В ней соблюдение границ габаритности контролируется с помощью лучевых инфракрасных датчиков. Датчики закреплены на несущей конструкции и расположены таким образом, что инфракрасные лучи формируют границу зоны габаритности. Если какой-либо предмет выступает за установленные границы, то он перекрывает инфракрасный луч. При этом датчик формирует тревожное извещение, которое с помощью оборудования передачи сигналов передается на автоматизированное рабочее место ПКО и отображается на компьютерном мониторе оператора в виде красного отрезка линии, обозначающей соответствующую зону негабаритности. Факт негабаритности регистрируют

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© О. А. Ходоскина, Ю. В. Матюшкова, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

в журнале событий с фиксацией порядкового номера вагона, в котором она обнаружена.

Описываемая система предоставляет оператору возможность визуального контроля состояния крыш, бортов вагонов подвижного состава, верхних люков цистерн, а также крепления грузов на открытых вагонах в реальном масштабе времени при прохождении состава через габаритные ворота. Для этого на несущей конструкции закреплены телекамеры, направленные на вагон с трех сторон: справа, слева и сверху. Отдельная четвертая телекамера установлена с целью формирования изображения люков цистерн. Телекамеры формируют видеоизображения, которые с помощью оборудования передачи сигналов поступают на автоматизированное рабочее место и отображаются на компьютерном мониторе комплекса. Одновременно с этим в автоматическом режиме производится регистрация видеоизображений, позволяющая после прохождения состава в замедленном режиме выполнить анализ прошедшего состава. Регистрация видеоизображений производится на жесткий диск сетевого хранилища данных системы.

Для обеспечения видеонаблюдения в темное время суток необходимо обеспечить освещение вагона. Для этой цели на несущей конструкции закреплены пять прожекторов, освещающие вагон с трех сторон: слева, справа и сверху. Включение прожекторов происходит автоматически при снижении уровня естественного освещения ниже установленного порога. Результаты осмотра состояния вагонов и грузов с помощью автоматических средств обрабатываются на ПЭВМ оператора и передаются на ПЭВМ приемщика в виде сообщения. Сообщение состоит из одной служебной и нескольких информационных фраз.

Приемщик поездов, получив информацию о зарегистрированных автоматическими средствами коммерческих неисправностях, обрабатывает её и формирует сообщение в автоматизированную систему управления станции о наличии негабаритных грузов и неисправных в коммерческом отношении вагонах в прибывшем поезде. Данное сообщение по команде приемщика поездов передается средствами АСУ станции на автоматизированное рабочее место станционного технологического центра, где о результатах осмотра вагонов в коммерческом отношении автоматически выдается на печать информация в виде справки с отметкой о запрете ставить вагон в поезд. Старший оператор СТЦ, получив справку, вносит необходимые корректировки в сортировочный листок. Маневровый диспетчер совместно со старшим по смене приемщиком поездов на основании этой информации принимает решение об отцепке вагона или пропуске его по назначению с устранением коммерческого брака в парке отправления.

Все выявленные коммерческие неисправности оформляют актом общей формы (ф. ГУ-23) согласно Правил коммерческого осмотра поездов и вагонов.

АСКО ПВ является программно-техническим комплексом средств автоматизации в составе пункта коммерческого осмотра, движущегося грузового подвижного состава и находящихся на нем грузов и контейнеров с последующим сбором, обработкой, хранением и документированием результирующей информации о коммерческом состоянии вагонов и грузов и передачей ее в автоматизированную систему оперативного управления перевозками.

Определить срок окупаемости и экономический эффект от внедрения этого программного продукта сложно, так как основными целями реализации такого проекта являются следующие:

– обеспечение функций передаточной станции по организации коммерческого осмотра поездов и вагонов в условиях электрификации;

– улучшение условий труда и повышение техники личной безопасности работников, связанных с операциями по выполнению коммерческого осмотра, с выводом их из опасной зоны.

Однако следует отметить, что технические средства контроля являются вспомогательными при осуществлении коммерческого осмотра, и заключение о результатах коммерческого осмотра должно приниматься комплексно. Также немаловажно, что установка полноценной системы АСКО ПВ, включающей все комплекты возможного оборудования, требует значительных капитальных вложений. Поэтому, с учетом местных условий на станциях Белорусской железной дороги, в первую очередь на по-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© О. А. Ходоскина, Ю. В. Матюшкова, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

граничных передаточных станциях, есть необходимость поэтапного внедрения современных технических средств и модернизации имеющихся, без вложения больших объемов инвестиционных ресурсов. Так, например, использование промышленных телевизионных установок на станциях формирования поездов, в пунктах смены поездных локомотивов, локомотивных бригад и передачи вагонов с одной дороги на другую позволит сократить межоперационные перерывы, связанные с осмотром составов, повысит производительность труда, а также безопасность обслуживающего персонала. Телеконтроль позволит улучшить качество коммерческого осмотра поездов, уменьшить время простоя вагонов на станциях и увеличить пропускную способность ПКО [11, 13]. Таким образом, будет достигнут значительный логистический эффект. Кроме того, использование телеустановок снизит объем маневровых работ, улучшит условия труда приемщиков ПКО и позволит сократить штат работников пунктов коммерческого осмотра. Также телеконтроль, совмещенный с видеозаписью, даст возможность документально фиксировать коммерческое состояние прибывающих и отправляемых поездов. Для осмотра состояния крепления грузов на открытом подвижном составе, проверки исправности крыш вагонов и контейнеров, состояния верхних загрузочных люков вагонов и цистерн применяют смотровые вышки, оборудованные телефонной и радиосвязью. При наличии смотровых вышек коммерческий осмотр поезда осуществляют приемщики, находящиеся на них. В перспективе смотровые вышки также могут быть оборудованы указанными телеустановками.

Для проверки габарита погрузки на открытом подвижном составе необходимо устанавливать габаритные ворота с электронным дистанционным контролем. Место установки габаритных ворот и стационарных смотровых вышек в виде капитальных сооружений определяют в зависимости от местных условий с учетом необходимости полного и своевременного обнаружения коммерческих неисправностей.

Взамен стационарных смотровых вышек на ПКО Белорусской железной дороги, особенно расположенных на пограничных передаточных станциях, целесообразно применение смотровых вышек в виде обрешеченных металлических конструкций со смотровыми площадками с ограждением и источниками освещения; их называют переносными смотровыми вышками, поскольку при необходимости они могут быть перенесены и установлены в другом месте.

Таким образом, внедрение современных технических средств на станциях Белорусской железной дороги для автоматического выявления коммерческих браков в поездах и вагонах позволит усовершенствовать технологию и повысить качество коммерческого осмотра, создать безопасные условия и улучшить охрану труда приемщиков поездов, а также оптимизировать штатную численность работников ПКО.

Необходимо отметить и то, что эффективная деятельность любой организации (в том числе и Белорусской железной дороги) в значительной мере зависит от штатной численности её работников, а также рационального использования трудовых ресурсов.

Величина загрузки смотровых бригад приемщиков зависит от размеров движения поездов, установленной технологии выполнения работ, особенностей путевого развития и технической оснащенности станций [8]. Коэффициент загрузки определяют по формуле:

$$k_з = \frac{T_з + T_{ОТ}}{720} \cdot 100, \qquad (1)$$

где $T_з$ – затраты времени смотровых бригад приемщиков поездов на коммерческий осмотр, мин; $T_{ОТ}$ – время на отдых и личные надобности (составляет 10 % от продолжительности смены); 720 – продолжительность смены, мин.

Затраты времени $T_з$ можно рассчитать по формуле:

$$T_З = \frac{Q_{АСКОПВ} \cdot N \cdot T_{обр}^{техн}}{730}, \qquad (2)$$

где $Q_{АСКОПВ}$ – понижающий коэффициент, учитывающий снижение затрат времени на осмотр поездов ввиду использования системы АСКО ПВ (принимается равным 0,7 на основе анализа данных станций РФ, на которых уже эксплуатируется АСКО ПВ); N – количество осматриваемых поездов за год, поездов; $T_{обр}^{техн}$ – техно-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© О. А. Ходоскина, Ю. В. Матюшкова, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

логическое время на осмотр одного поезда, мин; 730 – количество смен в году.

Согласно статистическим данным станции Гомель за 2016 год, имеем:

– прибытие поездов в четном направлении (из Жлобина и Калинковичей) составляет 2 966 поездов;

– отправление поездов в четном направлении (на Унечу, Бахмач и Чернигов) составляет 2 253 поезда;

– прибытие поездов в нечетном направлении (из Унечи, Бахмача и Чернигова) составляет 1 954 поезда;

– отправление поездов в нечетном направлении (на Жлобин и Калинковичи) составляет 2 822 поезда;

– прибытие и отправление передаточных и вывозных поездов по станции Гомель в четном направлении составляет 4 865 поездов;

– прибытие и отправление передаточных и вывозных поездов по станции Гомель в нечетном направлении составляет 5 471 поезд.

В соответствии с технологическим процессом станции Гомель технологическое время на осмотр поезда по прибытию составляет 80 мин, по отправлению – 40 мин, время на осмотр передаточного или вывозного поезда как по прибытию, так и по отправлению – 40 мин.

Подставив необходимые значения в формулу (2), можно рассчитать затраты времени смотровых бригад приемщиков, затрачиваемых на осмотр поездов в четной и нечетной системах станции Гомель за смену. Они составят: в четном направлении – 618 мин, в нечетном направлении – 604 мин. Тогда исходя из формулы (1) загрузка смотровой бригады составит 96 и 94 % соответственно.

Значения коэффициентов загрузки близки к единице, так как в расчетах принималось, что осмотром поездов в обеих системах станции занято по 1 бригаде приемщиков. Очевидно, что данный вариант неприемлем. Поэтому целесообразно как на четной, так и на нечетной системах привлекать для осмотра поездов по 2 бригады приемщиков поездов, тогда расчетный коэффициент их загрузки в смену составит не более 50 %.

На данный момент по существующей технологии коммерческий осмотр поездов производят на станции Гомель по чётной системе – 2 бригады приемщиков, что является оптимальным вариантом (1-я бригада работает с поездами в парке приема, 2-я бригада – в сортировочно-отправочном парке); на станции Гомель по нечётной системе – 3 бригады приемщиков (1-я бригада работает с поездами в парке прибытия «А», 2-я бригада – в приемо-отправочном парке «Б», 3-я бригада – в сортировочно-отправочном парке «С»).

В соответствии с картами-фотографиями рабочего времени в парке приема (ПП) и сортировочно-отправочном парке (СОП) на станции Гомель по чётной и Гомель по нечётной системе коэффициент загрузки смотровых бригад приемщиков поездов в период 18.09.2017–22.09.2017 составил: в «ПП – Гомель чётная система» – 43 %, в «СОП – Гомель чётная система» – 28 %, в «А – Гомель нечётная система» – 66 %, в «Б – Гомель нечётная система» – 39 %, в «С – Гомель нечетная система» – 33 %. Полученные данные приблизительно соответствуют рассчитанным по формуле (1) и составляют от 30 до 70 %.

Как видно из расчетов, при объединении двух бригад приемщиков поездов, работающих в «Б (нечётная система)» и «С (нечётная система)», в одну, их суммарная загрузка составит 72 %, однако следует учесть, что:

1) суммарно парки «Б» и «С» включают 26 путей, а значит приемщикам поездов нужно преодолевать значительные расстояния при переходе от одного поезда к другому;

2) в сортировочно-отправочном парке производят значительную маневровую работу (перестановку вагонов, осаживание составов, роспуск и т. п.), в результате которой переход с одного пути на второй может быть временно невозможен;

3) в соответствии со спецификой работы в приемо-отправочный парк «Б» принимают большое количество так называемых «прямых» поездов (отправляемых со станции без пропуска вагонов через сортировочную горку с уменьшением / увеличением числа вагонов или без него), которые требуют оперативной работы, что в случае сгущенного подхода поездов может вызвать значительные простои и даже срыв нитей графика движения поездов;

4) в нечетной системе парк прибытия «А» находится на значительном удалении от распо-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© О. А. Ходоскина, Ю. В. Матюшкова, 2019

ложенных параллельно парков «Б» и «С», к тому же между ними расположена сортировочная горка, что делает невозможным, например, проход из парка «А» в парк «Б» при роспуске состава, а следовательно, при простое бригады из парка «А» она далеко не всегда сможет помочь с осмотром поездов в парках «Б» или «С».

Из вышеперечисленного следует, что существующее число бригад приемщиков поездов по нечётной системе станции Гомель в количестве трех является оптимальным.

Научная новизна и практическая значимость

Следует отметить, что в современном мире практически любая деятельность человека сопровождается не просто использованием технических средств, но и применением адекватного программного обеспечения. Конечно, железнодорожный транспорт не является исключением. По результатам исследования практической деятельности сортировочной станции, а также на основании существующих и уже используемых программных ресурсов, методических и научных разработок в области технологических особенностей и совершенствования работы грузовых станций на методическом уровне определены основные направления оптимизации работы сортировочной станции Гомель. Наиболее перспективным, по мнению авторов, является применение инновационного подхода, в частности, развитие информационного обеспечения перевозочного процесса посредством внедрения и использования системы АСКО ПВ (и др.). Это позволит полностью автоматизировать информационное обеспечение диспетчерского аппарата для организации более точного планирования и контроля за выполнением планов погрузки, выгрузки, подходом и наличием вагонов на станциях и подъездных путях в реальном времени. Также на методическом уровне определены и структурированы причины, влияющие на простой вагонов на сортировочной станции, и сформулированы соответствующие им организационные мероприятия для уменьшения простоя.

Результаты выполненного аналитического исследования и сформулированные путем решения выявленных проблем позволят не только усовершенствовать технологию и повысить качество коммерческого осмотра, но и создать безопасные условия и улучшить охрану труда приемщиков поездов.

Выводы

На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что благодаря внедрению АСКО ПВ на станции Гомель будет достигнут значительный логистический эффект за счет уменьшения времени простоя вагонов и увеличения пропускной способности ПКО. На основе анализа данных станций сопредельных государств, на которых уже эксплуатируется АСКО ПВ, снижение затрат времени на осмотр поездов может достигать 70 %. Следовательно, внедрение АСКО ПВ на стации Гомель позволит сократить технологическое время на осмотр поезда по прибытию до 24 мин, по отправлению – до 12 мин, время на осмотр передаточного или вывозного поезда как по прибытию, так и по отправлению – также до 12 мин. Кроме того, данная система будет способствовать повышению эффективности работы рассмотренной железнодорожной станции как в технологическом, так и в экономическом плане.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аксёнчиков, А. А. Модель технологического процесса работы железнодорожной станции с учетом выполняющих функций станции передачи вагонов / А. А. Аксёнчиков // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Красноярск, 07–08 апр. 2016 г.). – Красноярск, 2016. – С. 329–334.
2. Асмарян, Г. Д. Направления совершенствования работы железнодорожной станции Ростов / Г. Д. Асмарян // Наука и современность. – 2014. – № 34. – С. 158–164.
3. Варжина, К. М. Методика оптимизации путевого развития грузовых железнодорожных станций / К. М. Варжина, С. Н. Корнилов // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства : материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Тюмень, 12 февр. 2015 г.). – Тюмень, 2015. – С. 61–65.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© О. А. Ходоскина, Ю. В. Матюшкова, 2019

4. Демидчик, Е. В. Значение и роль железнодорожного транспорта в экономике Республики Беларусь / Е. В. Демидчик, Е. Н. Жуковец // НИРС-2015 : материалы 71-й студ. науч.-техн. конф. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2015. – С. 114.
5. Карнакова, В. В. Методы совершенствования технологии работы грузовой железнодорожной станции Балаково Приволжской железной дороги / В. В. Карнакова, Е. А. Солопова, А. С. Ладин // Наука и образование транспорту. – 2014. – № 1. – С. 60–61.
6. Корнилов, С. Н. Методика оптимизации путевого развития транспортных узлов на примере грузовых железнодорожных станций / С. Н. Корнилов, К. М. Варжина // Соискатель (прил. к журналу «Мир транспорта»). – 2015. – № 1 (9). – С. 102–106.
7. Костенко, В. В. Моделирование работы железнодорожных станций для определения их проектных параметров и анализа эксплуатационной деятельности / В. В. Костенко, П. С. Алейник, А. А. Дегтярев // Интеллектуальные системы на транспорте : материалы IV междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 03–04 апр. 2014 г.) / Петербург. гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 542–545.
8. Лысиков, М. Г. Система планирования показателей работы железнодорожной сортировочной станции / М. Г. Лысиков, А. М. Ольшанский // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2014) : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Самара, 2014. – С. 372–379.
9. Параметры инновационных вагонов и некоторые проблемы их реализации / В. Н. Филиппов, А. В. Смольянинов, И. В. Козлов, Я. Д. Подлесников [и др.] // Транспорт Урала. – 2017. – № 1 (52). – С. 25–31. doi: 10.20291/1815-9400-2017-1-25-31
10. Хомякова, М. А. Интеллектуализация управленческих функций дежурного по станции / М. А. Хомякова // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. – 2017. – Т. 76, № 2. – С. 123–128. doi: 10.21780/2223-9731-2017-76-2-123-128
11. Чернявский, В. С. Особенности исторического развития устройств для сортировки вагонов на железнодорожных станциях / В. С. Чернявский // Тр. Рост. гос. ун-та путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2014. – № 2. – С. 148–153.
12. Khachatryan, N. K. Model for organizing cargo transportation with an initial station of departure and a final station of cargo distribution / N. K. Khachatryan, A. S. Akopov // Business Informatics. – 2017. – No. 1 (39). – С. 25–35. doi: 10.17323/1998-0663.2017.1.25.35
13. Safety monitor for train-centric CBTC system / Haifeng Wang, Ning Zhao, Bin Ning, Tao Tang, Ming Chai // IET Intelligent Transport Systems. – 2018. – Vol. 12. – Iss. 8. – P. 931–938. doi: 10.1049/iet-its.2018.5231

О. А. ХОДОСКІНА[1*], Ю. В. МАТЮШКОВА[2]

[1*]Каф. «Економіка транспорту», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 730 35 91, ел. пошта for_diplomnic@mail.ru, ORCID 0000-0003-2254-9638
[2]Каф. «Економіка транспорту», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (525) 531 93 97, ел. пошта girlfriendsxx@mail.ru, ORCID 0000-0003-1210-8417

РОЛЬ ОНОВЛЕННЯ ОПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ В ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ СТАНЦІЇ

Мета. Основною метою роботи є підвищення ефективності роботи станції Гомель шляхом впровадження автоматизованої системи комерційного огляду поїздів і вагонів (АСКО ПВ), а також розробка варіантів оптимізації роботи залізничної станції в цілому. **Методика**. В ході дослідження застосовано методи наукового пошуку, статистичного аналізу, синтезу, елементи теорії моделювання систем для вивчення ієрархічних структур, що виникають при визначенні причинно-наслідкових зв'язків у виявленні несприятливих факторів роботи станції. **Результати**. Ключова роль сортувальних станцій в експлуатаційній роботі пояснюється виконанням основної роботи по формуванню та розформуванню поїздів, від якої у значній мірі залежить необхідний парк вагонів для виконання заданого обсягу перевезень, швидкість доставки вантажних відправлень. Тому робота сортувальних станцій має суттєвий вплив на витрати залізниць, якість транспортного обслуговування, задоволення попиту на перевезення й доходи галузі. Отже, підвищення ефективності роботи сортувальних станцій сприяє досягненню оптимальних експлуатаційних та економічних показників для галузі в цілому. Розглянуто шляхи оптимізації роботи станції, визначені інноваційні шляхи вдосконалення технологі-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© О. А. Ходоскина, Ю. В. Матюшкова, 2019

чного процесу сортувальної станції в цілому, виявлена практична значимість оновлення існуючої операційної системи, її доцільність і ефективність, розрахований логістичний ефект від впровадження системи АСКО ПВ шляхом детального вивчення її роботи, виявлення переваг та недоліків. **Наукова новизна.** На підставі вивчення методичних джерел і наукових розробок в області технологічних особливостей та вдосконалення роботи вантажних станцій на методичному рівні визначені основні напрямки оптимізації роботи сортувальної станції Гомель, які є найбільш перспективними. Визначені й структуровані причини, що впливають на простій вагонів на сортувальній станції, та сформовані відповідні організаційні заходи для зменшення простою. **Практична значимість.** Проведене аналітичне дослідження та запропоновані шляхи вирішення виявлених проблем дозволять удосконалити технологію й підвищити якість комерційного огляду, створити безпечні умови і поліпшити охорону праці приймальників поїздів, а також сприятимуть підвищенню ефективності роботи розглянутої залізничної станції у технологічному та економічному плані.

Ключові слова: станція; основні засоби; операційна система; комерційна несправність; оптимізація

O. A. HODOSKINA[1*], Y. V. MATYUSHKOVA[2*]

[1*]Dep. «Economy of Transport», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Republic of Belarus, Gomel, 246653, tel. +37 (529) 730 35 91, e-mail for_diplomnic@mail.ru, ORCID 0000-0003-2254-9638
[2*]Dep. «Economy of Transport», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Republic of Belarus, Gomel, 246653, tel. +37 (525) 531 93 97, e-mail girlfriendsxx@mail.ru, ORCID 0000-0003-1210-8417

THE ROLE OF OPERATING SYSTEM UPGRADE IN OPTIMIZING THE OPERATION OF THE RAILWAY STATION

Purpose. This article is aimed at increasing the efficiency of the Gomel station by introducing an automated system for the commercial inspection of trains and cars (ASCI TC), as well as, developing the options for optimizing the operation of a railway station as a whole. **Methodology.** In the course of the study, the methods of scientific search, statistical analysis, synthesis, and elements of the theory of system modelling were used to study the hierarchical structures that arise in determining causal relationships in identifying adverse factors of the station. **Findings.** The key role of the marshalling yards in operational work is explained by the fact that they perform the main work in composition and breaking-up of trains, on which the required fleet of cars for performing a given volume of traffic, the speed of delivery of cargo shipments largely depends. Therefore, the work of the marshalling yards has a significant impact on the expenditures of railways, the quality of transport services, on meeting the demand for transportation and industry revenues. Consequently, increasing the efficiency of the marshalling plants contributes to the achievement of optimal operational and economic indicators for the industry as a whole. In the course of the study, authors considered the ways to optimize the station's work, determined the innovative ways to improve the technological process of the sorting station as a whole, identified the practical significance of updating the existing operating system for the station, its feasibility and efficiency, and calculated the logistical effect of the ASCI TC implementation through a detailed study of its operation, identifying its advantages and disadvantages. **Originality.** Based on the study of methodical sources and scientific developments in the field of technological features and improvement of the work of freight stations, the main directions for optimizing the operation of the Gomel marshalling yard are identified at the methodological level, which are the most promising measures. The reasons affecting the idle time of cars at the marshalling yard were identified and structured, as well as appropriate organizational measures were formed to reduce downtime. **Practical value.** Conducted analytical research and proposed solutions of identified problems will improve the technology and increase the quality of commercial inspection, create safe working conditions and improve the occupational safety of train pickers, and will also contribute to increasing the efficiency of the railway station under inspection, both technologically and economically.

Keywords: station; fixed assets; operating system; commercial malfunction; optimization

REFERENCES

1. Aksenchikov, A. A. (2016). Model tekhnologicheskogo protsessa raboty zheleznodorozhnoy stantsii s uchetom vypolnyayushchikh funktsiy stantsii peredachi vagonov. *Transportnye sistemy Sibiri. Razvitie transportnoy sistemy kak katalizator rosta ekonomiki gosudarstva:* Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Krasnoyarsk, 07-08 aprelya 2016 g.). Krasnoyarsk. (in Russian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© О. А. Ходоскина, Ю. В. Матюшкова, 2019

2. Asmaryan, G. D. (2014). Napravleniya sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnoy stantsii Rostov. *Nauka i sovremennost. 34*, 158-164. (in Russian)
3. Varzhina, K. M., & Kornilov, S. N. (2015). Technique of Optimization of Travelling Development of Cargo Railway Stations. *Nazemnye transportno-tekhnologicheskie kompleksy i sredstva:* Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Tyumen, 12 fevralya 2015 g.). Tyumen. (in Russian)
4. Demidchik, Y. V., & Zhukovets, Y. N. (2015). *Znachenie i rol zheleznodorozhnogo transporta v ekonomike Respubliki Belarus. NIRS-2015:* Materialy 71-y studencheskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Minsk: Belarusian National Technical University. (in Russian)
5. Karnakova, V. V., Solopova, Y. A., & Ladin, A. S. (2014). Metody sovershenstvovaniya tekhnologii raboty gruzovoy zheleznodorozhnoy stantsii Balakovo Privolzhskoy zheleznoy dorogi. *Nauka i obrazovanie transportu, 1,* 60-61. (in Russian)
6. Kornilov, S. N., & Varzhina, K. (2015). Optimization Methods of Track Development of Transport Nodes at Example of Freight Rail Stations. *Soiskatel, 1(9),* 102-106. (in Russian)
7. Kostenko, V. V., Aleynik, P. S., & Degtyarev, A. A. (2014). Modelirovanie raboty zheleznodorozhnykh stantsiy dlya opredeleniya ikh proektnykh parametrov i analiza ekspluatatsionnoy deyatelnosti. *Intellektualnye sistemy na transporte:* Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Sankt-Peterburg, 03-04 aprelya 2014 g.). St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. (in Russian)
8. Lysikov, M. G., & Olshanskiy, A. M. (2014). Sistema planirovaniya pokazateley raboty zheleznodorozhnoy sortirovochnoy stantsii. *Advanced Information Technologies and Scientific Computing (PIT 2014):* International Scientific Conference. Samara. (in Russian)
9. Filippov, V. N., Smolyaninov, A. V., Kozlov, I. V., … Podlesnikov, Y. D. (2017). The options of innovation railway cars and some problems of their realization. *Transport of the Urals, (1)52,* 25-31. doi: 10.20291/1815-9400-2017-1-25-31 (in Russian)
10. Khomyakova, M. A. (2017). Intellectualization of the station duty officer administrative and supervisory capacity. *Vestnik of the Railway Research Institute, 76(2),* 123-128. doi: 10.21780/2223-9731-2017-76-2-123-128 (in Russian)
11. Chernyavski, V. S. (2014). Features of the Historical Development of Devices for Cars Sorting at Railway Stations. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya, 2,* 148-153. (in Russian)
12. Khachatryan, N., & Akopov, A. (2017). Model for organizing cargo transportation with an initial station of departure and a final station of cargo distribution. *Business Informatics, 1(39),* 25-35. doi: 10.17323/1998-0663.2017.1.25.35 (in English)
13. Wang, H., Zhao, N., Ning, B., Tang, T., & Chai, M. (2018). Safety monitor for train-centric CBTC system. *IET Intelligent Transport Systems, 12(8),* 931-938. doi: 10.1049/iet-its.2018.5231 (in English)

Поступила в редколлегию: 04.09.2018
Принята к печати: 03.01.2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159508
© О. А. Ходоскина, Ю. В. Матюшкова, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

UDC 656.073.7

S. P. ONYSHCHENKO[1], Y. A. KOSKINA[2*]

[1]Dep. «Fleet Operating and Technologies of Sea Carriages», Odesa National Maritime University, Mechnikov St., 34, Odesa, Ukraine, 65029, tel. +38 (067) 557 76 46, e-mail onyshenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-9660-1921
[2*]Dep. «Fleet Operating and Technologies of Sea Carriages», Odesa National Maritime University, Mechnikov St., 34, Odesa, Ukraine, 65029, tel. +38 (067) 557 76 46, e-mail yuliia.koskina@ukr.net, ORCID 0000-0002-3164-6504

ESTIMATION OF THE TIME OF THE VESSEL'S ARRIVAL AT PORT

Purpose. The paper aims at the assessment of the probability of the vessel's arrival at the port at a specified time interval considering the different combination of the voyage charter-party (C/P) terms and their wordings. **Methodology.** The structure of the vessel's time in port was formed considering the C/P terms and their wordings. The time intervals for which it is actual to estimate the time of arrival were defined on the basis of the theory of transport processes and systems. The normal distribution law was used to estimate the probability of a vessel's arrival at a port at a specified time interval. **Findings.** The probability of the vessels arrival at the port of loading in the C/P in question was searched in three most actual situations: 1) the vessel's opening date is known; 2) the vessel's arrival to the port of discharging on previous C/P is known and 3) the vessels position on the passage to the port of discharging in previous voyage is known. For these three situation were estimate the probability of the duration of the time elements from the opening point and present position points to the port of loading in the C/P in question far as the C/P terms indicate the beginning and the duration of the laytime. **Originality.** For the first time the vessel's time in port was structured considering the C/P terms and their possible wordings, their impact on the time in port was determined, and the probability of vessel's arrival at specified time intervals was searched. **Practical value.** The obtained results can be used in voyage planning (during fixing the C/P and further voyage performance) by estimation the duration of the time in port considering the C/P terms and wordings of the beginning and duration of laytime and time of the vessel's arrival.

Keywords: vessel's voyage; vessel's time in port; voyage charter-party; voyage planning

Introduction

The vessel's time en route largely determines the duration of the passage between ports of loading and discharging and both with the voyage charter-party (C/P) terms on laytime (its beginning and duration) it does the total voyage time. This time, in its turn, is a basis for calculation of voyage expenses and that's why it influences the efficiency of the voyage. For the shipowner, who carries the cargo under the voyage C/P, the issues of determining the time of the voyage are therefore of fundamental importance. But the most part of researches dedicated to the voyage planning implies the problem of the time en route indicating the slow steaming as an important factor of the voyage efficiency [6, 7, 8, 10, 11, 14, 15]. But the time en route is only the part of the total voyage time and it is no use of searching it just without the time in port as far as time en route (probably the vessel's speed on passage) determines the time of the vessel's arrival to the port for cargo handling. On the other hand, the duration of time in port depends on the appropriate terms of the C/P.

Purpose

The purpose of this study is the assessment of the probability of the vessel's arrival at the port at a specified time interval, considering the C/P terms and their wordings, which is quite important both for negotiations before the C/P fixture and for voyage time planning and ensuring the voyage efficiency when performing the voyage. In order to

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158478
© S. P. Onyshchenko, Y. A. Koskina, 2019

achieve the purpose the following objectives are to be realized: definition of the impact of the appropriate C/P terms and their wordings on the structure and duration of the vessel's time in port; determination the situations, that are of practical importance for assessing the probability of the vessel arriving at a port at a specified time interval, and obtaining the appropriate calculation formulas; conducting statistical studies confirming the validity of using the normal distribution law for the elements of the voyage time in the processes of estimating the probability of a ship arriving at a port at a specified time interval.

Methodology

The definition of the impact of the appropriate C/P terms on the structure and the duration of the vessel's time in port was based on the analysis of the wording of the C/P terms and decomposition of the time in port depending on the possible combinations of the wordings of these terms. The determining of time intervals, for which it is expedient to determine the probability of the vessel's arrival at the ports of cargo handling, was formed on the main principles of the theory of transport processes and systems. The estimates of the probability of a vessel arriving at a port at a specified time interval were carried out taking into account the properties of the normal distribution law for the elements of the voyage time, the validity of which is confirmed by statistical studies.

Findings

General issues regarding the C/P terms which determine the duration of cargo handling and appropriate vessel's time in port are stipulated in [1, 2, 3, 5, 7, 9, 12, 13, 16-18]. These terms are the loading and discharging rates, terms on Notice of Readiness (NOR) tendering/accepting, including or excluding Sundays and Holidays in laytime days, Sunday time duration as itself. The initial point for time in port calculations is NOR terms – is how it's tendering/accepting stipulated in the C/P. There are two main variants: 1) NOR can be tendered whether the vessel in berth or not, whether in free pratique or not, whether in berth or not (www) or 2) NOR can be tendered after the port formalities on arrival, i.e. after the vessel's berthing. Rather important are wordings regarding the time of NOR tendering, i.e. there may be terms in C/P according to which NOR can be tendered only during office hours. That in fact will take some time waiting the office hours if the vessel arrives on day off. Table 1 shows the structure of the vessel's time in port considering the different wordings of C/P terms. As one can see, the C/P terms determining the duration of the elements of the time in port largely depends on the day of the week and time of arrival (before noon of after noon). For instance, when tendering NOR words in C/P as to be given on getting «free pratique», the waiting time t_{w} to tender NOR will be longer if the vessel arrives before noon (b. n.) on day off (w/e) compared with the vessel's arrival early in the morning on the first working day (w. d.). Similarly, the time between tendering/accepting of NOR will be less if the vessel arrives before noon on working day than if she arrives, for instance, the same day but closer to noon. If NOR can be tendered on www terms, the formalities take place during the «grace» period between tendering of NOR and the beginning of cargo handling. The impact of the terms that include/exclude Sundays and holidays as laytime is obvious. But the moment of the vessel's arrival is also important here – the vessel which arrived on Friday evening, for instance, will spend more time in port if the C/P fixed on SHEx terms than on SHInc.

Thus, even under the same C/P terms, which have a varying impact on the duration of time in port, actual duration of the time in port varies and is determined by the time of arrival of the vessel at the port. The decisive factors are:

1) The arrival of the vessel at the port before noon (b. n.) or afternoon (a. n.) which for NOR terms determines the initial point for t_{NOR};

2) The vessels staying in port during Sundays and holidays which (under SHEx in the C/P) determines the t_{SHEx}.

For estimating with reasonable certainty the possible structure and duration of time in port, the carrier must first assess the probability of the vessel's arrival at the port for cargo handling on a particular day or even within the specified time interval of a particular day. And this, in turn, depends on the duration of the vessel's previous voyage and the duration of the vessel's passage

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158478
© S. P. Onyshchenko, Y. A. Koskina, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

from the last port of call (port of loading) to the port of loading (discharging).

Thus, the estimation of the vessel's time in port is based on a preliminary estimation of the duration of the previous voyage and the vessel's passage to the port of loading/the duration of loading and passage to the port of discharging.

Table 1

Structure of vessel's time in port considering on combination of C/P terms and wordings

Combinations of C/P terms determining the vessel's time in port			Waiting time t_w	NOR acceptance time t_{NOR}	Formalities time t_f (arrival)	Cargo handling time t_{CH}	Sundays and Holidays t_{SH}	Formalities time t_f (departure)
www + SHEx	w.d.	–		t_{NOR} incl t_f	t_{NOR} incl t_f	t_{CH}	t_{SH}	t_f
		a.n.	–	t_{NOR} incl t_f	t_{NOR} incl t_f	t_{CH}	t_{SH}	t_f
	w/e	b.n.	–	t_{NOR} incl t_f	t_{NOR} incl t_f	t_{CH}	t_{SH}	t_f
		a.n.	–	t_{NOR} incl t_f	t_{NOR} incl t_f	t_{CH}	t_{SH}	t_f
www + SHInc	w.d.	b.n.	–	t_{NOR} incl t_f	t_{NOR} incl t_f	t_{CH}	–	t_f
		a.n.	–	t_{NOR} incl t_f	t_{NOR} incl t_f	t_{CH}	–	t_f
	w/e	b.n.	–	t_{NOR} incl t_f	t_{NOR} incl t_f	t_{CH}	–	t_f
		a.n.	–	t_{NOR} incl t_f	t_{NOR} incl t_f	t_{CH}	–	t_f
free pratique + SHEx	w.d.	b.n.	–	t_{NOR}	t_f	t_{CH}	t_{SH}	t_f
		a.n.	t_w	t_{NOR}	t_f	t_{CH}	t_{SH}	t_f
	w/e	b.n.	t_w	t_{NOR}	t_f	t_{CH}	t_{SH}	t_f
		a.n.	t_w	t_{NOR}	t_f	t_{CH}	t_{SH}	t_f
free pratique + SHInc	w.d.	b.n.	-	t_{NOR}	t_f	t_{CH}	–	t_f
		a.n.	t_w	t_{NOR}	t_f	t_{CH}	–	t_f
	w/e	b.n.	t_w	t_{NOR}	t_f	t_{CH}	–	t_f
		a.n.	t_w	t_{NOR}	t_f	t_{CH}	–	t_f

Mathematically, these temporal characteristics are continually variable, and it is possible to estimate the probabilities of one or another range of their values given 1) knowledge of the type and parameters of the distribution law of the above-mentioned durations of voyage time elements; 2) the availability of reliable information on the present position of the vessel.

A C/P is fixed usually both during the end of cargo handling and the vessel's opening, and much earlier. With significant time intervals between the barging the C/P terms and the planned beginning of the voyage, the assessing with a sufficient degree of certainty of the indicated elements of time is noted to be meaningless (and in this situation one can only rely on average data). So we consider three situations, in which it makes practical sense to assess the probability of a particular duration of the elements of the vessel's time in port (fig. 1):

1) reliable information on the vessel's opening is known and it is required to estimate the probability of the vessel's passage to the port of loading t_v;

2) reliable information is known about the arrival of the vessel at the port of discharging in the previous C/P and it is required to estimate the probability of the duration of the vessel's time in

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158478
© S. P. Onyshchenko, Y. A. Koskina, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

port of discharging in the previous voyage and the vessel's passage to the port of loading t'_v;

3) reliable information about the position of the vessel on the passage to the port of discharging in the previous C/P is known and it is required to estimate the probability of the duration of the vessel's passage to the port of discharging, the vessel's time in the port of discharging in the previous voyage and the vessel's passage to the port of loading t''_v.

The identified above practical situations determine three versions of the problem of estimating the probability of the vessel arriving at the port of loading in the time interval (t_1, t_2) The assessment takes place at points A, B, C.

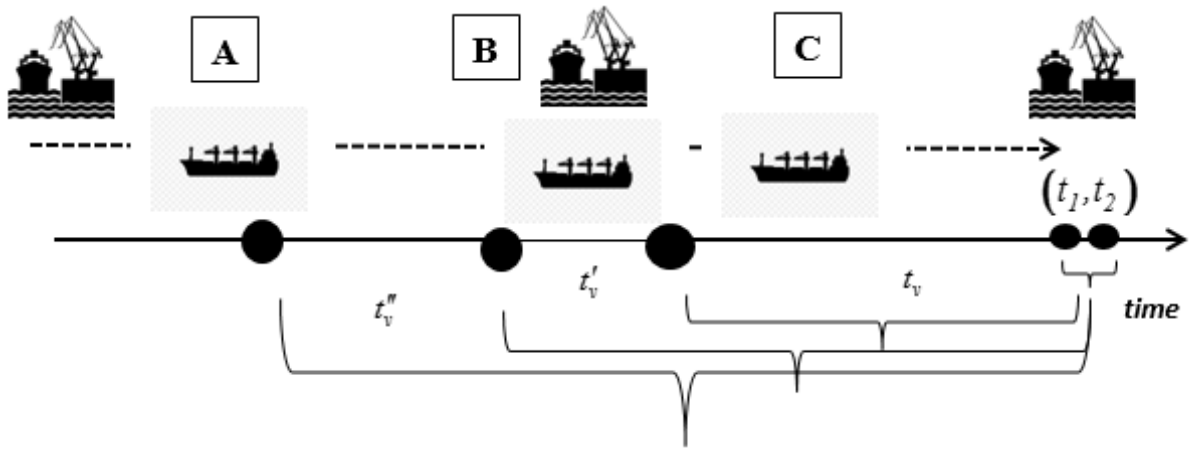


Fig. 1. Three situations, which are of practical sense to assess the probability of a duration the voyage time elements

It seems appropriate, the solution to this problem is associated with the determination of deterministic and probabilistic components in the structure of t_v, t'_v, t''_v and further evaluation of the probabilities of a certain range of values for the second component. This approach is taken as the basis for this study.

To authors opinion, the following formal descriptions for t_v, t'_v, t''_v are fair:

$$t_v = \frac{L}{\overline{V}} + \Delta t_v, \qquad (1)$$

where L – the passage length (miles), $\overline{V}$ – the average speed of the vessel on passage between ports, varies between allowable speeds of the vessel (miles/day).

In this case $\frac{L}{\overline{V}}$ is a deterministic value; Δt_v is a random component of the time interval t_v. The sense Δt_v – the additional time, which is formed under the impact of a variety of factors of different nature (in particular, these issues were considered in [4]), for example:

1) weather conditions that lead to the need to reduce the average speed at the transition or increase the length of the passage (changes in the route);

2) the need to wait in queue when passing channels, straits (in particular, the Bosporus). It should be noted that the expectation of the passage of the Bosporus by vessels is an important problem, especially in winter due to weather conditions.

Authors express t'_v as follows

$$t'_v = t_{CH} + t_v = \frac{Q}{M_{DR}} + \Delta t_{CH} + \frac{L}{\overline{V}} + \Delta t_v, \qquad (2)$$

where $t_{CH} = \frac{Q}{M_{DR}} + \Delta t_{CH}$ – the vessel's time in port of discharging in the previous voyage (days); Q – cargo discharged (VN); M_{DR} – discharging rates (MT/vessel/day); Δt_{CH} – a random component of the time in port of discharging in the previous voyage which occurs, for instance, as uncertainties in the duration of the formalities procedure (days).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158478
© S. P. Onyshchenko, Y. A. Koskina, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

t''_v formalized by authors as

$$t''_v = t^*_v + t'_v = \frac{L^*}{\overline{V}} + \Delta t^*_v + \frac{Q}{M_{DR}} + \Delta t_{CH} + \frac{L}{\overline{V}} + \Delta t_v \qquad (3)$$

where $t^*_v = \frac{L^*}{\overline{V}} + \Delta t^*_v$ – the time en route to the port of discharging in the previous voyage (days); L^* – voyage distance (miles), Δt^*_v – a random component of the time en route (days), takes place being influenced by factors similar to Δt_v

Thus, the assessment of the probability of the vessel's arrival at the port for the three situations and the time points of the A, B, C assessment comes to (4)-(6):

$$P\left(t_1 \le t_v \le t_2\right) \qquad (4)$$

$$P\left(t_1 \le t'_v \le t_2\right) \qquad (5)$$

$$P\left(t_1 \le t''_v \le t_2\right) \qquad (6)$$

where (t_1, t_2) - the set time interval.

Considering the presence in the structure of t_v, t'_v, t''_v deterministic and random components (4)-(6) are equivalent, respectively, to the following expressions:

$$P\left(t_1 - \frac{L}{\overline{V}} \le \Delta t_v \le t_2 - \frac{L}{\overline{V}}\right) \qquad (7)$$

$$P\left(t_1 - \frac{Q}{M_{DR}} - \frac{L}{\overline{V}} \le \Delta t_v + \Delta t_{CH} \le t_2 - \frac{Q}{M_{DR}} - \frac{L}{\overline{V}}\right) \qquad (8)$$

$$P\left(t_1 - \frac{Q}{M_{DR}} - \frac{L+L^*}{\overline{V}} \le \Delta t_v + \Delta t_{CH} + \Delta t^*_v \le t_2 - \frac{Q}{M_{DR}} - \frac{L+L^*}{\overline{V}}\right) \qquad (9)$$

In turn the problem of defining (7)-(9) is reduced to the problem of determining

$$P\left(t' \le \Delta t_v \le t''\right), \qquad (10)$$

$$P\left(t' \le \Delta t_v + \Delta t_{CH} \le t''\right), \qquad (11)$$

$$P\left(t' \le \Delta t_v + \Delta t_{CH} + \Delta t^*_v \le t''\right), \qquad (12)$$

where t' and t'' are formed after the transformation of the constraints in (7)-(9) considering the deterministic components in the structure of t_v, t'_v, t''_v.

Thus, to calculate (10)-(12), it is necessary to know the type and parameters of the distribution laws of random components in the constraint structure of the elements of the voyage time.

In studies of the probabilistic nature of the voyage time and its elements (for instance, [4]) the authors substantiate the validity of using the normal distribution law for the mathematical description of their behavior, in particular, the time en route and time in port. The authors [4] studied statistical data on the operation of bulk-carriers of up to 25000 tons of deadweight in the Black Sea-Mediterranean region. At the same time, the study was not connected with the total duration of the time en route or time in port, but with the study of their individual components (the time required to complete the formalities in the ports, the waiting time for the vessels starting the lay time), which essentially determine the probabilistic nature of the consolidated elements of the voyage time.

This conclusion is valid considering the fact that the speed of the vessel $\overline{V}$ and the cargo handling rates M_{DR}, for example, are not random values, but are formed as a result of the «purposeful» actions of the Master and the stevedoring company, respectively. In this case, due to, for example, weather conditions, the Master may be forced to slow steaming for a certain period of time, which is just a part of the Δt_v or Δt^*_v random component of the time en route.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158478
© S. P. Onyshchenko, Y. A. Koskina, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

In particular, as a result of statistical studies of the time of port formalities (that is, in essence $\Delta t'_v$), the hypothesis about the normal distribution law of this quantity was confirmed with a sufficient degree of reliability. Fig. 2 shows the result of testing the hypothesis of the normal distribution law of waiting time for the beginning of the laytime. Also, as a result of studies of the vessel's time waiting for the beginning of the counting of the lay time, the validity of using the normal distribution law for Δt^*_v was verified (fig. 3).

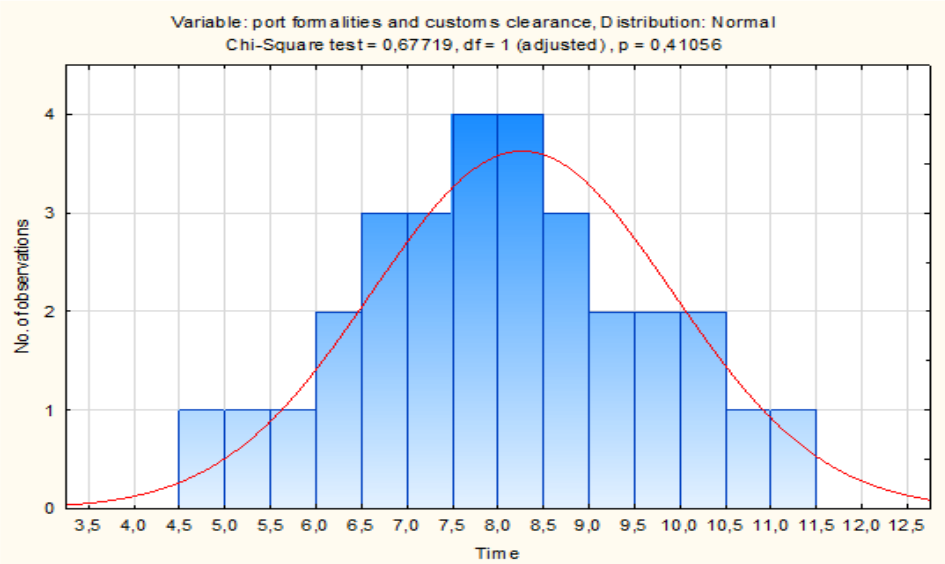


Fig. 2. The results of testing the hypothesis of the normal distribution law of waiting time for the beginning of the counting of the laytime

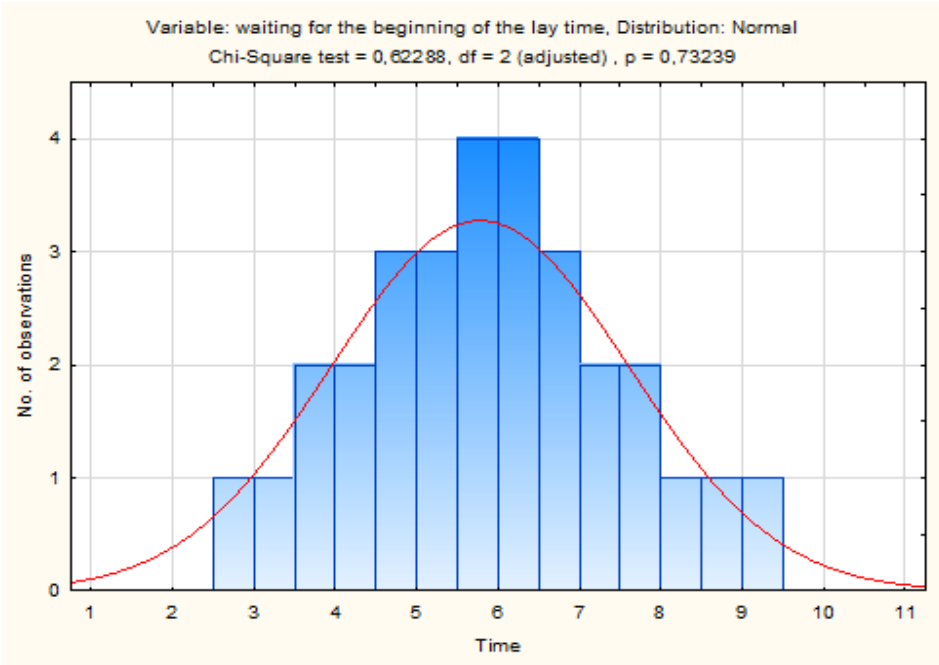
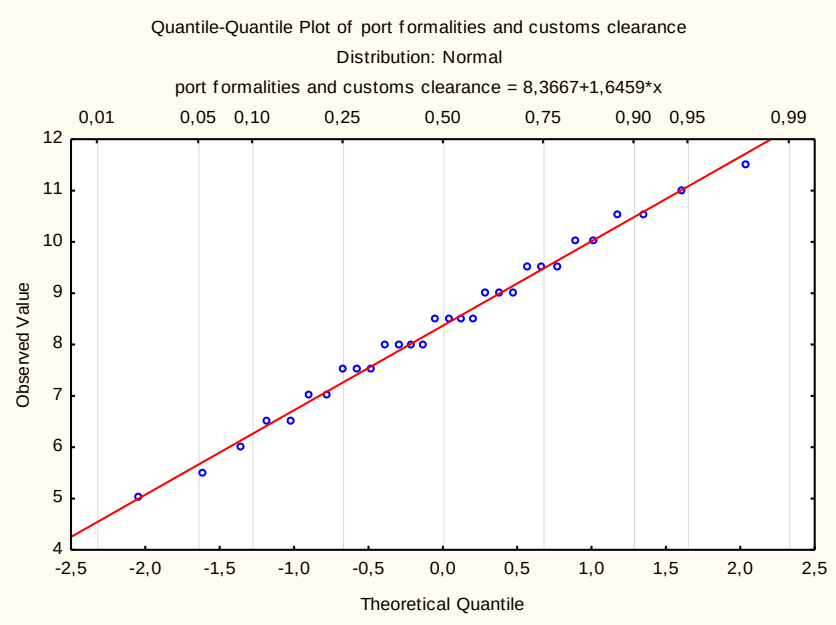


Fig. 3. The results of testing the hypothesis of the normal distribution law for Δt^*_v

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158478
© S. P. Onyshchenko, Y. A. Koskina, 2019

According to the obtained results, the p-value significantly exceeds 0.05 (usually the accepted level for testing hypotheses), therefore, the analyzed data do not contradict the normal distribution law. The following quantile-quantile graphs (Fig. 4) also provide visual confirmation that the data under consideration do not contradict the normal distribution law.



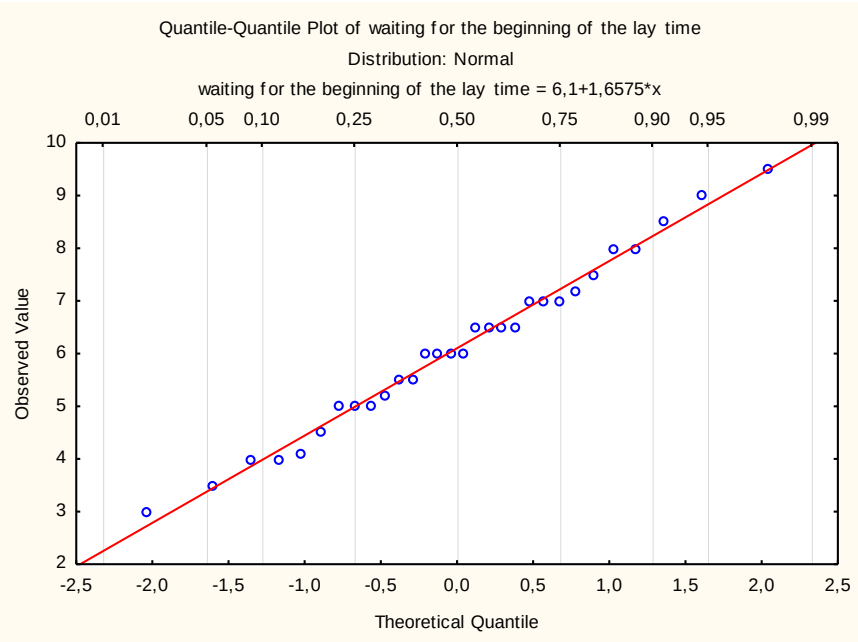


Fig. 4. Quantile-quantile graphs for normal distribution law and searched statistical sample

The homogeneity of the initial information is noted to be important for the «purity» of statistical studies. Therefore, to obtain reliable information on the distribution law parameters, it is necessary to systemize the source data (for example, by navigation regions, by season of work (summer, winter, autumn-spring), by countries of ports of

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158478
© S. P. Onyshchenko, Y. A. Koskina, 2019

call) since in fact the behavior Δt_v, Δt_{CH}, Δt_v^* is differentiated depending on the above factors.

Thus, the legitimacy of using the properties of the normal distribution law for the numerical estimate (10)-(12) is substantiated. Knowing the parameters of the laws of the distribution of random variables Δt_v, Δt_{CH}, Δt_v^*:

$$\left(M_{\Delta t_v}, \sigma_{\Delta t_v}\right), \tag{13}$$

$$\left(M_{\Delta t_{CH}}, \sigma_{\Delta t_{CH}}\right), \tag{14}$$

$$\left(M_{\Delta t_v^*}, \sigma_{\Delta t_v^*}\right), \tag{15}$$

where $M_{\Delta t_v}$, $M_{\Delta t_{CH}}$, $M_{\Delta t_v^*}$ – mathematical expectations, $\sigma_{\Delta t_v}$, $\sigma_{\Delta t_{CH}}$, $\sigma_{\Delta t_v^*}$ - standard deviations of the random value Δt_v, Δt_{CH}, Δt_v^* considering their independence and the properties of the composition of normal values authors obtain equivalent to (10)-(12) expressions (16)-(18)

$$P\left(t' \le \Delta t_v \le t''\right) = \Phi\left(\frac{t''-M_{\Delta t_v}}{\sigma_{\Delta t_v}}\right) - \Phi\left(\frac{t'-M_{\Delta t_v}}{\sigma_{\Delta t_v}}\right), \tag{16}$$

$$P\left(t' \le \Delta t_v + \Delta t_{CH} \le t''\right) = \Phi\left[\frac{t''-\left(M_{\Delta t_v}+M_{\Delta t_{CH}}\right)}{\sqrt{\sigma^2_{\Delta t_v}+\sigma^2_{\Delta t_{CH}}}}\right] - \Phi\left[\frac{t'-\left(M_{\Delta t_v}+M_{\Delta t_{CH}}\right)}{\sqrt{\sigma^2_{\Delta t_v}+\sigma^2_{\Delta t_{CH}}}}\right], \tag{17}$$

$$P\left(t' \le t_{CH} + \Delta t_v^* \le t''\right) = \Phi\left[\frac{t''-\left(M_{\Delta t_v}+M_{\Delta t_{CH}}+M_{\Delta t_v^*}\right)}{\sqrt{\sigma^2_{\Delta t_v}+\sigma^2_{\Delta t_{CH}}+\sigma^2_{\Delta t_v^*}}}\right] - \Phi\left[\frac{t'-\left(M_{\Delta t_v}+M_{\Delta t_{CH}}+M_{\Delta t_v^*}\right)}{\sqrt{\sigma^2_{\Delta t_v}+\sigma^2_{\Delta t_{CH}}+\sigma^2_{\Delta t_v^*}}}\right], \tag{18}$$

where $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}}dt$ is a Laplas function.

If estimated at time points A, B, or C (Fig. 1) the probability of a vessel arriving at a port at a specified time interval is less than a specified value $0 \le p^* \le 1$, that is, it does not hold, respectively

$$P\left(t' \le t_v \le t''\right) \ge p^* \text{ or} \tag{19}$$

$$P\left(t' \le t_{CH} \le t''\right) \ge p^* \text{ or} \tag{20}$$

$$P\left(t' \le t_v + t_{CH} + t_v^* \le t''\right) \ge p^* \tag{21}$$

so next, the time in port of loading under the C/P in question should be estimated, taking into account arrivals after the set time interval, and this becomes the basis for the ship-owner to insist on certain C/P terms regarding the time in port or freight rate in order to ensure the required level of the voyage efficiency.

As noted above, the time of arrival of the vessel at the port of loading under the C/P in question affects the structure and duration of the vessels time in port, which naturally has a further effect on the time of arrival of the vessel at the port of discharging, which in turn affects the structure and duration of the time in the port of discharging (Fig. 5).

Thus, after conclusions on the basis of (19)-(21) on the time of arrival of the vessel at the port of loading, conclusions can be made regarding the vessel's time in port under loading t_L, as well as the probability of the vessel's arrival at the port of discharging at different time intervals (Fig. 5), which also provides information on the probability of the time under discharging t_D, considering the time of the vessel's passage t_v^N.

The basis of these conclusions is the reasoning and formulas similar to those presented above, regarding the time of arrival of the vessel at the port of loading. Similarly, in the structure, t_L, t_v^N,

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158478
© S. P. Onyshchenko, Y. A. Koskina, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

t_D, random components can be distinguished and, using the information on the parameters of their distribution laws, for a given probability, the calculated values of the elements of the voyage time for the C/P in question are obtained. In particular, in [4], an approach to estimating a possible increase in time en route and time in port using the VAR method is presented and one can take into account the influence of random components in the structure t_L, t_v^N, t_D and get their total values.

So it becomes possible to estimate the duration of the voyage under the C/P in question:

$$t_{CV} = t_L + t_v^N + t_D \quad (22)$$

that in turn becomes the basis for evaluating the time-charter equivalent, as an indicator of the efficiency of a voyage.

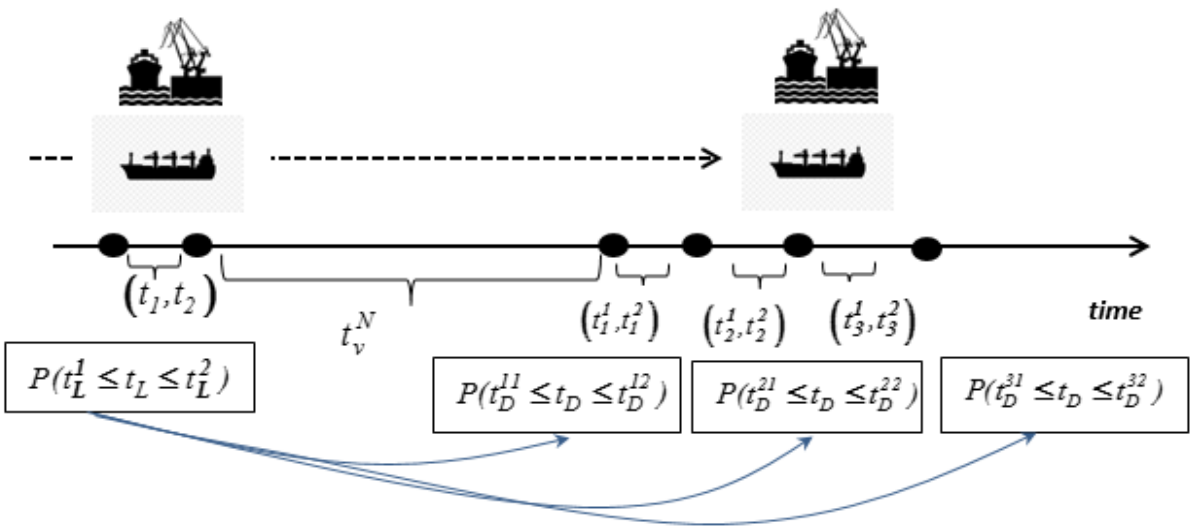


Fig. 5. The impact of the time of arrival of the vessel at the port of loading at the time of arrival at the port of discharging in terms of «probabilities»

At the same time, this assessment will largely correspond to the practice of the shipping business, since in (18) the elements of the vessel's time in port consider the specific structure and duration depending on a) the C/P terms and their wordings; b) the probability estimations of the vessel's arrival at the port of loading.

Originality and practical value

The authors have formed the structure of the vessel's time in port, based on the terms of the C/P and their possible wordings, and established their influence on the duration of the vessel's time in the ports under cargo handling. The estimation of the probability of the vessel's arrival at the ports of loading and discharging at certain time intervals has been completed considering the laytime terms stipulated in the C/P, based on the current position of the vessel. The obtained results can be used in the practice of shipping companies in order to plan the work of vessels on the carriage of goods, as well as to ensure the effectiveness of the voyage both at the negotiation on fixing and during the voyage on the already fixed C/P.

Conclusions

To ensure the effective organization and operation of the fleet for the carriage of goods, it is important to estimate the time required to carry out voyages. The results presented in this paper allow us to solve tasks related to the operation of a vessel on the terms of the voyage C/P, according to the estimation of duration of the vessels time in port under cargo handling, based on the terms and wordings in the C/P.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158478
© S. P. Onyshchenko, Y. A. Koskina, 2019

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Лапкін, О. І. Теорія і практика фрахтових операцій : монографія / О. І. Лапкін, С. П. Онишенко, Ю. О. Коскіна. – Одеса : Купрієнко С. В., 2017. – 150 с.
2. Николаева, Л. Л. Коммерческая эксплуатация морского судна : учебник / Л. Л. Николаева. – Одесса : Феникс, 2006. – 754 с.
3. Онищенко, С. П. Дослідження впливу умов оферти на успішність укладання фрахтової угоди / С. П. Онищенко, Ю. О. Коскіна // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6 (3). – С. 25–32. doi: 10.15587/1729-4061.2015.55738
4. Онищенко, С. П. Метод оценки отклонений результатов выполнения судном рейса под влиянием факторов риска / С. П. Онищенко, О. Д. Вишневская // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси : зб. наук. пр. – Харків, 2016. – № 7 (1179). – С. 25–32.
5. Davies, D. Commencement of Laytime / D. Davies. – London : Informa Law from Routledge, 2006. – 368 p. doi: 10.4324/9780203714973
6. Devanney, J. W. The Impact of Bunker Price on VLCC Spot Rates [Electronic resource] / J. W. Devanney. – Available at: http://www.c4tx.org/pub/vlcc_rates.pdf – Title from the screen. – Accessed : 25.01.2019.
7. Fagerholt, K. Bulk ship routing and scheduling: solving practical problems may provide better results / K. Fagerholt, D. Ronen // Maritime Policy and Management. – 2013. – Vol. 40. – Iss. 1. – P. 48–64. doi: 10.1080/03088839.2012.744481
8. Kim, J.-G. Optimizing ship speed to minimize fuel consumption / J.-G. Kim, H.-J. Kim, P. T.-W. Lee // Transportation Letters. – 2014. – Vol. 6. – Iss. 3. – P. 109–117. doi: 10.1179/1942787514Y.0000000016
9. Lopez, N. J. Bes`Chartering and Shipping Terms / N. J. Lopez. – London : Baker & Howard Ltd, 1992. – 651 p.
10. Modeling and optimization algorithms in ship weather routing / L. Walther, A. Rizvanolli, M. Wendebourg, C. Jahn // International Journal of e-Navigation and Maritime Economy. – 2016. – Vol. 4. – P. 31–45. doi: 10.1016/j.enavi.2016.06.004
11. Norstad, I. Tramp ship routing and scheduling with speed optimization / I. Norstad, K. Fagerholt, G. Laport // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. – 2011. – Vol. 19. – Iss. 5. – P. 853–865. doi: 10.1016/j.trc.2010.05.001
12. Pagonis, T. Chartering practice handbook / T. Pagonis. – Athens : Dimelos Publications, 2009. – 319 p.
13. Plomaritou, E. Shipbrokering and Chartering Practice / E. Plomaritou, A. Papadopoulos. – London : Informa Law from Routledge, 2017. – 738 p.
14. Psaraftis, H. N. Ship speed optimization: Concepts, models and combined speed-routing scenarios / H. N. Psaraftis, C. A. Kontovas // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. – 2014. – Vol. 44. – P. 52–69. doi: 10.1016/j.trc.2014.03.001
15. Ronen, D. The effect of oil price on the optimal speed of ships / D. Ronen // Journal of the Operational Research Society. – 1982. – Vol. 33, No. 11. – P. 1035–1040. doi: 10.2307/2581518
16. Schofield, J. Laytime and Demurrage / J. Schofield. – London : Informa Law from Routledge, 2015. – 636 p. doi: 10.4324/9781315689470
17. Tsoudis, G. N. The Shipbroker's Working Knowledge: Dry Cargo Chartering in Practice / G. N. Tsoudis. – London : AKAKIA Publications, 2015. – 656 p.
18. Voyage Charters / J. Cooke, T. Young, M. Ashcroft, A. Taylor, J. Kimball, D. Martowski, L. Lambert, M. Sturley. – London : Informa Law from Routledge, 2014. – 1463 p.

С. П. ОНИЩЕНКО[1], Ю. О. КОСКІНА[2*]

[1]Каф. «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень», Одеський національний морський університет, вул. Мечнікова, 34, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (067) 557 76 46, ел. пошта onyshenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-9660-1921
[2*]Каф. «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень», Одеський національний морський університет, вул. Мечнікова, 34, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (067) 557 76 46, ел. пошта yuliia.koskina@ukr.net, ORCID 0000-0002-3164-6504

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158478
© S. P. Onyshchenko, Y. A. Koskina, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

ОЦІНКА ЧАСУ ПРИБУТТЯ СУДНА В ПОРТ

Мета. Стаття присвячена оцінці вірогідності прибуття судна в порт у певні часові інтервали з урахуванням різних комбінацій умов рейсової чартер-партії (Ч/П) та їх формулювань. **Методика.** Сформовано структуру стоянкового часу судна в порту за результатами аналізу умов Ч/П та їх формулювань. Часові інтервали, які повинні актуально оцінювати час прибуття судна, були визначені на підставі положень теорії транспортних процесів і систем. Для оцінки вірогідності прибуття судна в порт у певні часові інтервали використано нормальний закон розподілу. **Результати.** Вірогідність прибуття судна в порт за розглянутою Ч/П досліджена для трьох найбільш актуальних ситуацій: 1) відомою є дата «відкриття» судна; 2) відомим є час прибуття судна в порт розвантаження за попередньою Ч/П; 3) відомою є позиція судна на переході з порту розвантаження за попереднім чартером. Для цих трьох ситуацій було оцінено вірогідність тривалості елементів часу від дати «відкриття» й поточної позиції судна до порту завантаження за розглянутою Ч/П, оскільки умови Ч/П визначають початок і тривалість сталії. **Наукова новизна.** Уперше стоянковий час структуровано з урахуванням умов Ч/П та їх можливих формулювань, установлено їх вплив на стоянковий час і досліджено вірогідність прибуття судна в певні часові інтервали. **Практична значимість.** Отримані результати можна використати під час планування рейсу (під час перемовин щодо укладання Ч/П й подальшого виконання рейсу) за рахунок оцінки тривалості стоянкового часу, з урахуванням умов та формулювань Ч/П щодо початку й тривалості сталії й часу прибуття судна.

Ключові слова: рейс судна; стоянковий час; рейсова чартер-партія; планування рейсу

С. П. ОНИЩЕНКО[1], Ю. А. КОСКИНА[2*]

[1]Каф. «Эксплуатация флота и технология морских перевозок», Одесский национальный морской университет, ул. Мечникова, 34, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (067) 557 76 46, эл. почта onyshenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-9660-1921

[2*]Каф. «Эксплуатация флота и технология морских перевозок», Одесский национальный морской университет, ул. Мечникова, 34, Одесса, Украина, 65029, тел. +38 (067) 557 76 46, эл. почта yuliia.koskina@ukr.net, ORCID 0000-0002-3164-6504

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПРИБЫТИЯ СУДНА В ПОРТ

Цель. Статья посвящена оценке вероятности прибытия судна в порт в определенные временные интервалы с учетом различных комбинаций условий рейсовой чартер-партии (Ч/П) и их формулировок. **Методика.** Сформирована структура стояночного времени судна в порту по результатам анализа условий Ч/П и их формулировок. Временные интервалы, которые должны актуально оценивать время прибытия судна, были установлены на основании положений теории транспортных процессов и систем. Для оценки вероятности прибытия судна в порт в определенные временные интервалы использован нормальный закон распределения. **Результаты.** Вероятность прибытия судна в порт погрузки по рассматриваемой Ч/П изучена для трех наиболее актуальных ситуаций: 1) известна дата «открытия» судна; 2) известно время прибытия судна в порт выгрузки по предыдущему Ч/П; 3) известна позиция судна на переходе из порта выгрузки по предыдущему чартеру. Для этих трех ситуаций была оценена вероятность продолжительности элементов времени от даты «открытия» и текущей позиции до порта погрузки по рассматриваемой Ч/П, т. к. условия Ч/П определяют начало и продолжительность сталии. **Научная новизна.** Впервые стояночное время структурировано с учетом условий Ч/П и их возможных формулировок, установлено их влияние на стояночное время и исследована вероятность прибытия судна в определенные временные интервалы. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы в планировании рейса (в процессе переговоров по заключению Ч/П и последующего выполнения рейса) за счет оценки продолжительности стояночного времени, с учетом условий и формулировок Ч/П по началу и продолжительности сталии и времени прибытия судна.

Ключевые слова: рейс судна; стояночное время; рейсовая чартер-партия; планирование рейса

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158478
© S. P. Onyshchenko, Y. A. Koskina, 2019

REFERENCES

1. Lapkin, O. I., Onyshenko, S. P., & Koskina, Y. O. (2017). *Teoriia i praktyka frakhtovykh operatsii: monohrafiia.* Odesa: Kupriienko S. V. (in Ukrainian)
2. Nikolaeva, L. (2004). *Kommercheskaya ehkspluatatsiya sudna.* Odessa: Feniks. (in Russian)
3. Onyshchenko, S. P., & Koskina, Y. O. (2015). Research of the effect of terms and conditions of an offer on successful conclusion of the freight transaction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(3(78),* 25-32. doi: 10.15587/1729-4061.2015.55738 (in Ukrainian)
4. Onishchenko, S. P., & Vishnevskaya, O. D. (2016). Assessment method for deviation of the work's results for vessel under the influence of risk factors. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Mechanical-technological systems and complexes, 7(1179),* 25-32. (in Russian)
5. Davies, D. (2014). *Commencement of Laytime.* London: Informa Law from Routledge. doi: 10.4324/9780203714973 (in English)
6. Devanney, J. W. (2010). *The Impact of Bunker Price on VLCC Spot Rates.* Retrieved from http://www.c4tx.org/pub/vlcc_rates.pdf (in English)
7. Fagerholt, K., & Ronen, D. (2013). Bulk ship routing and scheduling: solving practical problems may provide better results. *Maritime Policy & Management, 40(1),* 48-64. doi: 10.1080/03088839.2012.744481 (in English)
8. Kim, J.-G., Kim, H.-J., & Lee, P. T.-W. (2014). Optimizing ship speed to minimize fuel consumption. *Transportation Letters, 6(3),* 109-117. doi: 10.1179/1942787514y.0000000016 (in English)
9. Lopez, N. J. (1992). *Bes`Chartering and Shipping Terms.* London: Baker & Howard Ltd. (in English)
10. Walther, L., Rizvanolli, A., Wendebourg, M., & Jahn, C. (2016). Modeling and Optimization Algorithms in Ship Weather Routing. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy, 4,* 31-45. doi: 10.1016/j.enavi.2016.06.004 (in English)
11. Norstad, I., Fagerholt, K., & Laporte, G. (2011). Tramp ship routing and scheduling with speed optimization. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies, 19(5),* 853-865. doi: 10.1016/j.trc.2010.05.001 (in English)
12. Pagonis, T. (2009). *Chartering practice handbook.* Athens: Dimelos Publications. (in English)
13. Plomaritou, E., & Papadopoulos, A. (2017). *Shipbrokering and Chartering Practice*. London: Infroma Law from Routledge. (in English)
14. Psaraftis, H. N., & Kontovas, C. A. (2014). Ship speed optimization: Concepts, models and combined speed-routing scenarios. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies, 44,* 52-69. doi: 10.1016/j.trc.2014.03.001 (in English)
15. Ronen, D. (1982). The Effect of Oil Price on the Optimal Speed of Ships. *The Journal of the Operational Research Society, 33(11),* 1035-1040. doi: 10.2307/2581518 (in English)
16. Schofield, J. (2015). *Laytime and Demurrage.* London: Informa Law from Routledge. doi: 10.4324/9781315689470 (in English)
17. Tsoudis, G. N. (2015). *The Shipbroker's Working Knowledge: Dry Cargo Chartering in Practice.* London: AKAKIA Publications. (in English)
18. Cooke, J., Young, T., Ashcroft, M., Taylor, A., Kimball, J., Martowski, D., … Sturley, M. (2014). *Voyage Charters.* London: Informa Law from Routledge. (in English)

Received: Sep. 10, 2018
Accepted: Jan. 18, 2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158478
© S. P. Onyshchenko, Y. A. Koskina, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 625.112:625.033.3

М. Б. КУРГАН[1], Д. М. КУРГАН[2*], М. Ю. БРАЖНИК[3], Д. Л. КОВАЛЬСЬКИЙ[4]

[1]Каф. «Проектування і будівництво доріг», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709
[2*]Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269
[3]Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта xpunkxxx@gmail.com, ORCID 0000-0003-0670-8475
[4]Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kvalskyid@gmail.com, ORCID 0000-0002-0247-2074

ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СУМІЩЕНОЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Мета. Можливості залізничного транспорту для організації перевезень між державами Європейського Союзу й України використовують не повною мірою, оскільки є низка технічних несумісностей транспортних систем, а саме: ширина колії, характеристики рухомого складу, напруга в контактній мережі, габарити тощо. Одним із варіантів організації транспортування вантажів у міжнародному сполученні є використання суміщеної колії 1 435/1 520 мм. Метою цієї роботи є аналіз особливостей напружено-деформованого стану суміщеної конструкції колії, перш за все змін у роботі підшпальної основи внаслідок застосування спеціальної конструкції залізобетонної шпали з одночасним кріпленням чотирьох рейкових ниток. **Методика.** Для визначення напружень у баластному шарі під шпалами було обрано просторову модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності. Розглянуто рух по залізничній колії звичайної конструкції (зі шпалами Ш-1-1), взятої як еталон, і по колії для суміщеного руху, відмінної від еталонної застосуванням шпал типу Ш2С-1. Основні результати розрахунків склали матриці напружень у підшпальній основі. **Результати.** Аналіз результатів моделювання напружень у підшпальній основі суміщеної колії не показав їх збільшення за абсолютними значеннями, але виявив циклічну зміну можливих напрямків девіації часток баласту за наявності передумов до виникнення непружних деформацій у баластному шарі. Такий напружено-деформований стан підшпальної основи, у свою чергу, може призвести до виникнення деформацій у шпалах і погіршення загальної геометрії колії. **Наукова новизна.** У роботі набули подальшого розвитку задачі моделювання взаємодії колії й рухомого складу, зокрема для визначення напружено-деформованого стану підшпальної основи суміщеної колії. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані під час визначення термінів ремонтних робіт для ділянок з суміщеною конструкцією колії, обґрунтування необхідного рівня ущільнення баласту й доцільності застосування георешіток або спеціальних зв’язувальних речовин.

Ключові слова: міжнародні залізничні перевезення; залізнична колія; суміщена колія; ширина колії; взаємодія колії й рухомого складу; баласт

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158471
© М. Б. Курган, Д. М. Курган, М. Ю. Бражник, Д. Л. Ковальський, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Вступ

Завдяки своєму географічному положенню та розвиненій транспортній інфраструктурі Україна має значний потенціал у розвитку вантажних перевезень, зокрема в міжнародному сполученні як країна-транзитер у логістичному ланцюгу товарообміну між Азією та Європою.

Економіка України залежить від ефективного транспортування навалочних і насипних вантажів, таких як вугілля, залізна руда, сталь, зерно, а їх на далекі відстані найбільш вигідно перевозити залізницею. Успішне реформування та реструктуризація Укрзалізниці буде важливою частиною майбутніх українських економічних реформ [16].

Угода про асоціацію між Україною та Європейським Союзом [9], Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року [7] визначають напрями поліпшення якості транспортних послуг, передбачають наближення рівня їх надання й розвитку інфраструктури до європейських стандартів, підвищення рівня безпеки та зменшення негативного впливу на довкілля.

Реалізація Стратегії дозволить отримати високотехнологічну транспортну систему, в якій буде розбудована ключова транспортна мережа (core network) і забезпечена її експлуатаційна сумісність (інтероперабельність) із мультимодальною міжнародною й транс'європейською транспортною мережею TEN-T, у тому числі залізничною мережею колії 1 435 мм. Наслідком стануть масові регулярні перевезення контейнерів та інших вантажів мультимодальним транспортом, зокрема й у транзитному сполученні Європа – Азія.

Приєднання України до міжнародних конвенцій у галузі залізничного транспорту створює передумови для спрощення перевірки вантажів на кордонах, що, у свою чергу, дозволяє прискорити доставку і в цілому вийти на більш якісний рівень спільної роботи.

Наразі можливості залізничного транспорту для організації перевезень між державами Європейського Союзу й України використовують не повною мірою, оскільки є низка технічних несумісностей транспортних систем, а саме: ширина колії, характеристики рухомого складу, напруга в контактній мережі, габарити тощо [13].

До нашого західного кордону йде колія 1 520 мм, а в Європі – 1 435 мм. Україна не перша держава, якій доводиться вирішувати проблему сумісності двох технічних регламентів [3, 10, 20]. Так, у роботі [3] зроблено висновок, що впровадження інтермодальних перевезень з України до ЄС дозволить скоротити витрати на логістику транспортування вантажів залізницею, зменшити джерела ризику шляхом використання більш безпечного транспорту, знизити втрати й пошкодження вантажів, прискорити обіг оборотного капіталу, підвищити ефективність вагонного парку, створити сприятливі умови для користувачів залізничних транспортних послуг.

Аналіз способів організації транспортування вантажів у міжнародному сполученні з країнами Євросоюзу показав, що реалізації можуть підлягати такі варіанти [14]:

– перевантаження вантажів, у тому числі в контейнерах, із рухомого складу колії 1 520 мм на рухомий склад колії 1 435 мм;

– заміна візків у пунктах перестановки вагонів під час переходу стиків колії різного стандарту;

– застосування спеціального рухомого складу, обладнаного візками з розсувними колісними парами;

– продовження колії 1 520 мм від кордонів України на територію Європи;

– продовження колії 1 435 мм від кордонів Європи на територію України;

– використання суміщеної колії 1 435/1 520 мм.

Під час розглядання останнього з наведених варіантів одним із пріоритетних проектів може бути євроколія »Сухий порт» (Мостиська – Родатичі). Проект передбачає розвиток залізничної інфраструктури з будівництва суміщеної колії 1 435 і 1 520 мм на дільниці Мостиська-1 – Родатичі Львівської області. Орієнтовна вартість проекту – 11 млн євро. Термін реалізації – 2020–2022 роки. Ділянка залізничної колії Мостиська – Львів входить до Критського міжнародного транспортного коридору № 3 (Берлін – Вроцлав – Львів – Київ). Ця ділянка двоколійна, з шириною колії 1 520 мм. Одна з колій суміщена з колією 1 435 мм, до 90-х років – до станції Родатичі (протяжність 42 км), на цей час – до ст. Мостиська-1 (рис. 1).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158471
© М. Б. Курган, Д. М. Курган, М. Ю. Бражник, Д. Л. Ковальський, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Рис. 1. Залізнична ділянка Перемишль – Львів

Fig. 1. The railroad section Przemysl – Lviv

Прикладом використання суміщеної колії є міжнародний проект «Rail Baltica», реалізований від державного кордону Литви й Польщі до Каунаса. На ділянці залізниці «Rail Baltica» довжиною 120 км була прокладена нова колія європейського стандарту (шириною 1 435 мм), а поруч із нею оновлена залізнична лінія з шириною колії 1 520 мм. На новій трасі укладено 233 км нових рейок для колій шириною 1 435 і 1 520 мм, включаючи парки колій на станціях, оновлено інфраструктуру залізничних інженерних мереж, реконструйовано станції (рис. 2).

Рис. 2. Суміщена колія на ділянці Шяштокай –Моцкава [17]

Fig. 2. The dual gauge on the Shiashtokay-Mozkawa section [17]

У жовтні 2015 року було завершено укладання першої ділянки залізниці, а із 17 червня 2016 року розпочато регулярне пасажирське сполучення з Каунаса (Литва) до Білостока (Польща).

Привабливим міг би стати проект зі з'єднання як мінімум двох ділянок комбінованої колії з подальшим створенням інтермодального хабу. Наприклад, можна було б поєднати європейською колією Мукачево та Мостиська (близько 300 км), побудувавши у Львові великий перевалочний хаб. Природно, що такого роду плани вимагають залучення іноземних інвестицій.

Яскравим зразком хабу може служити словацький термінал «Добра», який із 2008 року перебуває в довгостроковій оренді у російського ВАТ «Трансконтейнер». Саме завдяки російським інвестиціям і вантажам термінал відіграє ключову роль у розвитку контейнерних перевезень на V єврокоридорі (Італія – Словенія – Угорщина – Словаччина – Україна – Росія).

Україна має подібного роду термінал у Закарпатті. Ще в 1998 році в Чопі було створено термінал «Карпати», виробничі потужності якого знаходяться біля вузлової станції Батьово. Однак він явно програє своєму словацькому конкуренту й вимагає подальшого розвитку.

Крім того, Україна й Польща могли б об'єднати зусилля у створенні спільного інтермодального терміналу з перевалки вантажів і забезпечити таким чином надійним вантажопотоком свої комбіновані (у випадку Польщі – ширококолійні) залізничні лінії.

Сьогодні на Львівській залізниці сумарна довжина суміщеної колії (1 520 і 1 435 мм) становить близько 150 км (рис. 3).

Рис. 3. Ділянка суміщеної рейкової колії 1 520 і 1 435 мм

Fig. 3. The section of the dual rail gauge is 1 520 and 1 435 mm

Мета

Зважаючи на вищевикладене, метою цієї роботи є аналіз особливостей напружено-деформованого стану суміщеної конструкції колії, перш за все змін у роботі підшпальної

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158471
© М. Б. Курган, Д. М. Курган, М. Ю. Бражник, Д. Л. Ковальський, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

основи внаслідок застосування спеціальної конструкції залізобетонної шпали з одночасним кріпленням чотирьох рейкових ниток.

Методика

Одним з основних недоліків суміщеної колії є те, що вона потребує розв'язок і обходів роздільних пунктів через необхідність укладання стрілочних переводів нормальної (1 520 мм) і європейської (1 435 мм) колій, що призводить до зниження швидкості руху поїздів під час проходження станцій.

Зараз у дослідній експлуатації перебуває стрілочний перевід Дн-410 типу UIC60 марки 1/11 колії 1 435 мм, на дерев'яних брусах, з хрестовиною з приварними рейковими закінченнями. Особливості конструкції: подовжені гнучкі гостряки довжиною 12 115 мм із жорстким защемленням у корені; криволінійний гостряк дотичного типу з радіусом кривизни 300 м, що поліпшує умови вписування рухомого складу; розріджена епюра шпал; хрестовина-моноблок із приварними рейковими закінченнями, що виключає утворення дефектів ДУ.12.5, ДУ.22.5 і ДС10.1.

Стрілочний перевід проекту Дн-410 укладено у травні 2005 року на I головній колії ст. Косини регіональної філії «Львівська залізниця» (рис. 4).

Рис. 4. По прямому напрямку колія 1 435 мм, по боковому – 1 520 мм

Fig. 4. In the forward direction the track is 1 435 mm, in the side one – 1 520 mm

У вересні 2017 року стрілочний перевід проекту Дн-410 було обстежено і встановлено наступне: вантажонапруженість – 0,05 млн т-км бр./км за рік, пропущений тоннаж – 8,9 млн т-км бр./км за рік, швидкість руху по прямому напрямку 60 км/год, по боковому – 25 км/год.

До стику рамних рейок стрілочного переводу примикають рейки типу Р50, до заднього стику хрестовини – рейки типу Р65. У зв'язку з тим, що суміщена колія вкладена на залізобетонних шпалах для забезпечення її рівнопружності, необхідно перейти до укладання таких стрілочних переводів на залізобетонних брусах.

У листопаді 2001 року на ділянці Батьово – Косини (2–11-ий км) було укладено суміщену колію, а в березні 2004 року покладено рейкові пліті [1]. У вересні 2017 року колієобстежувальна станція ПС-1 філії ЦДЗІ провела обстеження ділянки суміщеної залізничної колії на залізобетонних шпалах Ш2С-1 довжиною 2 850 мм та пружним скріпленням типу КПП-5.

Шпали Ш2С-1 мають спеціальну конструкцію, що дає змогу обпирання чотирьом рейковим ниткам, рис. 5. Такий тип шпал рекомендовано «Технічними вимогами до конструкції залізобетонних шпал суміщеної колії 1 520 мм і 1 435 мм», що затверджені комісією ОСЖД (Организация сотрудничества железных дорог) [8].

В Україні шпали Ш2С-1 виготовляє ПАТ «Коростенський завод залізобетонних шпал», що спеціалізується на виготовленні залізобетонних попередньо-напружених шпал і брусів стрілочних переводів для залізничної колії [4].

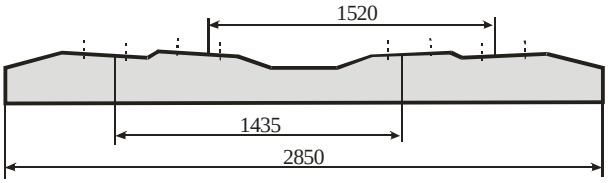


Рис. 5. Залізобетонна шпала Ш2С-1 для суміщеної конструкції колії

Fig. 5. Reinforced sleeper Ш2С-1 for the dual gauge structure

Характеристика обстеженої ділянки колії зведена в табл. 1.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158471
© М. Б. Курган, Д. М. Курган, М. Ю. Бражник, Д. Л. Ковальський, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Таблиця 1

Характеристика ділянки суміщеної залізничної колії

Table 1

Characteristics of the section of the dual railway gauge

Ширина колії, мм	Пропущений тоннаж, млн тонн брутто	Швидкість, км/год (пас./вант.)
1 520	77,9	80/70
1 435	15,75	80/80

У ході обстеження встановлено наступне: відстань між осями шпал знаходиться в діапазоні 630–700 мм, ширина колії – у межах допусків, угону плітей безстикової колії по всіх чотирьох нитках на даній ділянці немає.

Згідно зі спостереженнями за суміщеною колією, на окремих ділянках на шпалах Ш2С-1 у зоні анкерів спостерігаються тріщини як на колії 1 435 мм, так і на колії 1 520 мм, що може призвести до виходу з ладу шпали та наступних розладів верхньої будови колії. Більшість тріщин у зоні анкерів шпали спостерігались на колії 1 435 мм. Виявлені дефектні шпали мають різний характер пошкоджень: у зоні внутрішніх анкерів колії 1 435 мм (рис. 6, *а*), поздовжні тріщини на торцях шпал (рис. 6, *б*), поздовжні тріщини від торця шпал у підрейковій зоні (рис. 6, *в*), поздовжні тріщини від зони анкера до торця шпал (рис. 6, *г*).

Тріщини в зоні анкерів шпал на суміщеній колії у зв’язку з малою вантажонапруженістю не мають динамічного розвитку й виникають унаслідок некомплексного виправлення колії. Якщо виправлення суміщеної колії проводять машинним способом по колії 1 520 мм, а колію 1 435 мм не виправляють, то тріщини в зоні анкерів виникають на шпалах в зоні анкерів колії 1 435 мм. Якщо виправляти машинами колію 1 435 мм, то тріщини у зоні анкерів виникають на шпалах Ш2С-1 на колії 1 520 мм (на внутрішній частині шпали, під час навантажень на колію 1 520 мм шпала працює на злам, з польової сторони шпали колія 1 520 мм працює як консоль).

Для попередження виникнення тріщин і зламів шпал на суміщеній колії рекомендовано переглянути порядок транспортування та вкладання рейко-шпальної решітки зі шпалами для суміщеної колії типу Ш2С-1 довжиною 2 850 мм і технологію виправлення колій 1 435 і 1 520 мм.

До недоліків потрібно віднести також конструкцію залізобетонних шпал і, як наслідок, технологію утримання верхньої будови за нерівномірного завантаження нормальної і європейської колій, що призводить до виходу з ладу шпал (рис. 6, *д*, 6, *е*).

Для аналізу надійності роботи й строків експлуатації залізобетонних шпал існує декілька підходів [2, 6]. У різних експлуатаційних умовах інформація про характер їх роботи базується на теорії надійності. На основі даних обстеження залізобетонних шпал [6] були встановлені залежності настання непридатності й загальні ураження шпал дефектами залежно від експлуатаційних умов – осьове навантаження, річні перевезення, радіуси кривих. Крім головних факторів – силових, ураховано також фактор часу перебування шпал у колії, природні та кліматичні впливи – кількість циклів заморожування-розмерзання, корозійного впливу та ін.

Робота шпал залежить не тільки безпосередньо від навантаження на них, а й в значній мірі визначається контактом із баластом [15]. Для визначення напружень у підшпальній основі було обрано просторову модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності [5].

У моделі використана просторова система координат, у якій залізнична колія задана як набір об’єктів, які мають геометричні розміри та фізичні властивості. Її основу складає опис напружено-деформованого стану підрейкової основи, до якого прикладені сили, що діють на опори від прогину рейки. Ці сили визначають у процесі моделювання як сполучення, що пов’язує прогин рейки й деформацію підрейкової основи. Коливання рейки, яка спирається на опори, визначають з умови її взаємного прогину з підрейковою основою в місцях опор від сил, що передаються на ці опори від рейки. В об’єктах підрейкової основи виникають напруження, фронт поширення яких змінюється в часі. Зона дії напружень обмежена поверхнею, яку можна описати множиною векторів. Їх положення визначає швидкість поширення

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158471
© М. Б. Курган, Д. М. Курган, М. Ю. Бражник, Д. Л. Ковальський, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

в довільному напрямку, яка залежить від поперечної та поздовжньої швидкості руху хвиль у речовині з заданим модулем пружності Юнга, коефіцієнтом Пуассона й щільністю. Із кожним часовим кроком зона дії напружень збільшується, поділяючи підрейкову основу на умовні сегменти. Кожен такий сегмент складається з окремих елементів – простру, обмеженого чотирма суміжними векторами. Сумарні дані по кожному об'єкту складають інформацію про напружений стан сегмента. Якщо під час розв'язання таких рівнянь з'ясовується, що вектор виходить за межі об'єкта (переходить до наступного), його параметри корегують. Динамічна деформація сегмента підпорядкована системі диференціальних рівнянь. Її розв'язок визначає напруження (деформації) будь-якої точки підрейкового простору [5].

а – a

б – b

в – c

г – d

д – e

е – f

Рис. 6. Руйнування залізобетонних шпал у суміщеній колії:
а – тріщини в зоні внутрішніх анкерів; *б* – поздовжні тріщини на торцях шпал;
в – поздовжні тріщини в підрейковій зоні; *г* – поздовжні тріщини від зони анкера до торця шпал;
д – вихід із ладу (зовнішні руйнування); *е* – вихід із ладу (внутрішні руйнування)

Fig. 6. Destruction of reinforced sleepers in a dual gauge:
a – cracks in the zone of internal anchors; *b* – longitudinal cracks on the ends of sleepers;
c – longitudinal cracks in the under-sleeper base; *d* – longitudinal cracks from the anchor
to the end of the sleepers; *e* – out of order (external destruction); *f* – out of order (internal destruction)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158471
© М. Б. Курган, Д. М. Курган, М. Ю. Бражник, Д. Л. Ковальський, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Результати

Було розглянуто рух пасажирського вагона по залізничній колії звичайної конструкції, взятої як еталон для подальшого аналізу: рейки Р65, залізобетонні шпали Ш-1-1, щебеневий баласт товщиною 60 см. У наведених прикладах модуль деформації баласту складає 200 МПа, земляного полотна – 35 МПа, що відповідає загальному модулю пружності підрейкової основи зазначеної конструкції залізничної колії на рівні 50 МПа – прийняте значення для більшості типових розрахунків залізничної колії на міцність; величину сили, що діє від рейки на опору, отримано на рівні 30 кН.

Аналогічно було розглянуто конструкцію колії для суміщеного руху, відмінної від еталонної застосуванням шпал типу Ш2С-1.

Основні результати розрахунків склали матриці напружень у підшпальній основі на момент розташування колеса в перерізі дослідної шпали (рис. 7–9). Такий підхід дає можливість проаналізувати значення максимальних напружень, їх поширення й затухання як по довжині шпали, так і по глибині (у баласті, у земляному полотні та в місцях переходів між шарами). Результати, наведені на рис. 7–9, охоплюють 2 м простору вздовж шпали і 1,1 м під шпалою (0,6 м баласту й 0,5 м земляного полотна).

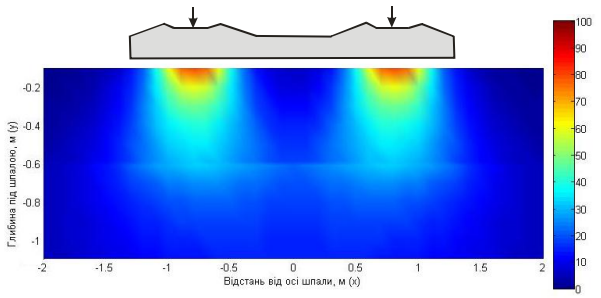


Рис. 7. Поширення напружень під шпалою Ш-1-1 (звичайна конструкція колії з шириною 1 520 мм)

Fig. 7. Distribution of stresses under the sleepers Ш-1-1 (ordinary construction of the track, width of 1 520 mm)

Процес накопичення деформацій баластного шару під час проходження поїздів можна поділити на дві фази: перша відбувається відразу після введення ділянки в експлуатацію як стабілізація колії після укладання завдяки ущільненню структури баласту; друга (суттєво повільніша) – триває весь подальший термін експлуатації за рахунок багатоциклічного навантаження, потрапляння забруднювачів, появи відступів у геометрії колії тощо. Сьогодні існує багато методик, що описують процес накопичення деформацій від кількості циклів навантажень і низки інших факторів. Найчастіше використовують логарифмічні або експоненціальні залежності, які були отримані в ході лабораторних і натурних випробувань. Детальний огляд таких методик зроблено, наприклад, у роботі [21]. Пошук нових і вдосконалення наявних моделей триває й зараз. Серед нових напрямків можна вказати підходи, які базуються на ентропії системи [5].

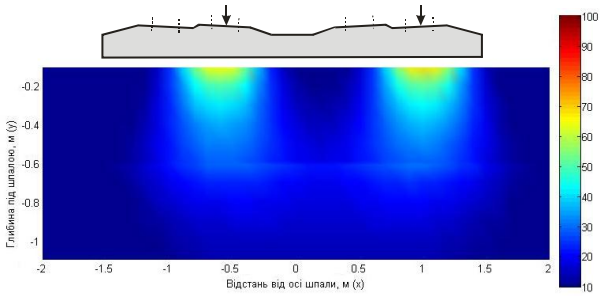


Рис. 8. Поширення напружень під шпалою Ш2С-1 (суміщена конструкція, рух по колії 1 520 мм)

Fig. 8. Distribution of stresses under the sleepers Ш2С-1 (combined construction, movement along the track 1 520 mm)

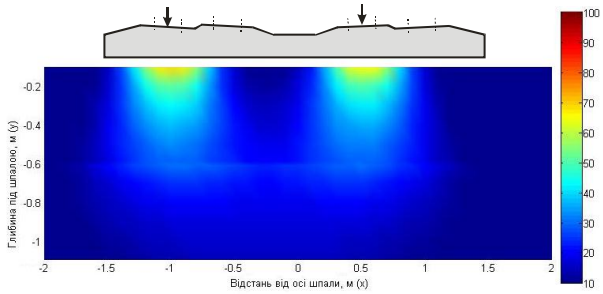


Рис. 9. Поширення напружень під шпалою Ш2С-1 (суміщена конструкція, рух по колії 1 435 мм)

Fig. 9. Distribution of stresses under the sleepers Ш2С-1 (combined structure, movement along the track 1 435 mm)

Також розвиваються й методи лабораторних досліджень роботи баласту [11, 12, 18, 19]. У праці [12] проведено аналіз більшості сучасних підходів щодо лабораторної оцінки напруженого стану й вичерпання ресурсу роботи щебеню.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158471
© М. Б. Курган, Д. М. Курган, М. Ю. Бражник, Д. Л. Ковальський, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Наведені в цих працях дослідження, як правило, спрямовані на опис другої фази роботи баластного шару. Ураховуючи, що при цьому розглядаються значні проміжки часу, яким відповідають багатоциклічні навантаження, суттєва деталізація сил і поширення їх дії зайва. Однак для порівняння роботи баласту під час руху по різній ширині суміщеної колії такого підходу недостатньо.

У цьому досліджені за основу взята матриця напружень у підшпальній основі. У різних точках виникають різні напруження (див. рис. 7–9), що призводить до утворення в баласті зон із різним тиском. Припускаємо гіпотезу, що девіація часток баласту (яка особливо характерна для першої фази деформацій) буде мати пріоритетні напрямки в зону з меншими напруженнями σ_{ij}. Тоді для окремої точки підшпального простору $(x; y)$ напрямок девіації α_{xy} будемо визначати так:

$$\left.\begin{array}{l} \min\left\{\sigma_{ij} \setminus \sigma_{xy}\right\} \to \alpha_{xy}; \\ i \in [x-1; x+1]; \\ j \in [y-1; y+1]. \end{array}\right\} \quad (1)$$

Розрахунки виконані по довжині шпали (x) і глибині шару під під шпалою (y) з кроком 10 см із точністю 45°. Результати розрахунків показані на рис. 10, *а* для шпали Ш-1-1 (ширина колії 1 520 мм) і на рис, 10, *б* для шпали Ш2С-1 (із суміщеною колією 1 520/1 435 мм) відповідно.

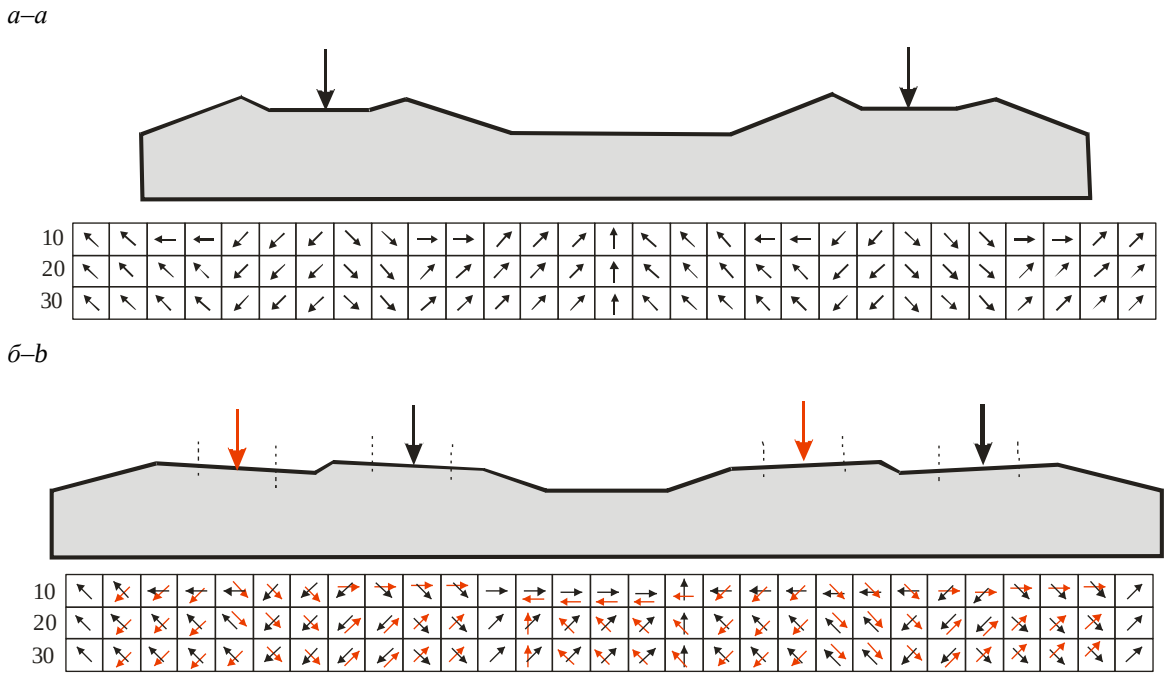


Рис. 10. Основні напрямки девіації баласту на глибині 10–30 см від підошви шпали: *а* – під шпалою Ш-1-1; *б* – під шпалою Ш2С-1 (для колії 1 435 мм показані тільки у випадках від'ємності від колії 1 520 мм)

Fig. 10. The main directions of ballast deviation at a depth of 10-30 cm from the sleeper sole: *a* – under the sleeper Ш-1-1; *b* – under the sleeper Ш2С-1 (for a 1 435 mm track shown only in cases of distance from the track of 1 520 mm)

Для шпали Ш-1-1 девіація баласту має постійні напрямки, симетричні відносно прикладання навантаження і по довжині шпали. Це сприяє швидкому завершенню першої фази стабілізації й роботі баластного шару в другій фазі в якості, наближеній до пружної.

Під шпалою Ш2С-1 спостерігаємо асиметричне розподілення напрямків девіації баласту

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158471
© М. Б. Курган, Д. М. Курган, М. Ю. Бражник, Д. Л. Ковальський, 2019

для кожного з варіантів експлуатації (рух по колії 1 520 і 1 435 мм) за рахунок як несиметричності конструкції шпали, так і несиметричності прикладання навантаження. Крім того, під час руху по різній ширині колії змінюється й напрямок девіації, у деяких зонах – в основному в перерізах обпирання рейок – напрямок може змінюватись більше ніж на 90° або навіть на протилежний. Напевно, за достатнього й рівномірного первинного ущільнення баластного шару це не є причиною для ускладнення роботи колії, особливо враховуючи відносно невеликі значення загальних напружень (див. рис. 8–9). Однак за наявності відхилень в ущільненні баласту це стає суттєвим фактором, який призводить до збільшення часу першої фази стабілізації й зростання інтенсивності накопичення залишкових деформацій під час подальшої експлуатації. Такий напружено-деформований стан підшпальної основи, у свою чергу, може призвести до виникнення деформацій у шпалах і погіршення загальної геометрії колії.

На підставі отриманих результатів можна рекомендувати ущільнювати баласт і використовувати додаткові засоби для поліпшення стійкості, такі як георешітки або спеціальні зв'язувальні речовини.

Наукова новизна та практична значимість

У роботі набули подальшого розвитку задачі моделювання взаємодії колії й рухомого складу, зокрема для визначення напружено-деформованого стану підшпальної основи суміщеної колії.

Отримані результати можуть бути використані під час визначення термінів ремонтних робіт для ділянок суміщеної конструкції колії, обґрунтування необхідного рівня ущільнення баласту й доцільності застосування георешіток або спеціальних зв'язувальних речовин.

Висновки

Одним із засобів розв'язання задачі залізничного сполучення України з державами, які використовують європейську ширину колії, є суміщена конструкція залізничної ділянки. Це дозволяє забезпечити пропуск поїздів із вагонами європейської колії в глибину країни для подальшого перевантаження на вузлових станціях і виключає надмірне навантаження на прикордонні станції.

Особливістю конструкції суміщеної колії є застосування спеціальних залізобетонних шпал (типу Ш2С-1), які дають змогу одночасного розташування чотирьох ниток рейок з організацією руху по коліях шириною 1 435 і 1 520 мм на одному залізничному полотні.

Асиметрія в навантаженні такої шпали і, як наслідок, асиметрія в подальшому поширенні напружень у підшпальній основі формує напружено-деформовану роботу суміщеної конструкції, яка відрізняється від роботи звичайної колії на залізобетонних шпалах.

Аналіз результатів моделювання напружень у підшпальній основі суміщеної колії не показав їх збільшення за абсолютними значеннями, але виявив циклічну зміну можливих напрямків девіації часток баласту за наявності передумов до виникнення непружних деформацій у баластному шарі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арбузов, М. А. Температурний інтервал закріплення плітей суміщеної безстикової колії / М. А. Арбузов // Зб. наук. пр. Донец. ін-ту залізн. трансп. – Донецьк, 2013. – № 34. – С. 133–141.
2. Досвід експлуатації пружних рейкових скріплень типу PRS і залізобетонних шпал із ними / А. А. Плугін, А. М. Плугін, С. В. Мірошніченко [та ін.] // Українські залізниці. – 2015. – № 3-4 (21-22). – С. 60–64.
3. Дьомін, Р. Ю. Впровадження AGCS-технологій – шлях до інтеграції залізниць України в європейську транспортну мережу / Р. Ю. Дьомін, Ю. В. Дьомін // Вагонний парк. – 2017. – № 5-6 (122-123). – С. 20–23.
4. Авдєєв, С. Василь Куницький: «Інноваційна продукція для українських залізниць» / С. Авдєєв // Українські залізниці. – 2014. – № 10 (16). – С. 48–49.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158471
© М. Б. Курган, Д. М. Курган, М. Ю. Бражник, Д. Л. Ковальський, 2019

5. Курган, М. Б. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні : монографія / М. Б. Курган, Д. М. Курган ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро : ДНУЗТ, 2016. – 283 с.
6. Мартинов, І. Е. Параметри надійності роботи залізобетонних шпал у різних експлуатаційних умовах / І. Е. Мартинов, В. Г. Вітольберг, Д. О. Потапов // Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізн. трансп. – Харків, 2018. – Вип. 175. – С. 47–57. doi: 10.18664/1994-7852.175.2018.127076
7. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року [Електронний ресурс] // М-во інфраструктури України. – Режим доступу: https://mtu.gov.ua/news/28581.html – Назва з екрана. – Перевірено : 22.01.2019.
8. Технические требования к конструкции железобетонных шпал совмещенной колеи 1 520 мм и 1 435 мм [Електронний ресурс] : Памятка № Р 755/5 // Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД). – Варшава, 2003. – Режим доступу: http://clc.am/9TOhyg – Назва з екрана. – Перевірено : 23.01.2019.
9. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони [Електронний ресурс] // Законодавство України. – Режим доступу: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011 – Назва з екрана. – Перевірено : 23.01.2019.
10. Cerniauskaite, L. European-standard railway line between Vilnius and Kaunas / L. Cerniauskaite, K. Sakalauskas, A. Massel // Environmental Engineering : The 7th International Conference (May 22–23, 2008). – Vilnius, Lithuania, 2008. – P. 1125–1129.
11. Fischer, S. Breakage Test of Railway Ballast Materials with New Laboratory Method / S. Fischer // Periodica Polytechnica Civil Engineering. – 2017. – Vol. 61, No. 4. – P. 794–802. doi: 10.3311/ppci.8549
12. Fischer, S. Special laboratory testing method for evaluation particle breakage of railway ballast material / S. Fischer, A. Németh // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 2 (74). – С. 87–102. doi: 10.15802/stp2018/130854
13. Kurhan, M. Problems of providing international railway transport / M. Kurhan, D. Kurhan // MATEC Web of Conf. – 2018. – Vol. 230. doi: 10.1051/matecconf/201823001007
14. Kurhan, M. The Effectiveness Evaluation of International Railway Transportation in the Direction of «Ukraine – European Union» / M. Kurhan, D. Kurhan // Transport Means 2018 : Proc. of the 22nd Intern. Sci. Conf. (Oct. 03–05, 2018, Trakai, Lithuania). – Kaunas, 2018. – Pt. I. – P. 145–150.
15. Normalised curvature square ratio for detection of ballast voids and pockets under rail track sleepers / S. Kaewunruen, R. Janeliukstis, A. Freimanis, K. Goto // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 1106. doi: 10.1088/1742-6596/1106/1/012002
16. Pittman, R. Reforming and restructuring Ukrzaliznytsia: a crucial task for Ukrainian reformers / R. Pittman // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 34–50. doi: 10.15802/stp2017/92775
17. Rail Baltica [Електронний ресурс] // Vikipediją. – Режим доступу: https://lt.wikipedia.org/wiki/Rail_Baltica – Назва з екрана. – Перевірено : 23.01.2019.
18. Research of Railway Crashed Stone Use of 40–70 mm Fraction / O. Pshinko, O. Patlasov, V. Andrieiev [et al.] // Transport Means 2018 : Proc. of the 22nd Intern. Sci. Conf. (Oct. 03–05, 2018, Trakai, Lithuania). – Kaunas, 2018. – Pt. I. – P. 170–178.
19. Specific assessment method of railway ballast particle degradation based on unique laboratory test / S. Fischer, A. Nemeth, D. Harrach, E. Juhasz // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 3 (75). – С. 87–94. doi: 10.15802/stp2018/134655
20. Szkoda, M. Assessment of reliability, availability and maintainability of rail gauge change systems / M. Szkoda // Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability. – 2014. – Vol. 16 (3). – P. 422–432.
21. The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works / M. Sysyn, U. Gerber, V. Kovalchuk, O. Nabochenko // Archives of Transport. – 2018. – № 47(3). – P. 91–107. doi: 10.5604/01.3001.0012.6512

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158471
© М. Б. Курган, Д. М. Курган, М. Ю. Бражник, Д. Л. Ковальський, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Н. Б. КУРГАН[1], Д. Н. КУРГАН[2*], М. Ю. БРАЖНИК[3], Д. Л. КОВАЛЬСКИЙ[4]

[1]Каф. «Проектирование и строительство дорог», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, эл. почта kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709
[2*]Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, эл. почта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269
[3]Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, эл. почта xpunkxxx@gmail.com, ORCID 0000-0003-0670-8475
[4]Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, эл. почта kvalskyid@gmail.com, ORCID 0000-0002-0247-2074

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОВМЕЩЕННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Цель. Возможности железнодорожного транспорта для организации перевозок между странами Европейского Союза и Украины используют не в полной мере, поскольку существует ряд технических различий транспортных систем, а именно: ширина колеи, характеристики подвижного состава, напряжение в контактной сети, габариты и т. д. Один из вариантов организации транспортирования грузов в международном сообщении – это использование совмещенной колеи 1 435/1 520 мм. Цель данной работы – анализ особенностей напряженно-деформированного состояния совмещенной конструкции пути, в первую очередь изменений в работе подшпальной основы вследствие использования специальной конструкции железобетонной шпалы с одновременным креплением четырех рельсовых нитей. **Методика.** Для определения напряжений в подшпальной основе было выбрано пространственную модель динамических деформаций железнодорожного пути на основе теории упругости. Рассмотрено движение по железнодорожному пути обычной конструкции (со шпалами Ш-1-1), принятому в качестве эталонного, и по пути для совмещенного движения, который отличается от эталона использованием шпал типа Ш2С-1. Основные результаты расчетов составили матрицы напряжений в подшпальной основе. **Результаты.** Анализ результатов моделирования напряжений в подшпальной основе совмещенного пути не показал их увеличения по абсолютным значениям, но выявил циклические изменения возможных направлений девиации частиц балласта при наличии предрасположенности к возникновению неупругих деформаций в балластном слое. Такое напряженно-деформированное состояние подшпальной основы, в свою очередь, может привести к появлению деформаций в шпалах и ухудшению общей геометрии пути. **Научная новизна.** В работе получили дальнейшее развитие задачи моделирования взаимодействия пути и подвижного состава, в частности для определения напряженно-деформированного состояния подшпальной основы совмещенного пути. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы для определения сроков ремонтных работ на участках с совмещенной конструкцией пути, обоснования необходимой степени уплотнения балласта, целесообразности применения георешеток или специальных связывающих материалов.

Ключевые слова: международные железнодорожные перевозки; железнодорожный путь; совмещенный путь; ширина пути; взаимодействие пути и подвижного состава; балласт

M. B. KURHAN[1], D. M. KURHAN[2*], M. Y. BRAZHNYK[3], D. L. KOVALSKYI[4]

[1] Dep. «Roads Design and Construction», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel +38 (056) 373 15 48, e-mail kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709
[2*] Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269
[3] Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail xpunkxxx@gmail.com, ORCID 0000-0003-0670-8475
[4] Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kvalskyid@gmail.com, ORCID 0000-0002-0247-2074

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158471
© М. Б. Курган, Д. М. Курган, М. Ю. Бражник, Д. Л. Ковальський, 2019

FEATURES OF STRESS-STRAIN STATE OF THE DUAL RAILWAY GAUGE

Purpose. The possibilities of railway transport for organizing transportation between the countries of the European Union and Ukraine are not fully utilized, since there are a number of technical differences in transport systems, namely: wheel gauge, characteristics of rolling stock, voltage in the contact network, dimensions, etc. One of the options in the organization of goods transportation in international traffic is the use of 1.435/1.520 mm dual gauge. The purpose of this study is to analyze the features of the stress-strain state of the combined construction of the track, first of all the changes in the operation of the under-sleeper base due to the use of a special design of reinforced concrete sleepers with simultaneous fastening of four rails. **Methodology.** To determine the stresses in the under-sleeper base, a spatial model of dynamic deformations of the railway track was chosen based on the elasticity theory. The movement on a railway track of a conventional construction (with sleepers Ш-1-1), accepted as a reference one, and along the track for combined movement, which differs from a standard using sleepers of type Ш2С-1, was considered. The main results of the calculations were the matrix of stresses in the under-sleeper base. **Findings.** The analysis of the results of the stresses simulation in the under-sleeper base of the dual gauge did not show their increase in absolute values, but revealed cyclical changes in the possible directions in deviation of ballast particles if there is a propensity for the occurrence of inelastic deformations in the ballast layer. Such a stress-strain state of the under-sleeper base, in turn, can lead to the appearance of deformations in the sleepers and the deterioration of the overall track geometry. **Originality.** The tasks of simulation got the further development of the track and rolling stock interaction, in particular to determine the stress-strain state of the under-sleeper base of the dual gauge. **Practical value.** The obtained results can be used to determine the timing of repair work on the sections with a combined track construction, justify the necessary degree of ballast consolidation, the feasibility of using the geogrids or special bonding materials.

Keywords: international rail transportation; railway track; dual gauge; railroad gage; track and rolling stock interaction; ballast

REFERENCES

1. Arbuzov, M. A. (2013). Temperaturnyi interval zakriplennia plitei sumishchenoi bezstykovoi kolii. *Zbirnik naukovih prac' of Donetsk Railway Transport Institute, 34,* 133-141. (in Ukrainian)
2. Pluhin, A. A., Pluhin, A. M., Miroshnichenko, S. V., Kalinin, O. A., Liutyi, V. A., & Tulei, Y. L. (2015). Dosvid ekspluatatsii pruzhnykh reikovykh skriplen typu PRS i zalizobetonnykh shpal iz nymy. *Ukrainski zaliznytsi, 3-4(21-22),* 60-64. (in Ukrainian)
3. Domin, R. Y., & Domin, Y. V. (2017). Vprovadzhennia AGCS-tekhnolohii – shliakh do intehratsii zaliznyts Ukrainy v yevropeisku transportnu merezhu. *Car Fleet, 5-6(122-123),* 20-23. (in Ukrainian)
4. Avdieiev, S. (2014). Vasyl Kunytskyi: «Innovatsiina produktsiia dlia ukrainskykh zaliznyts». *Ukrainski zaliznytsi, 10(16),* 48-49. (in Ukrainian)
5. Kurhan, M. B., & Kurhan, D. M. (2016). *Teoretychni osnovy vprovadzhennia vysokoshvydkisnoho rukhu poizdiv v Ukraini: monohrafiia.* Dnipro: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
6. Martynov, I., Vitolberg, V., & Potapov, D. (2018). Parameters of Reliability of Reinforced Concrete Shapes in Different Operating Conditions. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport, 175,* 47-57. doi: 10.18664/1994-7852.175.2018.127076 (in Ukrainian)
7. Natsionalna transportna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku. *Ministerstvo infrastruktury Ukrainy.* Retrieved from https://mtu.gov.ua/news/28581.html (in Ukrainian)
8. Tekhnicheskie trebovaniya k konstruktsii zhelezobetonnykh shpal sovmeshchennoy kolei 1 520 mm i 1 435 mm : Pamyatka № P 755/5. (2003). *Organisation for Co-operation Between Railways (OSJD).* Warsaw. Retrieved from http://clc.am/9TOhyg (in Russian)
9. Uhoda pro asotsiatsiiu mizh ukrainoiu, z odniiei storony, ta yevropeiskym soiuzom, yevropeiskym spivtovarystvom z atomnoi enerhii i yikhnimy derzhavamy-chlenamy, z inshoi storony. *Legislation of Ukraine.* Retrieved from http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011 (in Ukrainian)
10. Cerniauskaite, L., Sakalauskas, K., & Massel, A. (2008). European-standard railway line between Vilnius and Kaunas. *Environmental Engineering:* The 7th International Conference (May 22–23, 2008). Vilnius. (in English)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158471
© М. Б. Курган, Д. М. Курган, М. Ю. Бражник, Д. Л. Ковальський, 2019

11. Fischer, S. (2017). Breakage Test of Railway Ballast Materials with New Laboratory Method. *Periodica Polytechnica Civil Engineering, 61(4),* 794-802. doi: 10.3311/ppci.8549 (in English)
12. Fischer, S., & Németh, A. (2018). Special laboratory testing method for evaluation particle breakage of railway ballast material. *Science and Transport Progress, 2(74),* 87-102. doi: 10.15802/stp2018/130854 (in English)
13. Kurhan, M., & Kurhan, D. (2018). Problems of providing international railway transport. *MATEC Web of Conferences, 230*. doi: 10.1051/matecconf/201823001007 (in English)
14. Kurhan, M., & Kurhan, D. (2018, October). The Effectiveness Evaluation of International Railway Transportation in the Direction of «Ukraine – European Union». *Transport Means 2018:* Proceedings of 22nd International Scientific Conference. Kaunas. (in English)
15. Kaewunruen, S., Janeliukstis, R., Freimanis, A., & Goto, K. (2018). Normalised curvature square ratio for detection of ballast voids and pockets under rail track sleepers. *Journal of Physics: Conference Series, 1106*. doi: 10.1088/1742-6596/1106/1/012002 (in English)
16. Pittman, R. (2017). Reforming and restructuring Ukrzaliznytsia: a crucial task for Ukrainian reformers. *Science and Transport Progress. 1(67),* 34-50. doi: 10.15802/stp2017/92775 (in English)
17. Rail Baltica. *Vikipediją.* Retrieved from https://lt.wikipedia.org/wiki/Rail_Baltica (in English)
18. Pshinko, O., Patlasov, O., Andrieiev, V., Arbuzov, M., Hubar, O., Hromova, O., & Markul, R. (2018, October). Research of Railway Crashed Stone Use of 40–70 mm Fraction. *Transport Means 2018:* Proceedings of 22nd International Scientific Conference. Kaunas. (in English)
19. Fischer, S., Nemeth, A., Harrach, D., & Juhasz, E. (2018). Specific assessment method of railway ballast particle degradation based on unique laboratory test. *Science and Transport Progress, 3(75),* 87-94. doi: 10.15802/stp2018/134655 (in English)
20. Szkoda, M. (2014). Assessment of reliability, availability and maintainability of rail gauge change systems. *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability, 16(3),* 422-432. (in English)
21. Sysyn, M., Gerber, U., Kovalchuk, V., & Nabochenko, O. (2018). The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works. *Archives of Transport, 47(3),* 91-107. doi: 10.5604/01.3001.0012.6512 (in English)

Надійшла до редколегії: 06.09.2018
Прийнята до друку: 16.01.2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158471
© М. Б. Курган, Д. М. Курган, М. Ю. Бражник, Д. Л. Ковальський, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

UDC 004.774.6:[027.7:378.4(477.63)]

I. A. KLIUSHNYK[1*], T. O. KOLESNYKOVA[2], O. S. SHAPOVAL[3]

[1*]Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail klugran@i.ua, ORCID 0000-0001-9939-0755
[2]Scientific and Technical Library, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 371 51 05, e-mail lib@b.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-4603-4375
[3]Scientific and Technical Library, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 371 51 05, e-mail popcornphp@gmail.com, ORCID 0000-0002-2568-036X

UNIFIED DIGITAL INFRASTRUCTURE OF THE MODERN SCIENTIFIC LIBRARY ON THE BASIS OF WEB TECHNOLOGIES

Purpose. Digitization, expansion of the scientific library infomedia and its integration into the global digital space require the creation of a full-fledged, multifunctional Web-oriented ecosystem. The work is aimed at researching rational ways and implementation of separate tools within the framework of an interactive library information system on the basis of Web-technologies, which includes a single API gateway (library site) and combines separate library management systems (LMS). **Methodology.** The research was conducted on the basis of the Scientific and Technical Library of the Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (DNURT). We analysed the structure and condition of the existing out-of-dated library information system, based on the technologies of breaking up separate subsystems into separate services. We considered the possibilities and peculiarities of the transition to a single interactive system with the help of a central Web-application, which combines scattered services. This system is integrated into the system of «IRBIS-64» LMS (although any LMS can be used). Attention is focused on the reliability and protection of user data from unauthorized access. **Findings.** The ways, means and peculiarities of the transition to a full-fledged, multifunctional Web-oriented ecosystem of the DNURT library are explored. The system has its own API-based interface, which allows it to be easily scalable, thanks to the use of the current framework on the basis of Laravel – OctoberCMS. The system has an administrator and user panel. A subsystem – the DB «Publication Profile of University Science» – has been developed to provide the necessary functionality for plugins and applications: 1) for synchronization with Scopus, Web of Science, Google Scholar – in Pyhton language; 2) for automated reporting – in C# language for Windows. **Originality.** The researchers analysed the possibilities and suggested optimal and effective solutions for creating an interactive information system of the library based on Web-technologies, which includes a single API gateway (library site) and combines separate library automation systems. It is proved that the application of the increased level of abstraction using specialized PHP-frameworks and ORM instead of pure SQL allows the developer to focus on the development of a rather complex and at the same time a simple system from the point of view of development, which is sufficiently effective in the absence of time and material resources in the scientific libraries of Ukraine. The performed researches allow to assert about the partial implementation of the «Library 2.0» paradigm requirements in the library of DNURT. **Practical value.** The offered interactive information system of the scientific library allows to practically abandon the cumbersome and morally outdated IRBIS 64 system in the issues of service for readers (there is an opportunity even to execute orders of printed literature in a personal account, like in user accounts of modern courier services). The developed software that synchronizes with IRBIS in the C# language allows to upload data from the IRBIS LMS to any modern open-source LMS in the future. Realization of

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

possibilities of the subsystem «Publication Profile of University Science» will allow receiving a statistically reliable picture of the publication activity and influence of scientists, departments, university as a whole.

Keywords: library interactive information system; university library; Scientific and Technical Library of DNURT; OctoberCMS; Laravel; PostgreSql; LMS; API Gateway; Web-application; electronic catalogue; scientist profile

Introduction

Today, in scientific libraries, the development of digital infrastructure and networking, the high level of information services for learning and research is a prerequisite for fulfilling their mission – promoting the creation, preservation and dissemination of knowledge. This is the result of the choice and implementation of the strategy of digitization of educational and research activities of universities.

In a situation where the world of science and education becomes more global, and the development of the Internet allows searching for any information in a few clicks anywhere in the world, there are being developed the university digital transformation programs. Such a transformation is, in general, a cultural and organizational change in HEI, based on the implementation of IT solutions. Herewith, digital services of scientific libraries are among the main services, which considerably facilitate the life of students, scientific-pedagogical workers and scientists in the modern university. [5].

According to the Law of Ukraine «On Libraries and Library Services» [7] Ukrainian citizens have the right to library services, which may include the form of remote telecommunication services as well.

Today, it is no longer possible to preserve knowledge in ordinary printed books and understand library service only as circulation of literature. Digital services of scientific libraries are multi-vector and multifunctional [5]. And this involves the availability of sophisticated search and storage systems for libraries that can filter and find the right information in a matter of seconds.

Creating such systems requires the search and research of methods for distributing the computing server resources between clients. For such systems, the primary problem is to work at peak loads. When creating such systems, an important factor is the response time from the server, which often depends on the level of software optimization.

The data storage and retrieval system can mean absolutely any client-server system. When designing and developing a data storage and retrieval system, it is important to rely on the existing experience of creating such systems.

In the course of digital transformation, the library is being integrated with the research division, the publishing department, IT-structures of the HEI [4]. This allows, for example, solving an extremely important task – the creation and support of a digital publishing profile of the university and individual scientists. Obtaining from such system of the information about scientific publishing activities of each scientist, department, and institution significantly simplifies the formation of various levels of reporting and the presentation of the research activity of the institution in the WWW.

At the same time since the beginning of the XXI century, the use of library management systems (LMS) has become widespread in Ukraine. These systems replace the mostly traditional library processes with the automate ones, starting from acquisition and ending with a variety of user services (LIBER, IRBIS, UFD / Library, Aleph, MARC-SQL, etc.). The main element of any LMS is the electronic catalogue (EC). However, none of the LMS versions that serve Ukrainian libraries does not meet the current standards and level of information systems development, as well as in view of emergence of fundamentally new library services.

Digitization, the expansion of the library information environment and its integration into the global digital space require the creation of a full-fledged multifunctional Web-oriented ecosystem.

Purpose

Taking into account the aforementioned, the authors intend to explore the rational ways and realize the implementation of individual tools within the framework of an interactive information system of the scientific library based on Web-technologies, which includes a single API gateway and combines separate library automation systems. Particular attention will be paid to the analysis of

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

the solutions of the project «Publication Profile of University Science» – an interactive information and analytical system for obtaining a statistically reliable picture of the publication activity and influence of scientists, departments, the university as a whole.

A new Web-oriented scientific library system with a central Web-based application (library site) should provide opportunities for:

– Search for publications by title, author's name and surname, academic year, year of publication, keywords, etc.;

– Search for authors and display of their author IDs/profiles: Scopus Author ID, ResearcherID, ORCID, Google Scholar Citations;

– Implementation of automated electronic reporting by scientific publications of individual scientists, departments, the university as a whole;

– Integration into IRBIS LMS in order to synchronize the user databases and literature;

– Creation and processing of applications for the circulation of printed materials;

– Downloading literature in electronic form;

– Collection of statistics relating to library reader usage of the service for the library management [16].

Methodology

Analysis of the research and publications. The tendencies of recent years show that the multi-year corporate design paradigm, where a separate application-service (often without communication and integration with other corporate services) was created for solving individual business tasks, recedes into the past [12]. Today we are talking about distributed Web-oriented systems, which allow combining previously separate services into a single system using a central Web-application with a single unified API-interface. This solution allows us to get a flexible distributed, easily scalable system, constantly replenished with a new functional and able to withstand a high load [1], that is, it contains all the features of the Library 2.0, which works in a state of «constant beta» [3] (constantly evolving).

Of course, one of the most widely used LMSs, such as Koha, Absotheque Unicode, Ruslan, OPAC-Global, MAPK-SQL, IRBIS and others, can be used to create a full-fledged Web-oriented ecosystem of a modern library. Such systems are, in the vast majority, closed commercial products and/or require substantial development by programmers for the tasks previously stated by the authors. Of course, in the conditions when a university library has been using a certain morally obsolete and closed LMS (for example, IRBIS) for decades and there is no money for an army of highly skilled developers, there is a problem of alternative solutions, which in the long run will allow to «get off the needle» of the closed LMS [2].

In the context of this study, our attention is focused on the automation technologies, which allows to receive and analyze the state of publishing activities of higher education institutions and academic institutions, including its scientific metrics [16].

The research methodology. The study was conducted on the basis of the Scientific and Technical Library of the Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (DNURT).

Fig. 1 shows the old structural diagram of the automation services of the Scientific and Technical Library of DNURT till 2017. The system was split into 3 databases with three different interfaces:

– Website;

– electronic catalogue IRBIS LMS 64 (Web IRBIS);

– scientist publication profile [1].

Within the framework of the article, taking into account the information in Fig. 1, the issue of integrating other existing services of the DNURT library, such as the eaDNURT repository on DSpace, the Open Journal System (OJS) publishing systems, Open Monograph Press (OMP), the Open Conference System (OCS), is not raised. So far, these systems remain separate services.

As can be seen from Fig. 1 separate library services are implemented on a variety of data base management system (DBMS). For example, MYSQL – on the site, IRBIS LMS 64 – does not have a separate relational database, while the scientist profile system was implemented by a separate stand-alone windows-application using the Firebird DBMS.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

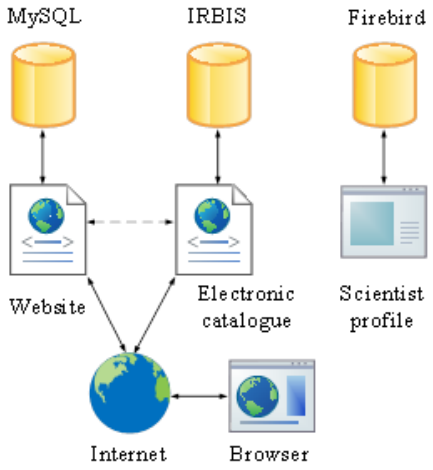


Fig. 1. Initial structural diagram of the library services of DNURT

To create a unified library system, it is necessary to completely abandon the old structure. The new structural diagram of the Web-oriented library system of DNURT with the central Web-application (library Website) is shown in Fig. 2 [6]. The Website, electronic catalogue and scientist publication profile were merged into a single system to which the IRBIS LMS was connected through the C#-program synchronizer, Android application and Telegram bot. All other subsystems shown in Fig. 2 perform an exchange between themselves through a centralized node (site) using a single specially developed API-interface.

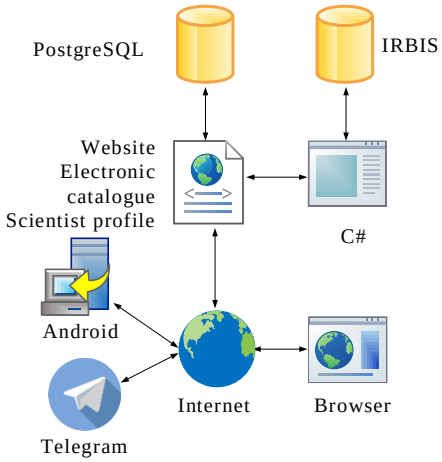


Fig. 2. Current structural diagram of distributed Web-oriented library system of DNURT

In the future, the structure of the electronic library system of DNURT may be released from dependence on IRBIS LMS with the aim of switching to a modern open-source LMS or even developing the own LMS with full migration of data entered into IRBIS LMS due to the developed C#-application for uploading user data and literature.

The platform for a scientific and technical library can be developed in any programming language using any frameworks and libraries that meet the specified project requirements and implementation deadlines.

Because the system is being developed for use in the Web space, the primary goal is to secure and protect user data from unauthorized access. To achieve this, it was decided to use the Web framework written in PHP version 7.0 (at the time the system was created and run), and the version of PHP 7.2 (at the moment).

Thanks to the use of the Web-based framework, it is possible to avoid many common mistakes in the system protection and to shorten the system development time.

There are many system security threats on the Internet. System security is possible with the integrated achievement of many parameters using various technologies. The main threats to which our system is opposed:

- Password cracking protection;
- Traffic interception protection;
- Protection against SQL Injection, XSS and CSRF.

For password cracking protection, it is obligatory to set limits on the number of authorization attempts, and then to block the user's activity for 15 minutes. All user passwords are encrypted using the AES-256-CBC encryption algorithm and stored as a hash. Due to this it is impossible to know the real user password.

You must be ready for any danger. That is why a special Telegram-bot was developed, which sends a message to the system administrator in case of unforeseen mistakes during work of any system element. This solution allows you to track any activity that resulted in an error. An example of such a message is shown in Fig. 3

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

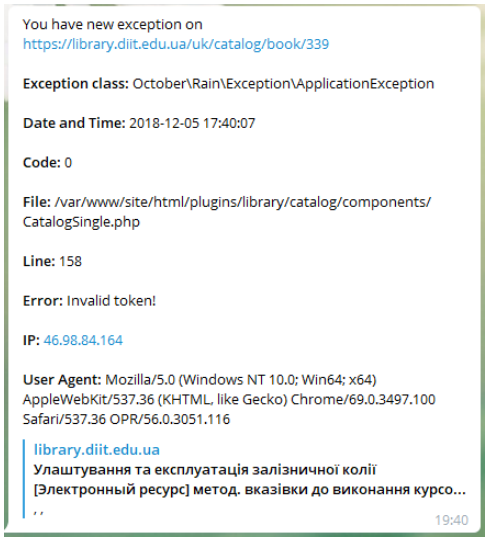


Fig. 3. Example of a Telegram-bot message about suspicious activity on the site

A traffic interception attack can be classified as a «Man in the Middle» attack (MITM) [10, 17]. In MITM, the hacker redirects traffic between the user and the communication gateway. The most common type of hacking is the distribution of free Wi-Fi. To protect against this type of attack, it was decided to use an SSL cryptographic protocol that uses asymmetric cryptography to authenticate exchange keys, symmetric encryption to keep confidentiality, message authentication codes for message integrity. For automatic redirecting the readers from http to https, special software was developed.

Now Web-applications are very popular because of their user-friendly environment and the rapid reception of any information in the Internet, but Web-applications are subject to a lot of threats. CSRF attack is one of the serious threats to Web-applications [17], which is based on vulnerabilities present in the normal Web-query and HTTP response. The vulnerability is difficult to detect, but nevertheless, it is present in most existing Web-applications.

Some users are able to use SQL injection to interfere with database security by executing an SQL query. They pass a SQL subquery in the password field instead of the password to get a confirmation [11].

In general, to protect the system from SQL injection, XSS and CSRF, a fairly rigid validation system for input data from users has been set up that does not permit the addition of arbitrary data to the database. In addition to this, the system blocks all queries that go not through a single entry point. All paths in the system are set by the developer, and therefore the system does not have hypothetical «backdoors».

Since PHP programing language has been chosen as the working environment, it is necessary to choose a framework that works with this language. Before choosing a framework, the possibility of creating a project on pure PHP was taken into account. This approach involves writing the entire logic of the application from scratch, except for cases where the required functionality has already been implemented in some Composer package. Basically, writing a new service in PHP is reduced to the ability to install turnkey packages, with their further integration among each other (the same as offered by different frameworks). The development «from scratch» has not been taken into account due to the short terms of development and limited human resources. When choosing a framework, priority was given to the universality, speed and size of the community.

The authors considered three common PHP-frameworks – Phalcon, Laravel, OctoberCMS [6, 18, 20].

Phalcon is one of the fastest PHP frameworks written in C programming language. Extensions on Zephir/C are loaded together with PHP once, when you start the Web-server daemon. The classes and functions provided by the extension are ready for use in any application. The code is compiled and not interpreted because it is already compiled for a particular platform and processor. Phalcon, thanks to its low-level architecture and optimization, provides the least load on the MVC-applications. But in general, the framework has: a very scanty documentation, even in English; it requires hosting suitable for a special PHP extension; a small community of developers.

Laravel is a free open source Web-framework intended for development using the MVC architectural model. Laravel is released under the MIT license. The source code of the project is placed on the GitHub. The advantages include: open source code, written in PHP; good documentation, great community; regular updates; a large number of implemented functions;

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

availability of ORM and Collection. The disadvantages include: a completely clear framework, without a basic functional; creation of a large number of migrations with constant database modification; no option to quickly clear the list of migrations.

OctoberCMS is a Canadian-Australian development. System developers: Alexey Bobkov – UX designer from Canada and Samuel Georges – PHP programmer from Australia. Beginning of development – 2013. The system is based on the Laravel Web-framework, over which the shell has been written for the rapid creation of Web-applications. OctoberCMS allows to quickly create a dynamic Web-application. This system works at a very high level of abstraction, which allows for a minimum amount of errors and concentrating the developer's attention on the set task, and not on the task of the application micro-architecture. If necessary, you can use all the features of the lower levels of software that underlie the system. These include Symfony Framework and Laravel Framework [20].

By default, the OctoberCMS admin panel is capable of performing the following functions:

Control of administrator accounts, the sharing of access rights for administrators and for groups of administrators separately;

- Management and setting up connection to postal services;
- Personalization of the control panel;
- Template settings;
- Viewing site query logs.

The advantages include: the system is based on Laravel (with all the advantages and disadvantages); constant core system security updates; high-quality documentation, large community; ready admin panel with lots of forms and widgets for quick creation of a functional; the project has its own structure and architecture, different from Laravel; there is an opportunity to independently create and delete migration; the possibility of expanding the functionality by means of events; there is no basic functionality for the user of the site part; flexibility: the database query caching algorithm can be written from scratch; the way to compress photos – may be inherited and redefined by the model, which allows to downscale the photo during loading.

The disadvantages include: Laravel version updating once every 2 years; many little drawbacks when creating large, supported projects (for example, the sequence of performed migrations when expanding the functionality with an additional plugin, indicating the dependencies of the plugins); difficulty to create own form-widgets due to a fairly high degree of abstraction.

Thus, the analysis showed that the best option for the implementation of the interactive information system of the scientific and technical library of DNURT is OctoberCMS, which was taken as a basis.

Many Web-applications use databases for permanent data storage, and the use of Object Relational Mapping (ORM) [14, 15] is a common way of developing such Web applications that are supported by the database. Unfortunately, the development of efficient applications for ORM is difficult, since the structure of ORM hides the basic generations and execution of database queries. This problem becomes more and more serious as applications require processing of more and more stable data [13, 19].

The work of ORM consists in sequential calling of methods of the model, for which the database query is built. In this case, only the input parameters of the methods are inserted, without writing the SQL-code itself. Fig. 4 shows a class hierarchy for constructing SQL queries.

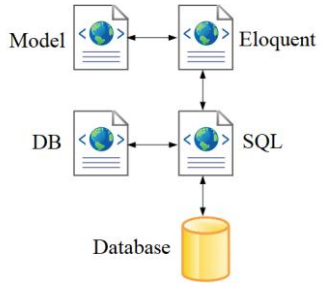


Fig. 4. Inheritance structure of model classes for OctoberCMS (Laravel)

The researchers conducted experiments, during which 4 major operations (create, select, update, delete) were checked over 1000 entries. The tests were conducted for ORM and SQL queries. Figure 5 shows the graphical representation of the results.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

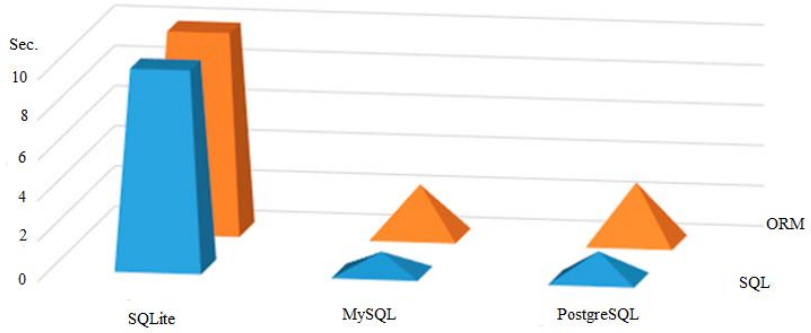


Fig. 5. Graphical comparison of query processing time in different databases

Despite all the advantages of ORM, there is one important thing: it only forms the SQL query and in no way saves the developer from possible errors. The OctoberCMS system allows deploying to a variety of environments: in the process of development, one can use MySQL, and during implementation – PostgreSQL (which was applied in the library of DNURT). For example, let us consider the following ORM queries:

$data = AuthorModel: where(‘name’, ‘ILIKE’, “%{$name}%”) ->get();

When this ORM-query is executed on an embedded system, an unknown operator 'ILIKE' error occurs because the operator belongs exclusively to MySQL.

PostgreSQL was taken as a database for the system. Despite the lower speed of work in comparison with MySQL, it is used by many high-capacity systems in the world [14, 15], and therefore (in the system development perspective) will become a more reliable solution. Unlike MySQL, PostgreSQL operates with data through transactions, which provides additional reliability. One of the reasons for this is that the Web-server already has PostgreSQL, which was used by the DSpace system.

Before you start developing a Web-system, you need to design a database. This step allows to avoid many problems in the future.

Findings

The Scientific and Technical Library of DNURT uses IRBIS-64 LMS. For many years it has gathered a large database of readers. Therefore, all of them had to be transferred to the new system. Given this, there was created a database structure, shown in Fig. 6.

The structure of the database part responsible for users is as follows:

– zombie – table of user data that has been transferred from IRBIS LMS. This includes just the user registration data, which gives the library readers an opportunity to register on the site and to access the electronic catalogue (for the purpose of ordering literature and access to full texts) and the scientist account (publication profile, including the research metrics);

– user – table with the readers who have registered on the site. To register, a user must specify his or her name, surname and number of the reader's ticket, then these data are checked against the data from the Zombie table, and if such a user is found, then the information is entered in the User, and the reader is deleted from Zombie. Here there is the basic information about/for readers, including setting up notifications about the arrival of literature at the circulation point.

– throttle – table that records unsuccessful authorization attempts and blocks possible attempts to crack passwords. Blocking takes place at the client's IP address when exceeding the maximum number of authorization attempts in the system. Time stamps are stored for the most recent unsuccessful authorization attempts, upon the expiry of which the records are deleted and the reader has new authorization attempts. Entries are deleted on schedule by a standard CRON-scheduler (the server runs under the Ubuntu Server OS).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

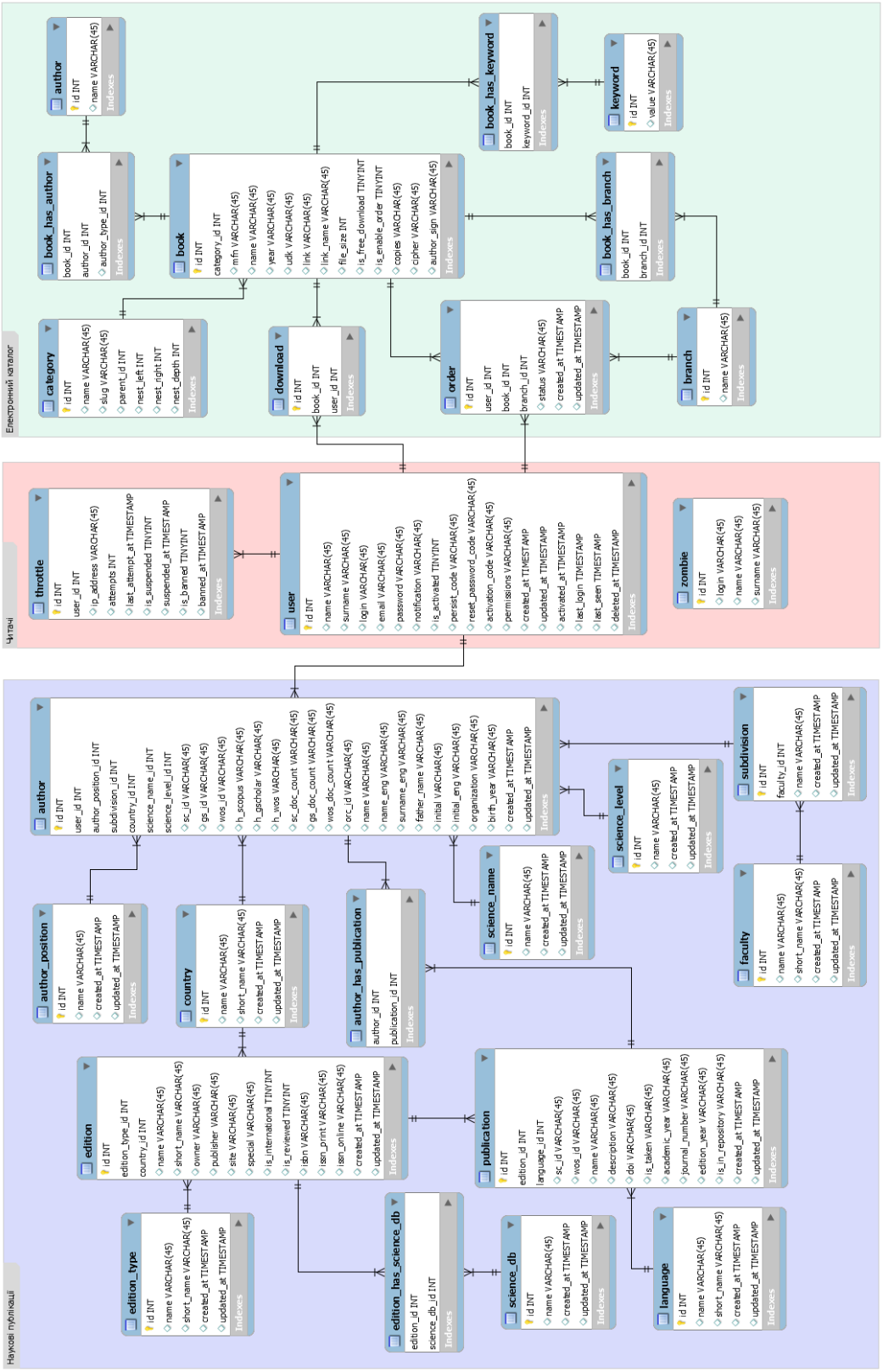


Fig. 6. Structure of the interactive information system database of the Scientific and Technical Library of DNURT

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

The part of the database responsible for the electronic catalogue consists of the following database tables:

– User – information about registered readers;

– Book – full information about all the books in the electronic catalogue;

– Author – information about the authors;

– Keywords;

– Category – category for electronic resources;

– Order – list of book orders in the library;

– Branch – binding of a book or order to a specific circulation point in a library;

– Book_has_author – a connecting table between editions and authors;

– Book_has_branch – a connecting table between editions and circulation points;

– Book_has_keyword – a connecting table between editions and keywords.

The structure of the DB, which is responsible for the university scientist publication profile with the structure of the readers database, consists of the following database tables:

– Author – full author information, including the H-index from Google Scholar, Scopus, Web of Science;

– Edition – full information about the edition;

– Author_position;

– Country;

– Science_db –list of scientific databases;

– Edition_has_science_db – information on publication of the edition in international scientific databases;

– Publication – scientific publications;

– Language – publishing languages;

– Edition_type;

– Science_name – academic ranks of scientists;

– Science_level – academic degrees of scientists;

– Subdivision – list of university subdivisions;

– Faculty – list of university faculties.

Interactive library information system is a system created for the Scientific and Technical Library of DNURT. This system is integrated into the system of IRBIS LMS. It has its own API-interface, which allows it to be easily scaled, thanks to the use of the modern Laravel-based framework – OctoberCMS. The system has an administrator and user panel.

Admin panel options (partially shown in Figure 7):

– Existing integration of e-catalogue and readers with IRBIS LMS;

– Displaying a complete list of readers;

– Order table: Graphical representation of real-time order statistics. Ability to change the status of orders, the literature circulation point;

– Publications: publications about new achievements, holidays and news. Notifications to readers about public events. Publication category breakdowns. Creating static pages from admin panel;

– Scientist publication profile: full information about the scientific work of the university in recent years. The profile includes: titles of editions, publications, types of publications, authors and their positions, countries, languages, faculties and subdivisions, academic degrees, academic ranks, information on the availability of publications in international databases, etc. Reports for the Ministry of Education and Science and the departments of DNURT are formed in a separate windows-application, which executes the formation of reports in MS Excel format;

– Online dictionary of scientific terms and transport words: directions of translation: Ukrainian-English and Russian-English, as well as English-Ukrainian and English-Russian;

– Surveys: the possibility of conducting surveys among the library readers;

– Statistics collection: total number of readers per month and total monthly growth. Display of statistics of orders and downloads of scientific literature by months, total by months and growth by months. Ability to export data as *.csv file for further submission of information to the rector's office;

– Multilingualism: ability to specify an unlimited number of languages for the translation of the site content;

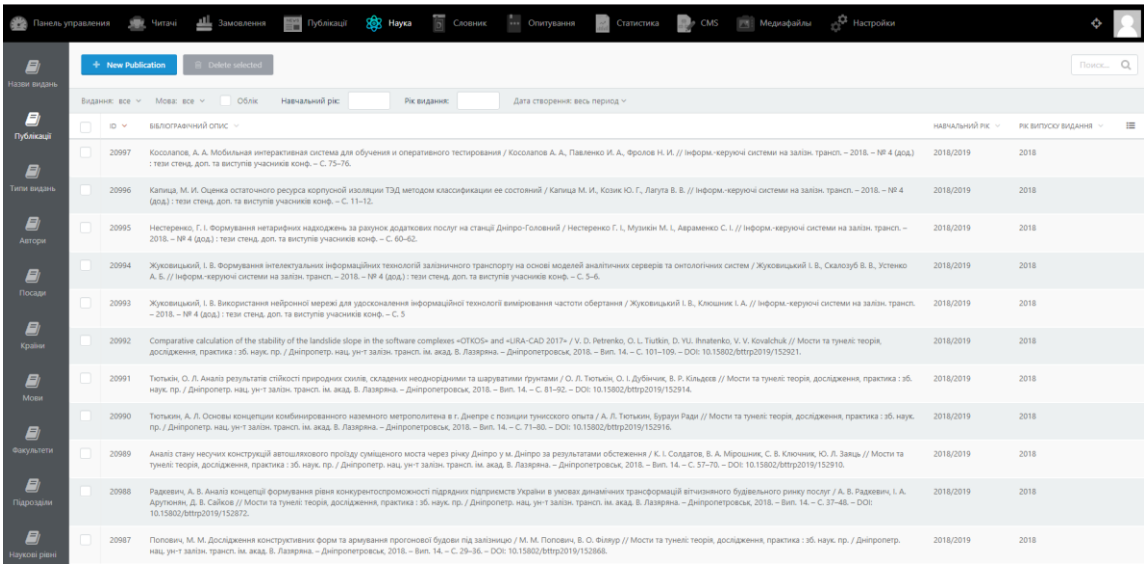
– The electronic catalogue of literature is absent in the admin panel because it is automatically synchronized with the IRBIS LMS.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

a



b

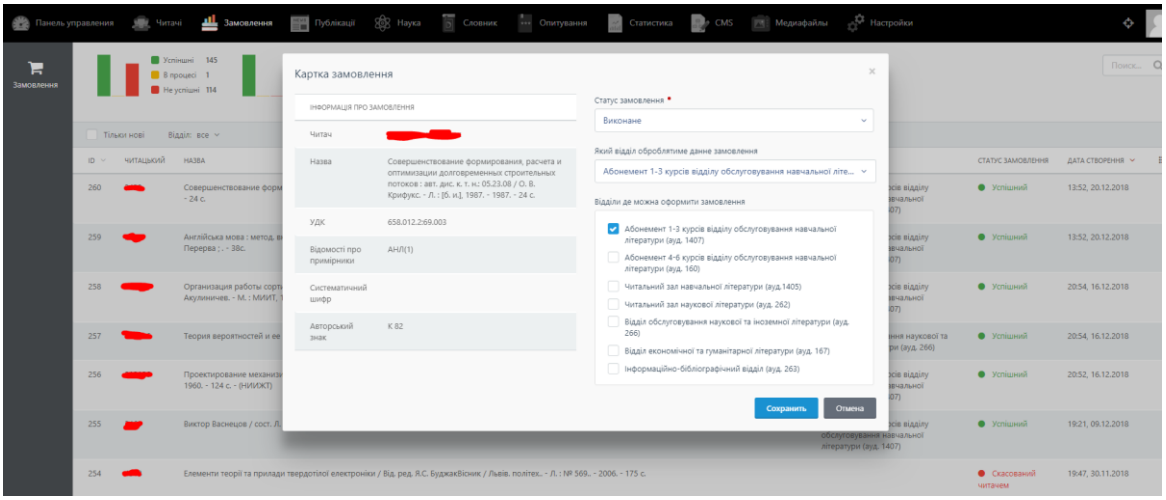


Fig. 7. Admin panel:
a – management of the university publication profile; *b* – management of online ordering of paper literature

Options of the client part (partially shown in Figure 8):

– Display of the latest publications and the full list;

– Search in electronic catalogue of the library by name, author, year, keyword and category;

– Search of scientific terms and words in the online dictionary, by 4 directions: Ukrainian-English, English-Ukrainian, Russian-English, English-Russian;

– University profile, with filtration by bibliographic description, First name, Last name, ID of scientometric databases, year of publication.

Subsystem «Publication Profile of University Science» (in the general interactive library system) is created based on PHP-framework with open source OctoberCMS. To ensure the required functionality, the authors created necessary plugins – (API-interface plugin, publication profile plugin, e-library plugin). Separately for synchronization with Scopus, Web of Science, Google Scholar the program in Pyhton language was created. To

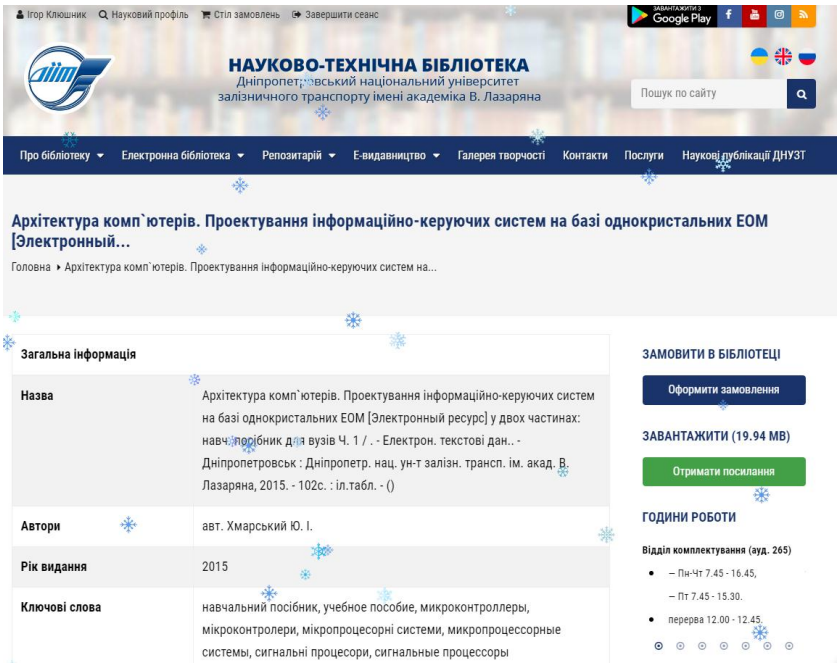
Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

ensure reporting, the program in C# language for Windows was written (with possible porting on Linux). Database for storing data can be virtually any, the authors tested the one on MySQL and POSTGRESQL, stability in others is not guaranteed.

a



b

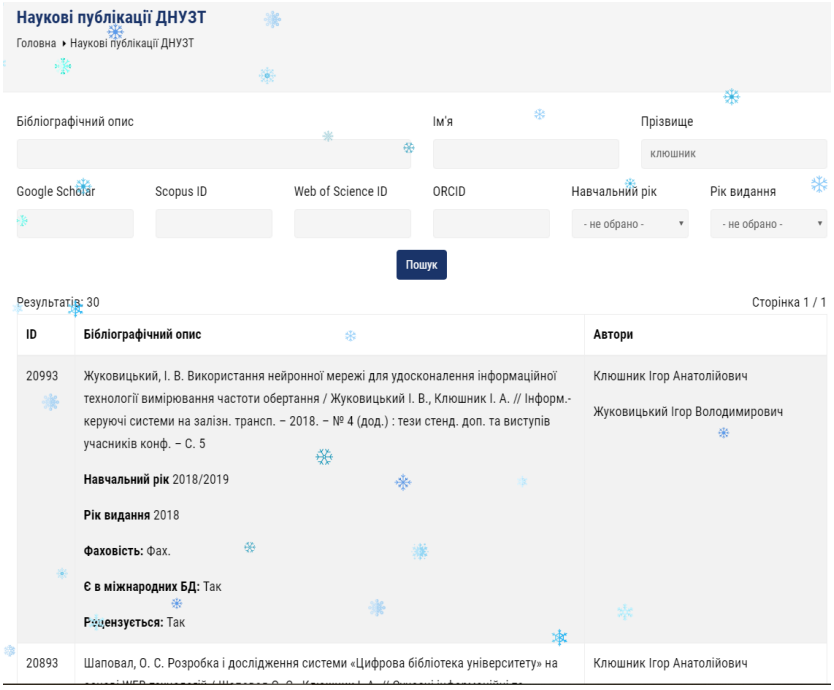


Fig. 8. Client part of the system:
a – electronic catalogue; *b* – university publication profile

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

Originality and practical value

The authors researched the rational ways and provided the implementation of individual tools within the interactive information system of the scientific library on the basis of Web-technologies, which contains a single API gateway combining separate library automation systems. The research has shown that the use of advanced levels of abstraction with the use of specialized PHP-frameworks and ORM instead of pure SQL allows the developer to focus on the development of a rather complex and yet simple system from the point of view of development, which is sufficiently effective in Ukrainian scientific libraries in terms of the lack of time and material resources. But the increase in abstraction may result in errors, for example, when using different types of DBMS at the developer and the working server. The offered interactive information system allows to practically abandon the cumbersome and morally outdated IRBIS 64 system in the issues of service for readers (there is an opportunity even to execute orders of printed literature in a personal account, like in user accounts of modern courier services). The developed software that synchronizes with IRBIS in the C# language allows to unload data from the IRBIS LMS to any modern open-source LMS in the future.

We conducted the analysis of solutions of the project «Publication Profile of University Science» – an informational-analytical subsystem of the interactive information system of the scientific library. Realization of possibilities of this subsystem will allow receiving a statistically reliable picture of the publication activity and influence of scientists, departments, university as a whole. It also benefits from the created software for generating automated reports on scientists' publication activities.

The research results can also be used to solve the system cyber security problems.

Conclusions

The digitalization of the educational and research activities of universities contributes to the great transformations in their scientific libraries. University communities should have not only the ability to receive literature in print or electronic form, but also to use convenient and reliable library digital services to create, accumulate, preserve, manage, analyze and reuse scientific and educational resources (including open ones).

In the context of promoting high quality higher education, the university scientific library should create its own information space, integrated into the external space of education and science, provide access to it and make effective use of its opportunities [9].

The solution to these problems can be facilitated by the creation of an interactive information system of university libraries on the basis of Web-technologies, which includes a single API-gateway combining separate library automation systems. This approach made it possible to create an easy-scalable and cross-platform system. Individual subsystems, which are united through a centralized gateway (library site) and through the API-interface, perform the following functions:

– Search for publications by title, author's name and surname, academic year, year of publication, keywords, etc.;

– Search for authors and display of their author IDs/profiles: Scopus Author ID, ResearcherID, ORCID, Google Scholar Citations;

– Implementation of automated electronic reporting by scientific publications of individual scientists, departments, the university as a whole;

– Integration into IRBIS LMS in order to synchronize the user databases and literature;

– Creation and processing of applications for the circulation of printed materials;

– Downloading literature in electronic form;

– Collection of statistics relating to library reader usage of the service for the library management.

The unified digital infrastructure of the modern scientific library on the basis of Web-technologies, which already has an implementation in the scientific and technical library of DNURT, allows to assert about the partial fulfillment of the requirements for the paradigm «Library 2.0» [8].

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Дзюба, В. В. О некоторых проблемах эксплуатации веб-систем / В. В. Дзюба, А. А. Косолапов // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні ІТММ'2017 : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. (Дніпро, 28–30 бер. 2017 р.) / Нац. металур. акад. України, Дніпропетр. нац. ун-т ім. О. Гончара, Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2017. – С. 96–98.
2. Дубик, С. О. АБІС Koha в Україні [Electronic resource] : [презентація] / С. О. Дубик. – Львів, 2018. – 14 с. – Available at: http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/25274 – Title from the screen. – Accessed : 13.02.2019.
3. Козаченко, Д. М. Розроблення методики формування публікаційного профілю університету / Д. М. Козаченко, С. Ю. Разумов, А. І. Миргородська // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : тези доп. 76 Міжнар. науково-практ. конф. (19.05–20.05.2016) / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 309–311.
4. Колесникова, Т. А. Издание научной периодики в университетах: новые задачи, участники, технологии / Т. А. Колесникова, И. А. Клюшник // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 183–197. doi: 10.15802/stp2015/57105
5. Колесникова, Т. О. Сервісні служби сучасної університетської бібліотеки: обслуговування науковців [Electronic resource] / Т. О. Колесникова // Безпекове інноваційне суспільство: взаємодія у сфері правової освіти та правового виховання : міжнар. інтернет-конф. (25 трав. 2016 р.) / Нац. юрид. ун-т ім. Ярослава Мудрого. – Харків, 2016. – Available at: http://clc.am/OKzujA – Title from the screen. – Accessed : 26.02.2019.
6. Косарев, Н. О. Сравнительное тестирование производительности php-основанных программных платформ (php-фреймворков) / Н. О. Косарев // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сб. стат. XIV Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. – Пенза, 2018. – Ч. 1. – С. 37–40.
7. Про бібліотеки і бібліотечну справу [Electronic resource] : Закон України від 27.01.1995 р. № 32/35-ВР [зі змінами та доповненнями] // Законодавство України : [сайт] / Верховна Рада України. – 1994–2019. – Available at: http://clc.am/8asb1Q – Title from the screen. – Accessed : 13.02.2019.
8. Соловяненко, Д. Бібліотека-2.0: концепція бібліотеки другого покоління / Д. Соловяненко // Бібліотечний вісник. – 2007. – № 5. – С. 10–20.
9. Шаповал, О. С. Розробка і дослідження системи «Цифрова бібліотека університету» на основі WEB-технологій / О. С. Шаповал, І. А. Клюшник // Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті : тези XII Міжнар. наук.-практ. конф. (Дніпро, 12.12–13.12.2018) / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2018. – С. 119–120.
10. Chordiya, A. R. Man-in-the-Middle (MITM) Attack Based Hijacking of HTTP Traffic Using Open Source Tools / A. R. Chordiya, S. Majumder, A. Y. Javaid // IEEE International Conference on Electro Information Technology (3–5 May 2018). – Rochester, MI, USA, 2018. – С. 438–443. doi: 10.1109/eit.2018.8500144
11. Contemplating Security of Http from SQL Injection and Cross Script / N. Joshi Padma, N. Ravishankar, M. B. Raju, N. C. Ravi // 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research ICCIC (14–16 Dec. 2017). – Coimbatore, India, 2017. – P. 948–952. doi: 10.1109/iccic.2017.8524376
12. From the Service-Oriented Architecture to the Web API Economy / W. Tan, Y. Fan, A. Ghoneim, M. A. Hossain, S. Dustdar // IEEE Internet Computing. – 2016. – Vol. 20. – Iss. 4. – P. 64–68. doi: 10.1109/mic.2016.74
13. How not to structure your database-backed web applications: a study of performance bugs in the wild / J. Yang, P. Subramaniam, S. Lu, C. Yan, A. Cheung // Proceedings of the 40th International Conference on Software Engineering ICSE 2018 (May 27–3 June 2018). – Gothenburg, Sweden, 2018. – P. 800–810. doi: 10.1145/3180155.3180194
14. Jound, I. Comparison of performance between Raw SQL and Eloquent ORM in Laravel / I. Jound, H. Halimi. – Karlskrona, Sweden, 2016. – 31 p.
15. Lindberg, T. A/B-testing for web design: A comparative study of response times between MySQL and PostgreSQL: Implementation of a web based tool for design comparisons with stored images [Electronic resource] / T. Lindberg. – 2018. – 49 p. – Available at: https://clck.ru/FCKEa – Title from the screen. – Accessed : 13.02.2019.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

16. Overview of popular approaches in creating client-server applications based on scientometrics onafts' platform / D. Salskyi, A. Kozhukhar, O. Olshevska, N. Povarova // Automation of Technological and Business Processes. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 21–26. doi: 10.15673/atbp.v10i4.833
17. Parimala, G. Efficient Web Vulnerability Detection Tool for Sleeping Giant-Cross Site Request Forgery / G. Parimala, M. Sangeetha, R. AndalPriyadharsini // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1000. doi: 10.1088/1742-6596/1000/1/012125
18. Prokofyeva, N. Analysis and Practical Application of PHP Frameworks in Development of Web Information Systems / N. Prokofyeva, V. Boltunova // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 104. – P. 51–56. doi: 10.1016/j.procs.2017.01.059
19. Ramana, K. A global dispatcher load balancing (GLDB) approach for a web server cluster / K. Ramana, M. Ponnavaikko, A. Subramanyam // International Conference on Communications and Cyber Physical Engineering ICCCE 2018 (24–25 Jan. 2018). – Hyderabad, India, 2018. – P. 341–357. doi: 10.1007/978-981-13-0212-1_36
20. Web Development is Simple [Electronic resource] // October. – Available at: https://octobercms.com/features – Title from the screen. – Accessed : 13.02.2019.

І. А. КЛЮШНИК[1*], Т. О. КОЛЕСНИКОВА[2], О. С. ШАПОВАЛ[3]

[1*]Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта klugran@i.ua, ORCID 0000-0001-9939-0755
[2]Науково-технічна бібліотека, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 371 51 05, ел. пошта lib@b.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-4603-4375
[3]Науково-технічна бібліотека, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 371 51 05, ел. пошта popcornphp@gmail.com, ORCID 0000-0002-2568-036X

ЄДИНА ЦИФРОВА ІНФРАСТРУКТУРА СУЧАСНОЇ НАУКОВОЇ БІБЛІОТЕКИ НА ОСНОВІ WEB-ТЕХНОЛОГІЙ

Мета. Цифровізація, розширення інформаційного середовища наукової бібліотеки та його інтеграція в глобальний цифровий простір потребують створення повноцінної багатофункціональної Web-орієнтованої екосистеми. Робота спрямована на дослідження раціональних шляхів та реалізацію окремих засобів у рамках інтерактивної інформаційної системи бібліотеки на основі Web-технологій, що містить у собі єдиний API-шлюз (сайт бібліотеки) та поєднує окремі автоматизовані бібліотечні інформаційні системи (АБІС). **Методика.** Дослідження проводилось на базі науково-технічної бібліотеки Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ). Проаналізовано структуру та стан існуючої морально застарілої інформаційної системи бібліотеки, заснованої на технологіях поділення підсистем на окремі сервіси. Розглянуто можливості та особливості переходу до єдиної інтерактивної системи за допомогою центрального Web-додатку, що поєднує розрізнені сервіси. Вона інтегрована в систему АБІС ІРБІС 64 (але може бути використана будь-яка АБІС). Увагу зосереджено на надійності та захисті даних користувачів від несанкціонованого доступу. **Результати.** Досліджені шляхи, засоби та особливості переходу до повноцінної багатофункціональної Web-орієнтованої екосистеми бібліотеки ДНУЗТ. Система передбачає власний API-інтерфейс, що дозволяє її легко масштабувати завдяки застосуванню сучасного фреймворку на базі Laravel – OctoberCMS. Система має панель адміністратора та користувача. Розроблено підсистему БД «Публікаційний профіль університетської науки», для забезпечення необхідного функціоналу якої створені плагіни та програми: 1) для синхронізації зі Scopus, Web of Science, Google Scholar – на мові Pyhton; 2) для формування автоматизованої звітності – на мові C# для ОС Windows. **Наукова новизна**. Дослідниками проаналізовані можливості й запропоновані оптимальні та ефективні рішення зі створення інтерактивної інформаційної системи бібліотеки на основі Web-технологій, що містить в собі єдиний API-шлюз (сайт бібліотеки) та поєднує окремі бібліотечні автоматизовані системи. Доведено, що застосування підвищеного рівня абстракції з використанням спеціалізованих PHP-фреймворків та технології ORM замість чистого SQL дозволяє зосередитися на розробці доволі

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

складної за функціями й водночас простої з точки зору розробки системи, що за браком часу та матеріальних ресурсів у наукових бібліотеках України є досить ефективним. Виконані дослідження дозволяють стверджувати про часткову реалізацію в бібліотеці ДНУЗТ вимог до парадигми «Бібліотека 2.0». **Практична значимість**. Запропонована інтерактивна інформаційна система наукової бібліотеки дозволяє практично відмовитись від застосування громіздкої й морально застарілої системи ІРБІС 64 для обслуговування читачів (наявна можливість виконання замовлення друкованої літератури з особистого кабінету). Розроблене програмне забезпечення, яке виконує синхронізацію з ІРБІС мовою C#, дозволяє в майбутньому провести вивантаження даних з АБІС ІРБІС до будь-якої сучасної АБІС із відкритим вихідним кодом. Реалізація можливостей підсистеми «Публікаційний профіль університетської науки» дозволить отримувати статистично достовірну картину публікаційної активності та впливовості науковців, кафедр, університету в цілому.

Ключові слова: інтерактивна інформаційна система бібліотеки; бібліотека університету; науково-технічна бібліотека ДНУЗТ; OctoberCMS; Laravel; PostgreSql; АБІС; API-шлюз; Web-додаток; електронний каталог; науковий профіль ученого

И. А. КЛЮШНИК[1*], Т. А. КОЛЕСНИКОВА[2], А. С. ШАПОВАЛ[3]

[1*]Каф. «Электронные вычислительные машины», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта klugran@i.ua, ORCID 0000-0001-9939-0755
[2]Научно-техническая библиотека, Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 371 51 05, эл. почта lib@b.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-4603-4375
[3]Научно-техническая библиотека, Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 371 51 05, эл. почта popcornphp@gmail.com, ORCID 0000-0002-2568-036X

ЕДИНАЯ ЦИФРОВАЯ ИНФРАСТРУКТУРА СОВРЕМЕННОЙ НАУЧНОЙ БИБЛИОТЕКИ НА ОСНОВЕ WEB-ТЕХНОЛОГИЙ

Цель. Цифровизация, расширение информационной среды научной библиотеки и ее интеграция в глобальное цифровое пространство требуют создания полноценной многофункциональной Web-ориентированной экосистемы. Работа направлена на исследование рациональных путей и реализацию отдельных средств в рамках интерактивной информационной системы библиотеки на основе Web-технологий, которая содержит в себе единый API-шлюз (сайт библиотеки) и сочетает отдельные автоматизированные библиотечные информационные системы (АБИС). **Методика**. Исследование проводилось на базе научно-технической библиотеки Днипровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДНУЖТ). Проанализирована структура и состояние существующей морально устаревшей информационной системы библиотеки, основанной на технологиях деления подсистем на отдельные сервисы. Рассмотрены возможности и особенности перехода к единой интерактивной системе с помощью центрального Web-приложения, сочетающего разрозненные сервисы. Она интегрирована в систему АБИС ИРБИС 64 (но может быть использована любая АБИС). Внимание сосредоточено на надежности и защите данных пользователей от несанкционированного доступа. **Результаты**. Исследованы пути, средства и особенности перехода к полноценной многофункциональной Web-ориентированной экосистеме библиотеки ДНУЖТ. Система предусматривает собственный API-интерфейс, позволяющий ее легко масштабировать благодаря применению современного фреймворка на базе Laravel – OctoberCMS. Система имеет панель администратора и пользователя. Разработана подсистема БД «Публикационный профиль университетской науки», для обеспечения необходимого функционала которой созданы плагины и программы: 1) для синхронизации со Scopus, Web of Science, Google Scholar – на языке Pyhton; 2) для формирования автоматизированной отчетности – на языке C # для Windows. **Научная новизна**. Исследователями проанализированы возможности и предложены оптимальные и эффективные решения по созданию интерактивной информационной системы библиотеки на основе Web-технологий, которая содержит в себе единый API-шлюз (сайт библиотеки) и сочетает отдельные библиотечные автоматизированные системы. Доказано, что применение повышенного уровня абстракции

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

с использованием специализированных PHP-фреймворков и технологии ORM вместо чистого SQL позволяет сосредоточиться на разработке довольно сложной по функциям и одновременно простой с точки зрения разработки системы, что за неимением времени и материальных ресурсов в научных библиотеках Украины является достаточно эффективным. Выполненные исследования позволяют утверждать о частичной реализации в библиотеке ДНУЖТ требований к парадигме «Библиотека 2.0». **Практическая значимость**. Предложенная интерактивная информационная система научной библиотеки позволяет практически отказаться от применения громоздкой и морально устаревшей системы ИРБИС 64 для обслуживания читателей (присутствует возможность выполнения заказа печатной литературы из личного кабинета). Разработанное программное обеспечение, синхронизирующееся с ИРБИС на языке C#, позволяет в будущем провести выгрузку данных из АБИС ИРБИС в любую современную АБИС с открытым исходным кодом. Реализация возможностей подсистемы «Публикационный профиль университетской науки» позволит получать статистически достоверную картину публикационной активности и влияния ученых, кафедр, университета в целом.

Ключевые слова: интерактивная информационная система библиотеки; библиотека университета; научно-техническая библиотека ДНУЖТ; OctoberCMS; Laravel; PostgreSql; АБИС; API-шлюз; Web-приложение; электронный каталог; научный профиль ученого

REFERENCES

1. Dzyuba, V. V., & Kosolapov, A. A. (2017). *O nekotorykh problemakh ekspluatatsii veb-sistem, Information technology in metallurgy and machine building, Materials of Scientific and Technical International Conference*. Dnipro: National Metallurgical Academy of Ukraine, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Russian)
2. Dubyk, S. O. (2018). *ABIS Koha v Ukraini: prezentatsiia.* Lviv. Retrieved from http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/25274 (in Ukrainian)
3. Kozachenko, D., Razumov, S., & Myrgorodska, A. (2016). *Development the methodology for establishing the publication profile of the university, The problems and prospects of railway transport development, Abstracts of the 76 International Scientific & Practical Conference*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
4. Kolesnykova, T. O., & Kliushnyk, I. A. (2015). Publication of scientific periodicals at universities:new challenges, participants, technology. *Science and Transport Progress, 6(60),* 183-197. doi: 10.15802/stp2015/57105 (in Russian)
5. Kolesnykova, T. O. (2016). *Service Centers of Contemporary University Library: Service of Scientists, Security Innovation Society: cooperation in the field of legal education and legal education, International Internet Conference.* Kharkiv: Yaroslav Mudryi National Law University. Retrieved from http://clc.am/OKzujA (in Ukrainian)
6. Kosarev, N. O. (2018). Comparative performance testing of php-frameworks. *Fundamentalnye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktualnye voprosy, dostizheniya i innovatsii*: sbornik statey XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. (Vol. 1-2). Penza. (in Russian)
7. Pro biblioteky i bibliotechnu spravu: Zakon Ukrainy № 32/35-BP. (1995). Retrieved from http://clc.am/8asb1Q (in Ukrainian)
8. Solovianenko, D. (2007). Biblioteka-2.0: kontseptsiia biblioteky druhoho pokolinnia. *Bibliotechnyi visnyk, 5,* 10-20. (in Ukrainian)
9. Shapoval, O. S., & Kliushnyk, I. A. (2018). *Rozrobka i doslidzhennia systemy «tsyfrova biblioteka universytetu» na osnovi web-tekhnolohii, Modern information and communication technologies in transport, industry and education, Abstracts of the XII International Scientific and Practical Conference*. Dnipro: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
10. Chordiya, A. R., Majumder, S., & Javaid, A. Y. (2018). *Man-in-the-Middle (MITM) Attack Based Hijacking of HTTP Traffic Using Open Source Tools, IEEE International Conference on Electro/Information Technology, EIT*. Rochester. doi: 10.1109/EIT.2018.8500144 (in English)
11. Joshi Padma, N., Ravishankar, N., Raju, M. B., & Ravi, N. C. (2017). *Contemplating Security of Http from SQL Injection and Cross Script, 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, ICCIC.* Coimbatore. doi: 10.1109/iccic.2017.8524376 (in English)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

12. Tan, W., Fan, Y., Ghoneim, A., Hossain, M. A., & Dustdar, S. (2016). From the Service-Oriented Architecture to the Web API Economy. *IEEE Internet Computing, 20(4)*, 64-68. doi: 10.1109/mic.2016.74 (in English)
13. Yang, J., Subramaniam, P., Lu, S., Yan, C., & Cheung, A. (2018). *How not to structure your database-backed web applications, Proceedings of the 40th International Conference on Software Engineering, ICSE 2018.* Gothenburg. doi: 10.1145/3180155.3180194 (in English)
14. Jound, I., & Halimi, H. (2016). *Comparison of performance between Raw SQL and Eloquent ORM in Laravel*. Karlskrona. (in English)
15. Lindberg, T. (2018). *A/B-testing for web design: A comparative study of response times between MySQL and PostgreSQL: Implementation of a web based tool for design comparisons with stored images.* Retrieved from https://clck.ru/FCKEa (in English)
16. Salskyi, D., Kozhukhar, A., Olshevska, O., & Povarova, N. (2017). Overview of popular approaches in creating client-server applications based on scientometrics onafts' platform. *Automation of Technological and Business Processes, 9(4),* 21-26. doi: 10.15673/atbp.v10i4.833 (in English)
17. Parimala, G., Sangeetha, M., & AndalPriyadharsini, R. (2018). Efficient Web Vulnerability Detection Tool for Sleeping Giant-Cross Site Request Forgery. *Journal of Physics: Conference Series, 1000.* doi: 10.1088/1742-6596/1000/1/012125 (in English)
18. Prokofyeva, N., & Boltunova, V. (2017). Analysis and Practical Application of PHP Frameworks in Development of Web Information Systems. *Procedia Computer Science, 104,* 51-56. doi: 10.1016/j.procs.2017.01.059 (in English)
19. Ramana, K., Ponnavaikko, M., & Subramanyam, A. (2018). *A Global Dispatcher Load Balancing (GLDB) Approach for a Web Server Cluster*, *International Conference on Communications and Cyber Physical Engineering, ICCCE 2018*. Hyderabad. doi: 10.1007/978-981-13-0212-1_36 (in English)
20. Web Development is Simple. *October*. Retrieved from https://octobercms.com/features (in English)

Received: Sep. 10, 2018
Accepted: Jan. 11, 2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160434
© I. A. Kliushnyk, T. O. Kolesnykova, O. S. Shapoval, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

УДК 658.51.012

Г. К. КОЖЕВНИКОВ[1], О. М. ПИГНАСТЫЙ[2*]

[1]Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Пушкинская, 79-2, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (050) 776 88 79, эл. почта kgk4711@gmail.com, ORCID 0000-0002-6586-6767
[2*]Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Пушкинская, 79-2, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (067) 572 50 29, эл. почта pihnastyi@gmail.com, ORCID 0000-0002-5424-9843

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ PDE-МОДЕЛЬ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАГРУЗКОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ

Цель. В работе необходимо рассмотреть проектирование системы управления параметрами производственной линии для предприятия с поточным методом организации производства. **Методика.** Производственная линия предприятия с поточным методом организации производства – это сложная динамическая распределенная система. Технологический маршрут изготовления изделия для многих современных предприятий содержит несколько сотен технологических операций, в межоперационном заделе каждой из которых содержатся тысячи изделий, ожидающих обработку. Технологические маршруты разных деталей одного вида изделий пересекаются. Это приводит к тому, что распределение предметов труда вдоль технологического маршрута оказывает значительное влияние на пропускную способность производственной линии. Для описания таких систем введен новый класс моделей производственных линий (PDE-model). Модели этого класса используют уравнения в частных производных для описания поведения потоковых параметров производственной линии. В данной статье построена PDE-модель производственной линии, потоковые параметры которой зависят от величины коэффициента загрузки технологического оборудования для каждой операции. **Результаты.** Авторы получили оптимальное управление потоковыми параметрами производственной линии, в основу которого положен алгоритм изменения коэффициента загрузки технологического оборудования производственной линии. В качестве базового нормативного режима функционирования поточной линии рассмотрен односменный режим работы. Для моделирования работы технологического оборудования после смены использована обобщенная функция Дирака. **Научная новизна** заключается в разработке метода проектирования систем управления параметрами производственной линии предприятий с поточным методом организации производства, основанного на PDE-модели объекта управления. Авторы предложили метод построения оптимального управления параметрами поточной линии через управление коэффициентом загрузки технологического оборудования. При проектировании системы управления поточная линия представлена динамической системой с распределенными потоковыми параметрами. **Практическая значимость.** Предложенный метод проектирования системы управления потоковыми параметрами производственной линии может быть положен в основу проектирования высокоэффективных систем управления потоковыми параметрами производства для предприятий по изготовлению полупроводниковой продукции автомобильной отрасли.

Ключевые слова: конвейер; производственная линия; PDE-модель производства; системы управления производством; незавершенное производство; массовое производство

Вступление

На поточной линии предприятия требуется обработать партию изделий за производственный цикл минимальной продолжительности [8]. Для технологического процесса определены:

а) последовательность операций и их технологические параметры;

б) оборудование, необходимое для выполнения операции, параметры его работы и схема расстановки;

в) свойства предмета труда и законы переноса ресурсов на предметы труда в результате воздействия оборудования.

Предполагается, что технология производства за время производственного цикла не меняется, т. е. параметры, характеризующие опе-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159489
© Г. К. Кожевников, О. М. Пигнастый, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

рацию, остаются неизменными. Продолжительность смены задана, составляет восемь часов. Сокращение длительности производственного цикла возможно за счет изменения режима загрузки оборудования. Величину загрузки оборудования при обработке партии изделий будем характеризовать коэффициентом сменности работы оборудования в течение суток K_{Sm}. Полагаем, что стоимость одного часа работы оборудования является разной для каждой операции и зависит от времени суток. Потоковыми параметрами модели управляемого производственного процесса в двухмоментном описании являются межоперационные заделы, характеризующиеся плотностью $[\chi]_0(t,S)$, и темп движения предметов труда $[\chi]_1(t,S)$ по технологическому маршруту [1, 9, 10, 11]. Для описания поведения потоковых параметров в пространстве и времени используем одномерное координатное пространство (t,S) [2, 6]. Координата S определяет место предмета труда в технологическом маршруте. Введенное одномерное координатное пространство (t,S) позволяет построить компактные, качественно обозримые модели управления параметрами поточной линии. Разобьем координатную ось $0S$ на отрезки $\Delta S_m \in [S_{m-1}, S_m]$. Координаты S_{m-1} и S_m характеризуют начало и окончание m-ой операции, $m = 1..M$. При этом полагаем, что $S_0 = 0$, $S_M = S_d$, где S_d – себестоимость продукции. Пусть функция $z_c(t,S_m)$ определяет стоимость сверхнормативных затрат ресурсов, необходимых для использования дополнительного оборудования в течение одного часа на m-ой операции. Зависимость функции $z_c(t,S_m)$ от времени подразумевает то, что в течение производственного цикла стоимость сверхнормативных затрат ресурсов, необходимых для выполнения операции на дополнительном оборудовании, может меняться во времени. Под использованием дополнительного оборудования понимаем использование резервного оборудования требуемое время или основного оборудования в дополнительное время (коэффициент сменности $K_{Sm} < 3$) [5]. Одним из подходов, позволяющим синхронизировать производительность обработки предметов труда на разных операциях поточной линии, является использование основного оборудования в дополнительное время между основными технологическими сменами (управление коэффициентом сменности технологического оборудования для заданной технологической операции). Если в качестве оси времени пространства состояний выбрать отработанное оборудованием время при односменном режиме работы, то состояние заделов в течение промежутка между моментом окончания смены и началом другой смены в случае использования основного оборудования в течение второй и третьей смены будет меняться скачкообразно на величину обработанных изделий в течение второй и третьей смены.

Введем плотность распределения стоимости сверхнормативных затрат технологических ресурсов, требуемых для выполнения работ на дополнительном оборудовании в течение часа, для технологического маршрута на интервале $[0, S_d]$ (рис. 1):

$$\int_{S_{m-1}}^{S_m} \omega_z(t,S)\,dS = z_c(t,S_m);$$

$$\int_0^{S_d} \omega_z(t,S)\,dS = \sum_{m=1}^{M} \int_{S_{m-1}}^{S_m} \omega_z(t,S)\,dS = \sum_{m=1}^{M} z_c(t,S_m).$$

Введем функцию $W_\delta(t,S)$, характеризующую работу дополнительного оборудования (основного оборудования во вторую или третью смену, коэффициент сменности $K_{Sm} > 1$). Определим

$$\int_{t_1}^{t_2} W_\delta(t,S)\,dt$$

как количество отработанных дополнительным оборудованием (расположенным в окрестности координаты S технологического маршрута) часов за промежуток времени $\Delta t = (t_2 - t_1)$. В результате включения дополнительного оборудования, обеспечивающего обработку предметов труда во вторую и третью смену с темпом, рав-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159489
© Г. К. Кожевников, О. М. Пигнастый, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

ным темпу работы основного оборудования $[\chi]_{1\psi}(t,S)$, общий темп движения предметов труда в точке технологического маршрута с координатой S увеличивается на величину $[\chi]_{1\psi}(t,S)\cdot W_{\delta}(t,S)$. За время $\Delta t=(t_2-t_1)$ работы дополнительного оборудования через точку технологического маршрута с координатой S пройдет дополнительный поток предметов труда общим количеством

$$\int_{t_1}^{t_2}[\chi]_{1\psi}(t,S)\cdot W_{\delta}(t,S)dt$$

единиц. Стоимость сверхнормативных затрат, необходимых для обеспечения работы дополнительного оборудования, расположенного на участке $\Delta S_m\in[S_{m-1},S_m]$ и используемого для выполнения m-ой операции за длительность производственного цикла T_d, определяем интегралом:

$$\int_0^{T_d}\int_{S_{m-1}}^{S_m}W_{\delta}(t,S)\cdot\omega_z(t,S)dSdt\,.$$

Общая стоимость C_{cb} сверхнормативных затрат технологических ресурсов за время производственного цикла T_d может быть рассчитана как:

$$C_{cb}(T_d)=\int_0^{T_d}\int_0^{S_d}W_{\delta}(t,S)\cdot\omega_z(t,S)dSdt\,.$$

Цель

Построение системы управления потоковыми параметрами производственной линии, которая базируется на управлении коэффициентом сменности функционирования технологического оборудования.

Методика

Производственная линия предприятия с поточным методом организации производства рассмотрена как динамическая распределенная система. Технологический маршрут изготовления изделия для многих современных предприятий содержит несколько сотен технологических операций, в межоперационном заделе каждой из которых содержатся тысячи изделий, ожидающих обработку. Технологические маршруты разных деталей одного вида изделий пересекаются. Это приводит к тому, что распределение предметов труда вдоль технологического маршрута оказывает значительное влияние на пропускную способность производственной линии. Для описания таких систем введен новый класс моделей производственных линий (PDE-model). Модели этого класса используют уравнения в частных производных для описания поведения потоковых параметров производственной линии. В данной статье построена PDE-модель производственной линии, потоковые параметры которой зависят от величины коэффициента загрузки технологического оборудования для каждой операции. Для описания распределенной динамической системы использована PDE-модель поточной линии [1, 9–14]. При этом рассмотрен в качестве базового режима функционирования односменный режим работы производственного предприятия.

Результаты

Параметры линии для непрерывного поточного производства с достаточно большим количеством операций удовлетворяют системе балансовых уравнений:

$$\frac{\partial[\chi]_0(t,S)}{\partial t}+\frac{\partial[\chi]_1(t,S)}{\partial S}=0\,, \qquad (1)$$

$$[\chi]_1(t,S)=[\chi]_{1\psi}(t,S)\,.$$

Нормативный темп $[\chi]_{1\psi}(t,S)$ обработки предметов труда для поточной линии является заданным в каждой точке технологического маршрута и для каждого момента времени. Параметрами модели управляемого производственного процесса в двухмоментном описании являются межоперационные заделы, характеризующие плотностью $[\chi]_0(t,S)$ распределения предметов труда вдоль технологического маршрута, и их темп движения $[\chi]_1(t,S)$ [8]. Управление величиной потоковых параметров $[\chi]_0(t,S)$, $[\chi]_1(t,S)$ осуществляем путем ре-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159489
© Г. К. Кожевников, О. М. Пигнастый, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

гулирования места включения в технологическом маршруте дополнительного оборудования и длительности его включения (изменение коэффициента сменности функционирования технологического оборудования, $K_{Sm} > 1$).

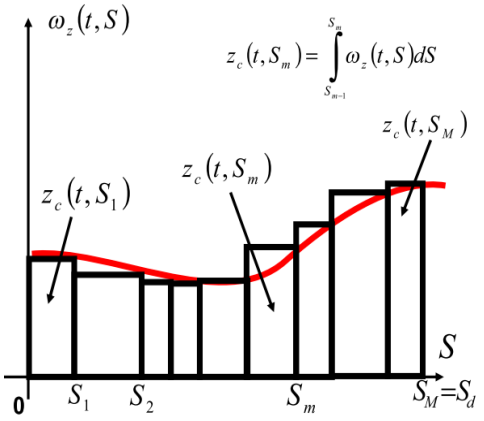


Рис. 1. Плотность распределения $\omega_z(t,S)$

Fig. 1. Distribution density $\omega_z(t,S)$

Управляющая функция

$$U_\delta(t,S)=W_\delta(t,S)$$

определяет величину длительности включения дополнительного оборудования в указанном месте технологического маршрута с координатой S в момент времени $t=t_q$, где t_q – время окончания q-ой смены ($q=1,2,3...$). Интервал планирования для рассматриваемой линии равен интервалу протяженности трех смен (суточный интервал планирования) при односменном режиме работы основного оборудования. В качестве дополнительного использовано основное оборудование $K_{Sm} > 1$, обрабатывающее предметы труда во вторую и третью смену с темпом $[\chi]_{1\psi}(t,S)$.

Поведение параметров $[\chi]_0(t,S)$, $[\chi]_1(t,S)$ поточной линии ограничено начальными условиями распределения предметов труда по технологическому маршруту и целью управления:

$$[\chi]_0(0,S)=[\chi]_{00}(S),$$

$$[\chi]_0(T_d,S)=[\chi]_{0T_d}(S),$$

а также граничными условиями, определяющими поступление со склада сырья, материалов на первую операцию и выход готовой продукции с последней операции:

$$[\chi]_0(t,0)=[\chi]_{0S}(t),$$

$$[\chi]_1(t,0)=[\chi]_{1S}(t).$$

В отсутствие включения дополнительного оборудования параметры $[\chi]_0(t,S)$, $[\chi]_1(t,S)$, $[\chi]_{1\psi}(t,S)$ в момент t_q окончания q-ой смены и начала $(q+1)$-ой смены являются непрерывными функциями времени t с непрерывными производными n-го порядка:

$$[\chi]_0(t_{q-},S)=[\chi]_0(t_{q+},S),$$

$$\frac{\partial^n[\chi]_0(t_{q-},S)}{\partial t^n}=\frac{\partial^n[\chi]_0(t_{q+},S)}{\partial t^n},$$

$$[\chi]_1(t_{q-},S)=[\chi]_1(t_{q+},S),$$

$$\frac{\partial^n[\chi]_1(t_{q-},S)}{\partial t^n}=\frac{\partial^n[\chi]_1(t_{q+},S)}{\partial t^n},$$

$$[\chi]_{1\omega}(t_{q-},S)=[\chi]_{1\omega}(t_{q+},S),$$

$$\frac{\partial^n[\chi]_{1\omega}(t_{q-},S)}{\partial t^n}=\frac{\partial^n[\chi]_{1\omega}(t_{q+},S)}{\partial t^n}.$$

Обозначения t_{q-} и t_{q+} означают, что функции $[\chi]_0(t,S)$, $[\chi]_1(t,S)$, $[\chi]_{1\psi}(t,S)$ рассматривают в бесконечно малой окрестности слева и справа от t_q. Полагаем, что нормативные параметры, характеризующие операцию в течение производственного цикла T_d, остаются неизменными во времени, т. е.:

$$[\chi]_{1\psi}(t,S)=[\chi]_{1q}(S).$$

Принимая это во внимание, система уравнений (1) может быть проинтегрирована:

$$[\chi]_0(t,S)=[\chi]_0(0,S)-\frac{\partial[\chi]_{1q}(S)}{\partial S}t,$$

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159489
© Г. К. Кожевников, О. М. Пигнастый, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

$$[\chi]_1(t,S)=[\chi]_{1\psi}(t,S)=[\chi]_{1q}(S). \qquad (2)$$

Рис. 2 демонстрирует увеличение плотности межоперационных заделов для технологической m-ой операции в течение продолжительности цикла T_d для случая, когда отсутствует включение дополнительного оборудования во вторую и третью смену при

$$\left.\frac{\partial[\chi]_{1q}(S)}{\partial S}\right|_{S=S_m}<0.$$

При этом темп обработки деталей на технологической операции будем считать постоянным в течение времени (рис. 3). Средняя величина суточного темпа может быть изменена в зависимости от значения коэффициента сменности технологического оборудования. Значение времени t_q соответствует времени окончания выполнения работ в q-ю смену при односменном режиме работы основного оборудования (продолжительность рабочей смены):

$$\Delta t_q=\left(t_q-t_{q-1}\right)=8 \text{ (ч)}.$$

Количество межоперационных заделов в момент времени, соответствующий окончанию работ в q-ю смену, равно их количеству на начало работ $(q+1)$-ой смены (2) (рис. 2).

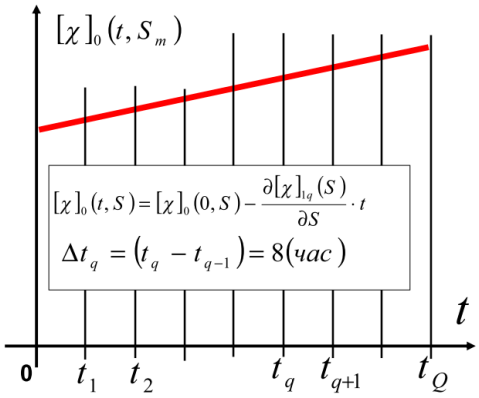


Рис. 2. Величина плотности $[\chi]_0(t,S)$ без включения дополнительного оборудования

Fig. 2. The value of the density $[\chi]_0(t,S)$ without involvement of the additional equipment

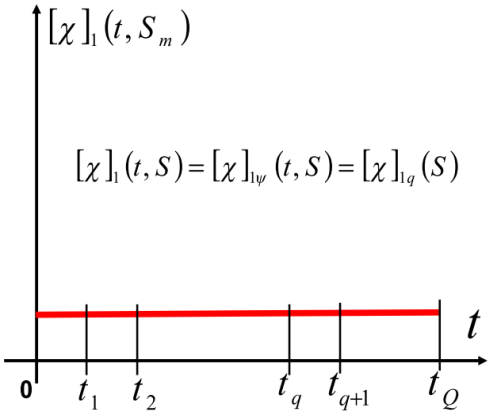


Рис. 3. Величина темпа $[\chi]_1(t,S)$ без включения дополнительного оборудования

Fig. 3. The value of the rate $[\chi]_1(t,S)$ without involving the additional equipment

Увеличение со временем плотности межоперационных заделов приведет к переполнению емкости межоперационного накопителя, находящегося в точке технологического маршрута, определенной координатой S_M, и в конечном итоге, к переполнению накопителей на участке $[0,S_m]$ технологического маршрута с последующей остановкой производственной линии.

Детально условия возникновения процесса переполнения накопителей и исследование эволюции его развития для участка $[0,S_m]$ технологического маршрута изложено в [2, 7, 10, 13].

Для обеспечения бесперебойной работы поточной линии необходимо синхронизировать темп обработки предметов труда на отдельных операциях в пределах интервала времени между началом t_q-ой и началом t_{q+1}-ой рабочей смены. Одним из распространенных методов синхронизации производственной линии в пределах интервала 1-й, 2-й и 3-й смены является условие

$$\frac{1}{t_q-t_{q-1}}\int_{t_{q-1}}^{t_q}[\chi]_{1\psi}(t,S_{m-1})dt=$$

$$=\frac{1}{t_q-t_{q-1}}\int_{t_{q-1}}^{t_q}[\chi]_{1\psi}(t,S_m)dt=const,$$

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159489
© Г. К. Кожевников, О. М. Пигнастый, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

определяющее равенство суточных темпов обработки изделий на смежных технологических операциях для разных значений времени производственного цикла.

Дополним уравнения (1) управляющей функцией $U_\delta(t,S)$:

$$\frac{\partial[\chi]_0(t,S)}{\partial t}+\frac{\partial[\chi]_{1q}(S)}{\partial S}=\frac{\partial\left([\chi]_{1q}(S)\cdot U_\delta(t,S)\right)}{\partial S}, \quad (3)$$

$$U_\delta(t,S)=W_\delta(t,S)=W(t,S)\cdot\delta(t-t_q),$$

$$t_q=8\cdot q(\text{час}),\ W(t_q,S)\le 8(\text{час}),$$

определяющей длительности включения оборудования в позиции S в момент времени между окончанием q-ой и началом $(q+1)$-ой смены ($q=1,2,3...$).

Управление потоковыми параметрами осуществляемое в результате использования дополнительного оборудования в момент времени t_q между окончанием q-ой смены и началом $(q+1)$-ой смены, определено через дельта-функцию Дирака $\delta(t-t_q)$ [3, 4].

Уравнение для изменения плотности межоперационных заделов (3) может быть проинтегрировано по времени:

$$[\chi]_0(\tau,S)=[\chi]_0(0,S)-\frac{\partial[\chi]_{1q}(S)}{\partial S}t-\sum_{q=1}^{k}\frac{\partial}{\partial S}\left([\chi]_{1q}(S)W(t_q,S)\right), \quad (4)$$

где моменты времени пополнения межоперационных заделов поточной линии

$$0<t_1<t_2<...<t_q<t_{q+1}<...<t_k<\tau \text{ (ч)}$$

при продолжительности работы дополнительного оборудования

$$W(t_1,S),W(t_2,S),...,W(t_q,S),...,W(t_k,S) \text{ (ч)}$$

Моменты времени пополнения t_q и длительность работы дополнительного оборудования $W(t_q,S)\le 8$ (ч) зависят от выбора управления. Общее количество предметов труда в межоперационном заделе технологической операции, ограниченной координатами технологического маршрута S_{m-1} и S_m, есть величина:

$$\int_{S_{m-1}}^{S_m}\left([\chi]_0(\tau,S)-[\chi]_0(0,S)\right)dS=$$
$$=-\left([\chi]_{1q}(S_m)-[\chi]_{1q}(S_{m-1})\right)\tau-$$
$$-\sum_{q=1}^{k}\left([\chi]_{1q}(S_m)\cdot W(t_q,S_m)-[\chi]_{1q}(S_{m-1})\cdot W(t_q,S_{m-1})\right),$$

где $\int_{S_{m-1}}^{S_m}\left([\chi]_0(\tau,S)-[\chi]_0(0,S)\right)dS$ (шт.) – изменение задела m-ой операции за время τ (ч); $[\chi]_{1q}(S_{m-1})\tau$ (шт.) – количество предметов труда, которое поступило на m-ую операцию с $(m-1)$-ой за время τ (ч); $[\chi]_{1q}(S_m)\tau$ (шт.) – количество предметов труда, которое ушло с m-ой операции на $(m+1)$-ую за время τ (ч); $[\chi]_{1q}(S_{m-1})W(t_q,S_{m-1})$ (шт.) – количество предметов труда, которое поступило на m-ую операцию с $(m-1)$-ой в результате работы дополнительного оборудования в течение времени $W(t_q,S_{m-1})$ между началом q-ой и началом $(q+1)$-ой смены; $[\chi]_{1q}(S_m)W(t_q,S_m)$ (шт.) – количество предметов труда, которое ушло с m-ой операции на $(m+1)$-ую в результате работы дополнительного оборудования в течение времени $W(t_q,S_m)$ (ч) между началом q-ой и началом $(q+1)$-ой смены.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159489
© Г. К. Кожевников, О. М. Пигнастый, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

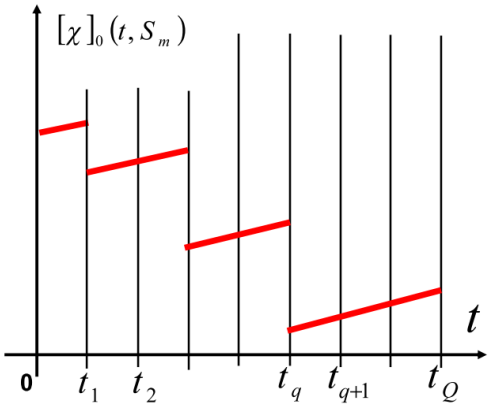


Рис. 4. Величина плотности $[\chi]_0(t,S)$ при включении дополнительного оборудования

Fig. 4. The value of the density $[\chi]_0(t,S)$ involving the additional equipment

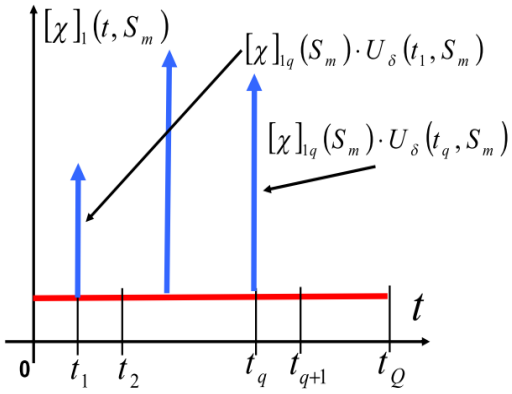


Рис. 5. Величина темпа $[\chi]_1(t,S)$ при включении дополнительного оборудования

Fig. 5. The value of the rate $[\chi]_1(t,S)$ involving the additional equipment

На рис. 4 и 5 представлено поведение потоковых параметров при наличии управляющих воздействий, которые обеспечиваются включением или выключением дополнительного оборудования. Показаны разрывы функции $[\chi]_0(t,S)$ в моменты времени t_q. Разрыв функции $[\chi]_0(t,S)$, соответствующий величине $[\chi]_{1q}(S)W(t_q,S)$, определяется работой дополнительного оборудования производительностью $[\chi]_{1q}(t,S)$, включенного между t_q и t_{q+1} сменой для обработки предметом труда на время $W(t_q,S)$.

В достаточно общем виде задача построения оптимальной программы для управления потоковыми параметрами $[\chi]_0(t,S)$, $[\chi]_1(t,S)$ при использовании дополнительного оборудования может быть сформулирована следующим образом: определить состояние параметров $[\chi]_0(\tau,S)\in G_0$, $[\chi]_1(\tau,S)\in G_1$ для каждой точки $S\in[0,S_d]$ маршрута в течение промежутка времени $t\in[0,T_d]$ при управлении $U_\delta(t,S)\in G_U$ длительностью работы дополнительного оборудования

$$U_\delta(t,S)=W_\delta(t,S)=W(t,S)\cdot\delta(t-t_q),$$

$$t_q=8\cdot q(час),$$

доставляющих минимум функционалу

$$C_{cb}(T_d)=\int_0^{T_d}\int_0^{S_d}W_\delta(t,S)\cdot\omega_z(t,S)dSdt\to\min, \quad (5)$$

при дифференциальных связях

$$\frac{\partial[\chi]_0(t,S)}{\partial t}+\frac{\partial[\chi]_{1q}(S)}{\partial S}=\frac{\partial\left([\chi]_{1q}(S)\cdot U_\delta(t,S)\right)}{\partial S},$$

при ограничениях вдоль траектории на фазовые переменные $[\chi]_0(t,S)$, определенные емкостью накопителей

$$0\le[\chi]_0(t,S),[\chi]_0(t,S)\le[\chi]_{0G}(S),$$

при ограничениях вдоль траектории на управление [6]

$$0\le\int_{t_q-0.5\Delta t_q}^{t_q+0.5\Delta t_q}U_\delta(t,S)dt\le U_{\delta G}(S)=8 \text{ (ч/смена)}, \quad (6)$$

$$\Delta t_q\to 0, \qquad 0\le U_\delta(t,S),$$

начальных условиях

$$[\chi]_0(0,S)\le[\chi]_{00}(S),$$

конечном состоянии (цель управления)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159489
© Г. К. Кожевников, О. М. Пигнастый, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

$$[\chi]_0(T_d,S)\le[\chi]_{0T_d}(S)$$

и граничных условиях

$$[\chi]_1(t,0)=[\chi]_{1q}(0),$$

$$[\chi]_1(t,S_d)=[\chi]_{1q}(S_d),$$

где $t_q=8\cdot q$ – время окончания q-ой рабочей смены; $\delta(t-t_q)$ – дельта функция. Управление осуществляется в интервале времени между сменами

$$0<t_1<t_2...<t_q...\le t_d,\ \Delta t_q\to 0.$$

Управление $U_\delta(t,S)$ следует понимать как некоторый импульс, являющийся идеализацией достаточно большого по величине обычного управления в течение смены, сосредоточенного в окрестности точки t_q [3]. Значение функции $U_\delta(t,S)$ в момент времени t задает количество часов работы дополнительного оборудования в месте технологического маршрута с координатой S. Условие (6) для разных участков маршрута записано в предположении того, что длительность работы дополнительного оборудования не может превышать длительности технологической смены, равной восьми часам.

Темп обработки предметов труда вдоль технологического маршрута есть заданная функция

$$[\chi]_{1q}=[\chi]_{1q}(S)$$

от координаты S. Темп движения предметов труда

$$[\chi]_1(t,0)=[\chi]_{1q}(0),$$

поступающих в виде заготовок сырья и материалов на поточную линию, и темп

$$[\chi]_1(t,S_d)=[\chi]_{1q}(S_d)$$

готовых деталей, выходящих с последней операции, не зависят от времени, согласованы с планом снабжения производственного участка сырьем и планом отгрузок готовой продукции. Функционал (5) определяет критерий качества управления потоковыми параметрами за время производственного цикла T_d, отражает сверхнормативные затраты по всем технологическим операциям, связанным с использованием дополнительного оборудования. При этом предполагается, что стоимость часа работы дополнительного оборудования задана разной для каждой операции и зависит от времени, определена функцией $\omega_z(t,S)$. При определении оптимальной программы управления считаем, что интервалы между сменами примыкают друг к другу. Предполагаем, что основное оборудование в течение рабочей смены работает непрерывно. Для обеспечения условий непрерывности потока предметов труда по технологическому маршруту

$$[\chi]_{0G}(S)\ge[\chi]_0(t,S)\ge 0,$$

управление работой дополнительного оборудования необходимо производить таким образом, чтобы в течение смены в интервале $t\in[t_q,t_{q+1}]$ основное оборудование функционировало непрерывно. Строгое равенство

$$[\chi]_{0G}(S)\equiv[\chi]_0(t,S)$$

и

$$[\chi]_0(t,S)\equiv 0,$$

соответствующее заполнению предметами труда накопителя и опустошению его, допускается только в интервале времени

$$t\in\left[t_q-\frac{\Delta t_q}{2},t_q+\frac{\Delta t_q}{2}\right],\ \Delta t_q\to 0.$$

Проинтегрировав уравнения баланса в указанном интервале времени, получим:

$$[\chi]_0\left(t_{q+1}-\frac{\Delta t_q}{2},S\right)=[\chi]_0\left(t_q-\frac{\Delta t_q}{2},S\right)-,$$

$$-\frac{\partial[\chi]_{1q}(S)}{\partial S}8-\frac{\partial}{\partial S}\int_{t_q-\frac{\Delta t_q}{2}}^{t_q+\frac{\Delta t_q}{2}}[\chi]_{1q}(S)U_\delta(t,S)dt$$

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159489
© Г. К. Кожевников, О. М. Пигнастый, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

что позволяет записать условие недопустимости переполнения межоперационного накопителя

$$[\chi]_{0G}(S)-[\chi]_0\left(t_q-\frac{\Delta t_q}{2},S\right)-\frac{\partial[\chi]_{1q}(S)}{\partial S}8+$$

$$+\frac{\partial}{\partial S}\int_{t_q-\frac{\Delta t_q}{2}}^{t_q+\frac{\Delta t_q}{2}}[\chi]_{1q}(S)U_\delta(t,S)dt\geq 0$$

и условие недопустимости опустошения межоперационного накопителя

$$[\chi]_0\left(t_q-\frac{\Delta t_q}{2},S\right)-\frac{\partial[\chi]_{1q}(S)}{\partial S}8-$$

$$-\frac{\partial}{\partial S}\int_{t_q-\frac{\Delta t_q}{2}}^{t_q+\frac{\Delta t_q}{2}}[\chi]_{1q}(S)U_\delta(t,S)dt\geq 0.$$

Функция $[\chi]_0(t_q,S)$ определяет распределение предметов труда по технологическому маршруту в момент времени $t=t_q$, соответствующий началу q-ой смены. Управление $U_\delta(t,S)$ при ограничениях на фазовые переменные и при ограничениях на управление, обеспечивает достижение цели управления при минимальном значении интеграла (5) и при заданных дифференциальных связях, является оптимальной программой для потоковых параметров производственной линии. В отсутствие управления уравнение связей имеет вид (1). Изменение количества предметов труда на участке поточной линии в пределах операции возможно только за счет поступления предметов труда с предыдущей операции и ухода их на последующую в результате технологической обработки. Слагаемое

$$\frac{\partial\left([\chi]_{1q}(S)\cdot U_\delta(t,S)\right)}{\partial S},$$

содержащее управление $U_\delta(t,S)$, играет роль источника или стока [1] предметов труда в рассматриваемом элементе объема фазового пространства. Начальные условия и цель управления определяют распределение предметов труда по маршруту в начальный и конечный момент времени.

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна заключается в разработке метода проектирования систем управления параметрами производственной линии предприятий с поточным методом организации производства, основанном на PDE-модели объекта управления.

При этом объект управления – производственная поточная линия, представлен динамической системой с распределенными параметрами вдоль технологического маршрута. Оптимальное управление параметрами поточной линии ищется в виде суперпозиций дельта функций.

Предложенный метод проектирования системы управления потоковыми параметрами производственной линии может быть положен в основу проектирования высокоэффективных систем управления потоковыми параметрами производства для предприятий по изготовлению полупроводниковой продукции автомобильной отрасли.

Выводы

Длительность производственного цикла T_d обработки партии предметов труда можно разбить на три характерные части:

T_H – промежуток времени между событиями, когда была начата обработка первого предмета труда на первой операции и закончена обработка первого предмета труда на последней операции (нестационарный режим работы поточной линии);

T_{Cm} – промежуток времени между событиями, когда была закончена обработка первого предмета труда на последней операции и начата обработка последнего предмета труда на первой операции;

T_K – промежуток времени между событиями, когда была начата обработка последнего предмета труда на первой операции и закончена обработка последнего предмета труда на по-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159489
© Г. К. Кожевников, О. М. Пигнастый, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

следней операции (нестационарный режим работы поточной линии):

$$T_d = T_H + T_{Cm} + T_K . \quad (7)$$

В течение промежутка времени T_H осуществляется заполнение всех технологических позиций поточной линии поступившими на обработку предметами труда k-ой партии, что приводит к переходному нестационарному режиму функционирования. Если производственная линия обрабатывает предыдущую $(k-1)$-ую партию изделий, то время переходного периода T_H для k-ой партии может быть оценено величиной

$$\tau_{m,(k-1)} \cdot \sum_{m=1}^{M} N_{m,(k-1)} \le T_H \le$$

$$\le \tau_{\max,(k-1)} \sum_{m=1}^{M} N_{m,(k-1)} + \sum_{m=1}^{M} \tau_{m,(k-1)} , \quad (8)$$

где $\tau_{m,(k-1)}$ – эффективное время обработки предмета труда $(k-1)$-ой партии изделий на m-ой операции ($m = 1..M$), $N_{m,(k-1)}$ – количество предметов труда $(k-1)$-ой партии в m-ом межоперационном накопителе.

Для синхронизированной производственной линии промежуток времени T_H принимает минимальное значение, равное

$$T_H = \tau_{m,(k-1)} \cdot \sum_{m=1}^{M} N_{m,(k-1)} . \quad (9)$$

После заполнения всех технологических позиций поступившими на обработку предметами труда k-ой партии производственная линия может функционировать как в установившемся, так и в переходном режиме, что определяется заданным изменением во времени темпа обработки предметов труда на разных операциях. Промежуток времени T_K характеризует требуемое время переходного нестационарного процесса для освобождения производственной линии от изделий k-ой партии, может быть вычислен по формуле (8).

Движение первого предмета труда обрабатываемой k-ой партии ограничено движением предмета труда предыдущей $(k-1)$-ой партии изделий. Для уменьшения времени переходного режима T_H необходимо ускорить обработку изделий предыдущей партии. Для линий, удовлетворяющих условию $T_d \gg T_H$, затратами на управление в этот промежуток времени можно пренебречь. Если промежуток времени T_H достаточно велик или затраты на управлении потоковыми параметрами в промежутке T_H существенны, то для сокращения времени производственного цикла T_d необходимо управление на операциях, на которых находятся предметы труда предшествующей партии. Освобождение оборудования для исследуемой партии деталей сокращает длительность T_H. Вопрос о необходимости управления в течение времени $t \in [0, T_H]$ определяется условием (7) при дополнительных уравнениях и неравенствах вида (5).

Достижение производственной системой с начальным распределением предметов труда $[\chi]_{00}(S)$ по технологическому маршруту поточной линии за время продолжительности производственного цикла T_d конечного состояния $[\chi]_{0T_d}(S)$ может быть реализовано множеством способов, каждый из которых именуется программой управления. В технических задачах управления состоянием производственной линии возникает вопрос о нахождении наиболее оптимальной программы использования ресурсов (оптимального управления). Математическое отражение этого факта состоит в том, что управление параметрами поточной линии должно быть выбрано из условия минимума интеграла (5).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159489
© Г. К. Кожевников, О. М. Пигнастый, 2019

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Азаренков, Н. А. Кинетическая теория колебаний параметров поточной линии / Н. А. Азаренков, О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Доп. Нац. акад. наук України. – 2014. – № 12. – С. 36–43. doi: 10.15407/dopovidi2014.12.036
2. Власов, В. А. Моделирование технологических процессов изготовления промышленной продукции / В. А. Власов, И. А. Тихомиров, И. И. Локтев. – Томск : Изд-во ГТПУ, 2006. – 300 с.
3. Дыхта, В. А. Оптимальное импульсное управление с приложениями / В. А. Дыхта, О. Н. Самсонюк. – Москва : Физматлит, 2000. – 255 с.
4. Иваненко, Д. Д. Классическая теория поля (новые проблемы) / Д. Д. Иваненко, А. А. Соколов. – Москва ; Ленинград : Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1951. – 480 с.
5. Коробецкий, Ю. П. Имитационные модели в гибких системах / Ю. П. Коробецкий, С. К. Рамазанов. – Луганск : Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2003. – 280 с.
6. Михайлов, В. С. Теория управления / В. С. Михайлов. – Киев : Выща школа, 1988. – 312 с.
7. Пигнастый, О. М. Задача оптимального оперативного управления макропараметрами производственной системы с массовым выпуском продукции / О. М. Пигнастый // Доп. Нац. акад. наук України. – 2006. – № 5. – С. 79–85.
8. Пигнастый, О. М. Расчет производственного цикла с применением статистической теории производственно-технических систем / О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Доп. Нац. акад. наук України. – 2009. – № 12. – С. 38–44.
9. Online scheduling of 2re-entrant flexible manufacturing systems / J. Pinxten, U. Waqas, M. Geilen, A. Basten, L. Somers // ACM Transactions on Embedded Computing Systems. – 2017. – Vol. 16. – Iss. 5s. – P. 1–20. doi: 10.1145/3126551
10. On the Optimization of Conservation Law Models at a Junction with Inflow and Flow Distribution Controls / F. Ancona, A. Cesaroni, G. Coclite, M. Garavello // SIAM Journal on Control and Optimization. – 2018. – Vol. 56. – Iss. 5. – P. 3370–3403. doi: 10.1137/18M1176233
11. Simulation model study for manufacturing effectiveness evaluation in crowdsourced manufacturing / T. Kaihara, Y. Katsumura, Y. Suginishi, B. Kádár // CIRP Annals. – 2017. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 445–448. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.094
12. Situation Awareness and Environmental Factors: The EVO Oil Production / M. de Falco, N. Mastrandrea, W. Mansoor, L. Rarità // New Trends in Emerging Complex Real Life Problems / P. Daniele, L. Scrimali (eds). – Cham : Springer, 2018. – P. 209–217. doi: 10.1007/978-3-030-00473-6_23
13. Tiacci, L. Simultaneous balancing and buffer allocation decisions for the design of mixed-model assembly lines with parallel workstations and stochastic task times / L. Tiacci // International Journal of Production Economics. – 2015. – Vol. 162. – P. 201–215. doi: 10.1016/j.ijpe.2015.01.022
14. Towards adaptive simulation-based optimization to select individual dispatching rules for production control / M. Kück, E. Broda, M. Freitag, T. Hildebrandt, E. M. Frazzon // 2017 Winter Simulation Conference (WSC). – Las Vegas, NV, USA, 2017. – P. 3852–3863. doi: 10.1109/WSC.2017.8248096

Г. К. КОЖЕВНІКОВ[1], О. М. ПІГНАСТИЙ[2*]

[1]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Пушкінська, 79-2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (050) 776 88 79, ел. пошта kgk4711@gmail.com, ORCID 0000-0002-6586-6767
[2*]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Пушкінська, 79-2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (067) 572 50 29, ел. пошта pihnastyi@gmail.com, ORCID 0000-0002-5424-9843

РОЗПОДІЛЕНА ДИНАМІЧНА PDE-МОДЕЛЬ ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЧОЇ ЛІНІЇ

Мета. У роботі необхідно розглянути проектування системи управління параметрами виробничої лінії для підприємства з потоковим методом організації виробництва. **Методика.** Виробнича лінія підприємства з потоковим методом організації виробництва – це складна динамічна розподілена система. Технологічний

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159489
© Г. К. Кожевников, О. М. Пигнастый, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

шлях виготовлення продукції для багатьох сучасних підприємств містить кілька сотень технологічних операцій, в міжопераційному резерві кожної з яких є тисячі продуктів, що чекають на обробку. Технологічні маршрути різних деталей одного виду виробів перетинаються. Це призводить до того, що розподіл предметів праці уздовж технологічного маршруту значно впливає на пропускну здатність виробничої лінії. Для опису таких систем введений новий клас моделей виробничих ліній (PDE-model). Моделі цього класу використовують рівняння в частинних похідних для опису поведінки потокових параметрів виробничої лінії. У цій статті побудована PDE-модель виробничої лінії, потокові параметри якої залежать від величини коефіцієнта завантаження технологічного обладнання для кожної операції. **Результати**. Автори отримали оптимальне управління потоковими параметрами виробничої лінії, в основу покладено алгоритм зміни коефіцієнта завантаження технологічного обладнання виробничої лінії. Як базовий нормативний режим функціонування потокової лінії розглянуто однозмінний режим роботи. **Наукова новизна** полягає в розробці методу проектування систем управління параметрами виробничої лінії підприємств із потоковим методом організації виробництва, заснованого на PDE-моделі об’єкта управління. Автори запропонували метод побудови оптимального управління параметрами потокової лінії через управління коефіцієнтом завантаження технологічного обладнання. Під час проектування системи управління потокова лінія представлена динамічною розподіленою системою. **Практична значимість**. Запропонований метод проектування системи управління потоковими параметрами виробничої лінії може бути покладено в основу проектування високоефективних систем управління потоковими параметрами виробництва для підприємств із виготовлення напівпровідникової продукції автомобільної галузі.

Ключові слова: конвеєр; виробнича лінія; PDE-модель виробництва; системи управління виробництвом; незавершене виробництво; масове виробництво

G. K. KOZEVNIKOV[1], O. M. PIHNASTYI[2*]

[1]National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Pushkinska St., 79-2, Kharkiv, Ukraine, 61002,
tel. +38 (050) 776 88 79, e-mail kgk4711@gmail.com, ORCID 0000-0002-6586-6767
[2*]National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Pushkinska St., 79-2, Kharkiv, Ukraine, 61002,
tel. +38 (067) 572 50 29, e-mail pihnastyi@gmail.com, ORCID 0000-0002-5424-9843

DISTRIBUTED DYNAMIC PDE-MODEL OF PROGRAM CONTROL BY UTILIZATION OF THE TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF PRODUCTION LINE

Purpose. The article is aimed at designing a control system for the parameters of a production line for an enterprise with a straight flow method of organizing production. **Methodology**. The production line at the enterprise with a straight flow method of organizing production is a complex dynamic distributed system. The flow route for manufacturing a product for many modern enterprises contains several hundreds of technological operations, in the interoperating reserve each of which there are thousands of products waiting to be processed. The flow routes of different parts of the same type of products intersect (re-entrant manufacturing systems). This leads to the fact that the distribution of subjects of labor along the technological route has a significant impact on the throughput capacity of the production line. To describe such systems, a new class of production line models (PDE-model) has been introduced. To describe the behavior of the flow parameters of the production line, a production line model containing partial differential equations (PDE-model) was used. The PDE-model of the production line is built in the article, the flow parameters of which depend on the value of utilization rate of the technological equipment for each operation. **Findings**. The authors obtained the optimal control of the flow parameters of the production line, which is based on the algorithm for changing the utilization rate of the technological equipment of the production line. The single-shift working time pattern is considered as a basic regulatory treatment of the production line operation. To simulate the work of technological equipment after the shift, the generalized Dirac function was used. **Originality** consists in the development of a method for designing control systems for the parameters of the production line of enterprises with a straight flow method of organizing production based on the PDE-model of the control object. The authors proposed a method for constructing an optimal control of the parameters of the production line through the control of the utilization rate of the technological equipment. When designing a control system, the production line is represented by a dynamic system with distributed flow parameters. **Practical value**. The proposed method for designing

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159489
© Г. К. Кожевников, О. М. Пигнастый, 2019

a control system for the flow parameters of a production line can be used as the basis for designing highly efficient production flow control systems for enterprises manufacturing semiconductor products of the automobile industry.

Keywords: conveyor; production line; PDE-model of production; production control systems; unfinished production; mass production

REFERENCES

1. Azarenkov, N. A., Pihnastyi, O. M., & Khodusov, V. D. (2014). Kinetic theory of fluctuations of the parameters of a production line. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, (12),* 36-43. doi: 10.15407/dopovidi2014.12.036 (in Russian)
2. Vlasov, V. A., Tikhomirov, I. A., & Loktev, I. I. (2006). *Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya promyshlennoy produktsii*. Tomsk: Izdatelstvo GTPU. (in Russian)
3. Dykhta, V. A., & Samsonyuk, O. N. (2000). *Optimalnoe impulsnoe upravlenie s prilozheniyami.* Moscow: Fizmatlit. (in Russian)
4. Ivanenko, D. D., & Sokolov, A. A. (1951). *Klassicheskaya teoriya polya (novye problemy).* Moscow: Gosudarstvennoe izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoy literatury. (in Russian)
5. Korobetskiy, Y. P., & Ramazanov, S. K. (2003). *Imitatsionnye modeli v gibkikh sistemakh*. Lugansk: Izdatelstvo VNU im. V. Dalya. (in Russian)
6. Mikhaylov, V. S. (1988). *Teoriya upravleniya*. Kiev: Vyshcha shkola. (in Russian)
7. Pihnastyi, O. M. (2006). Zadacha optimalnogo operativnogo upravleniya makroparametrami proizvodstvennoy sistemy s massovym vypuskom produktsii. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, (5),* 79-85. (in Russian)
8. Pihnastyi, O. M., & Khodusov, V. D. (2009). Raschet proizvodstvennogo tsikla s primeneniem statisticheskoy teorii proizvodstvenno-tekhnicheskikh sistem. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, (12),* 38-44. (in Russian)
9. Pinxten, J. V., Waqas, U., Geilen, M., Basten, T., & Somers, L. (2017). Online Scheduling of 2-Re-entrant Flexible Manufacturing Systems. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 16(5s),* 1-20. doi: 10.1145/3126551 (in English)
10. Ancona, F., Cesaroni, A., Coclite, G. M., & Garavello, M. (2018). On the Optimization of Conservation Law Models at a Junction with Inflow and Flow Distribution Controls. *SIAM Journal on Control and Optimization, 56(5),* 3370-3403. doi: 10.1137/18m1176233 (in English)
11. Kaihara, T., Katsumura, Y., Suginishi, Y., & Kadar, B. (2017). Simulation model study for manufacturing effectiveness evaluation in crowdsourced manufacturing. *CIRP Annals, 66(1),* 445-448. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.094 (in English)
12. Falco de, M., Mastrandrea, N., Mansoor, W., & Rarità, L. (2018). Situation Awareness and Environmental Factors: The EVO Oil Production. In: P. Daniele, & L. Scrimali (eds), *New Trends in Emerging Complex Real Life Problems* (pp. 209-217). Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-030-00473-6_23 (in English)
13. Tiacci, L. (2015). Simultaneous balancing and buffer allocation decisions for the design of mixed-model assembly lines with parallel workstations and stochastic task times. *International Journal of Production Economics, 162,* 201-215. doi: 10.1016/j.ijpe.2015.01.022 (in English)
14. Kuck, M., Broda, E., Freitag, M., Hildebrandt, T., & Frazzon, E. M. (2017, December). Towards adaptive simulation-based optimization to select individual dispatching rules for production control. *2017 Winter Simulation Conference (WSC)*. Las Vegas. doi: 10.1109/wsc.2017.8248096 (in English)

Поступила в редколлегию: 16.08.2018
Принята к печати: 02.01.2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159489
© Г. К. Кожевников, О. М. Пигнастый, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

UDC 669.14/15:621.78

I. O. VAKULENKO[1], S. V. PROIDAK[2], L. I. VAKULENKO[3], N. A. GRISCHENKO[4]

[1]Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro 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», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 373 15 56, e-mail proydak.S@gmail.com, ORCID 0000-0003-2439-3657
[3]Management of Prydniprovsk Railway, Yavornytskyi Av., 107, Dnipro, Ukraine, 49054, tel. +38 (095) 466 08 50, e-mail dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0003-2616-740X
[4]Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro 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 0000-0002-0091-1387

SOFTENING OF HARDENED MEDIUM-CARBON STEEL DURING HEATING

Purpose. The work is aimed to clarify the softening mechanism during the heating of martensite hardened carbon steel, which is of practical importance, especially in the development of the production technology of rolled products with different levels of hardening. **Methodology**. The samples after martensite hardening were tempered at the temperatures of 300-500˚C. The microstructure was investigated under the electron microscope. Thin foils were made using the Bolman and tweezer methods in chlorous-acetic solution and Morris reagent. Phase distortions of crystalline lattice were determined by the methods of X-ray structural analysis, using the diffractometer. The cold-worked layer of metal after grinding was removed by electrolytic dissolution. Tensile strength brake of the metal was determined using the tensile diagrams of samples using the Instron type machine. Microhardness was measured using the PMT-3 device with indentation load 0.49 N. **Findings**. When heating the hardened steel to a temperature of 300˚C, the softening effect is mainly related to the rate of reduction of the accumulated as a result of martensitic transformation, density of the crystalline structure defects. The total result is caused by the development of dislocations recombination and strengthening because of the emergence of additional number of cementite particles during the martensitic crystals decomposition. Starting from the heating temperatures of 400˚C and above, the development of polygonization processes in the ferrite is accompanied by the emergence of additional sub-boundaries, which enhance the effect of metal strengthening. With increase in the heating temperature of the hardened steel, the level of strength properties is determined by the progressive softening from the decrease in carbon atoms saturation degree of the solid solution, dislocations density and increase in the size of cementite particles over the effect of strengthening from hindering of mobile dislocations by carbon atoms and the emergence of additional sub-boundaries. **Originality**. For the tempering temperature of 300-400˚C, the absence of the phase distortion change indicates the emergence of additional factor in strengthening the metal from the formation of sub-boundaries and the dispersion strengthening from the carbide particles. **Practical value**. The given explanation of the mechanism of structural transformations in the process of tempering in the average temperature range of the hardened carbon steel can be used to optimize the technology of thermal strengthening of rolled metal.

Keywords: microstructure; martensite; cementite; sub-boundaries; hardening; softening

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160163
© I. O. Vakulenko, S. V. Proidak, L. I. Vakulenko, N. A. Grischenko, 2019

Introduction

During the thermal hardening using the heat of rolling heating [2, 4, 10], in the elements of products of large sections a gradient of structures is formed, which correspond to certain values of the strength characteristics [1, 9, 11]. The observed structural inhomogeneity is caused by the cumulative effect of the development of phase transformation processes with different nature of influence on the properties. Thus, the achieved level of metal hardening is proportional to the speed of accelerated cooling, which decreases as the distance from the cooled rolling surface increases [5]. At the same time, the heating temperature of the metal will increase when approaching the central volumes [1, 4]. For the detailed analysis, the continuous nature of the structure change across the section of the rolled product, depending on the distance from the cooling surface, can be conditionally divided into separate volumes with corresponding structure and ability to work hardening [3]. Based on the above-mentioned, the changes in the nature of behaviour when loading the specified volumes of metal will be similar to the influence of the temperature of individual heating when tempering the hardened steel [1]. Takin into account the additive nature of influence of the dispersion and morphology of the structural components on the general level of carbon steel hardening [3], the formation of certain gradient of structures across the rolled product section should be considered as one of the directions of technology optimization to achieve the required structural state and the level of strength characteristics [1, 3, 5].

Purpose

The work is aimed to clarify the mechanism of softening during the heating of the hardened medium-carbon steel in the average temperature range.

Methodology

The fragments of the railway wheel set axis made of carbon steel with the concentration of chemical elements: 0.41% C, 0.36% Si, 0.61% Mn, 0.0022% S, 0.015% P served as a material for the research. The plates 2 mm thick, 20 mm wide and 250 mm long were the test samples. The samples were austenitized at temperatures higher than Ac_3 followed by forced cooling in a water tank. After hardening, the samples were subjected to tempering at temperatures of 300-500°C during 1 h. The heating was carried out in the SNOL electric furnace – 1.6.2.5.1/11-IZ. The temperature was controlled by the chromel-alumel thermocouple and DC potentiometer. The microstructure of the samples was studied under electron microscope at accelerating voltage of 100 kV. Thin foils for the research under electron microscope were made using the Bolman and tweezer methods in chlorous-acetic electrolyte and Morris reagent. During the manufacture of the objects for X-ray studies, the cold-worked layer of metal, after making the polished sections were removed by dissolution in the chlorous-acetic electrolyte. The phase distortions of crystalline lattice ($\Delta a/a$), where a is the ferrite lattice parameter, were determined by the methods of X-ray structural analysis using the DRON-2.0 diffractometer at scintillation registration of reflexes, in monochromatic CuK_α radiation, at room temperature. The error in the determination $\Delta a/a$ was up to 5%. Tensile strength brake of the metal was evaluated under tension using the Instron type machine, at room temperature and deformation rate of $10^{-3}\,s^{-1}$. As a characteristic of the strength of metal microvolumes, the microhardness was used, which was measured using the PMT-3 device with indentation load 0.49 N.

Findings

The level of the values of tensile strength break of the studied steel after hardening and tempering at the temperatures of 300-500˚C corresponded to the known experimental data for the steels with similar chemical composition [1, 5, 7]. As the tempering temperature increases, well-defined structural changes, detected starting from the temperatures of 200-250˚C, correspond to the progressive metal softening [3, 9]. Indeed, as shown in the works [6, 8] for carbon steels with a carbon content of about 0.4%, the temperature of the beginning of martensitic transformation is about 300°C. This temperature should be enough

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160163
© I. O. Vakulenko, S. V. Proidak, L. I. Vakulenko, N. A. Grischenko, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

to start the emission of cementite particles from the solid solution during the formation of the martensitic crystal itself. Thus, depending on the temperature of the end of forced cooling, a different combination in the development of the processes of hardening and softening in steel, determines the final level of strength properties.

The effect of hardening from the ordering of carbon atoms in the crystalline lattice of the martensitic crystal [6] and quenching aging [2, 10], when tempering at 300°C, is almost completely suppressed by the progressive metal softening (Fig. 1, *a*).

Indeed, for steels with medium carbon content, the degree of supersaturation of the solid solution achieved during the martensite hardening determines the resource of maintaining the increased metal strength after heating to certain temperatures. Based on this, it is safe to believe that for the studied steel after hardening, the effect from reducing the tetragonality degree of the ferrite crystalline lattice (martensitic crystal) during low-temperature tempering can be to some extent compensated by the increasing role of quenching aging processes [2, 10]. However, already after heating of hardened steel, starting from 300°C, the monotonous nature of the decrease in strength characteristics indicates a definite excess of softening effect over hardening (Fig. 1, *a*). A qualitatively different nature of the dependence on tempering temperature is observed for the value of the phase distortions (Fig. 1, *b*). A comparative analysis of the absolute values of these characteristics, depending on the structural state of the metal, showed that as a result of tempering at 400°C, the H_μ reduction reaches about 40-43%, and for $\Delta a/a$ up to 20% of relatively hardened state. After tempering at 500°C, the values of the corresponding characteristics are 58 and 30%, respectively. Thus, the observed differences in the nature of changes of H_μ and $\Delta a/a$ at tempering up to 400°C (Fig. 1) can be associated only with different sensitivity to sub-structural changes during tempering of the hardened steel. It is hoped that the analysis of the microstructure of hardened steel after tempering at 400°C made it possible to explain the nature of change of $\Delta a/a$.

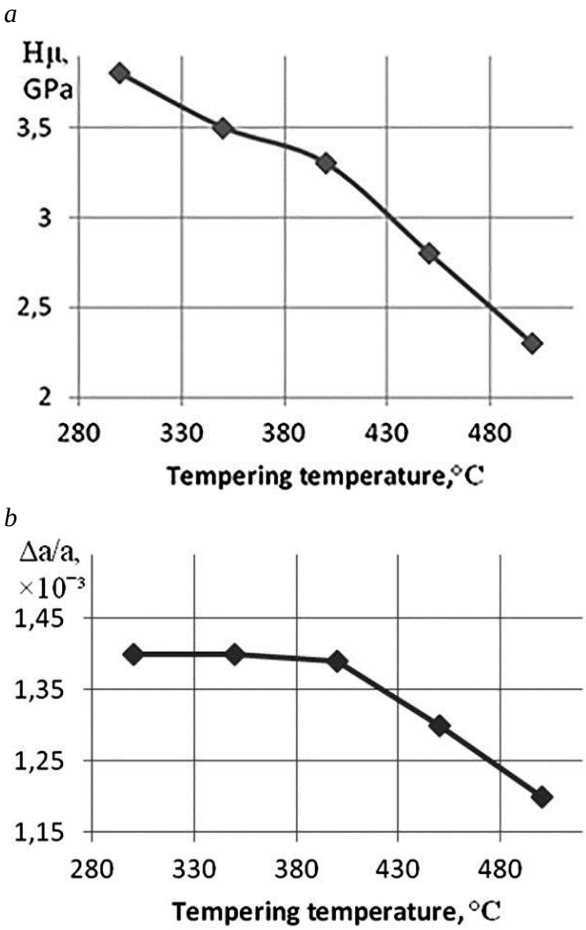


Fig. 1. Influence of tempering temperature on micro hardness (*a*) and micro distortions (*b*) of the hardened steel

The microstructure presented in Fig. 2, *a* corresponds to the hardened state, and in Fig. 2, *b* – to the state after tempering at a temperature of 400°C. The detected sections of the lath martensite with a high dislocation density (Fig. 2, *a*) indicate the development of austenite transformation according to a shear mechanism. The laths width is generally up to 1 micron.

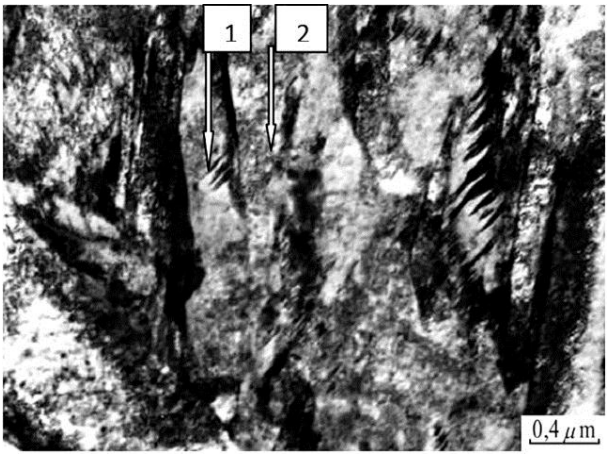
At sufficiently careful study, in separate martensitic crystals, simultaneously with thin twins (designation 1), stroked randomly oriented cementite emissions of high dispersity (designation 2) were found, Fig. 2, *a*. Analysis of the results [2, 8] indicates that the emergence of the observed emissions of the carbide phase is in fact caused by the development of the decomposition processes of martensitic crystals, which are formed at a relatively high transformation temperature.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160163
© I. O. Vakulenko, S. V. Proidak, L. I. Vakulenko, N. A. Grischenko, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

a



b

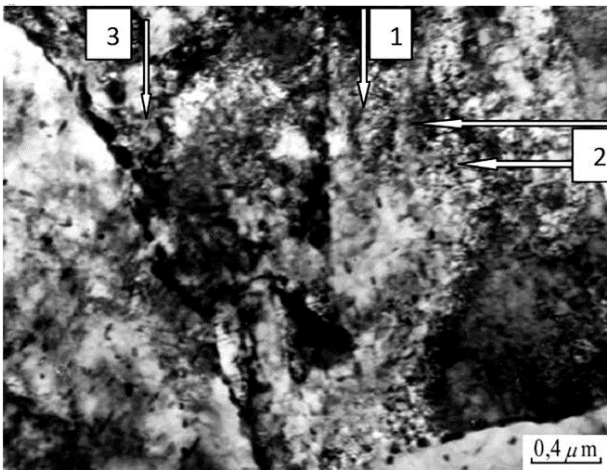


Fig. 2. Microstructure of steel after hardening (*a*) and tempering at 400˚C (*b*)

As compared to H_μ, the absence of the decrease $\Delta a/a$ indicates the complex change in the ratio in the development of the softening and hardening processes of the metal. In the first approximation, the hardening effect is provided by the simultaneous influence of the formation of additional interfaces in the ferrite (sub-boundaries) and dispersion hardening from the emitted carbide particles (Fig. 2, *b*). Considering the influence of cementite particles on the hardening effect separately, it should be noted that in addition to the carbide particles formed during steel hardening, the influence from the emitted particles even when tempering of the hardened steel is added. As follows from the works [6, 8], simultaneously with the emission of the dispersed particles during tempering, the processes of spheroidization and coalescence for the particles that are formed during martensitic transformation receive a certain acceleration. Thus, the expected total hardening effect from the dispersed particles of cementite, which are formed as a result of tempering, will in fact be somewhat reduced. However, in fact, based on a comparative analysis of the microstructure (Fig. 2), no evidence of the existence of carbide particles with markedly increased sizes was found. At a sufficiently careful study of the structure, the particles of cementite located at the sub-boundaries (formed during tempering) and in the internal volumes of the former martensitic crystals (hardening precipitation) (Fig. 2, *b*, designation 1) have almost identical diameters. On the basis of the known results of the study, the permanence of particle sizes is explained by the cyclical nature of the change in the stages of particles growth, when they are located at the grain boundaries due to the dissolving particles located inside of the grain. Thus, despite the fact that at heating temperatures up to 400˚C, the process of carbon atoms emission from the tetragonal insertion positions is almost completed, as evidenced by the decrease in the blurring of reflections in microdiffraction photographs and the broadening of x-ray interferences [2, 6]. The insufficient acceleration of cementite coalescence is one of the reasons for a certain decrease in the rate of steel softening. The presence of unessential anomaly on the monotonous course of the curve H_μ (Fig. 1, *a*) confirms these positions.

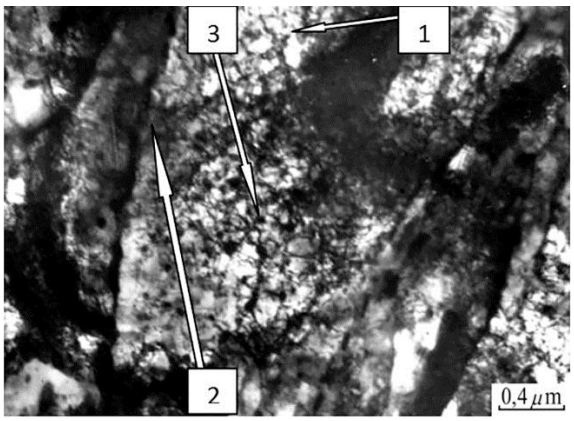
With a further increase in tempering temperature, the sub-structural changes observed at 400°C receive additional acceleration. As follows from the microstructure analysis (Fig. 3), the heating to 500°C is already sufficient for the beginning of the formation of the sections with almost equiaxial subgrains in the hardened steel. (Fig. 3, *a*, designation 1). At the same time, there are volumes in the metal in which the formation of sub-boundaries is just beginning (Fig. 3, *a*, designation 2).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160163
© I. O. Vakulenko, S. V. Proidak, L. I. Vakulenko, N. A. Grischenko, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

a



b

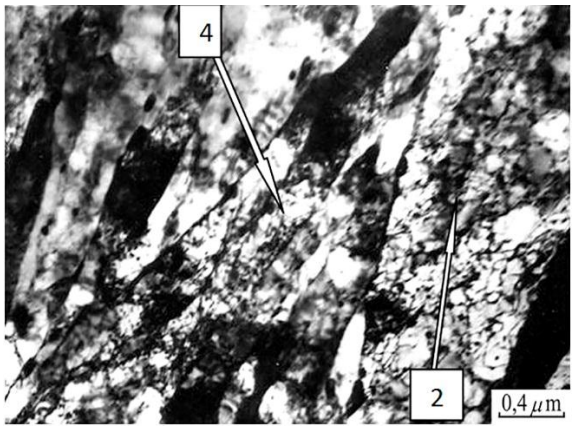


Fig. 3. Microstructure of steel after hardening and tempering at 500˚C

Based on this, the differences in the conditions for the beginning of spheroidization and coalescence processes of cementite particles in the metal microvolumes are one of the reasons for the formation of a certain sub-structural heterogeneity. In microvolumes in which a significant amount of finely dispersed carbide particles have been preserved, the polygonization processes are significantly inhibited, as evidenced by the increased dislocation density (Fig. 3, *a*, designation 3). In contrast, in the sections with more intensive polygonization development, the dislocations redistribution leads to the improvement of sub-boundaries, the purification of the internal volumes of fragmented martensitic crystals from unbound dislocations (Fig. 3, *b*, designation 4). Considering that the additional formation of sub-boundaries and the emission of cementite particles by the nature of their influence are related to hardening, these phenomena should slow down the development of softening processes with increasing the tempering temperature. From the analysis of the results, it follows that the cumulative effect of softening during tempering of hardened steel from the solid solution decomposition, reducing the dislocation density and the coalescence of carbide particles exceeds the hardening from the interaction of dislocations with carbon atoms, the formation of additional sub-boundaries and the hardening from cementite particles of various dispersity.

Originality and practical value

During the research it was for the first time established that for the tempering temperatures of 300–400°C, the absence of phase distortions change indicates the emergence of additional factor in the metal hardening from the formation of sub-boundaries and the dispersion hardening from carbide particles.

The given explanation of the mechanism of structural transformations in the process of tempering in the average temperature range of the hardened carbon steel can be used to optimize the technology of thermal hardening of rolled products.

Conclusions

1. During the tempering of hardened steel in the temperature range of 300-500˚C, the effect of softening from the solid solution decomposition, the reduction of dislocation density and the coalescence of carbide particles exceeds hardening from the dislocations interaction with carbon atoms, the formation of additional sub-boundaries and dispersion hardening from cementite particles.

2. The dependence of the value of the phase distortion indicates the development of complex structural changes during the tempering of 300–400°C in hardened steel with the opposite nature of influence on the strength properties.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160163
© I. O. Vakulenko, S. V. Proidak, L. I. Vakulenko, N. A. Grischenko, 2019

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бабаченко, А. И. Надежность и долговечность железнодорожных колес и бандажей. – Днепропетровск : Приднепров. гос. акад. стр-ва и архитектуры, 2015. – 350 с.
2. Большаков, В. И. Атлас структур металлов и сплавов / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Н. Э. Погребная. – Днепропетровск : Gaudeamus, 2001. – 114 с.
3. Гриднев, В. Н. Прочность и пластичность холодно деформированной стали / В. Н. Гриднев, В. Г. Гаврилюк, Ю. Я. Мешков. – Киев : Наукова думка, 1974. – 231 с.
4. Кинетика превращения аустенита в рельсовых сталях марок М74 и 75ХГСМ при непрерывном охлаждени / Ф. К. Ткаченко, С. О. Кузьмин, В. Г. Ефременко, В. Г. Казанков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 29. – С. 198–201.
5. Совершенствование химического состава стали для железнодорожных колес, обеспечивающего повышение их стойкости к образованию дефектов на поверхности катания / А. И. Бабаченко, П. Л. Литвиненко, А. В. Кныш, Ж. А. Дементьева, А. Н. Хулин, Е. А. Шпак // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 23. – С. 226–233.
6. Bhadesha, H. K. D. H. Bainite in steels: Transformations, Microstructure and Properties / H. K. D. H. Bhadesha. – Cambridge : The University Press, 2001. – 478 p.
7. Effect of morphologies of martensite–austenite constituents on impact toughness in inter critically reheated coarse-grained heat-affected zone of HSLA steel / Xiang Luo, Xiaohua Chen, Tao Wang, Shiwei Pan, Zidong Wang // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 710. – P. 192–199. doi: 10.1016/j.msea.2017.10.079
8. Powder metallurgical nanostructured medium carbon bainitic steel: Kinetics, structure, and in situ thermal stability studies / I. Lonardelli, M. Bortolotti, W. van Beek [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2012. – Vol. 555. – P. 139–147. doi: 10.1016/j.msea.2012.06.043
9. Structure and properties of the steel railway wheel disc after forced cooling / I. Vakulenko, N. Grischenko, L. Vakulenko, V. Efremenko, S. Proiydak, O. Perkov // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2018. – Vol. 98. – P. 173–180. doi: 10.20858/sjsutst.2018.98.16
10. Vakulenko, I. Influence of cooling rate on the strength of the ring of railway wheel / I. Vakulenko // Materials Science. – 2016. – Vol. 51. – Iss. 6. – P. 839–842. doi: 10.1007/s11003-016-9910-8
11. Vakulenko, I. Investigation of slide mechanism of tread during operation of railway wheel / I. Vakulenko, S. Proidak, O. Perkov // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2016. – Vol. 90. – P. 185–193. doi: 10.20858/sjsutst.2016.90.16

І. О. ВАКУЛЕНКО[1], С. В. ПРОЙДАК[2], Л. І. ВАКУЛЕНКО[3], М. А. ГРИЩЕНКО[4]

[1]Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916
[2]Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта proydak.S@gmail.com, ORCID 0000-0003-2439-3657
[3]Управління Придніпровської залізниці, просп. Дмитра Яворницького, 107, Дніпро, Україна, 49054, тел. + 38 (095) 466 08 50, ел. пошта dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0003-2616-740X
[4]Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-0091-1387

ЗНЕМІЦНЕННЯ ПІД ЧАС НАГРІВАННЯ ЗАГАРТОВАНОЇ СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Мета. У роботі необхідно провести уточнення механізму пом’якшення при нагріві загартованої на мартенсит вуглецевої сталі, що має важливе практичне значення, особливо при розробці технології виробництва прокату з різним рівнем зміцнення. **Методика.** Зразки після гартування на мартенсит

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160163
© I. O. Vakulenko, S. V. Proidak, L. I. Vakulenko, N. A. Grischenko, 2019

відпускали при температурах 300–500˚С. Мікроструктуру досліджували під електронним мікроскопом. Фольги виготовляли методами Больмана і пінцету, в хлорно-оцтовому розчині й реактиві Морріса. Викривлення другого роду кристалічної решітки визначали за методиками рентгенівського структурного аналізу з використанням дифрактометра. Наклепаний шар металу після шліфування видаляли електролітичним розчиненням. Тимчасовий опір руйнуванню визначали з діаграм розтягання зразків на машині типу «Інстрон». Мікротвердість вимірювали з використанням приладу ПМТ-3, з навантаженням на индентор 0,49 Н. **Результати**. При нагріванні до температури 300 ˚С загартованої сталі ефект пом'якшення пов'язаний з темпом зниження накопиченої в результаті мартенситного перетворення щільності дефектів кристалічної будови. Сумарний результат обумовлений розвитком рекомбінації дислокацій та пом'якшенням від появи додаткових частинок цементиту при розпаді мартенситних кристалів. Починаючи від температур нагріву 400 ˚С і вище, розвиток процесів полігонізації у фериті супроводжується виникненням додаткових субмеж, які підсилюють ефект зміцнення металу. З підвищенням температури нагріву загартованої сталі рівень міцності властивостей визначається прогресуючим пом'якшенням від зниження ступеня пересичення атомами вуглецю твердого розчину, густини дислокацій і збільшення розміру частинок цементиту над ефектом зміцнення від гальмування рухомих дислокацій атомами вуглецю та виникнення додаткових субмеж. **Наукова новизна**. Для температур відпуску 300–400 ˚С відсутність зміни спотворень другого роду свідчить про появу додаткового фактора в зміцненні металу від формування субмеж і дисперсійного зміцнення від карбідних частинок. **Практична значимість**. Наведене пояснення механізму структурних перетворень в процесі відпуску в середньому інтервалі температур загартованої вуглецевої сталі може бути використано для оптимізації технології термічного зміцнення прокату.

Ключові слова: мікроструктура; мартенсит; цементит; субмежі; гартування; пом'якшення

И. А. ВАКУЛЕНКО[1], С. В. ПРОЙДАК[2], Л. И. ВАКУЛЕНКО[3], Н. А. ГРИЩЕНКО[4]

[1]Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916
[2]Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта proydak.S@gmail.com, ORCID 0000-0003-2439-3657
[3]Управление Приднепровской железной дороги, просп. Дмитрия Яворницкого, 107, Днипро, Украина, 49054, тел. + 38 (095) 466 08 50, эл. почта dnuzt_texmat@ukr.net , ORCID 0000-0003-2616-740X
[4]Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-0091-1387

РАЗУПРОЧНЕНИЕ ПРИ НАГРЕВЕ ЗАКАЛЕННОЙ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Цель. В работе необходимо провести уточнение механизма разупрочнения при нагреве закаленной на мартенсит углеродистой стали, что имеет важное практическое значение, особенно при разработке технологии производства проката с разным уровнем упрочнения. **Методика.** Образцы после закалки на мартенсит отпускали при температурах 300–500˚С. Микроструктуру исследовали под электронным микроскопом. Фольги изготавливали методами Больмана и пинцета, в хлорно-уксусном растворе и реактиве Морриса. Искажения второго рода кристаллической решетки определяли по методикам рентгеновского структурного анализа, с использованием дифрактометра. Наклепанный слой металла после шлифования удаляли электролитическим растворением. Временное сопротивление разрушению определяли из диаграмм растяжения образцов при испытаниях на машине типа «Инстрон». Микротвердость измеряли с использованием прибора ПМТ-3, с нагрузкой на индентор 0,49 Н. **Результаты**. При нагреве до 300˚С закаленной стали эффект разупрочнения связан с темпом снижения накопленной в результате мартенситного превращения плотности дефектов кристаллического строения. Суммарный результат обусловлен развитием рекомбинации дислокаций и упрочнением от появления дополнительных частиц цементита при распаде мартенситных кристаллов. Начиная от температур 400˚С и выше, развитие процессов полигонизации в феррите сопровождается возникновением дополнительных субграниц, которые усиливают

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160163
© I. O. Vakulenko, S. V. Proidak, L. I. Vakulenko, N. A. Grischenko, 2019

эффект упрочнения металла. С ростом температуры нагрева закаленной стали уровень прочностных свойств определяется прогрессирующим разупрочнением от снижения степени пресыщения атомами углерода твердого раствора, плотности дислокаций и увеличения размера частиц цементита над эффектом упрочнения от торможения подвижных дислокаций атомами углерода и возникновения дополнительных субграниц. **Научная новизна.** Для температур отпуска 300–400 ˚С отсутствие изменения величины искажений второго рода свидетельствует о появлении дополнительного фактора в упрочнении металла от формирования субграниц и дисперсионного упрочнения от карбидных частиц. **Практическая значимость.** Приведенное объяснение механизма структурных превращений в процессе отпуска в среднем интервале температур закаленной углеродистой стали может быть использовано для оптимизации технологии термического упрочнения проката.

Ключевые слова: микроструктура; мартенсит; цементит; субграницы; закалка; разупрочнение

REFERENCES

1. Babachenko, A. I. (2015). *Nadezhnost i dolgovechnost zheleznodorozhnykh koles i bandazhey.* Dnepropetrovsk: Pridneprovskaya gosudarstvennaya akademiya stroitelstva i arkhitektury. (in Russian)
2. Bolshakov, V. I., Sukhomlin, G. D., & Pogrebnaya, N. E. (2001). *Atlas struktur metallov i splavov.* Dnepropetrovsk: Gaudeamus. (in Russian)
3. Gridnev,V. N., Gavrilyuk, V. G., & Meshkov, Y. Y. (1974). *Prochnost i plastichnost kholodno deformirovannoy stali*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
4. Tkachenko, F. K., Kuzmin, S. O., Yefremenko, V. H. & Kazankov, V. H. (2009). The kinetics of austenite transformation in the rail steel grades m74 and 75 хгсм during continuous cooling. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 29*, 198-201. (in Russian)
5. Babachenko, A. I., Litvinenko, P. L., Knysh, A. V., Dementeva, Zh. A., Khulin, A. N., & Shpak, Y. A. (2011). Improving chemical composition of steel railway wheels, ensure their enhanced resistance to surface defects skating. *Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoy metallurgii, 23*, 226-233. (in Russian)
6. Bhadesha, H. K. D. H. (2001). *Bainite in steels: Transformations, Microstructure and Properties.* Cambridge: The University Press. (in English)
7. Luo, Xiang, Chen, Xiaohua, Wang, Tao, Pan, Shiwei & Wang, Zidong (2018). Effect of morphologies of martensite–austenite constituents on impact toughness in inter critically reheated coarse-grained heat-affected zone of HSLA steel. *Materials Science and Engineering: A, 710, 192–199*. doi: 10.1016/j.msea.2017.10.079 (in English)
8. Lonardelli, I., Bortolotti, M., van Beek, W., Girardini, L., Zadra, M., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2012). Powder metallurgical nanostructured medium carbon bainitic steel: Kinetics, structure, and in situ thermal stability studies. *Materials Science and Engineering: A, 555,* 139-147. doi: 10.1016/j.msea.2012.06.043 (in English)
9. Vakulenko, I., Grischenko, N., Vakulenko, L., Efremenko, V., Proiydak, S., & Perkov, O. (2018). Structure and properties of the steel railway wheel disc after forced cooling. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 98*, 173-180. doi: 10.20858/sjsutst.2018.98.16 (in English)
10. Vakulenko, I. O. (2016). Influence of Cooling Rate on the Strength of the Rims of Railway Wheel. *Materials Science, 51(6),* 839-842. doi: 10.1007/s11003-016-9910-8 (in English)
11. Vakulenko, I., Proidak, S., & Perkov, O. (2016). Investigation of slide mechanism of tread during operation of railway wheel. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 90,* 185-193. doi: 10.20858/sjsutst.2016.90.16 (in English)

Received: Sep. 03, 2018
Accepted: Jan. 03, 2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160163
© I. O. Vakulenko, S. V. Proidak, L. I. Vakulenko, N. A. Grischenko, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

МАШИНОБУДУВАННЯ

UDC 621.86/87(075.8)

L. M. BONDARENKO[1], O. P. POSMITYUKHA[2*], K. T. HLAVATSKYI[3]

[1]Dep. «Applied Mechanics and Material Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail bondarenko-l-m2015@yandex.ua, ORCID 0000-0002-2212-3058
[2*]Dep. «Applied Mechanics and Material Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (066) 150 95 00, e-mail AleksandrP@3g.ua, ORCID 0000-0002-9701-3873
[3] Dep. «Applied Mechanics and Material Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (095) 816 99 90, e-mail kazimir.glavatskij@gmail.com, ORCID 0000-0003-0921-9845

ANALYTICAL DETERMINATION OF THE REDUCED ROTATIONAL RESISTANCE COEFFICIENT OF THE CONSTRUCTION MACHINE SLEWING GEAR

Purpose. Designing new models of construction machines is closely related to the development of slewing gear, and that, in turn, has a drive whose power and dimensions depend on the rotational resistance and the reduced friction coefficient in the units. The absence of analytical dependencies for determining the reduced coefficient of friction for the rotation of construction machines, first, restricts the designer's ability to select materials, and secondly, does not allow the adoption of optimal design solutions. Therefore, the purpose of the article is to find analytical solutions to determine the rotational resistance in the slewing gear of construction machines, which allows projecting more advanced gears and machines in general. Existing techniques are based on empirical dependencies and experimental coefficients that reduce the accuracy of calculations, increase the size and cost of work. It is proposed to improve the accuracy and simplify the process of determining the rotational resistance and the magnitude of the reduced rotational resistance coefficient of the building tower cranes. **Methodology.** The set objectives can be achieved by means of analytical dependencies for determination of rolling friction coefficients over linear and point contacts. This will enable to find the more accurate value of the resistance coefficient, and the constructor during the calculations to take targeted measures to reduce it, using the mechanical constants of materials of the units and their geometric parameters. The calculation is based on Hertz contact deformation theory and the body point plane motion theory. **Findings**. The obtained dependencies will allow analytically to find the resistance of rolling resistance of rollers in construction machines with fixed and rotating pillars, with circular rotary devices, as well as in ball and roller slewing rings. The calculated values of the rotational resistance coefficients for some types of mechanisms give similar values with those recommended, while for others they significantly differ and require their refinement in reference values. **Originality** of the work consists in the use of analytical dependences for determining the reduced coefficient of the rotational resistance over linear and point contacts using Hertz contact deformation theory and Tabor partial analytic dependencies theory. **Practical value.** The obtained dependencies will allow to design new types of slewing gear units of the construction machines and to reveal the additional rotational resistances.

Keywords: construction machine; resistance; rotation; turn; slewing ring; rail; rolling friction

Introduction

There are the following types of slewing gears (SG) of the construction machines:

a) with a fixed pillar consisting of an upper support with a thrust and radial bearings;

b) with a rotating pillar: consists of a pillar connected to the revolving portion of the construction tower crane;

c) with a circular flat or tapered rail consisting of a series of conical or cylindrical rollers, which come in contact with two rails on the revolving and

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmityukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

non-revolving portions of the construction crane;

g) with a slewing ring: consists of ball or roller single-row or multi-row structures (full-slewing and part-slewing excavators, motor graders).

One of the main causes of rotational resistance is rolling resistance [12, 13]. There are many studies and suggestions for its definition, but all of them are either inaccurate, like Reynolds's assertion that rolling resistance is the result of sliding friction at the contact point, or require an experimental determination of one or more coefficients.

The analytic dependence of Tabor [3] on determining the rolling friction coefficient, which is based on Hertz contact deformation theorem [6], is quite successful. Tabor obtained the following analytical dependences for determining the rolling friction coefficient, *k*;

– for a linear contact:

$$k = \frac{3b}{3\pi}\alpha, \qquad (1)$$

– for a point contact

$$k = \frac{3b}{16}\alpha, \qquad (2)$$

where b – half-width of the contact pattern; α – coefficient of hysteresis losses.

However, the presence in these formulas of the coefficient α nullifies their practical application.

In [5], there are formulas analogous to (1) and (2) without coefficient α, namely: $k = 0.11b$ and $k = 0.1b$, that essentially differ from those offered by Tabor, and the absence of their coefficient of hysteresis losses testifies to their inaccuracy.

In [4], there are proposed the dependences for determining the rolling friction coefficient with the use of Tabor analytical dependences and the experimental values of the rolling friction coefficient for the wheels of cranes with a flat champignon and bull-headed rails [1, 2].

Similarly to formulas (1) and (2) they are obtained in the following form:

– for flat champignon rail:

$$k = 0.225be^{-1.2R}, \qquad (3)$$

– for bull-headed rail:

$$k = 0.16be^{0.2R}, \qquad (4)$$

where R – wheel radius, m.

The difference in numerical values from the half-width of the contact pattern is obviously due to the rounding of the coefficient k in experiments to ten millimeters, as well as to the fact that their values are obtained the same for several wheel diameters (400, 500, 560, 630): $k = 0.5$ mm in the case of a flat champignon rail and $k = 0.6$ mm for the bull-headed rail).

It should be noted that formulas (3) and (4) are obtained independently of (1) and (2), and since the coefficients before b for such a class of problems can be considered close by value, we will assume that the general values of k in these formulas coincide. Having considered that the coefficients before b in Tabor's formulas are obtained analytically and are exact, the value of α can be found by changing the coefficients before R in the exponents. This equality can be achieved by taking the following values α in formulas (1) and (2):

$$\alpha = e^{-1.13R} \text{ and } \alpha = e^{0.23R}. \qquad (5)$$

Purpose

Designing new models of construction machines is closely related to the development of slewing gear, and that, in turn, has a drive whose power and dimensions depend on the rotational resistance and the reduced friction coefficient in the units [14–16]. The absence of analytical dependencies for determining the reduced coefficient of friction for the rotation of construction machines, first, restricts the designer's ability to select materials, and secondly, does not allow the adoption of optimal design solutions. Therefore, the purpose of the article is to find analytical solutions to determine the rotational resistance in the slewing gear of construction machines, which allows projecting more advanced gears and machines in general. Existing techniques are based on empirical dependencies and experimental coefficients that reduce the accuracy of calculations, increase the size and cost of work. It is proposed to improve the accuracy and simplify the process of determining the rotational resistance and the magnitude of the reduced rotational resistance coefficient of the building tower cranes. More precise definition of the rotational resistance in the slewing gear of construction machines leads to saving the machine manufacturing and operation costs [21], as well as reduction of their harmful impact on the service staff and the environment [17-20].

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmityukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Methodology

Now the formulas of Tabor (1) and (2) can be written as follows:

– for a linear contact:

$$k = \frac{2b}{3\pi} e^{-1.13R}, \quad (6)$$

– for a point contact:

$$k = \frac{3b}{16} e^{0.23R}. \quad (7)$$

With formulas (6) and (7), we can solve the set problems analytically.

In [7] it is indicated that the value of hysteresis losses α in Tabor formulas is small. We can use formula (5) for its determination and (6), (7) for determination of the resistance.

Findings

1. Wheel rolling resistance. For a linear contact, we can take $[\sigma] = 800$ MPa (steel 65G, crane operating mode 4M [11]), the elastic modulus $E = 2.1 \cdot 10^5$ MPa, the Poisson factor is 0.3.

When the value of the pressure restraining force P [4]

$$P = \frac{BR[\sigma]^2}{0.418E}, \quad (8)$$

the half-width of the contact pattern will be

$$b = 1.526\sqrt{\frac{PR}{BE}}, \quad (9)$$

where B – wheel width, m; while the rolling friction coefficient can be determined by the formula (6).

For the point contact we can take $[\sigma] = 1040$ MPa, the radius of the bull-head rail $R_r = 300$ mm. Similarly to the formulas (8) and (9) we can determine the values for the point contact

$$P = \frac{R^2 R_p^2 [\sigma]^3}{0.245^3 n_p^3 E^2 \left(R + R_p\right)^2}, \quad (10)$$

$$b = 1.397 n_b \sqrt[3]{\frac{P}{E} \cdot \frac{RR_p}{R + R_p}}, \quad (11)$$

where n_b – coefficient depending on the tangent ellipse equation coefficient $A/B = R_k / R_r$; R_r – rail rounding radius.

Depending on the wheel radius of the pressure restraining force, the coefficient of hysteresis losses, the coefficient of rolling friction and resistance are shown in Fig. 1.

Since the rolling friction coefficient for the wheels of the construction cranes corresponds to their certain radius, it can be assumed that the relationship between the force of rolling resistance and the load on the wheel is linear. But the rolling friction coefficient is determined by the half-width of the contact pattern, depending on several parameters not linearly, therefore, it is necessary to establish the dependence of the wheel rolling resistance on the load.

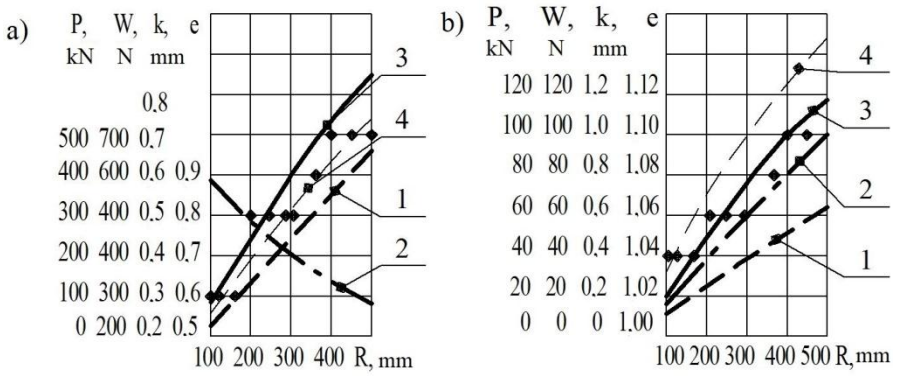


Fig. 1. Dependence on the wheel radius for linear *a*) and point contact *b*) (points show the reference values of the rolling friction coefficients):
1 – wheel pressure restraining force; *2* – coefficient of hysteresis losses;
3 – rolling friction coefficient; *4* – rolling resistance coefficient

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmityukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

For this, the load P on the wheels with the radii $R_1 = 500$ mm and $R_2 = 100$ mm can be divided on two wheels in the ratio $P_2 = \frac{P_1}{P}$.

Dependences of the coefficients of rolling friction, loading and rolling resistance of the wheel and the total resistance of the wheels are shown in Fig. 2

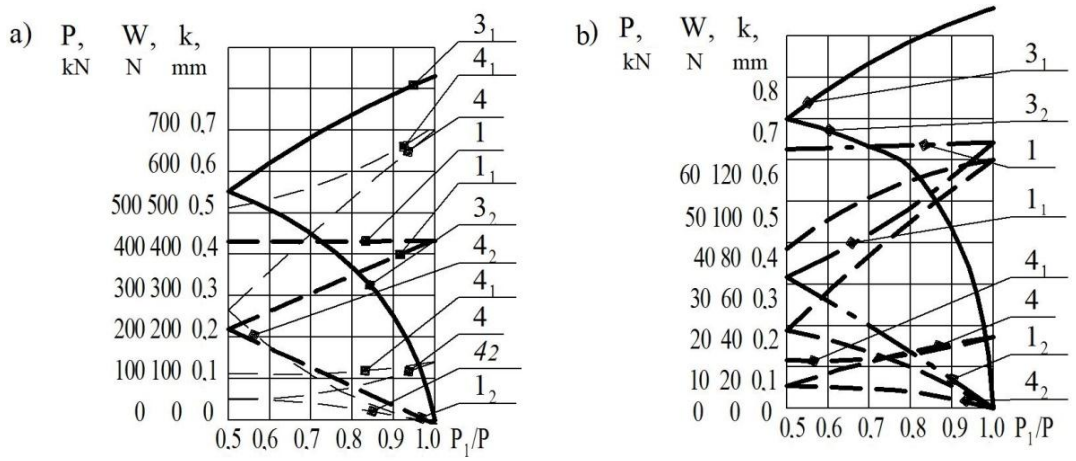


Fig. 2. Dependences of the ratio of the applied forces for linear (*a*) and point (*b*) contacts:
1, 1₁, 1₂ – total value of the pressing force and the force acting on each wheel, *3₁, 3₂* – rolling friction coefficients;
4, 4₁, 4₂ – total rolling resistance value and rolling resistance of each wheel;
lower position of curves for wheel $R = 100$ mm, upper for wheel $R = 500$ mm

Analytic dependencies (6) and (7) are used to determine the coefficients rolling friction, so it is possible to restore one lacuna in the reference literature. Losses in roller bearings are found by the coefficient of friction reduced to the shaft (ball $\mu = 0.01...0.015$, roller $\mu = 0.015...0.02$ [2]). However, this does not take into account, which race is rotating, inner or outer one.

Assuming that the deviation in the coefficient is negligible, it should be borne in mind that the number of locally positioned bearings may be significant (conveyors, vehicles), as well as an increase in the efficiency from 0.99 to 0.995 per ten bearings gives it an increase in more than 5%.

2. Ball bearings. The tasks to be clarified when calculating resistance:

1) To take into account the difference in the coefficients of rolling friction during rolling of the ball on the inner and outer races, since for calculating their size we take them equal, and the tangential force acting on the ball (Fig. 3, a) is defined as [8]

$$F_i = \frac{P_i k}{r_к};$$

2) To take into account the rotation of the race, since the special feature of the roller bearings design is that the balls (rollers) pass different lines during one revolution of the inner or outer race.

Under the simplified scheme of the bearing, the problem is solved as follows. If the outer race rotates at an angular velocity ω_o (Fig. 3, b), then the speed of point 1 as the point belonging to the outer race will equal:

$$v_o = (r_i + 2r_b)\omega_o = 2\pi n(r_i + 2r_b), \qquad (12)$$

Where o, i, b are the letters of the indices of sizes and speed of outer, inner races and ball; n – frequency of rotation of both inner and outer races.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmityukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

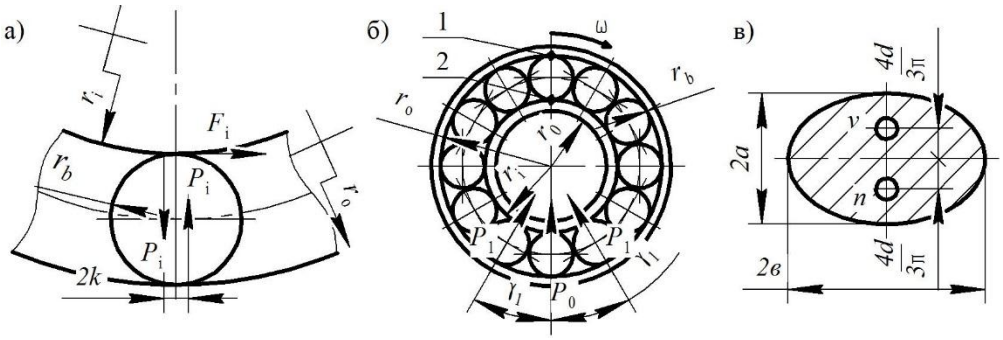


Fig. 3. Elements of bearings:
a – scheme for determining the tangential force during the rotation of inner race [1],
b – scheme for determining the speed of points of outer race and ball; *c* – contact pattern

Naturally, that the instantaneous velocity center of this race is located at point 2 of the ball touch. Assuming that there is no slip between the outer race and the ball, then $\bar{v}_1 = \bar{v}_2$.

The length of the ball rolling track on the outer race $l_o = 2\pi r_o$, and on the inner race $l_i = 2\pi r_i$ and the length difference will be $\Delta l = 2\pi(r_o - r_i)$, that is, on this track there will be ball sliding on the inner race.

In case of rotation of the inner race with the fixed outer race the difference Δl is evident that the ball will pass the outer race track that equals the inner race track.

We find the load on the balls based on their number [8]:

$$z = 2.9\,\frac{D+d}{D-d}. \qquad (13)$$

The force acting on the most loaded ball is:

$$P_0 = \frac{5Q}{z}. \qquad (14)$$

For further calculations, the radius of the ball (without rounding to the standard one) and of the rolling bearing track will be equal [8, 9]:

$$d_b \approx 0.3\,(D-d); \quad r_t \approx 1.03 r_b.$$

For the number of balls $z \geq 10$ the load on the bearing Q (for example, if $z = 10$) [8]:

$$Q = P_0\left(1 + 2\cos^{5/2}\gamma + 2\cos^{5/2}2\gamma\right), \qquad (15)$$

where γ is the angle between the balls (here $\gamma = 36^\circ$). Based on this, the load on the side balls

$$P_1 = P_0\cos^{5/2}\gamma, \quad P_2 = P_0\cos^{5/2}2\gamma. \qquad (16)$$

The values of the half-width of contact patterns in formulas (9) and (11) are determined from expressions (17) and (18). When rolling the ball on the inner ring:

$$b_i = 1.397\,n_{iv}\sqrt[3]{\frac{P}{E}\cdot\frac{1}{\frac{1}{r_b}-\frac{1}{r_t}+\frac{1}{r_i}}}, \qquad (17)$$

where n_{iv} – is the coefficient, depending on the tangency ellipse equation $\frac{A}{B} = \frac{\left(\frac{1}{r_b}-\frac{1}{r_t}\right)}{\left(\frac{1}{r_b}+\frac{1}{r_i}\right)}$. In formulas (13) – (17) D – outer bearing diameter; d – inner bearing diameter; $r_i \approx 0.5d + r_b$ radius of the track of the inner race.

At b_i for the most loaded ball, it is necessary to set optionally the value of *P*, and for the side balls P_1 or P_2 depending on the number of balls.

When rolling the ball on the outer race:

$$b_o = 1.397\,n_{ov}\sqrt[3]{\frac{P}{E}\cdot\frac{1}{\frac{1}{r_b}-\frac{1}{r_t}-\frac{1}{r_o}}}, \qquad (18)$$

where n_{ov} is determined as a function; $\frac{A}{B} = \frac{\left(\frac{1}{r_b}-\frac{1}{r_t}\right)}{\left(\frac{1}{r_b}-\frac{1}{r_o}\right)}$; $r_o \approx 0.5d + 3r_b$ is the radius of the outer race track.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmityukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

3. Influence of resistance in bearings on wheel rolling resistance. Let us consider two rolling bearings of one series, but of essentially different sizes.

3.1. Ball bearing of 304 series. Calculation output data: bearing of 304 series, $d = 20$ mm, $D = 52$ mm, static load $Q = 7.94$ kN, average diameter $D_{av} = 0.5(D + d) = 36$ mm, $d_b = 9.6$ mm, number of balls $z = 7$ at $\gamma_1 = (360^\circ) : 7 = 51.4^\circ$, $r_i = 14.8$ mm; $r_o = 242.4$ mm; $r_t = 4.944$ mm.

Half-width contact pattern of the ball, loaded with force $P_0 = 3\,150$ N, with the inner race $b_{ir} = 0.23$ mm for $n_i = 0.38$, with the outer race $b_{or} = 0.3$ mm for $n_o = 0.42$. Correspondingly, the side balls loaded by force $P_1 = 1\,740$: $b_{i1} = 0.155$ mm; $b_{o1} = 0.202$ mm. Resistance to rolling of the most loaded ball: on the inner race $W_{ir} = 44.45$ N, with the rolling friction coefficient $k_{ir} = 0.0434$ mm, on the outer race $W_{or} = 57.77$ N with $k_{or} = 0.0564$ mm; two side balls on the inner race $W_{i1} = 18.30$ N with $k_{i1} = 0.029$ mm and $W_{o1} = 23.90$ N with $k_{o1} = 0.038$ mm.

Let us determine the work of the rolling friction forces during one rotation of the inner and outer races.

During rotation of the inner race, Nm:

$$A_i = 2\pi r_i \left(W_{ir} + W_{i1} + W_{or} + W_{i1}\right) = 13.4; \quad (19)$$

During the rotation of the outer race, Nm:

$$A_o = 2\pi\left[r_o\left(W_{or} + W_{o1}\right) + r_i\left(W_{ir} + W_{i1}\right)\right] + \\ +2\pi f\left(P_0 + 2P_1\right)\left(r_o - r_i\right) = \quad (20) \\ = 14.99 + 5.83 + 59.98 = 20.82 + 59.98 = 80.8.$$

Thus, during the rotation of the inner race, the rolling friction force work during one rotation equals $A_i = 13.4$ Nm, in case of the outer race rotation $A_o = 20.82$ Nm (1.55 times higher), and taking into account sliding $A_{i.slid} = 20.82 + 59.98 = 80.8$ Nm, that is, 6 times higher.

In this case, the value of the conditional coefficient of friction reduced to the shaft is equal to: during the rotation of the inner race $\mu_i = \dfrac{A_i}{2\pi Q r_i} = 0.018$, for the recommended value $\mu = 0.010...0.015$, and during the rotation of the outer race $\mu_o = \dfrac{A_o}{2\pi Q r_o} = 0.081$.

3.2. Ball bearing of 2306 series. Calculation output data for the bearing of 2306 series: $d = 30$ mm, $D = 72$ mm, static load $Q = 20.6$ kN, roller diameter $d_r = 0.25(D - d) = 10.5$ mm, roller length $l_r = d_r$, $d_r = 10.5$ mm, number of rollers $z = \dfrac{5(D + d)}{(D - d)} = 12$ at $\gamma_1 = 360^\circ : 12 = 30^\circ$, bearing track radius on the inner race $r_i = 0.5d + 0.5d_r = 20.25$ mm, track radius on the outer race $r_o = 0.5d + 1.5d_r = 30.75$ mm.

The force acting on the most loaded and side rollers is determined from formulas (15) and (16).

It was proved in [9] that if a load is applied to a group of bodies according to the cosine law, then to determine the resistance to their rolling, all loads can be applied to one body, that is, the rolling resistance of all five rollers on the inner race for the linear contact is determined from the expression:

$$b_i = 1.522\sqrt{\frac{Q}{BE} \cdot \frac{r_i \cdot r_r}{r_i + r_r}}, \quad (21)$$

and on the outer race:

$$b_o = 1.522\sqrt{\frac{Q}{BE} \cdot \frac{r_i \cdot r_r}{r_i - r_r}}. \quad (22)$$

According to formula (6), the rolling friction coefficient will be respectively $k_i = 0.0636$ mm, $k_o = 0.0876$ mm. The rolling resistance of rollers: on the outer race $W_o = 343.7$ H, N, and on the inner race $W_i = 249.6$ N.

Work of rolling and sliding friction forces on the inner and outer races, Nm:

$$A_i = 2\pi r_i\left(W_i + W_o\right) = 75.4,$$

$$A_o = 2\pi\left(r_i W_i + r_o W_o\right) + \\ +2\pi Q f\left(r_o - r_i\right) = 98.1 + 135.8 = 233.9, \quad (23)$$

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmityukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

for the friction sliding coefficient of rollers on the inner race $f = 0.1$.

The motion resistance coefficient is: during the rotation of the inner race $\omega_i = \frac{W_i}{Q} = 0.012$, during the rotation of the outer race $\omega_o = \frac{W_o}{Q} = 0.017$, for the recommended value [9] for the wheel with up to 700 mm diameter $\omega = 0.02$.

4. Ball-bearing slewing gear (SG). The formula for determining the greatest pressure on the ball, given in [11], contains two unknowns: the average diameter of the rolling circle and the number of balls.

If the first unknown can be set on the basis of constructive considerations, then the number of balls can be set after finding their diameters. In addition, this formula is acceptable only if the reaction from the moment does not go beyond the support contour.

We propose finding the moment of the friction forces in the following sequence.

4.1. The slewing ring is broken, for example, into 10 sectors with a central angle $\gamma_1 = 36^\circ$ and for constructive reasons the average radius of the ball centers is taken R_{av}.

4.2. We apply the load to one conditional ball in the sector, similar to the ball bearing (15), we find the maximum vertical pressure on it from the moment, Nm:

$$N_{0м} = \frac{M}{2R_{av}\left(1 + 2\sin\gamma_1\cos\gamma_1 + 2\sin 2\gamma_1\cos 2\gamma_1\right)}. \quad (24)$$

Under the known value of vertical pressure V, the pressure on the balloon will be:

$$N_{0rt} = \left(N_{0м} + V\frac{\gamma_1}{2\pi}\right)\frac{1}{\cos\beta} \text{ Nm}, \quad (25)$$

where β is the angle between the reaction of the ball and the vertical line (usually $\beta = 45^\circ$) (Fig. 4).

Maximum pressures on conditional side balls, Nm:

$$N_{1rt} = N_{0rt}\cos\gamma_1, \quad N_{2rt} = N_{0rt}\cos 2\gamma_1. \quad (26)$$

4.3. Maximum pressure on the opposite (left) conditional ball:

$$N_{0lt} = \left(-N_{0м} + V\frac{\gamma_1}{2\pi}\right)\frac{1}{\cos\beta} \text{ Nm}. \quad (27)$$

The pressure on the left conditional side balls is found in the same way as for the right ones.

4.4. After the value R_{av}, we roughly take the diameters of the ball $d_b = 0.4R_{av}$.

4.5. We find the number of balls in one sector with geometric conditions: $n = \frac{\gamma R_{av}}{d_b + 5}$.

4.6. Maximum pressure on one ball of the right sector $P_{01} = \frac{N_{0rt}}{n}$ and the ball radius, based on Hertz contact pressure for the track radius $r_{tr} = 1.2\, r_b$ mm:

$$r_b = 0.1\, n_r\sqrt{\frac{P_0 E^2}{\sigma^3}} \text{ Nm}, \quad (28)$$

where n_r is the value depending on the ratio of tangible ellipse equation factors $\frac{A}{B} = \frac{\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_{tr}}}{\frac{1}{r_b}}$;

σ – boundary contact stresses depending on the steel grade, contact type and Brinell-hardness; for $r_{tr} = 1.2 r_b$ mm, $n_r = 0.86$ ($n_a = 1.96$; $n_i = 0.59$ [4]).

4.7. We find the final diameter of the ball, while proceeding from conditions 4.4 and 4.6 and determine the number of balls.

4.8. Based on the equations (25), (26), (27) and the number of balls, we determine the pressure on one ball per sector, the rolling resistance by the formula (7) of one of the balls of 10 sectors.

We find the rolling resistance of z balls and total pressure as the sum of values obtained by the formulas (25) and (27).

We find the rotational resistance coefficient as the ratio of the total rotational resistance to the total pressure.

Calculations are carried out according to the following data: the greatest moment acting on the slewing ring $M = 427$ kNm, the largest vertical reaction $V = 178$ kN, the average diameter of the

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmityukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

ball centers $D_{av} = 1500$ mm ($R_{av} = 750$ mm).

In this case, the vertical pressure from the moment, taking into account the side balls (24) will be $N_{0м} = 112$ kN, and pressure on the right and left conditional balls (25) and (27) $N_{0rt} = 183.6$ kN, $N_{0lt} = |133.2|$ kN. Having taken the ball diameter $d_b = 0.4R_{av} = 30$ mm and the maximum pressure on one ball, we will have:

$$P_{00} = \frac{N_{0rt}}{n} = \frac{183.6}{13} = 14.12 \text{ kN},$$

where n is determined from geometric conditions $n = \frac{\gamma R_{av}}{d_b + 5} \approx 13$. Let us check the taken ball radius

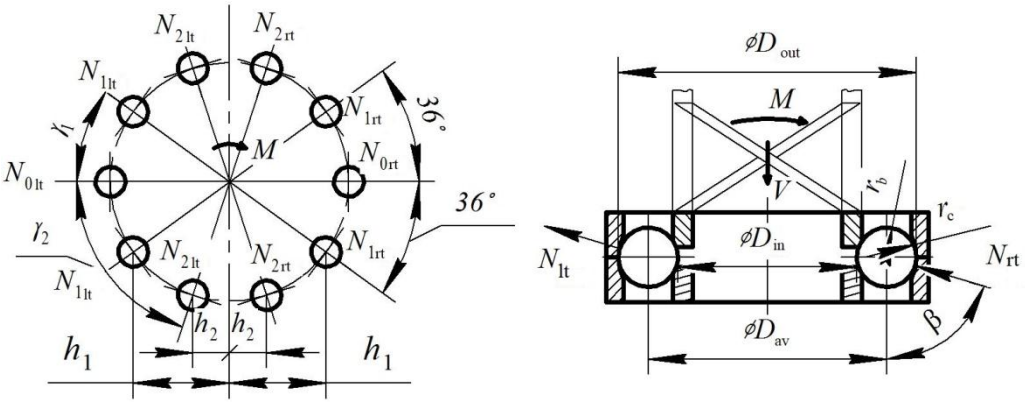


Fig. 4. Design diagram of the ball-bearing SG

by the theory of contact stresses provided that $r_{tr} = 1.2r_b$:

$$r_b = 0.1\sqrt{\frac{P_{00}E^2}{\sigma^3}} \text{ Nm}, \qquad (29)$$

where $r_b = 15$ mm for $[\sigma] = 3000$ MPa (surface hardened steel 45 [2]).

For $n_i = 0.59$ taking into account the number of balls in the sector and pressure on the conditional central and side balls (26), we find the half-width of the contact pattern:

$$b = 1.397\, n_i \sqrt[3]{\frac{P_1}{E} \cdot \frac{r_{tr} \cdot r_b}{2r_{tr} - r_b}}\,. \qquad (30)$$

The rolling friction coefficient is determined by the formula (7), and the rolling resistance subject to two rolling surfaces, i.e. $W = \frac{2kP}{r_b}$.

The distribution of pressure per ball on the ring length and the rolling resistance of each ball in the form of graphs are shown in Fig. 5 [5, 12-13].

When adding all the pressures on the balls and their resistance to rolling and disision of $W = 17.42$ kN by $P = 1025.3$ kN, we obtained the value of the reduced rotational resistance of the crane $\omega = 0.017$, that significantly exceeds the recommended value $\omega = 0.01$.

The reasons for this discrepancy may be: a) irrelevance of the value adopted here $[\sigma]$ to the valid one; b) understated value M during the experiment.

It can be emphasized that in the examples of SG calculations, given in [11, 12], the coefficient ω is taken in relation to these quantities, and in [13] $\omega = 0.04$.

Let us find the value of the rotational resistance coefficient, which falls on sliding during rolling along the ring. Usually it is taken into account only when moving along a cylinder ring. However, in the case of ball contact with both the plane and the bearing track, the contact pattern is not a point, but the ellipse with the axes $2a$ and $2b$, the length of which is determined from the Hertz contact deformation formulas.

The average pressure per ball during its rotation by 360^0 is $P_1 = 8.6$ kN. Herewith, the minor axis of the ellipse is $a = 2.2$ mm.

Concentrating the pressure at 4 points, we find that the pressure at the points v and n (see Figure 3) is $P_1 = 8.6$ kN. In this case, the vertical axis of the ellipse [4]:

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmityukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

$$a = 1.397 n_a \sqrt[3]{\frac{P_1}{E} \cdot \frac{r_{tr} \cdot r_b}{2r_{tr} - r_b}} = 2.2 \text{ mm.} \quad (31)$$

The distance from these points to R_{av} is $3a/16$, i.e. 0.41 mm.

The difference in the distance travelled by one rotation of the ring is $4\pi a = 5.15$ mm. For $2P_1 = 4.3$ kN, $f = 0.15$ (steel on steel, no lubrication), the work of sliding friction forces will be $A_{sl} = 2P_1 fl = 3.32$ Nm. Expressing the work of normal forces $2P_1$ through the reduced coefficient, we can obtain $A_{sl} = 2\omega P_1 \cdot 2\pi R_{av}$, wherefrom and is

$$\omega_c = \frac{2af}{R_{av}} = 0.00008 \quad (32)$$

about 0.01 of the recommended value of the reduced rotational resistance coefficient of the building cranes. However, it should be borne in mind that the denominator of the formula defining ω_c, includes the average radius of the ball centres R_{av}. The distribution of pressure per ball on the ring length and the rolling resistance of each ball in the form of graphs are shown in Fig. 5

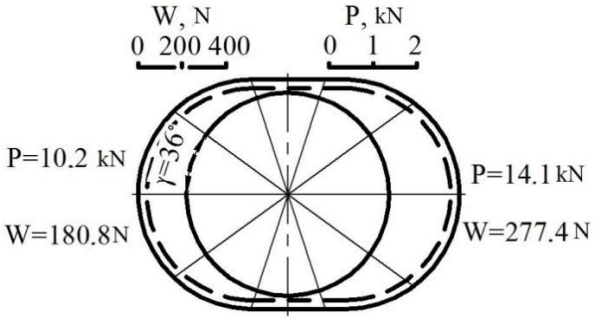


Fig. 5. Distribution of pressures per one ball and resistance to its rolling along the ring

5. Roller slewing gear. For the calculation example, we considered the slewing gear of the construction tower crane with a fixed pillar and fixed rollers (Fig. 6).

Calculation output data: construction tower crane; average diameter of the thrust ball bearing $d_{av} = 97.5$ mm; diameter of the bearing ring $D = 2R = 1\,500$ mm; horizontal reaction $H = \frac{M}{h} = 21.4$ t, where $M = 87$ t·m – the resulting moment of the rotary part in the vertical plane; $h = 4$ m –the distance between the line of application of reactions H and the journal; vertical reaction $V = 18$ t.

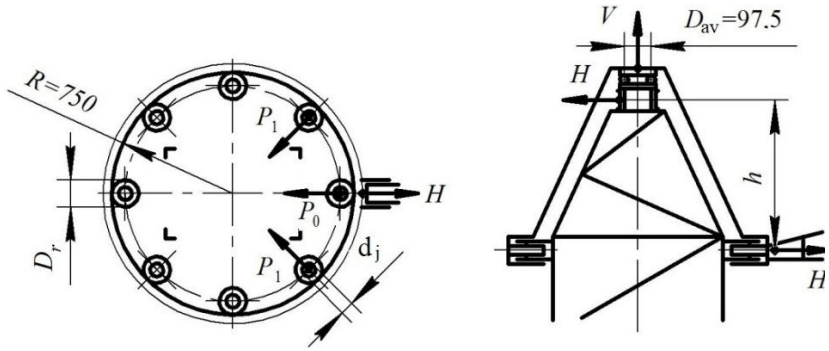


Fig. 6. Design diagram of the slewing gear of a construction tower crane with fixed rollers on roller bearings, thrust bearing and top slide journal

5.1. Calculation of support rollers. Load on the roller, located on the line of force H $P_0 = \frac{H}{1 + 2\cos\gamma} = 88.65$ kN, the force acting on each of the two side rollers is the same and is equal to $P_1 = \frac{P_0}{\cos\gamma} = 125.39$ kN.

For the roller width $B = 0.25 D_r$ mm and

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmityukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

$[\sigma] = 750$ MPa (steel 75, mode of operation 5M), its radius is determined from the Hertz contact forces formula:

$$R_r = \frac{0.418^2 P_1 E}{R\sigma^2} \pm \sqrt{\left(\frac{0.418^2 P_1 E}{R\sigma^2}\right)^2 + \frac{0.418^2 P_1 E}{0.5\sigma^2}}, \quad (33)$$

it is 130 mm.

Half-width of the contact pattern

$$b = 1.322\sqrt{\frac{P_1}{BE} \cdot \frac{RR_r}{R - R_r}}, \quad (34)$$

and it is 1.75 mm.

Rolling coefficient of the side roller (6) $k_1 = 0.32$ mm, and that located on the horizontal axis $k_o = 0.23$ mm.

Rolling resistance of three rollers:

$$W = W_0 + 2W_1 = 154 + 617 = 771 \text{ N}.$$

Due to the high pressure on the rollers and the impossibility of selecting the appropriate roller bearing, it is possible to apply in the construction tower cranes the bearings with friction sliding coefficient $\mu = 0.1$ and with the journal diameter $d_j = 0.25D_r = 65$ mm.

Friction resistance in roller journals:

$$W_j = \mu \frac{0.5d_j}{0.5D_r}(2P_1 + P_0) = 16.97 \text{ kN}. \quad (35)$$

For the top journal diameter $d_1 = 150$ mm the sliding resistance in it

$$W_{tj} = H\mu = \mu\frac{M}{h} = 21.4 \text{ kN}. \quad (36)$$

5.2. Resistance in thrust bearing. According to the value of static load on the bearing $V = 180$ kN we take the bearing of 8216 series with $d = 80$ mm, $D = 115$ mm, ball diameter $d_b = 14$ mm, number of balls $z = 20$, track radius $r_t = 0.54$ mm.

When loading one ball $P = V/20 = 9$ kN, the half-width of the contact pattern (11) $b = 0.447$ mm $(n_i = 0.49,\ n_a = 2.7)$.

The rolling friction coefficient according to formula (7) is $k = 0.084$ mm.

The rolling resistance of 20 balls $W_b = W_1 \cdot 20 = 108 \cdot 20 = 2\,160$ N. The ball sliding resistance coefficient in accordance with (32) for $f = 0.1$ (thick lubrication) $\omega_c = 0.01$ and for its rolling resistance value is $W_c = 0{,}5\omega_c V = 900$ N, which is about half of the rolling resistance and requires consideration when calculating the units with thrust bearings.

The total moment of frictional forces during the turning of a construction crane with a fixed tower consists of the resistances:

rolling of support rollers 771 N (20% of the total);

– in the roller journals 17 N (0.4% of the total);

– in the top journal 21 N (0.5% of the total);

– in the support roller from the rolling of balls 2 160 N (56% of the total) and their sliding 900 N (23% of the total) for a total rotational resistance value of 3 870 N.

6. Rotational resistance of SG rollers with stationary and fixed rollers. In some construction cranes, the support rollers are stationary (Fig. 7, a) or movable (Fig. 7, b). Load per a roller $P = \frac{H}{2\cos\alpha}$.

It is obviously that for cylindrical rollers, the values of the maximum contact stresses will be different, and the diameters of the rollers and their rolling support on the slewing ring will have different values as well.

For calculations we take the same radius, as in the previous example, $D = 2R = 1\,500$ mm, the horizontal reaction is equal to $H = 25$ kN, the boundary contact stress is $[\sigma] = 750$ MPa, the roller width $B = 0.25D_r = 0.5R_r$.

The radius of the roller for the diagram *a* (Fig. 7) can be found from formula (33), by replacing P_1 with $H/\cos\alpha$. According to the taken values $R_r = 60$ mm, the journal radius is taken to be equal to $r_j = 15$ mm for cases *a* and *b* (Fig. 7).

The radius of the roller for the diagram *b* (Fig. 7) can be found by the same formula (33) in the case of change of the sign under the radical to the inverse, and it will be equal to $R_r = 50$ mm.

Half-width of the contact patterns is found by the formula (34) with the change of the sign to the inverse, according to the diagram *b* before R_r (see Figure 7).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmityukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

Half-width of the contact patterns (Fig. 7):

– according to the diagram a $в = 0.11$ mm, according to the diagram b – $в = 0.12$ mm;

– rolling resistances of the two rollers are respectively $W = 17.8$ N and $W = 23.4$ N.

The resistance in the journals of the two rollers according to the first and second diagrams $f = 0.1$ is $W_j = 2\dfrac{H}{\cos\alpha} f = 5.77$ kN, that is more than two orders higher than the rolling resistance of rollers.

Originality and practical value. The paper proposes to use analytical dependences to determine the reduced rotational resistance coefficient for linear and point contacts using Hertz contact deformations theory and Tabor partial analytic dependencies. The obtained dependencies will allow to design new types of slewing gear assemblies of the construction machines and to find additional rotational supports, which depend on the overall dimensions, shape and type of material from which the components of the assembly are made and do not contain any empirical data.

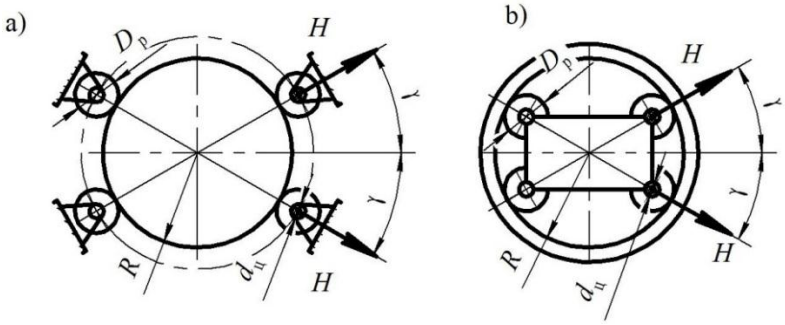


Fig. 7. Design diagram of the slewing gear of cranes:
a – with stationary rollers; *b* – with moving rollers

Conclusions

The analysis of the dependencies and graphs obtained makes it possible to draw the following conclusions and suggestions:

– rolling friction coefficient and rolling resistance of the crane type wheels practically linearly depends on the wheel radius, and the coefficient of hysteresis losses linearly decreases from 0.9 to 0.6 per linear contact and linearly increases from 1.01 to 1.06 per point contact;

– the friction coefficient value of rolling bearings, reduced to the shaft, depends on whether inner or outer race rotates;

– during the outer race rotation on a different path, passed by a ball or a roller on the tracks of the outer and inner races, the friction coefficient reduced to the shaft, which falls on pure rolling, is 1.3...1.5 times higher than its value during the inner race rotation, and taking into account the sliding of balls or rollers on the inner race, it is 4...6 times higher than its size in ball bearings and 3 ... 4 times higher – in roller bearings;

– due to the high value of friction in case of outer race rotation, during the design of rolling assemblies, it is necessary to avoid such solutions, and, if it is impossible, to take into account this fact both for the determination of resistance and for the lubrication of the assembly;

– the given value of the resistance of the construction crane with the ball-bearing sewing gear is obtained analytically, is 70% higher than the one recommended by supplier;

– in case of construction cranes with a turning tower, the greatest resistance to rotation falls on support rollers (about 80%).

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бондаренко, Л. М. Деформаційні опори в машинах / Л. М. Бондаренко, М. П. Довбня, В. С. Ловєйкін. – Дніпропетровськ : Дніпро-VAL, 2002. – 200 с.
2. Бондаренко, Л. М. Уточнення розрахункової схеми навантаження групи тіл кочення / Л. М. Бондаренко, С. В. Ракша, М. Г. Брильова // Підйомно-транспортна техніка. – 2005. – № 1. – С. 47–52.
3. Влияние сопротивлений качению на динамику механизмов подъема транспортирующих машин / В. М. Богомаз, Л. Н. Бондаренко, О. В. Богомаз, М. Г. Брылева // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 2 (74). – С. 124–132. doi: 10.15802/stp2018/130441

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmityukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

4. Грузоподъёмные машины : учебник для вузов / М. П. Александров, Л. Н. Колобов, М. А. Лобов [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1986. – 400 с.
5. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – Москва : Мир, 1989. – 510 с.
6. Иванов, М. Н. Детали машин. Курсовое проектирование / М. Н. Иванов, В. Н. Иванов. – Москва : Высш. школа, 1975. – 551 с.
7. Ковальський, Б. С. Вопросы передвижения мостовых кранов / Б. С. Ковальський ; Восточноукр. нац. ун-т. – Луганск : [б. и.], 2000. – 63 с.
8. Кожевников, С. Н. Теория механизмов и машин / С. Н. Кожевников. – Москва : Машиностроение, 1969. – 584 с.
9. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев : Наук. думка, 1988. – 736 с.
10. Расчеты грузоподъёмных и транспортирующих машин / Ф. К. Иванченко, В. С. Бондарев, Н. Т. Колесник, В. Я. Барабанов. – Киев : Выща школа, 1975. – 520 с.
11. Справочник по кранам : в 2 т. / М. П. Александров, М. М. Гохберг, А. А. Ковин [и др.] ; под общ. ред. М. М. Гохберга. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – Т. 2. – 559 с.
12. Технологічні процеси під час відновлення опорно-обертального пристрою будівельних кранів / А. М. Храмцов, В. М. Богомаз, І. М. Щека, І. Є. Крамар // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : тези доп. 77 Міжнар. наук.-практ. конф. (Дніпро, 11–12 трав. 2017 р.) / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2017. – С. 315–316.
13. Akhavian, R. Remote Monitoring of Dynamic Construction Processes Using Automated Equipment Tracking / R. Akhavian, A. Behzadan // Construction Research Congress (May 21–23, 2012). – West Lafayette, Indiana, United States, 2012. – P. 1360–1369. doi: 10.1061/9780784412329.137
14. Criteria for the selection of sustainable onsite construction equipment / M. Waris, M. Shahir Liew, M. F. Khamidi, A. Idrus // International Journal of Sustainable Built Environment. – 2014. – Vol. 3. – Iss. 1. – P. 96–110. doi: 10.1016/j.ijsbe.2014.06.002
15. Eldredge, K. R. The mechanism of roiling friction. I. The plastic range. II. The elastic range / K. R. Eldredge, D. Tabor // Wear. – 1958. – Vol. 1. – Iss. 5. – P. 452. doi: 10.1016/0043-1648(58)90178-9
16. Holt, G. Analysis of interrelationships among excavator productivity modifying factors / G. Holt, D. Edwards // International Journal of Productivity and Performance Management. – 2015. – Vol. 64. – Iss. 6. – P. 853–869. doi: 10.1108/IJPPM-02-2014-0026
17. Pries, F. Innovation in the construction industry: the dominant role of the environment / F. Pries, F. Janszen // Construction Management and Economics. – 1995. – Vol. 13. – Iss. 1. – P. 43–51. doi : 10.1080/01446199500000006
18. Slemenmeyer, H. Bearings for large capacity crane applications / H. Slemenmeyer, S. Aaronson // SAE Technical Paper Series. – 1983. doi: 10.4271/831373
19. Su, X. Improving Construction Equipment Operation Safety from a Human-centered Perspective / X. Su, J. Pan, M. Grinter // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 118. – P. 290–295. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.429
20. Takahashi, H. Measurement of the rolling element load distribution in turntable bearings / H. Takahashi, H. Omary // SAE Technical Paper Series. – 1985. doi: 10.4271/850762
21. Yip, H. Predicting the maintenance cost of construction equipment: Comparison between general regression neural network and Box–Jenkins time series models / H. Yip, H. Fan, Y. Chiang // Automation in Construction. – 2014. – Vol. 38. – P. 30–38. doi: 10.1016/j.autcon.2013.10.024

Л. М. БОНДАРЕНКО[1], О. П. ПОСМІТЮХА[2*], К. Ц. ГЛАВАЦЬКИЙ[3].

[1]Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38(056)3731518, ел. пошта bondarenko-l-m2015@yandex.ua, ORCID 0000-0002-2212-3058
[2*]Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 150 95 00, ел. пошта AleksandrP@3g.ua, ORCID 0000-0002-9701-3873
[3]Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 816 99 90, ел. пошта kazimir.glavatskij@gmail.com, ORCID 0000-0003-0921-9845

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmitjukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. ВісникДніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПРИВЕДЕНОГО КОЕФІЦІЄНТА ОПОРУ ОБЕРТАННЮ МЕХАНІЗМІВ ПОВОРОТУ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН

Мета. Проектування нових зразків будівельних машин тісно пов'язане з розробкою механізмів повороту, а ті, в свою чергу, мають привід, потужність та габарити якого залежать від опору повороту та приведеного коефіцієнта тертя у вузлах. Відсутність аналітичних залежностей для визначення приведеного коефіцієнта тертя обертанню будівельних машин, по-перше, обмежує можливості конструктора у виборі матеріалів, а по-друге, не дає можливості приймати оптимальні конструктивні рішення. Тому мета статті – знайти аналітичні рішення для визначення опорів обертанню в механізмах повороту будівельних машин, що дозволяє проектувати досконаліші механізми й машини у цілому. Існуючі методики спираються на емпіричні залежності та експериментальні коефіцієнти, що зменшують точність підрахунків, збільшують габарити та вартість робіт. Пропонується підвищити точність та спростити процес визначення опору повороту й величину приведеного коефіцієнта опору обертанню будівельних баштових кранів. **Методика.** Досягти поставленої мети можна за допомогою аналітичних залежностей для визначення коефіцієнтів тертя кочення за лінійного й точкового контактів. Це дозволить точніше знайти величину коефіцієнта опору, а конструктору під час розрахунків вжити цілеспрямованих заходів щодо його зменшення, використовуючи механічні константи матеріалів вузлів кочення і їх геометричні параметри. Розрахунок ґрунтується на теорії контактних деформацій Герца й теорії плоского руху точок тіла. **Результати**. Отримані залежності дозволять аналітично знайти опір кочення роликів у будівельних машинах із нерухомою й обертовою колонами, із круговими поворотними пристроями, а також у кулькових і роликових опорно-поворотних кругах. З'ясовані значення коефіцієнтів опору обертанню для деяких їх типів механізмів дають близькі значення з рекомендованими, а для деяких – істотно відрізняються і вимагають їх уточнення у довідкових величинах. **Наукова новизна** роботи полягає у використанні аналітичних залежностей для визначення приведеного коефіцієнта опору обертанню за лінійного і точкового контактів із використанням теорії контактних деформацій Герца та частково аналітичних залежностей Табора. **Практична значимість**. Отримані залежності дозволять проектувати нові типи вузлів обертання механізмів повороту будівельних машин і виявляти додаткові опори обертанню.

Ключові слова: будівельна машина; опір; обертання; поворот; поворотний круг; рейка; тертя кочення

Л. Н. БОНДАРЕНКО[1], А. П. ПОСМИТЮХА[2*], К. Ц. ГЛАВАЦКИЙ[3]

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

[2*]Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (066) 150 95 00, эл. почта AleksandrP@3g.ua, ORCID 0000-0002-9701-3873

[3]Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (095) 816 99 90, эл. почта kazimir.glavatskij@gmail.com ORCID 0000-0003-0921-9845

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЮ МЕХАНИЗМОВ ПОВОРОТА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Цель. Проектирование новых образцов строительных машин тесно связано с разработкой механизмов поворота, а те, в свою очередь, имеют привод, мощность и габариты которого зависят от сопротивления поворота и приведенного коэффициент трения в узлах. Отсутствие аналитических зависимостей для определения приведенного коэффициента трения вращению строительных машин, во-первых, ограничивает возможности конструктора в выборе материалов, а во-вторых, не дает возможности принимать оптимальные конструктивные решения. Поэтому цель статьи – найти аналитические решения для определения сопротивлений вращению в механизмах поворота строительных машин, которые позволят проектировать более совершенные механизмы и машины в целом. Существующие методики опираются на эмпирические зависи-

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2019/159499

© L. M. BondarenkO, O. P. Posmitjukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

мости и экспериментальные коэффициенты, уменьшающие точность подсчетов, увеличивающие габариты и стоимость работ. Предлагается повысить точность и упростить процесс определения сопротивления поворота и величину приведенного коэффициента сопротивления вращению строительных башенных кранов. **Методика.** Достичь поставленной цели можно с помощью аналитических зависимостей для определения коэффициентов трения качения при линейном и точечном контактах. Это позволит точнее найти величину коэффициента сопротивления, а конструктору при расчетах принять целенаправленные меры по его уменьшению, используя механические константы материалов узлов качения и их геометрические параметры. Расчет основывается на теории контактных деформаций Герца и теории плоского движения точек тела. **Результаты.** Полученные зависимости позволят аналитически найти сопротивление качению роликов в строительных машинах с неподвижной и вращающейся колоннами, с круговыми поворотными устройствами, а также в шариковых и роликовых опорно-поворотных кругах. Найденные значения коэффициентов сопротивления вращению для некоторых типов механизмов дают близкие значения с рекомендованными, а для некоторых – существенно отличаются и требуют их уточнения в справочных величинах. **Научная новизна** работы заключается в использовании аналитических зависимостей для определения приведенного коэффициента сопротивления вращению для линейного и точечного контактов с использованием теории контактных деформаций Герца и частично аналитических зависимостей Табора. **Практическая значимость**. Полученные зависимости позволят проектировать новые типы узлов вращения механизмов поворота строительных машин и выявлять дополнительные опоры вращению.

Ключевые слова: строительная машина; сопротивление; вращения; поворот; поворотный круг; рельс; трение качения

REFERENCES

1. Bondarenko, L. M., Dovbnia, M. P., & Loveikin, V. S. (2002). *Deformatsiini opory v mashynakh*. Dnipropetrovsk: Dnipro-VAL. (in Ukrainian)
2. Bondarenko, L. M., Raksha, S. V., & Brylova, M. H. (2005). Utochnennia rozrakhunkovoi skhemy navantazhennia hrupy til kochennia. *Pidiomno-transportna tekhnika, 1,* 47-52. (in Ukrainian)
3. Bohomaz, V. M., Bondarenko, L. M., Bohomaz, O. V., & Brylyova, M. G. (2018). Effect of resistance to rolling on the dynamics of the lifting mechanisms of the transporting mac. *Science and Transport Progress. 2(74),* 124-132. doi: 10.15802/stp2018/130441 (in Russian)
4. Aleksandrov, M. P., Kolobov, L. N., Lobov, M. A. Nikolskaya, T. A., & Polkovnikov, V. S. (1986). *Gruzopodemnye mashiny: Uchebnik dlya vuzov*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
5. Dzhonson, K. (1989). *Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya.* Moscow: Mir. (in Russian)
6. Ivanov, M. N., & Ivanov, V. N. (1975). *Detali mashin. Kursovoe proektirovanie*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
7. Kovalskiy, B. S. (2000). *Voprosy peredvizheniya mostovykh kranov*. Lugansk. (in Russian)
8. Kozhevnikov, S. N. (1969). *Teoriya mekhanizmov i mashin*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
9. Pisarenko, G. S., Yakovlev, A. P., & Matveev, V. V. (1988). *Spravochnik po soprotivleniyu materialov*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
10. Ivanchenko, F. K., Bondarev, V. S., Kolesnik, N. P., & Barabanov, V. Y. (1975). *Raschety gruzopodemnykh i transportiruyushchikh mashin*. Kiev: Vishcha shkola. (in Russian)
11. Aleksandrov, M. P., Gokhberg, M. M., Kovin, A. A., & Gokhberg, M. M. (Ed). (1988). *Spravochnik po kranam* (Vol. 1-2). Leningrad: Mashinostroenie. (in Russian)
12. Khramtsov, A. M., Bohomaz, V. M., Shcheka, I. M., & Kramar, I. Y. (2017). Tekhnolohichni protsesy pid chas vidnovlennia oporno-obertalnoho prystroiu budivelnykh kraniv. *The Problems and Prospects of railway transport*: 77th International scientific and practical conference. Dnipro: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
13. Akhavian, R., & Behzadan, A. H. (2012). Remote Monitoring of Dynamic Construction Processes Using Automated Equipment Tracking. *Construction Research Congress 2012*. West Lafayette, Indiana, United States. doi: 10.1061/9780784412329.137 (in English)
14. Waris, M., Shahir Liew, M., Khamidi, M. F., & Idrus, A. (2014). Criteria for the selection of sustainable onsite construction equipment. *International Journal of Sustainable Built Environment, 3(1),* 96-110. doi: 10.1016/j.ijsbe.2014.06.002 (in English)
15. Eldredge, K. R., & Tabor, D. (1958). The mechanism of rolling friction. I. The plastic range. II. The elastic range. *Wear, 1(5),* 452. doi: 10.1016/0043-1648(58)90178-9 (in English)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmitjukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

16. Holt, G. D., & Edwards, D. (2015). Analysis of interrelationships among excavator productivity modifying factors. *International Journal of Productivity and Performance Management, 64(6),* 853-869. doi: 10.1108/ijppm-02-2014-0026 (in English)
17. Pries, F., & Janszen, F. (1995). Innovation in the construction industry: the dominant role of the environment. *Construction Management and Economics, 13(1),* 43-51. doi: 10.1080/01446199500000006 (in English)
18. Siemensmeyer, H., & Aaronson, S. F. (1983). Bearings for Large Capacity Crane Applications. *SAE Technical Paper Series*. doi: 10.4271/831373 (in English)
19. Su, X., Pan, J., & Grinter, M. (2015). Improving Construction Equipment Operation Safety from a Human-centered Perspective. *Procedia Engineering, 118,* 290-295. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.429 (in English)
20. Takahashi, H., & Omory, T. (1985). Measurement of the Rolling Element Load Distribution in Turntable Bearings. *SAE Technical Paper Series.* doi: 10.4271/850762 (in English)
21. Yip, H., Fan, H., & Chiang, Y. (2014). Predicting the maintenance cost of construction equipment: Comparison between general regression neural network and Box–Jenkins time series models. *Automation in Construction, 38,* 30-38. doi: 10.1016/j.autcon.2013.10.024 (in English)

Received: Sep. 06, 2018
Accepted: Jan. 16, 2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159499
© L. M. BondarenkO, O. P. Posmitjukha, K. T. Hlavatskyi, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. ВісникДніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

УДК 621.865.8

Р. П. ПОГРЕБНЯК[1*], М. Р. ПОГРЕБНЯК[2*]

[1*]Каф. «Прикладна механіка», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 743 32 76, ел. пошта pogrebnyakk@ukr.net,ORCID 0000-0002-4685-1818
[2*]Каф. «Автоматизація та комп'ютерні системи», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, ел. пошта mpogrebnyakk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2961-3383

КІНЕМАТИЧНИЙ СИНТЕЗ КРИВОШИПНО-ПОВЗУНКОВОГО МЕХАНІЗМУ ЗАХОПЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМ ІНДЕКСОМ ПЕРЕДАЧІ РУХУ

Мета. Основна мета роботи – виконати кінематичний синтез схем кривошипно-повзункового захоплювального пристрою за критерієм сталості потужності приводу механізму з обмеженнями щодо припустимих кутів тиску в кінематичних парах. **Методика.** Досягнення поставленої мети здійснюється засобами теорії механізмів і машин за допомогою аналітичного методу трикутників Озолса кінематики пласких стрижньових механізмів та математичним моделюванням руху ланок. **Результати.** Десятиланковий стрижневий механізм захоплювача побудований на основі спареного паралелограмного кривошипно-повзункового механізму з ведучим повзуном. Для захоплювача, побудованого на основі стрижньової схеми, доцільно оптимальне проектування з використанням критеріїв передавання руху, або індексів передачі. Для забезпечення постійного зусилля затискання для об'єктів різної товщини бажано, щоб потужність приводу була сталою, а енергетичні витрати мінімальними. За критерій оптимізації взято відношення швидкості ведучої ланки механізму до проекції вектора швидкості точки веденої ланки на напрям вектора сили затискання (енергетичний трансмісійний індекс). Найменші енергетичні витрати мають місце, коли індекс близький до одиниці. Отримані аналітичні залежності для визначення швидкісних функцій центрального й дезаксіального кривошипно-повзункового механізму захоплювача, які зручні для аналізу й моделювання. На їх основі виконаний енергетичний синтез геометричних параметрів механізму захоплювального пристрою за критерієм найменшого відхилення від одиниці енергетичного трансмісійного індексу. З'ясовано, що практичне використання захоплювача на основі центрального кривошипно-повзункового механізму за даним критерієм украй обмежене. Розширює можливості захоплювача використання в його схемі дезаксіального кривошипно-повзункового механізму, а найкращі результати можуть бути отримані в схемі, де дезаксіал менший за кривошип. Визначені конкретні значення відносних параметрів довжин ланок і діапазони повороту кривошипа центрального й дезаксіального кривошипно-повзункового механізму захоплювача, що найкраще відповідають критерію оптимізації й задовольняють обмеженням за кутами тиску. **Наукова новизна.** Уперше введений новий критерій передавання руху – енергетичний трансмісійний індекс. За цим критерієм проведений кінематичний синтез захоплювального пристрою, побудованого на основі спареного кривошипно-повзункового механізму. **Практична значимість.** Запропоновані практичні рекомендації щодо відносних розмірів і розташування ланок механізму для центрального й дезаксіального кривошипно-повзункового механізму захоплювача, які реалізують вимоги критерію оптимізації та обмеження щодо припустимих кутів тиску.

Ключові слова: механічний захоплювач; передавання руху; енергетичний трансмісійний індекс; швидкісна функція; кут тиску

Вступ

Захоплювальні пристрої (захоплювачі)промислових роботів, які призначені для захоплення й утримання об'єкта маніпулювання, –це окремі нескладні виконавчі механізми з індивідуальним приводом. Кінематичні схеми механічних стрижньових захоплювачів із невеликою кількістю рухомих ланок мають,переважно, один ступінь свободи і відповідно один двигун приводу. Переважна більшість таких механізмів є діадними з однорухомими кінематичними з'єднаннями.

Останнім часом опубліковано багато робіт із дослідження й проектування схем і конструкцій захоплювачів різного призначення, у тому числі й механічних стрижньових. Широко висвіт-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159493
© Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. ВісникДніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

лені результати розробок нових кінематичних схем захоплювачів, методики й результати кінематичних і кінетостатичних розрахунків, проблеми компонування й конструювання вузлів і деталей захоплювальних пристроїв[1, 3, 8, 9, 11, 17, 18]. Проте залишаються поза увагою питання метричного синтезу схеми механізму, хоча визначення його оптимальних розмірів і положень ланок, встановлення залежностей між швидкостями й пришвидшеннями точок є початковою й важливою задачею проектувальника [5, 10].

Під час проектування схеми захоплювального механізму важливо забезпечити, щоб швидкість затискних елементів у момент контакту з об'єктом маніпулювання була сталою й мінімально можливою для уникнення динамічних перенавантажень. З цієї ж причини кутові швидкості й кутові пришвидшення вихідних ланок механізму також повинні бути мінімальні. Для захоплювачів, побудованих на основі стрижньових схем, доцільне оптимальне проектування з використанням критеріїв передавання руху або індексів передачі[5, 12–15,19,20]. Існує декілька критеріїв якості передачі руху, і останнім часом таких показників пропонується більше: на основі геометричної кінематики, відносних величин сил і реакцій у кінематичних парах, кутів тиску й передавання, погрішностей, чутливості до зміни розмірів ланок механізму, коефіцієнта корисної дії, існування збірок механізму, швидкостей, пришвидшень та ривка окремих і вихідних ланок механізму. Між більшістю критеріїв існує безумовний зв'язок. Великі кути передачі(малі кути тиску) практично гарантують невисокі швидкості й пришвидшення і відсутність ривків, нечутливість механізму до відхилення розмірів ланок від номінальних, інших погрішностей. Щодо енергетичних та силових критеріїв якості руху, то між ними також існує певний зв'язок.

Отримати механізм, параметри якого задовольняють усім критеріям передавання руху, неможливо. При проектуванні у першу чергу задовольняються вимоги необхідних (більш вагомих) критеріїв, і, по можливості, – вимоги інших критеріїв.

У механізмах захоплювачів для забезпечення постійного зусилля затискання для об'єктів різної товщини бажано, щоб потужність приводу була сталою, а енергетичні витрати мінімальними. За умови рівності потужностей рухомих сил $P_р$ і сил опору $P_о$ (зневажаючи силами інерції рухомих мас механізму), маємо $P_p V_{вх} + P_o V_{вих} \cos\alpha = 0$, де α – кут між вектором сили $P_о$й вектором швидкості $V_{вих}$ точки прикладання цієї сили. За бажаного $P_o = const$ зусилля $P_р$ на вході механізму змінюються за законом зміни $P_p = P_o \frac{V_{вих}}{V_{вх}} \cos\alpha$ й енергетичні витрати тим менші, чим менше це відношення відрізняється від одиниці $\frac{V_{вих}}{V_{вх}} \cos\alpha = U_V \sim 1$. Тобто бажано, щоб U_V було не тільки постійним, але ще й близьким до одиниці. Доцільно ввести енергетичний критерій якості передавання руху: відхилення U_V від одиниці назвемо ***енергетичним індексом передачі руху***(енергетичний трансмісійний індекс).

Як відомо, критерії передавання руху повинні бути суто геометричними [5, 19, 20], швидкісна передавальна функція від швидкостей не залежить, а залежить від розташування та відносних розмірів ланок механізму.

Кінематичний синтез за подібним критерієм передавання руху для інших механізмів стрижньових захоплювачів виконаний у роботах[7, 8].

Мета

Основна мета роботи – виконати геометричний синтез схем кривошипно-повзункового захоплювального пристрою за критерієм сталості потужності приводу.

Методика

Досягнення поставленої мети здійснюється засобами теорії механізмів і машин за допомогою аналітичного методу трикутників Озолса кінематики пласких механізмів і математичним моделюванням руху ланок захоплювального пристрою.

Результати

Десятиланковий стрижньовий механізм захоплювача побудований на основі спареного паралелограмного центрального кривошипно-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159493
© Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. ВісникДніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

повзункового механізму з ведучим повзуном. Ведучий повзун 1 (рис.1) впливає на шатуни 2 і 6, що з'єднані коромислами 3 і 7 зі станиною 0. На кінці шатунів шарнірно закріплені ланки 4 й 8, що містять затискні елементи захоплювача. Додані діади 4–5 і 8–9 утворюють паралелограм і забезпечують плоскопаралельний рух затискних елементів.

У разі затискання об'єктів різної товщини орієнтація затискних елементів захоплювача залишається незмінною, однак його центр переміщується вздовж поздовжньої осі. Тому використання захоплювача, побудованого на цій схемі, для базування об'єкта обмежене.

Структурний аналіз такого механізму захоплювача виконаний у роботі [6].

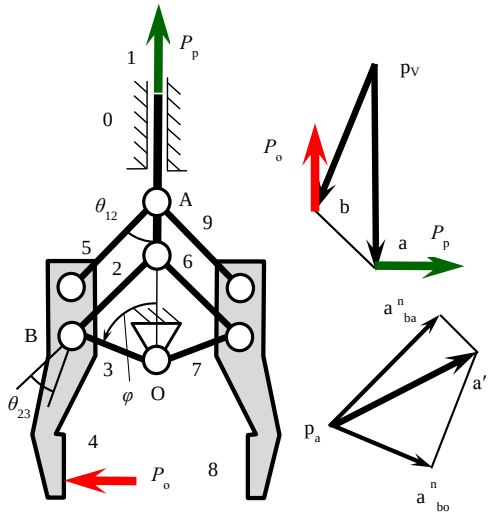


Рис.1. Кінематична схема й плани швидкостей і пришвидшень центрального кривошипно-повзункового механізму захоплювача

Fig. 1. Kinematic scheme and plans for velocities and accelerations of the central crank-slider mechanism of the gripping device

Аналітичні дослідження кінематики найпростіших механізмів, до яких належить кривошипно-повзунковий механізм, добре алгоритмізовані[2, 4, 16] і мають високу точність результатів. У складі механізму захоплювача є тільки двоповідкові структурні групи, і механізм має станину, а в основі діадних механізмів лежить змінна форма діади, яка є змінним трикутником. Тому аналітичні кінематичні залежності, отримані на основі методу трикутників, нескладні. Аналітична кінематика кривошипно-повзункового механізму добре описана у класичних підручниках із теорії механізмів, однак для визначення параметрів руху залежності містять, крім незалежного кута нахилу кривошипа φ,ще й кут між напрямом кривошипа й шатуна. Методом трикутників [4] отримана формула визначення швидкості в функції тільки параметра φ:

$$V_A = -V_B \sin\varphi - \frac{V_B r \cos\varphi}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin\varphi^2}} \sin\varphi \qquad (1)$$

або

$$U_{AB}(\varphi) = \frac{V_A}{V_B} = -(1 + \frac{r\cos\varphi}{\sqrt{l^2 - r^2\sin\varphi^2}})\sin\varphi, \quad (2)$$

Введемо відносний параметр розмірів ланок – $\sigma = r/l$, тоді залежність (2) прийме форму, зручну для синтезу й моделювання:

$$U_{AB}(\varphi,\sigma) = -(1 + \frac{\sigma\cos\varphi}{\sqrt{1-\sigma^2\sin\varphi^2}})\sin\varphi. \qquad (3)$$

Сформуємо індекс передачі руху (рис. 1):

$$U_V(\varphi,\sigma) = -(1 + \frac{\sigma\cos\varphi}{\sqrt{1-\sigma^2\sin\varphi^2}})\tan\varphi. \qquad (4)$$

Як бачимо,індекс залежить від двох параметрів, графік його раціональних і невід'ємних значень представлений на рис. 2, *а*.

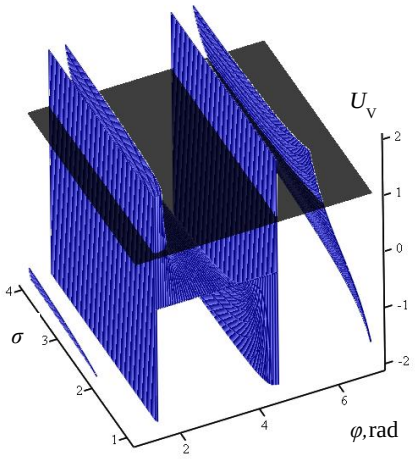
На рис. 2 просторова поверхня залежності (4) перетнута площиною U_V= 1, де лінія перетину задовольняє умові оптимізації. Як видно, функція перетину не має локальних екстремумів і має лише одне рішення для кожного окремого значення σ. Для розповсюджених значень σ на рис. 2, *б* побудовані залежності індексу передачі у можливому робочому діапазоні φ експлуатації захоплювача. Зон, де $|U_V|$= 1, по дві симетричні, і всі вони нетривалі (рис. 2, *в*). За припущення симетричного відхилення Δ/2 від $|U_V|$ = 1 стає можливим визначення діапазону зміни кута повороту кривошипа для взятого σ. Механізм можна експлуатувати у діапазоні 0° <φ < 180°, і нижча межа цього діапазону φ_{min} відповідає нижньому Δ/2, а значення швидкісної функції у цьому діапазоні будуть симетрично змінюватися від (1 + Δ/2) до (1 – Δ/2).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159493
© Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк, 2018

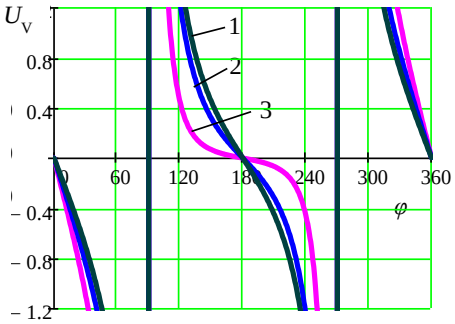
ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. ВісникДніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

а – a



б – b



в – c

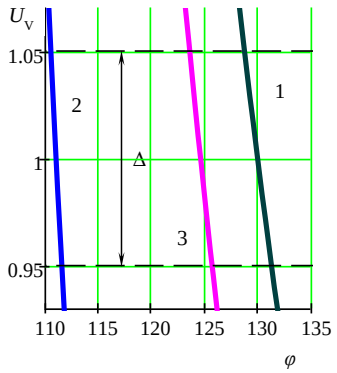


Рис.2. Перетин об'ємної фігури залежності $U_V(\varphi,\sigma)$ центрального кривошипно-повзункового механізму площиною критерію оптимізації(*а*), графіки функції $U_V(\varphi,\sigma)$ для деяких розповсюджених значень σ(*б*), для робочої зони експлуатації (*в*)

Fig. 2. Intersection of the volume figure of the $U_V(\varphi,\sigma)$ dependence of the central crank-slider mechanism by the plane of the optimization criterion (*a*), the graphic of the $U_V(\varphi, \sigma)$ functions for somecommon values of σ (*b*), for the working area of operation (*c*)

Якщо прийняти припустиме відхилення 10 % від критерію оптимізації $|U_V|$= 1, тобто 1±0,05, то реалізувати таку вимогу зможуть механізми з різними параметрами σ (рис. 2, *в*), однак кут їх експлуатації φ не перевищує 2°, що є недостатнім, і практичне використання такого механізму за даним критерієм неможливе.

Суттєво розширює можливості захоплювача використання у його схемі дезаксіального кривошипно-повзункового механізму(рис. 3).

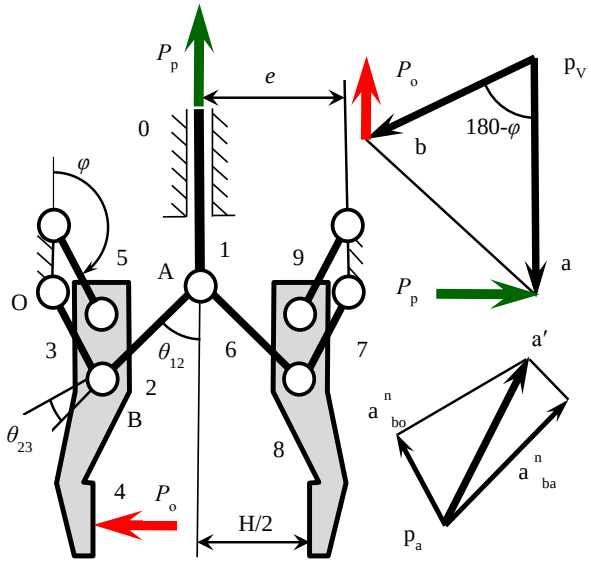


Рис. 3. Кінематична схема й плани швидкостей і пришвидшень дезаксіального кривошипно-повзункового механізму захоплювача

Fig. 3. Kinematic scheme and plans for velocities and accelerations of the de-axial crank-slider mechanism of the gripping device

Методом трикутників[4] отримана аналітична залежність визначення швидкості для такого механізму:

$$V_B = -V_A \sin\varphi - \frac{V_A(e + r\cdot\sin\varphi)\cos\varphi}{\sqrt{l^2 - (e + r\cdot\sin\varphi)^2}}, \qquad (5)$$

$$U_{AB} = -\sin\varphi - \frac{(e + r\cdot\sin\varphi)\cos\varphi}{\sqrt{l^2 - (e + r\cdot\sin\varphi)^2}}.$$

Після введення безрозмірного параметра дезаксіала $\gamma = e/l$ та алгебраїчних перетворень отримаємо залежність для визначення трансмісійного індексу:

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159493
© Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. ВісникДніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

$$U_V(\varphi,\sigma,\gamma) = -\tan\varphi - \frac{\sin\varphi - \gamma}{\sqrt{\frac{1}{\sigma^2} - (\sin\varphi - \gamma)^2}}. \quad (6)$$

Функція (6) залежить від трьох геометричних параметрів механізму. Для механізму, в якому радіус кривошипа дорівнює дезаксіалу $r=e$ або $\sigma = \gamma$, формула (6) спрощується до залежності від двох параметрів:

$$U_V(\varphi,\sigma) = -\tan\varphi - \frac{\sin\varphi - \sigma}{\sqrt{\frac{1}{\sigma^2} - (\sin\varphi - \sigma)^2}}. \quad (7)$$

Об'ємний графік цієї залежності представлений на рис. 4, *а*. Для деяких значень σ, де функції U_V мають локальний мінімум поблизу критерію оптимізації, побудовані графіки на рис. 4, *б*. Як видно, що такі функції існують тільки в другому квадранті. Графік функції, що задовольняє умові десятивідсоткового відхилення від критерію оптимізації, представлений на рис. 4, *в*. Останній побудований для єдиного можливого значення σ = 0,905, а діапазон кута експлуатації механізму лежить межах 142° < φ < 170°.

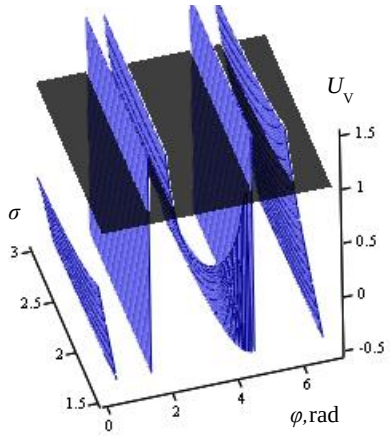
Додаткові обмеження синтезу здійснює дотримання припустимої величини кутів тиску, які в деяких положеннях механізму можуть виходити за межі дозволених. Кут тиску – гострий кут між вектором сили, прикладеної до веденої ланки, і вектором швидкості точки прикладання рушійної сили. Чим він менший, тим якість передачі руху вища. Значення кута тиску в поступальній парі повзун – напрямна визначимо за залежністю (8), його допустиме значення прийнято $[\theta_{12}] \le 30^{\circ}$[2].

Припустимий кут тиску в обертальній парі 2–3 може бути прийнятий більшим $[\theta_{23}] \le 45°$ [2].

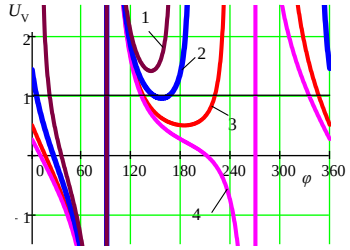
З урахуванням обмежень за допустимим кутом тиску кут експлуатації механізму звужується до 12° (142° < φ < 154°), де нижню границю діапазону обмежує критерій оптимізації, а верхню – допустимий кут тиску в парі 0 – 1. У цьому діапазоні кут тиску в обертальній парі 2 – 3 не перевищує допустимого.

$$\theta_{12}(\varphi) = \arcsin[\sigma(1 - \sin\varphi)]. \quad (8)$$

а – a



б – b



в – c

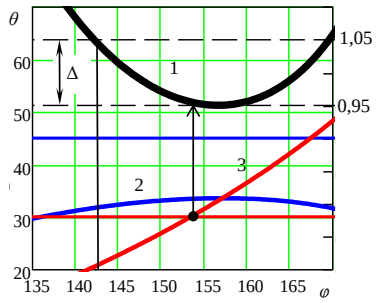


Рис. 4. Перетин об'ємної фігури залежності $U_V(\varphi,\sigma)$ дезаксіального кривошипно-повзункового механізму ($r=e$) площиною критерію оптимізації (*а*), деякі функції U_V з локальним мінімумом поблизу критерію оптимізації (1–σ = 1,1; 2–σ = 0,905; 3– σ = 0,67) і без локального мінімуму (4–σ = 0,5) (*б*), графіки U_V й кутів тиску для механізму з параметром σ =γ =0,905 і визначення для нього кута експлуатації (1– U_V, 2–θ_{12}, 3– θ_{23}) (*в*)

Fig. 4. Intersection of the volume figure of the $U_V(\varphi, \sigma)$ dependence of de-axial crank-slider mechanism ($r = e$) by the plane of the optimization criterion (*a*), some U_V functions with a local minimum near the opti–mization criterion (1 – σ = 1.1; 2 –σ = 0.905; 3 – σ = 0.67) and without the local minimum (4 – σ = 0.5) (*b*), U_V graphs and pressure angles for the mechanism with the parameter σ = γ = 0.905 and determination of the angle for its operation (1 – U_V, 2 – θ_{12}, 3 – θ_{23}) (*c*)

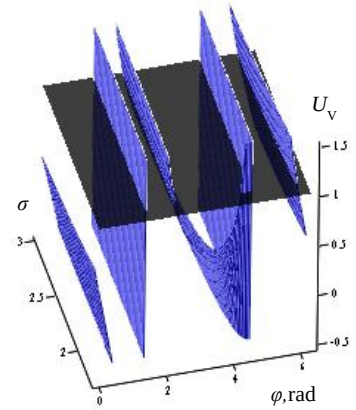
Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159493
© Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

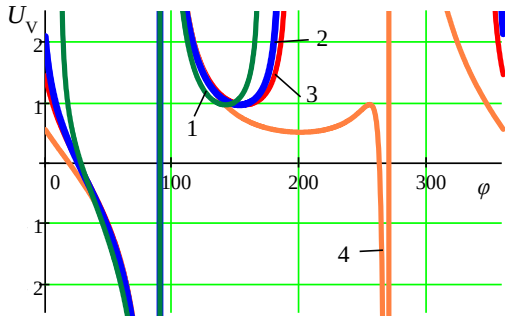
Наука та прогрес транспорту. ВісникДніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Найбільш широкі можливості проектування надає розрахунок геометричних параметрів механізму за залежністю (6). Ця залежність є функцією трьох змінних,тому об'ємних поверхонь може бути побудовано багато. Одна з них представлена на рис.5, *а*. Симетричне відхилення від U_V = 1 може бути підібране комбінацією параметрів σ й γ. Пошук оптимального рішення для мінімальних габаритів механізму слід шукати у схемі, де дезаксіал менший за радіус кривошипа. На рис. 5, *б* представлені графіки таких комбінацій із параметром *e/r* <1 для практичного діапазону існування механізму. Усі криві зміни U_V мають локальний мінімум, який відповідає значенню U_V =1,05, що дозволяє знаходити тільки одне симетричне рішення для заданого Δ. 5 %симетричне відхилення задовольняє багато функцій, однак діапазон кута повороту кривошипа, що задовольняє такому відхиленню, становить не більше 35° і тільки у другому квадранті.

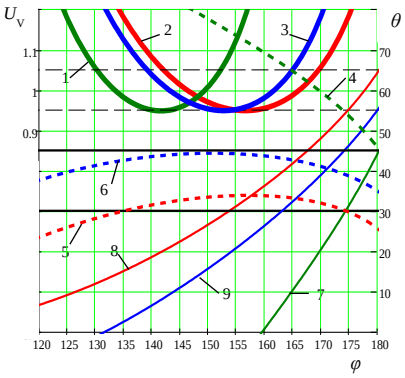
а – a



б – b



в – c



г – d

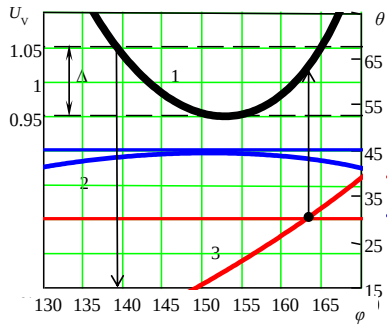


Рис. 5. Перетин об'ємної фігури залежності U_V(φ, σ, γ) дезаксіального кривошипно-повзункового механізму площиною критерію оптимізації (γ = 0,8) (*а*), графіки U_V у робочому діапазоні φ експлуатації захоплювача з симетричним відхиленням від критерію оптимізації для деяких відносних параметрів механізму (1–σ = 2 і γ=0,7; 2–σ = 1,1 і γ=0,82; 3– σ = 0,908 і γ=0,902; 4– σ = 0,524 і γ=0,902) (*б*), кути тиску:в обертальній парі шатун – кривошип (4,5,6), у поступальній парі напрямна –повзун (7,8,9) (*в*), графіки U_V й кутів тиску для механізму з параметром σ =1,1і γ=0,82 й визначення для нього кута експлуатації (1– U_V, 2– θ_{12}, 3– θ_{23}) (*г*)

Fig. 5. Cross section of the volume figure of the U_V(φ, σ, γ) dependence of the de-axial crank-slider mechanism by the plane of the optimization criterion (γ = 0.8) (*a*), the U_V graphs in the operating range φ of the gripping device operation with a symmetric deviation from the optimization criterion for some relative parameters of the mechanism (1 –σ = 2 and γ = 0.7; 2 –σ = 1.1 and γ = 0.82; 3 – σ = 0.908 and γ = 0.902; 4 – σ = 0.524 and γ = 0.902) (*b*), angles of pressure: in the rotating pair connecting rod – crank (4, 5, 6), in thesliding pair a guide – a slider (7, 8, 9) (*c*), graphs of U_V and pressure angles for the mechanism with the parameter σ = 1.1 and γ = 0.82 and the definition of operation angle for it (1 – U_V, 2 – θ_{12}, 3 – θ_{23})(*d*)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159493
© Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк, 2018

Кут тиску в поступальній парі визначимо за залежністю:

$$\theta_{12}(\varphi) = \arcsin(\gamma - \sigma \cdot \sin\varphi), \qquad (9)$$

а в парі шатун – кривошип – за залежністю:

$$\theta_{23}(\varphi) = \varphi - \theta_{12}(\varphi) - 90°. \qquad (10)$$

Як видно з графіків, ці обмеження зменшують верхню межу й діапазон φ роботи механізму.

Механізм із параметрами σ = 0,908, γ=0,902 (рис. 5, *г*) відповідає граничному стану схеми, де *e/r* =1.Зміна цих параметрів викликає або збільшення відношення *e/r*, або збільшення відхилення від нижнього граничного значення критерію оптимізації 0,95. Діапазон кута експлуатації такого механізму лежить у достатньо широких межах 142° <φ< 170°, однак обмеження за кутом тиску у поступальній парі звужують цей діапазон до величини 142° <φ < 154°.Пошук рішення в області зростання σ й зменшення γ призводить до невиконання умови припустимого кута тиску у парі 2–3.

Єдиний варіант схеми, що найкраще задовольняє умовам оптимізації, –це механізм із параметрами σ = 1,1 й γ=0,82, діапазон кута експлуатації якого лежить у межах 139° < φ < 165°. В усьому цьому діапазоні дотримується критерій оптимізації та умова допустимого кута тиску в обертальній парі. Зменшується кут експлуатації механізму до 24° (139° <φ < 163°) за рахунок дотримання допустимого кута тиску в поступальній парі.

Таким чином, механізм захоплювача, побудований за схемою дезаксіального кривошипно-повзункового механізму, що забезпечує відхилення в діапазоні U_V= 0,95…1,05, повинен мати наступні геометричні параметри: $l = r/\sigma = 0{,}91r$, $e = (\gamma \cdot r)/\sigma = 0{,}745r$. У такому механізмі в діапазоні кута повороту кривошипа 139° < φ < 163° сила затискання об'єкта буде сталою й дорівнюватиме номінальній рушійній силі приводу в усьому діапазоні товщин деталей, які затискають.

Наприклад, якщо прийняти для максимальної товщини затискуваного об'єкта H=100мм компактний варіант схеми з *e* =H/2, то розміри механізму будуть: *r* = 67мм, *l* = 60,98мм, *e* = 50 мм. У напрямку затискання об'єкта затискні елементи переміститься на величину $h = 2r(\sin 163° - \sin 139°) = 0{,}728r$, а діапазон товщин об'єктів маніпулювання без заміни затискних елементів складе 49…100 мм.

Характер кривих (рис.4, б; 5, б) показує, що збільшення кута експлуатації механізму відбувається за рахунок збільшення межі відхилення Δ від критеріального параметра й дозволяє знайти рішення симетричного відхилення від U_V = 1 для широкого діапазону Δ, а п'ятивідсоткове обмеження відхилення може бути змінене до заданого.

Наукова новизна та практична значимість

Уведене поняття «енергетичний індекс передачі руху».

Уперше проведений енергетичний синтез захоплювального пристрою, побудованого на основі спареного кривошипно-повзункового механізму,за критерієм рівності одиниці енергетичного індексу передачі руху. Визначені оптимальні відносні розміри ланок і їх розташування для кривошипно-повзункового механізму, що задовольняють вимозі геометричного синтезу за енергетичним індексом передачі руху.

Запропоновані практичні рекомендації щодо розмірів і розташування ланок механізму для центрального й дезаксіального кривошипно-повзункового механізму захоплювача.

Висновки

У роботі виконаний енергетичний синтез геометричних параметрів кривошипно-повзункового механізму захоплювального пристрою за критерієм найменшого відхилення від одиниці швидкісної функції (енергетичний трансмісійний індекс).

Визначені конкретні значення відносних параметрів довжин ланок і діапазони повороту кривошипа центрального й дезаксіального кривошипно-повзункового механізму захоплювача, що найкраще відповідають критерію оптимізації й задовольняють обмеженням за кутами тиску. Найкращі результати синтезу отримані для схеми дезаксіального кривошипно-повзункового механізму з позитивним дезаксіалом, меншим за довжину кривошипа.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159493
© Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк, 2018

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боренштейн, Ю. П. Исполнительные механизмы захватывающих устройств / Ю. П. Боренштейн. – Ленинград : Машиностроение, 1982. –232 с.
2. Кіницький, Я. Т. Теорія механізмів і машин: підручник / Я. Т. Кіницький. – Київ : Наук. думка, 2002. – 650 с.
3. Механика промышленных роботов: учеб. пособие для втузов: в 3 кн. / под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. – Москва : Высш. шк., 1988. – Кн. 2 : Расчет и проектирование механизмов / Е. И. Воробьев, О. Д. Егоров, С. А. Попов. – 367 с.
4. Озол, О. Г. Основы конструирования и расчета механизмов / О. Г. Озол. – Рига : Звайгзне, 1979. – 360 с.
5. Пейсах, Э. Е. Система проектирования плоских рычажных механизмов / Э. Е. Пейсах, В. А. Нестеров ; под ред. К.В.Фролова.– Москва : Машиностроение, 1988.– 232 с.
6. Погребняк, Р. П. Повторювані зв’язки у схемах стрижньового повзунно-шатунного механізму захоплювального пристрою / Р. П. Погребняк // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 4 (76). – С. 81–88. doi: 10.15802/stp2018/140547
7. Погребняк, Р. П. Структурний аналіз і кінематичний синтез стрижньового кулісного механізму захвата / Р. П. Погребняк // Підйомно-транспортна техніка. – 2017. – № 2 (54).– С. 47–56.
8. Погребняк, Р. П. Структурний аналіз і кінематичний синтез спареного стрижньового кулісного механізму захвата робота / Р. П. Погребняк // Підйомно-транспортна техніка. – 2017. – № 4 (56). – С. 57–66.
9. Челпанов, И. Б. Схваты промышленных роботов / И. Б. Челпанов, С. Н. Колпашников. – Ленинград : Машиностроение, 1989. – 287 с.
10. Atarer, F. Design alternatives of network of Altmann linkages / F. Atarer, K. Korkmaz, G. Kiper // International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements. – 2017. – Vol. 5. – Iss. 4. – P. 495–503. doi: 10.2495/CMEM-V5-N4-495-503
11. Bai, G. Kinematic Analysis and Dimensional Synthesis of a Meso-Gripper / G. Bai, X. Kong, J. M. Ritchie // Journal of Mechanisms and Robotics. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 1–59. doi: 10.1115/1.4035800
12. Balli, S. S. Transmission angle in mechanisms (Triangle in mech) / S. S. Balli, S. Chand // Mechanism and Machine Theory. – 2002. – Vol. 37. – Iss. 2. – P. 175–195. doi: 10.1016/S0094-114X(01)00067-2
13. Chen, C. Generalized transmission index and transmission quality for spatial linkages / C. Chen, J. Angeles // Mechanism and Machine Theory. – 2007. – Vol. 42. – Iss. 9. – P. 1225–1237. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2006.08.001
14. Gosselin, C. Optimization of Planar and Spherical Function Generators as Minimum-Defect Linkages / C. Gosselin, C. Angeles // Mechanism and Machine Theory. – 1989. – Vol. 24. – Iss.4. – P. 293–307. doi:10.1016/0094-114x(89)90049-9
15. Lin, C.-C. The force transmissivity index of planar linkage mechanisms / C.-C. Lin, W.-T. Chang // Mechanism and Machine Theory. – 2002. – Vol. 37. – Iss. 12. – P. 1465–1485. doi: 10.1016/s0094-114x(02)00070-8
16. Pfurner, M. Algebraic analysis of overconstrained single loop four link mechanisms with revolute and prismatic joints / M. Pfurner, T. Stigger, M. L. Husty // Mechanism and Machine Theory. – 2017. – Vol. 114. – P. 11–19. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.03.014
17. Pogrebnyak, R. P. Structural analysis and rational design parallelogram arm gripping device/ R. P. Pogrebnyak // Теория и практика металлургии. – 2015. – № 1/2. – С. 124–126.
18. Robot grippers / Gareth J. Monkman, Stefan Hesse, Ralf Steinmann, Henrik Schunk. – Weinheim : Wiley-VCH, 2007. – 463 p. doi: 10.1002/9783527610280
19. Sutherland, G. Transmission Index for Spatial Mechanisms / G. Sutherland, B. Roth // Journal of Engineering for Industry. – 1973. – Vol. 95. – Iss. 2. – P. 589–597. doi: 10.1115/1.3438195
20. Sutherland, G. H. Quality of Motion and Force Transmission / G. H. Sutherland // Mechanism and Machine Theory. –1981. – Vol.16. – Iss. 3. – P. 221–225. doi: 10.1016/0094-114x(81)90037-9

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159493
© Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. ВісникДніпропетровського
національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Р. П. ПОГРЕБНЯК[1*], М. Р. ПОГРЕБНЯК[2*]

[1*]Каф. «Прикладная механика», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днипро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 743 32 76, эл. почта pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818
[2*]Каф. «Автоматизация и компьютерные системы», Национальный технический университет «Днепровская политехника», пр. Дмитрия Яворницкого, 19, Днипро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 743 32 76,
эл. почта mpogrebnyakk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2961-3383

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КРИВОШИПНО-ПОЛЗУННОГО МЕХАНИЗМА ЗАХВАТЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ИНДЕКСУ ПЕРЕДАЧИ ДВИЖЕНИЯ

Цель. Основная цельработы – провести кинематический синтез схемкривошипно-ползунного захватывающего устройствапо критериюпостоянства мощности привода механизма с ограничениями по допустимым углам давления в кинематических парах. **Методика.** Достижение поставленной цели осуществляется средствами теории механизмов и машин с помощью аналитического метода треугольников Озолса кинематики плоских стержневых механизмов и математическим моделированием движения звеньев. **Результаты.** Десятизвенный стержневой механизм схвата построен на основе спаренного параллелограммного кривошипно-ползунного механизма с ведущим ползуном. Для схвата, который построен на основе стержневой схемы, целесообразно оптимальное проектирование с использованием критериев передачи движения, или индексов передачи. В качестве критерия оптимизации принято отношение скорости ведущего звена механизма к проекции вектора скорости точки ведомого звена на направление вектора силы зажатия (энергетический трансмиссионный индекс). Наименьшие энергетические затраты могут быть достигнуты при условии, что это отношение будет близко к единице. Получены аналитические зависимости для определения скоростных функций центрального и дезаксиального кривошипно-ползунного механизма схвата, которые удобны для анализа и моделирования. На их основе выполнен энергетический синтез геометрических параметров механизма захватывающего устройства по критерию наименьшего отклонения от единицы энергетического трансмиссионного индекса. Возможности схвата расширяются при использовании в его схеме дезаксиального кривошипно-ползунного механизма, а наилучшие результаты могут быть получены в схеме, где дезаксиал меньше, чем кривошип. Определены конкретные значения относительных параметров длин звеньев и диапазоны поворота кривошипа центрального и дезаксиального кривошипно-ползунного механизма схвата, которые наилучшим образом отвечают критерию оптимизации и удовлетворяют ограничениям по углам давления. **Научная новизна.** Впервые введен новый критерий передачи движения – энергетический трансмиссионный индекс. По этому критерию проведен кинематический синтез захватывающего устройства, построенного на основе спаренного кривошипно-ползунного механизма. **Практическая значимость.** Предложены практические рекомендации по относительным размерам и расположению звеньев механизма для центрального и дезаксиального кривошипно-ползунного механизма схвата, которые удовлетворяют требованиям критерия оптимизации и реализуют ограничения по допустимым углам давления.

Ключевые слова: механический схват; передача движения; энергетический трансмиссионный индекс; скоростная функция; угол давления

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159493
© Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. ВісникДніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

R. P. POGREBNYAK[1*], M. R. POHREBNIAK[2*]

[1*]Dep. «Applied Mechanics», National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Av., 4, 49005, Dnipro, tel. +038 (056) 743 32 76, e-mail pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818
[2*]Dep. «Automation and Computer Systems», National Technical University «Dnipro Polytechic», Dmitro Yavornytskyi Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, e-mail mpogrebnyakk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2961-3383

KINEMATIC SYNTHESIS OF CRANK-SLIDER MECHANISM OF THE GRIPPING DEVICE BASED ON THE POWER TRANSMISSION INDEX

Purpose. The main purpose of the work is to carry out a kinematic synthesis of a crank-slider gripping device in accordance to the criterion of the constancy of the drive power of the mechanism with restrictions on permissible pressure angles in kinematic pairs. **Methodology**. Achieving this purpose is carried out by means of the theory of mechanisms and machines using the analytical method of the Ozols triangles of kinematics of plane rod mechanisms and mathematical modeling of the movement of links. **Findings.** The ten-bar mechanism of the gripping device is built on the basis of a paired parallelogram of a crank-slider mechanism with a leading slider. For gripping device, which is built on the basis of the rod scheme, it is advisable optimal design using the criteria for the transfer of motion or transmission indices. The criterion of optimization is the ratio of the speed of the leading link to the projection of the velocity vector of the driven point on the direction of the clamping force vector (power transmission index). The lowest energy costs can be achieved, provided that this ratio is equal to one. Analytical dependences are obtained for determining the velocity function of the central and de-axial crank-slider gripping device, which are convenient for analysis and modeling. On their basis, an energy synthesis of the geometrical parameters of the mechanism of the gripping device in accordance with the criterion of the smallest deviation from the unit of power transmission index is performed. The possibilities of the gripping device are enhanced by using it in a de-axial crank-slider mechanism, and the best results can be obtained in a scheme where the de-axial value is larger than the crank length. It is determined the specific values of the relative parameters of the lengths of the links and the ranges of rotation of the crank of the central and de-axial crank-slider of the gripping device, which best meet the optimization criterion and satisfy the pressure angle constraints. **Originality.** For the first time, a new criterion for the transmission of motion was introduced – power transmission index. According to this criteria, a kinematic synthesis of the gripping device built on the basis of a paired crank slider mechanism was carried out. **Practical value.** Practical recommendations are proposed on the size and location of the links of the mechanism for the central and de-axial crank-slider mechanism, which satisfy the requirements of the optimization criterion and implement restrictions on permissible pressure angles.

Keywords: mechanical gripping device; motion transmission; power transmission index; speed function; pressure angle

REFERENCES

1. Borenshteyn, Y. P. (1982). *Ispolnitelnye mekhanizmy zakhvatyvayushchikh ustroystv*. Leningrad: Mashinostroyeniye. (in Russian)
2. Kinytskyi, Y. T.(2002). *Teoriya mekhanizmiv i mashyn: pidruchnyk*. Kyiv: Naukova dumka. (in Ukrainian)
3. Vorobov, Y. I., Yegorov, O. D., & Popov, S. A. (1988). Raschet i proyektirovanie mekhanizmov. In K. V. Frolov, Y. I. Vorobev (Eds.), *Mekhanika promyshlennykh robotov.* (Vol. 2). Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
4. Ozol, O. G. (1979). *Osnovy konstruirovaniya i rascheta mekhanizmov*. Riga: Zvaygzne. (in Russian)
5. Peysakh, E. Y., & Nesterov, V. A. (1988). *Sistema proyektirovaniya ploskikh rychazhnykh mekhanizmov*. Moscow: Mashinostroyeniye. (in Russian)
6. Pogrebnyak, R. P. (2018). Repeated Connections in the Schemes of Link Slider-crank Mechanism of Gripping Device. *Science and Transport Progress. 4(76),* 81-88. doi: 10.15802/stp2018/140547 (in Ukrainian)
7. Pogrebnyak, R. P. (2017). Strukturniy analiz i kinematychniy sintez strizhnovogo kulisnogo mekhanizmu zakhvata. *Pidyomno-transportna tekhnika, 2(54),* 47-56. (in Ukrainian)
8. Pogrebnyak, R. P. (2017). Strukturniy analiz i kinematychniy sintez sparenogostrizhnovogo kulisnogo mekhanizmu zakhvata robota. *Pidyomno-transportna tekhnika, 4(56),* 57-66. (in Ukrainian)
9. Chelpanov, I. B., & Kolpashnikov, S. N. (1989). *Skhvaty promyshlennykh robotov.* Leningrad: Mashinostroyenie. (in Russian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159493
© Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк, 2018

10. Atarer, F., Korkmaz, K., & Kiper, G. (2017). Design alternatives of network of altmann linkages. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, 5(4),* 495-503. doi:10.2495/CMEM-V5-N4-495-503 (in English)
11. Bai, G., Kong, X., & Ritchie, J. M. (2017). Kinematic Analysis and Dimensional Synthesis of a Meso-Gripper. *Journal of Mechanisms and Robotics, 9(3),* 1-59. doi: 10.1115/1.4035800 (in English)
12. Balli, S. S., & Chand, S. (2002). Transmission angle in mechanisms (Triangle in mech). *Mechanism and Machine Theory, 37(2),* 175-195. doi: 10.1016/s0094-114x(01)00067-2 (in English)
13. Chen, C., & Angeles, J. (2007). Generalized transmission index and transmission quality for spatial linkages. *Mechanism and Machine Theory, 42(9),* 1225-1237. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2006.08.001 (in English)
14. Gosselin, C., & Angeles, J. (1989). Optimization of planar and spherical function generators as minimum-defect linkages. *Mechanism and Machine Theory, 24(4),* 293-307. doi:10.1016/0094-114x(89)90049-9(in English)
15. Lin, C.-C., & Chang, W.-T. (2002). The force transmissivity index of planar linkage mechanisms. *Mechanism and Machine Theory, 37(12),* 1465-1485. doi: 10.1016/s0094-114x(02)00070-8 (in English)
16. Pfurner, M., Stigger, T., & Husty, M. L. (2017). Algebraic analysis of overconstrained single loop four link mechanisms with revolute and prismatic joints. *Mechanism and Machine Theory, 114*, 11-19. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.03.014 (in English)
17. Pogrebnyak, R. P. (2015). Structural analysis and rational design parallelogram arm gripping device. *Theory and Practice Steel Industry, 1/2,* 124-126. (in English)
18. Monkman, G. J., Hesse, S., Steinmann, R., & Schunk, H. (2007). *Robot Grippers.*Weinheim: Wiley-VCH. doi: 10.1002/9783527610280 (in English)
19. Sutherland, G., & Roth, B. (1973). A Transmission Index for Spatial Mechanisms. *Journal of Engineering for Industry, 95(2),* 589-597. doi: 10.1115/1.3438195 (in English)
20. Sutherland, G. H. (1981). Quality of motion and force transmission. *Mechanism and Machine Theory, 16(3),* 221-225. doi: 10.1016/0094-114x(81)90037-9 (in English)

Надійшла до редколегії: 21.09.2018
Прийнята до друку: 09.01.2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/159493
© Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4.027.2

С. А. КОСТРИЦА[1*], С. Ю. МОЛЧАНОВ[2*], М. В. КРАМАРЕНКО[3*], А. А. ГРЕЧКИН[4*], Д. В. ЛАКТИОНОВ[5*]

[1*]Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 11, эл. почта kossa571@gmail.com, ORCID 0000-0002-7922-0975
[2*]Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 11, эл. почта sergio.molchanov88@gmail.com, ORCID 0000-0002-2568-1581
[3*]Публичное акционерное общество «Крюковский вагоностроительный завод», ул. И. Приходько, 139, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (0536) 76 95 05, эл. почта kvsz@kvsz.com, ORCID 0000-0001-6686-8556
[4*]Публичное акционерное общество «Крюковский вагоностроительный завод», ул. И. Приходько, 139, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (0536) 66 11 71, эл. почта pkutsn@kvsz.com, ORCID 0000-0003-4618-5525
[5*]Публичное акционерное общество «Крюковский вагоностроительный завод», ул. И. Приходько, 139, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (0536) 66 11 71, эл. почта pkutsn@kvsz.com, ORCID 0000-0001-6877-2814

ОЦЕНКА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА ДПКР-2 ПРИ ДЕЙСТВИИ РАСЧЁТНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК

Цель. Обеспечение безопасности эксплуатации, увеличение прочности и долговечности наиболее нагруженных несущих элементов подвижного состава – тележек, в частности тележек дизель-поезда ДПКр-2. **Методика.** Для оценки прочности конструкции опытного варианта тележки построена пространственная твердотельная 3D-модель. С применением программного комплекса, реализующего метод конечных элементов, на основе теории Пальмгрена–Майнера–Мизеса определены наиболее нагруженные узлы рамы тележки. При проведении конечно-элементного моделирования учтены особенности работы конструкции в эксплуатации, действие статических нагрузок и соответствующих динамических добавок. Результаты расчёта были использованы для разработки схемы размещения тензодатчиков на раме тележки при проведении ходовых прочностных испытаний. По их результатам дана оценка усталостной прочности опытного варианта рамы тележки при действии эксплуатационных нагрузках и сделан вывод о необходимости усиления её конструкции. Конструкторское управление ПАО «Крюковский вагоностроительный завод» предложило вариант усиления опытного образца рамы тележки. **Результаты.** Основываясь на результатах теоретических и экспериментальных исследований, была произведена модернизация конструкции опытного варианта тележки дизель-поезда ДПКр-2, что позволило уменьшить напряжения в наиболее нагруженных узлах и значительно увеличить её долговечность. Выполнены расчёты на прочность и ходовые прочностные испытания дизель-поезда с модернизированными тележками. **Научная новизна.** Впервые построена пространственная конечно-элементная модель тележки дизель-поезда нового поколения и произведен расчёт на прочность при действии нормативных нагрузок. Построенная модель позволила выбрать вариант модернизации опытного образца рамы, который удовлетворяет условиям усталостной прочности. Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность модернизации, в частности увеличение прочности и долговечности конструкции. **Практическая значимость.** Комплекс расчётно-экспериментальных работ по оценке напряжённо-деформированного состояния рамы тележки дизель-поезда ДПКр-2 при действии расчётных и эксплуатационных нагрузок позволил создать конструкцию, которая удовлетворяет как эксплуатационным требованиям, так и требованиям прочности и долговечности. Разработанная конструкция рамы

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160653
© С. А. Кострица, С. Ю. Молчанов, М. В. Крамаренко, А. А. Гречкин, Д. В. Лактионов, 2019

тележки дает возможность увеличить безопасность эксплуатации и может быть использована в дизель-поездах следующих поколений.

Ключевые слова: прочность конструкции; долговечность; несущий элемент; тележка дизель-поезда; усиление конструкции

Вступление

Тележка является одним из основных несущих элементов подвижного состава железных дорог и служит ключевым звеном в схеме передачи нагрузки от кузова на головку рельса [14, 18]. Конструкция рам тележек во многом обеспечивает безопасность подвижного состава в эксплуатации, поэтому их прочность и долговечность должны удовлетворять требованиям действующих нормативных документов [3, 7].

Недостаточная прочность несущих элементов подвижного состава, в частности рам тележек, – одна из основных проблем, требующих поиска возможных путей решения [5, 8, 15]. В процессе такого поиска учитывают, что несущие элементы тележки должны отвечать следующим параметрам и требованиям [1, 6, 7, 9–12]:

– обеспечивать безопасность при эксплуатации подвижного состава;

– соответствовать требованиям прочности и долговечности;

– выполнять все эксплуатационные требования (плавность хода, конструкционная скорость и т. п.).

Цель

Создание рамы тележки дизель-поезда, отвечающей требованиям прочности, долговечности и безопасности в эксплуатации.

Методика

Объектом исследования является напряженно-деформированное состояние (НДС) рамы приводной тележки (сталь 09Г2С) дизель-поезда ДПКр-2 производства Крюковского вагоностроительного завода. Для исследования НДС элементов конструкции рамы тележки использован метод 3D-моделирования и метод конечных элементов [2, 4, 16, 19].

Для проверки результатов численного моделирования и оценки эффективности модернизации рамы тележки использованы экспериментальные методы.

Конечно-элементный расчет построенной 3D-модели опытного образца рамы тележки дизель-поезда был проведен при действии нормативных нагрузок. При расчёте было принято, что материал конструкции работает в зоне упругих деформаций и обладает постоянными характеристиками, модулем упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа и коэффициентом Пуассона $\mu = 0{,}3$.

Уровень напряжений, возникающих в раме тележки, зависит от величины прикладываемых нагрузок и конструктивных особенностей их приложения [13, 17, 20].

При расчете учтены следующие основные силы:

– собственная сила тяжести конструкции и сила тяжести кузова вагона;

– инерционные силы, вызванные колебаниями экипажа при его движении;

– силы от работы тяговых двигателей;

– силы, связанные с тягой и торможением подвижного состава;

– аэродинамические силы (силы давления ветра);

– силы, возникающие при вписывании дизель-поезда в кривые участки пути.

Перечисленные силы при расчете напряженно-деформированного состояния рамы тележки принимаем действующими статически и приводим к следующим основным схемам приложения:

– вертикальные (сила тяжести брутто, динамическая сила при конструкционной скорости, вертикальная составляющая силы инерции кузова);

– продольные (сила тяги, продольные силы инерции);

– боковые (центробежная сила, сила давления ветра, горизонтальные рамные силы);

– кососимметричные.

Опирание рамы тележки на колесные пары в расчетной схеме осуществляется на пружины буксового подвешивания.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160653
© С. А. Кострица, С. Ю. Молчанов, М. В. Крамаренко, А. А. Гречкин, Д. В. Лактионов, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

В результате анализа результатов расчёта определены наиболее нагруженные узлы рамы тележки и составлена схема размещения тензодатчиков для проведения ходовых динамических испытаний.

Расчет долговечности проведен по данным регистрации одного тензодачика, полученным при проведении динамических ходовых испытаний. Тензодатчик для расчета долговечности выбран по максимальным стататистическим значениям динамических напряжений.

Предел выносливости детали, с учетом асимметрии цикла согласно «Норм…» [7], определен по формуле:

$$\sigma_{-1Dm}=\sigma_{-1D}\times 1{,}035\times\sqrt{1-\frac{\left(\sigma_m+0{,}35\times\sigma_B\right)^2}{\left(1{,}35\times\sigma_B\right)^2}}, \quad (1)$$

где σ_{-1D} – предел выносливости детали для симметричного цикла; σ_m – среднее напряжение цикла; σ_B – временное сопротивление.

Предел выносливости детали для симметричного цикла определяем по формуле:

$$\sigma_{-1D}=\frac{C(p)\times\sigma_{-1}}{K}\sigma_{-1Dm}, \quad (2)$$

где σ_{-1}– среднее значение предела выносливости образца (для стали 09Г2С – 195 МПа); $C(p)$ – коэффициент, зависящий от вероятности разрушения детали. Значение выбрано по таблице 3.19 «Норм…» [7]; K – коэффициент понижения предела выносливости, определяемый по формуле:

$$K=K_\sigma\times\eta, \quad (3)$$

здесь η – технологический фактор. Значение η зависит от способа и контроля сварки (табл. 3.20 «Норм…» [7]); K_σ – коэффициент, характеризующий понижение предела выносливости:

$$K_\sigma=\frac{K_1\times K_2\times\beta_K}{\gamma\times m}, \quad (4)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий неоднородность материала детали; K_2 – коэффициент, учитывающий влияние внутренних напряжений в детали; β_K – эффективный коэффициент концентрации напряжений в узлах сложного очертания, концентрация напряжений в которых определяется только их геометрией; γ – коэффициент, учитывающий влияние размерного фактора; m – коэффициент, учитывающий состояние поверхности детали.

Поскольку уровни напряжений в рамах тележек выше чем σ_{-1Dm}, то, согласно п. 3.6.3 «Норм…» [7], для оценки долговечности используем параметры кривой усталости стандартного образца и гистограммы распределения амплитудных значений напряжений рам тележек.

Кривую усталости для образца описываем уравнением (3.35) «Норм…» [7]:

$$N=\beta\frac{\sigma_B-\sigma}{\sigma-\sigma_{-1}}, \quad (5)$$

где σ_{-1} – предел выносливости стандартного образца для симметричного цикла нагружения;
N – число циклов до разрушения образца при амплитуде напряжений σ симметричного цикла нагружения;
β – постоянная образца.

Параметры кривой усталости детали σ_{-1D} и β_D для симметричного цикла нагружения определены по формулам:

$$\sigma_{-1D}=\frac{\sigma_{-1}}{K}, \quad (6)$$

$$\beta_D=\frac{\beta}{K^2}. \quad (7)$$

Параметры кривой усталости детали для асимметричного цикла нагружения определяем по формуле (3.37) «Норм…» [7]:

$$\beta_{Dm}=\beta_D\frac{\sigma_{-1Dm}+|\sigma_m|}{\sigma_{-1D}}, \quad (8)$$

Расчет долговечности детали выполнен по следующему алгоритму:

– из гистограммы напряжений определены амплитудные значения напряжений σ_i и соответствующее этим напряжениям число

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160653
© С. А. Кострица, С. Ю. Молчанов, М. В. Крамаренко, А. А. Гречкин, Д. В. Лактионов, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

рабочих циклов n_i за условную единицу пробега (пробег при проведении ходовых прочностных испытаний L_V, км);

– при этом нумерация интервалов произведена так, чтобы:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > ... > \sigma_S, \quad (9)$$

где s – количество интервалов гистограммы;

– при последовательном воздействии $n_1, n_2, ... n_i$ рабочих циклов (за условную единицу пробега) с амплитудами напряжений соответственно $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 ... \sigma_i > (\sigma_{-1Dm})_{i-1}$, величину предела выносливости детали каждый раз пересчитываем:

$$(\sigma_{-1Dm})_i = \frac{\sigma_i \times \left(1 - \frac{n_i}{N_i}\right)}{\frac{\sigma_i - (\sigma_{-1Dm})_{i-1}}{(\sigma_{-1Dm})_{i-1}} + \left(1 - \frac{n_i}{N_i}\right)}, \quad (10)$$

где

$$N_i = (\beta_{1Dm})_{i-1} \times \frac{\sigma_B - |\sigma_m| - \sigma_i}{\sigma_i - (\sigma_{-1Dm})_{i-1}}, \quad (11)$$

$$(\beta_{1Dm})_i = (\beta_{1Dm})_{i-1} \times \frac{(\sigma_{-1Dm})_i}{(\sigma_{-1Dm})_{i-1}}, \quad (12)$$

$$(\sigma_{-1Dm})_0 = \sigma_{-1Dm}, \; i = 1, 2 ... l, \quad (13)$$

Цикл расчетов по формулам (10)–(13) повторяем, пока выполняется условие $(\sigma_{-1Dm})_i \geq 0$.

Описанные выше исследования проведены для опытного образца тележки и модернизированного.

Результаты

Для проведения расчётов на прочность опытного образца тележки дизель-поезда ДПКр-2 построена её 3-D модель, которая представлена на рис. 1. Способ опирания рамы тележки и расчётные нагрузки описаны в методике исследований.

На рис. 2 приведены поля эквивалентных напряжений в конструктивных элементах рамы тележки. При этом показан узел, в котором эквивалентные напряжения достигают максимального значения 184 МПа.

Расчет долговечности рамы тележки проведен по данным регистрации напряжений тензодатчика № 2, установленного в указанном узле.

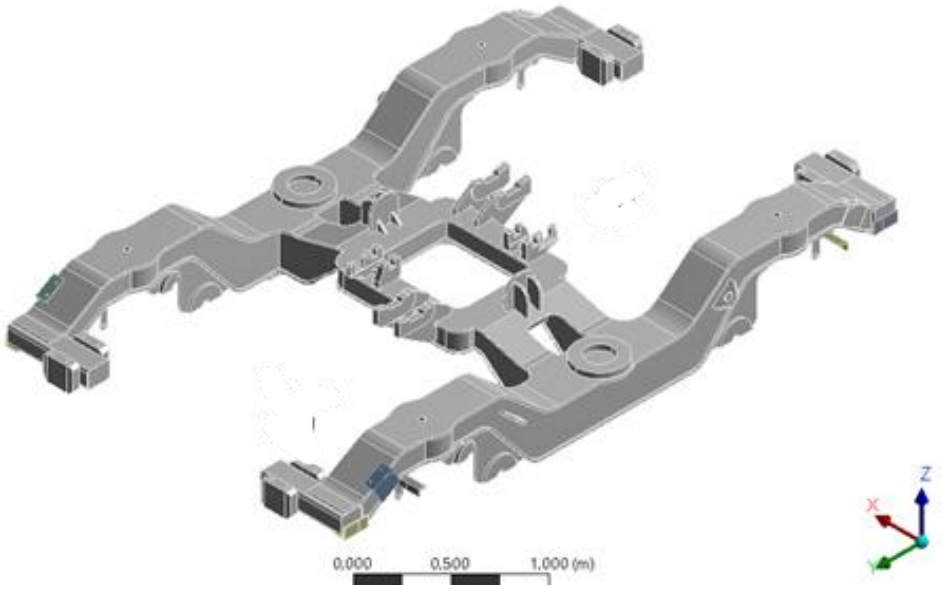


Рис. 1. Общий вид исходной рамы тележки дизель-поезда

Fig. 1. General view of the initial frame of the diesel train bogie

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160653
© С. А. Кострица, С. Ю. Молчанов, М. В. Крамаренко, А. А. Гречкин, Д. В. Лактионов, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

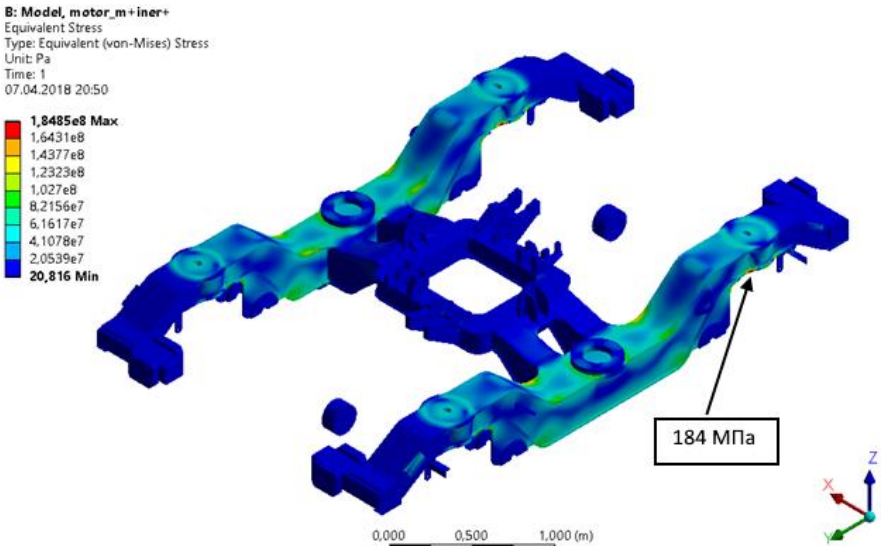


Рис. 2. Эквивалентные напряжения в раме тележки дизель-поезда

Fig. 2. Equivalent stresses in the frame of the diesel train bogie

Гистограмма распределения напряжений, полученная при проведении динамических ходовых испытаний, приведена на рис. 3. Она включает приведенное к нормативному распределению скоростей (Таблица А.1 СОУ МПП 45.060-203:2007) и типу профилей (75 % – прямые, 23 % – кривые, 2 % – стрелки) количество амплитудных значений напряжений за пробег 343 км, пройденный во время ходовых испытаний со скоростями движения до 140 км/ч.

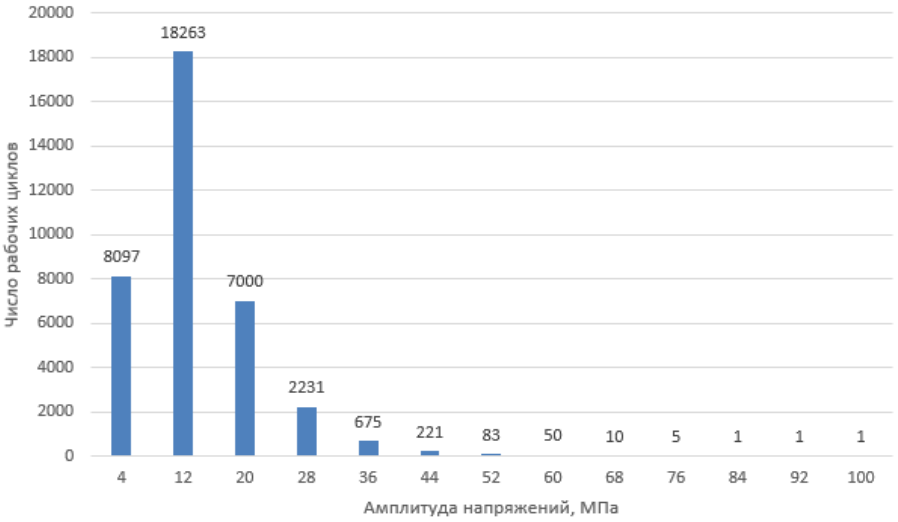


Рис. 3. Гистограмма амплитудных значений напряжений
для тензодатчика 2 исходной рамы приводной тележки

Fig. 3. Histogram of the amplitude values of the stresses
for the strain gauge 2 of the initial drive bogie frame

По алгоритму, описанному выше, было установлено, что рамы приводных тележек не будут иметь усталостных разрушений при пробеге 320 тыс. км, что является недостаточным для дизель-поезда, работающего в межрегиональном сообщении. Поэтому было принято решение об усилении конструкции. Для уменьшения напряжения в наиболее нагружен-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160653
© С. А. Кострица, С. Ю. Молчанов, М. В. Крамаренко,
А. А. Гречкин, Д. В. Лактионов, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

ных узлах конструкции можно использовать несколько направлений: увеличить толщину конструктивных элементов, использовать более прочный материал и т. п. Конструкторы завода предложили увеличить момент сопротивления изгибу сечения путём добавления П-образного элемента поверх стакана буксового узла (рис. 4).

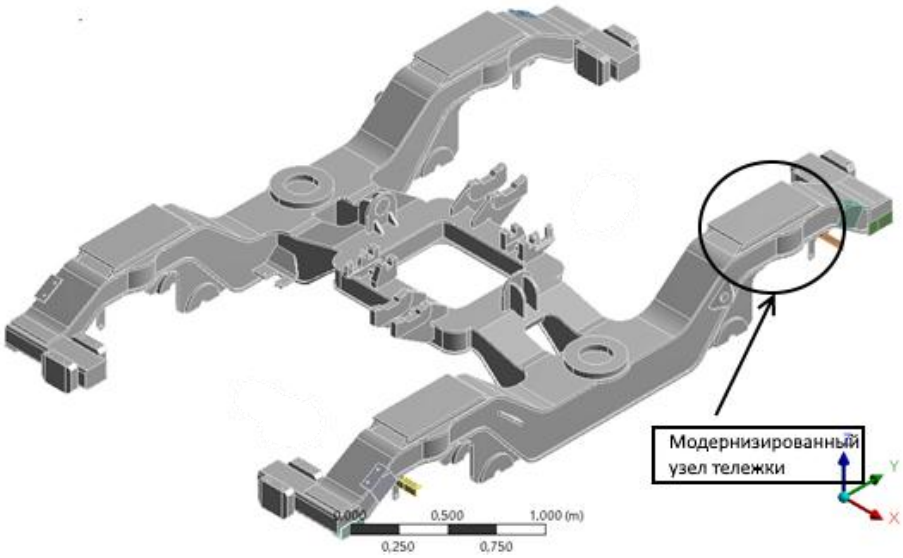


Рис. 4. Общий вид модернизированной рамы тележки дизель-поезда

Fig. 4. General view of the modernized frame of the diesel train bogie

Такое конструктивное решение позволило не изготавливать новую раму, а повысить прочность существующей опытной конструкции путём её модернизации. На рис. 5 приведены поля эквивалентных напряжений в конструктивных элементах модернизированной рамы тележки. Из представленных результатов видно, что напряжения в модернизированном узле снизились со 184 МПа до 49 МПа.

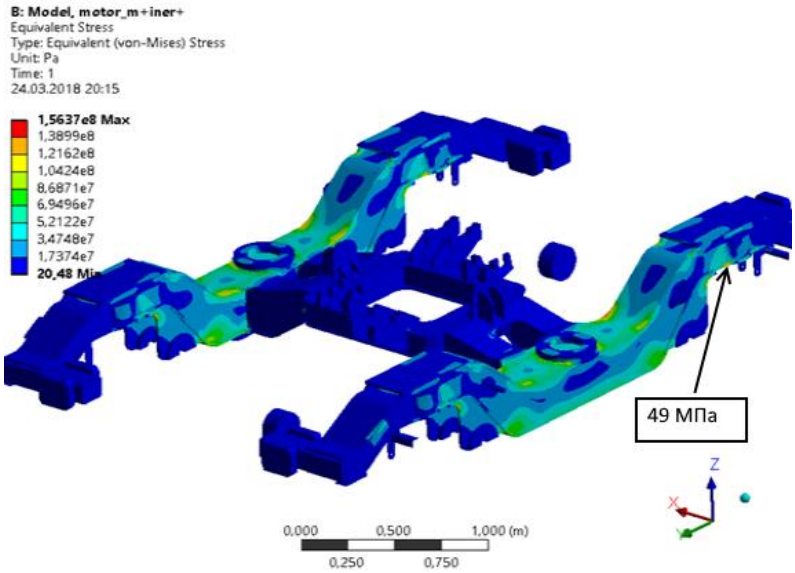


Рис. 5. Эквивалентные напряжения в модернизированной раме тележки дизель-поезда

Fig. 5. Equivalent stresses in the modernized frame of the diesel train bogie

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160653
© С. А. Кострица, С. Ю. Молчанов, М. В. Крамаренко, А. А. Гречкин, Д. В. Лактионов, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Гистограмма амплитудных значений напряжений в исследуемом узле модернизированной тележки, полученных при проведении ходовых прочностных испытаний, приведена на рис. 6. Расчётный срок службы модернизированной тележки составил 4,6 млн км.

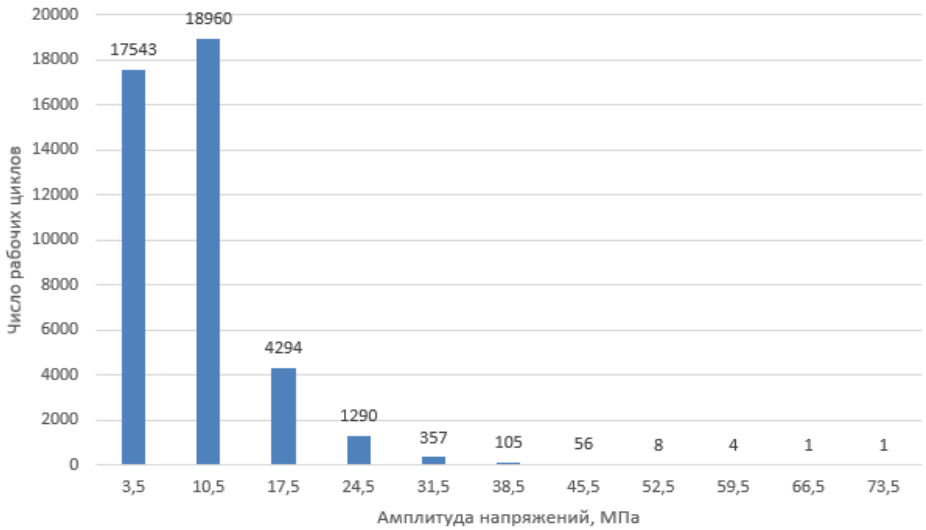


Рис. 6. Гистограмма амплитудных значений напряжений для тензодатчика 2 модернизированной рамы приводной тележки

Fig. 6. Histogram of the amplitude values of the stresses for the strain gauge 2 of the modernized drive bogie frame

Научная новизна и практическая значимость

Впервые построена пространственная конечно-элементная модель тележки дизель-поезда нового поколения и произведен расчёт на прочность при действии на нее нормативных нагрузок. Построенная модель позволила выбрать вариант модернизации опытного образца рамы, который удовлетворяет условиям усталостной прочности. Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность модернизации. Комплекс расчётно-экспериментальных работ по оценке напряжённо-деформированного состояния рамы тележки дизель-поезда ДПКр-2 при действии расчётных и эксплуатационных нагрузок позволил создать конструкцию, которая удовлетворяет как эксплуатационным требованиям, так и требованиям прочности и долговечности.

Разработанная конструкция рамы тележки дает возможность увеличить безопасность эксплуатации и может быть использована в дизель-поездах следующих поколений.

Выводы

1. Конструктивное решение по усилению опытной рамы тележки позволило не изготавливать новую конструкцию, а повысить прочность существующей путём её модернизации.
2. Модернизация позволила более чем в 3 раза снизить уровень эквивалентных напряжений в опасном сечении рамы тележки.
3. В результате проведенной модернизации рамы тележки расчётный срок ее службы увеличился с 320 тыс. до 4,6 млн км.
4. Предложенная методика исследований позволяет на стадии проведения приёмочных испытаний оценить прочность и долговечность несущих конструкций подвижного состава.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160653
© С. А. Кострица, С. Ю. Молчанов, М. В. Крамаренко, А. А. Гречкин, Д. В. Лактионов, 2019

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – Москва : Наука, 1984. – 312 с.
2. Босов, К. А. Ansys для конструкторов / К. А. Босов. – Москва : ДМК Пресс, 2016. – 247 с.
3. ГОСТ 27.502–83. Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений. – На замену ГОСТ 17510–79. – Введ. 1983–07–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1984. – 23 с.
4. Каплун, А. Б. Ansys в руках инженера. Практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – Москва : Либроком, 2015. – 270 с.
5. Мадейски, Т. Тележки с короткой базой для высокоскоростного подвижного состава / Т. Мадейски // Железные дороги мира. – 1990. – № 2. – С. 19–20.
6. Металловедение и термическая обработка стали : справочник : в 3 т. / под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштада. – Москва : Металлургия, 1983. – Т. 3. – 113 с.
7. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств экипажной части моторвагонного подвижного состава железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – Москва : МПС РФ : ВНИИЖТ, 1998. – 145 с.
8. Плехотски, В. Испытания новых тележек для метрополитенов в Вене / В. Плехотски // Железные дороги мира. – 1994. – № 9. – С. 33–35.
9. Проников, А. С. Надежность машин / А. С Проников. – Москва : Машиностроение, 1978. – 592 с.
10. Терминология теории упругости, испытаний и механических свойств материалов и строительной механики // Сборники рекомендуемых терминов. – Москва, 1952. – Вып. 14. – 72 с.
11. Шор, Я. Б. Прикладные вопросы теории надежности / Я. Б. Шор. – [Москва] : [б. и.], 1965. – Вып. 3-4. – 51 с.
12. Шухгалтер, Л. Я. Экономика долговечности и надежности машин / Л. Я. Шухгалтер. – Москва : Экономиздат, 1963. – 148 с.
13. Determination of friction heat generation in wheel-rail contact using fem / A. Miltenović, M. Banić, D. Stamenković, M. Milošević, M. Tomić, J. Bucha // Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 99–108.
14. Improving a methodology of theoretical determination of the frame and directing forces in modern diesel trains / V. Kovalchuk, A. Kuzyshyn, S. Kostritsa, Ju. Sobolevska, A. Batig, S. Dovhanyuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. – № 6/7 (96). – P. 19–25. doi: 10.15587/1729-4061.2018.149838
15. Kotoul, M. Crack path modelling in railway wheel under rolling contact fatigue / M. Kotoul // Applied and Computational Mechanics. – 2015. – Vol. 9. – Iss. 2. – P. 103–126.
16. Sae Siew, J. Nonlinear Finite Element Modelling of Railway Turnout System considering Bearer/Sleeper-Ballast Interaction / J. Sae Siew, O. Mirza, S. Kaewunruen // Journal of Structures. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–11. doi: 10.1155/2015/598562
17. Sun, Y. Q. Monitoring vertical wheel–rail contact forces based on freight wagon inverse modelling [Электронный ресурс] / Y. Q. Sun, C. Cole, M. Spiryagin // Advances in Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 7. – Iss. 5. – Режим доступа: http://clc.am/SWV_Zw – Загл. с экрана. – Проверено : 25.03.2019. doi: 10.1177/1687814015585431
18. Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension [Электронный ресурс] / A. Kuzyshyn, A. Batig, S. Kostritsa, J. Sobolevska // MATEC Web of Conferences. – 2018 – Vol. 234. – Режим доступа: http://clc.am/QaWrNA – Загл. с экрана. – Проверено : 25.03.2019. doi: 10.1051/matecconf/201823405003
19. Tran, P. SOLIDWORKS 2016 Advanced Techniques / P. Tran. – Mission : SDC Publications, 2016. – 726 p.
20. Vu, Q. H. Implementation of multiaxial high cycle fatigue criterion in finite element analysis [Электронный ресурс] / Q. H. Vu, D. Q. Vu // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 77. – Режим доступа: http://clc.am/cV7dvw – Загл. с экрана. – Проверено : 25.03.2019. doi: 10.1051/matecconf/20167701022

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160653
© С. А. Кострица, С. Ю. Молчанов, М. В. Крамаренко, А. А. Гречкин, Д. В. Лактионов, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

С. А. КОСТРИЦЯ[1*], С. Ю. МОЛЧАНОВ[2*], М. В. КРАМАРЕНКО[3*], О. А. ГРЕЧКІН[4*], Д. В. ЛАКТІОНОВ[5*]

[1*]Каф. «Теоретична і будівельна механіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 11, ел. пошта kossa571@gmail.com, ORCID 0000-0002-7922-0975
[2*]Каф. «Теоретична і будівельна механіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 11, ел. пошта sergio.molchanov88@gmail.com, ORCID 0000-0002-2568-1581
[3*]Публічне акціонерне товариство «Крюківський вагонобудівний завод», вул. І. Приходька, 139, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (0536) 76 95 05, ел. пошта kvsz@kvsz.com, ORCID 0000-0001-6686-8556
[4*]Публічне акціонерне товариство «Крюківський вагонобудівний завод», вул. І. Приходька, 139, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (0536) 66 11 71, ел. пошта pkutsn@kvsz.com, ORCID 0000-0003-4618-5525
[5*]Публічне акціонерне товариство «Крюківський вагонобудівний завод», вул. І. Приходька, 139, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (0536) 66 11 71, ел. пошта pkutsn@kvsz.com, ORCID 0000-0001-6877-2814

ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РАМИ ВІЗКА ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА ДПКР-2 ПІД ЧАС ДІЇ РОЗРАХУНКОВИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Мета. Підвищення безпеки експлуатації, збільшення міцності й довговічності найбільш навантажених несних елементів рухомого складу – візків, зокрема візків дизель-поїзда ДПКр-2. **Методика.** Для оцінки міцності конструкції дослідного варіанта візка побудована просторова твердотільна 3D-модель. Із застосуванням програмного комплексу, що реалізує метод скінченних елементів, на основі теорії Пальмгрена–Майнера–Мізеса визначені найбільш напружені вузли рами візка. Під час проведення скінченно-елементного моделювання враховані особливості роботи конструкції в експлуатації, дія статичних навантажень і відповідних динамічних добавок. Результати розрахунку були використані для розробки схеми розміщення тензодатчиків на рамі візка під час проведення ходових випробувань на міцність. За їх результатами дано оцінку втомної міцності дослідного варіанта рами візка в разі дії експлуатаційних навантажень і зроблено висновок про необхідність посилення її конструкції. Конструкторське управління ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» запропонувало варіант посилення дослідного зразка рами візка. **Результати.** Ґрунтуючись на результатах теоретичних та експериментальних досліджень, було проведено модернізацію конструкції дослідного варіанта візка дизель-поїзда ДПКр-2, що дозволило зменшити напруження в найбільш навантажених вузлах і значно збільшити її довговічність. Виконано розрахунки на міцність і ходові випробування на міцність дизель-поїзда з модернізованими візками. **Наукова новизна.** Уперше побудовано просторову скінченно-елементну модель візка дизель-поїзда нового покоління і проведено розрахунок на міцність під час дії нормативних навантажень. Побудована модель дозволила вибрати варіант модернізації дослідного зразка рами, який задовольняє умови втомної міцності. Проведені експериментальні дослідження показали ефективність модернізації, зокрема збільшення міцності й довговічності конструкції. **Практична значимість.** Комплекс розрахунково-експериментальних робіт з оцінки напружено-деформованого стану рами візка дизель-поїзда ДПКр-2 в разі дії розрахункових та експлуатаційних навантажень дозволив створити конструкцію, яка задовольняє як експлуатаційні вимоги, так і вимоги міцності й довговічності. Розроблена конструкція рами візка дає можливість підвищити безпеку експлуатації й може бути використана в дизель-поїздах наступних поколінь.

Ключові слова: міцність конструкції; довговічність; несучий елемент; візок дизель-поїзда; посилення конструкції

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160653
© С. А. Кострица, С. Ю. Молчанов, М. В. Крамаренко, А. А. Гречкин, Д. В. Лактионов, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

S. A. KOSTRYTSIA[1*], S. Y. MOLCHANOV[2*], M. V. KRAMARENKO[3*], A. A. HRECHKIN[4*], D. V. LAKTIONOV[5*]

[1*]Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 11, e-mail kossa571@gmail.com, ORCID 0000-0002-7922-0975
[2*]Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 11, e-mail sergio.molchanov88@gmail.com, ORCID 0000-0002-2568-1581
[3*]PJSC «Kryukov Railway Car Building Works», I. Prykhodko St., 139, Kremenchuk, Ukraine, 39621, tel. +38 (0536) 76 95 05, e-mail kvsz@kvsz.com, ORCID 0000-0001-6686-8556
[4*]PJSC «Kryukov Railway Car Building Works», I. Prykhodko St., 139, Kremenchuk, Ukraine, 39621, tel. +38 (0536) 66 11 71, e-mail pkutsn@kvsz.com, ORCID 0000-0003-4618-5525
[5*]PJSC «Kryukov Railway Car Building Works», I. Prykhodko St., 139, Kremenchuk, Ukraine, 39621, tel. +38 (0536) 66 11 71, e-mail pkutsn@kvsz.com, ORCID 0000-0001-6877-2814

STRESS-STRAIN STATE ASSESSMENT OF THE BOGIE FRAME OF DPKR-2 DIESEL TRAIN UNDER ACTION OF DESIGN AND OPERATIONAL LOADS

Purpose. The article is aimed to ensure the operation safety, increase in the strength and durability of the most loaded supporting elements of rolling stock – bogies, in particular the bogies of the DPKr-2 diesel train. **Methodology.** In order to assess the design strength of the bogie prototype, a spatial solid-state 3D model was constructed. Using the software package implementing the finite element method, the most loaded nodes of the bogie frame are determined based on the Palmgren–Miner–Mises theory. During the finite element modeling, the peculiarities of the design work in operation, the action of static loads and the corresponding dynamic additives are taken into account. The results of calculation were used to develop the layout diagram of the strain gauges on the bogie frame during the running strength tests. According to their results, the fatigue strength of the bogie frame prototype under the action of operating loads was estimated and a conclusion was made about the need to strengthen its design. The design management of the PJSC «Kryukov Railway Car Building Works» proposed the variant of enhancing the bogie frame prototype. **Findings.** Based on the results of theoretical and experimental studies, the prototype design of the DPKr-2 diesel train was modernized, which made it possible to reduce stresses in the most loaded nodes and significantly increase its durability. Strength calculations and running strength tests of diesel trains with modernized bogies were carried out. **Originality.** For the first time, a spatial finite element model of the new generation diesel train was constructed and the strength calculation was carried out under the action of design loads. The constructed model made it possible to choose the variant of modernizing the frame prototype that satisfies the fatigue strength conditions. The conducted experimental studies have shown the efficiency of modernization, in particular the increase in strength and durability of the design. **Practical value.** The complex of design and experimental work on the assessment of the stress-strain state of the bogie frame of the DPKr-2 diesel train under the action of design and operating loads allowed creating a design that satisfies both the operational requirements and the requirements of strength and durability. The developed design of the bogie frame makes it possible to increase the operation safety and can be used in the next generation diesel trains.

Keywords: design strength; durability; supporting element; diesel train bogie; design reinforcement

REFERENCES

1. Bolotin, V. V. (1984). *Prognozirovaniye resursa mashin i konstruktsiy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
2. Bosov, K. A. (2016). *Ansys dlya konstruktorov*. Moscow: DMK Press. (in Russian)
3. Nadezhnost v tekhnike. Sistema sbora i obrabotki informatsii. Planirovanie nablyudeniy, 23 GOST 27.502–83. (1984). (in Russian)
4. Kaplun, A. B., Morozov, Ye. M., & Olfereva, M. A. (2015). *Ansys v rukakh inzhenera. Prakticheskoe rukovodstvo*. Moscow: Librokom. (in Russian)
5. Madeyski, T. (1990). Telezhki s korotkoy bazoy dlya vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava. *Zheleznye dorogi mira, 2*, 19-20. (in Russian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160653
© С. А. Кострица, С. Ю. Молчанов, М. В. Крамаренко, А. А. Гречкин, Д. В. Лактионов, 2019

6. Bernshteyn, M. L., & Rakhshtadt, A. G. (Eds). (1983). *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali: Spravochnik* (Vol. 1-3). Moscow: Metallurgiya. (in Russian)
7. *Normy dlya rascheta i otsenki prochnosti nesushchikh elementov i dinamicheskikh kachestv ekipazhnoy chasti motorvagonnogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog MPS RF kolei 1520 mm.* Moscow: VNIIZhT. (in Russian)
8. Plekhotski, V. (1994). Ispytaniya novykh telezhek dlya metropolitenov v Vene. *Zheleznye dorogi mira, 9,* 33-35. (in Russian)
9. Pronikov, A. S. (1978). *Nadezhnost mashin.* Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
10. Terminologiya teorii uprugosti, ispytaniy i mekhanicheskikh svoystv materialov i stroitelnoy mekhaniki. (1952). In *Sborniki rekomenduemykh terminov* (Vol. 14). Moscow. (in Russian)
11. Shor, Ya. B. (1965). *Prikladnye voprosy teorii nadezhnosti* (Vol. 3-4). Moscow. (in Russian)
12. Shukhgalter, L. Ya. (1963). *Ekonomika dolgovechnosti i nadezhnosti mashin*. Moscow: Ekonomizdat. (in Russian)
13. Miltenović, A., Banić, M., Stamenković, D., Milošević, M., Tomić, M., & Bucha, J. (2015). Determination of friction heat generation in wheel-rail contact using fem. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering, 13(2),* 99-108. (in English)
14. Kovalchuk, V., Kuzyshyn, A., Kostritsya, S., Sobolevska, Y., Batig, A., & Dovganyuk, S. (2018). Improving a methodology of theoretical determination of the frame and directing forces in modern diesel trains. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(7(96),* 19-26. doi: 10.15587/1729-4061.2018.149838 (in English)
15. Kotoul, M. (2015). Crack path modelling in railway wheel under rolling contact fatigue. *Applied and Computational Mechanics, 9(2),* 103-126. (in English)
16. Sae Siew, J., Mirza, O., & Kaewunruen, S. (2015). Nonlinear Finite Element Modelling of Railway Turnout System considering Bearer/Sleeper-Ballast Interaction. *Journal of Structures, 2015,* 1-11. doi: 10.1155/2015/598562 (in English)
17. Sun, Y. Q., Cole, C., & Spiryagin, M. (2015). Monitoring vertical wheel–rail contact forces based on freight wagon inverse modelling. *Advances in Mechanical Engineering, 7(5).* Retrieved from http://clc.am/SWV_Zw doi: 10.1177/1687814015585431 (in English)
18. Kuzyshyn, A., Batig, A., Kostritsa, S., Sobolevska, J., Kovalchuk, V., Dovhanyuk, S., & Voznyak, O. (2018). Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension. *MATEC Web of Conferences, 234*. Retrieved from http://clc.am/QaWrNA doi: 10.1051/matecconf/201823405003 (in English)
19. Tran, P. (2016). *SOLIDWORKS 2016 Advanced Techniques.* Mission: SDC Publications. (in English)
20. Vu, Q. H., & Vu, D. Q. (2016). Implementation of multiaxial high cycle fatigue criterion in finite element analysis. *MATEC Web of Conferences, 77.* Retrieved from http://clc.am/cV7dvw doi: 10.1051/matecconf/20167701022 (in English)

Поступила в редколлегию: 03.09.2018
Принята к печати: 04.01.2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160653
© С. А. Кострица, С. Ю. Молчанов, М. В. Крамаренко, А. А. Гречкин, Д. В. Лактионов, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

УДК 629.463.3:656.211.7

А. О. ЛОВСЬКА[1*]

[1*]Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

ВИЗНАЧЕННЯ СТІЙКОСТІ КОНТЕЙНЕРА-ЦИСТЕРНИ ВІДНОСНО РАМИ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ ПІД ЧАС ПЕРЕВЕЗЕННЯ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ПОРОМІ

Мета. Це дослідження спрямоване на виявлення особливостей визначення стійкості контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи, під час перевезення на залізничному поромі. **Методика.** Для досягнення зазначеної мети проведено математичне моделювання динамічної навантаженості контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі, під час перевезень на залізничному поромі. Модель враховує переміщення контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи та наливного вантажу в котлі, переміщення якого обмежені його стінками. Ураховано, що вагон-платформа, на якому розміщений контейнер-цистерна, жорстко закріплений відносно палуби залізничного порома та здійснює переміщення разом із нею. За прототип обраний контейнер-цистерна типорозміру 1СС, розміщений на вагоні-платформі моделі 13-4012. Під час складання моделі враховано трохоїдальний закон руху збуреної дії (морської хвилі) на залізничний пором із вагонами, розміщеними на його палубах, і дисипативну складову, яка виникає під час коливань залізничного порома в умовах морської хитавиці. Також взяті до уваги курсові кути морської хвилі відносно корпуса залізничного порома й вітрове навантаження, що діє на надводну проекцію залізничного порома, вагона-платформи, розміщеного на верхній палубі, і контейнерів-цистерн. Розв'язання диференціальних рівнянь руху здійснено в середовищі програмного забезпечення MathCad із урахуванням зведення їх до нормальної форми Коші з наступним інтегруванням за методом Рунге–Кутта. **Результати.** Установлені величини прискорень як складові динамічного навантаження враховано під час дослідження стійкості контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи. Отримано уточнені величини динамічних навантажень, які діють на контейнер-цистерну, розміщену на вагоні-платформі, під час перевезення на залізничному поромі. **Наукова новизна**. Розроблено математичну модель переміщень контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі, під час перевезення на залізничному поромі. **Практична значимість.** Результати проведених досліджень можуть бути використані під час проектування контейнерів-цистерн нового покоління з поліпшеними техніко-економічними й екологічними показниками.

Ключові слова: контейнер-цистерна; динаміка; стійкість; моделювання; навантаженість конструкції; залізнично-поромні перевезення

Вступ

Підвищення об'ємів перевезень наливних вантажів через міжнародні транспортні коридори зумовлює впровадження в експлуатацію контейнерів-цистерн. Потреба в контейнерах-цистернах як транспортних засобах у перевізному процесі зумовлена їх мобільністю та інтермодальністю.

Останнім часом простежується ефективність експлуатації контейнерів і на залізнично-поромних маршрутах у складі поїздів комбінованого транспорту.

Для гарантування безпеки слідування контейнерів-цистерн морем необхідним є дослідження їх стійкості під час коливань залізничного порома в умовах хвилювання моря.

Визначення динамічної навантаженості контейнера-цистерни за експлуатаційних режимів навантаження проведено у [29]. Отримані величини враховано під час розрахунків на міцність контейнера-цистерни в середовищі програмного забезпечення Ansys.

Особливості розрахунку на міцність підлоги 40-футового контейнера у програмному комплексі Abaqus/CAE v 6.1 наведені у [25]. Запропоновані рекомендації щодо безпечної експлуатації цього типу контейнера.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160182
© А. О. Ловська, 2019

Задача визначення показників міцності контейнерів під час перевезення їх на залізничних поромах у розглянутих роботах не ставилася.

Обґрунтування оптимізації несучої конструкції контейнера-цистерни моделі ТК25 з метою зменшення матеріалоємності наведене у [5, 20]. Під час складання моделі міцності контейнера-цистерни враховано, що конструкція повинна витримувати дію власних сил інерції. Ці сили виникають під час руху транспортного засобу, а також у ряді інших випадків: співударяння вагонів у момент маневрових операцій, у тому числі під час розпускання з гірок, екстреного гальмування в поїздах на малих швидкостях руху; за прискорень у повздовжньому напрямку – 2g, у поперечному напрямку – 1g, у вертикальному напрямку – 2g; у разі співударянь для завантаженого контейнера – 4g, для порожнього (з метою перевірки арматури) – 5g [4].

Дослідження міцності контейнера-цистерни моделі Т11 за експлуатаційних режимів навантаження проведене у [13]. У роботі проаналізований вплив густоти скінченно-елементної сітки на точність розрахунку напружено-деформованого стану контейнера-цистерни, а також проведені натурні дослідження його міцності за ударних навантажень.

Визначенню показників міцності контейнера-цистерни під час перевезення на залізничному поромі в цих роботах уваги не приділено.

Конструкційні особливості контейнера-цистерни для перевезення та зберігання скрапленого природного газу розглянуті в [24]. У статті наведені теплові розрахунки котла контейнера-цистерни, визначений оптимальний час зберігання вантажу.

Вплив корозії й температури на міцність бокової оболонки паливного бака, що перебуває під тиском, досліджено у [28]. Запропоновані рекомендації щодо підвищення довговічності паливного бака в експлуатації.

Рекомендації щодо проектування несучих конструкцій контейнерів для забезпечення їх міцності під час перевезення на залізничних поромах у цих роботах не наведені.

Обґрунтування доцільності проектування та впровадження в експлуатацію контейнерів-цистерн як транспортних засобів наведено в [15]. Розроблено нову оптимізовану конструкцію контейнера-цистерни для перевезення світлих нафтопродуктів.

Результати визначення напруженого стану контейнера-цистерни наведені у [23], визначені відхилення рами й котла за експлуатаційних режимів навантаження.

Питанню дослідження міцності контейнера-цистерни під час перевезення на залізничному поромі в зазначених роботах уваги не приділено.

Вплив рівня завантаження котла вагона-цистерни наливним вантажем на його статичну навантаженість досліджено у [27]. У статті наведені результати визначення максимальних еквівалентних напружень і деформацій у котлі з урахуванням різного рівня його завантаженості.

Удосконалення конструкції опорного пристрою вагона-цистерни для перевезення наливних вантажів описано у [26]. Розрахунок на міцність проведений за методом скінченних елементів і реалізований в середовищі програмного забезпечення «Ліра».

Варіаційному описанню конструктивних виконань вантажних вагонів присвячена робота [21]. Наведені особливості й приклад застосування запропонованого методу формалізованих варіаційних описань конструктивних виконань вантажних вагонів у вигляді «І–АБО» – дерев.

Дослідження навантаженості несучих конструкцій транспортних засобів під час перевезення на залізничному поромі в цих роботах не проведене.

Визначення сил, які діють на вагони під час перевезень їх залізничним поромом морем проведене у [7]. При цьому динамічне навантаження, що діє на вагони, визначено шляхом диференціювання закону руху морської хвилі.

Особливості дослідження динамічних навантажень, які діють на вагони під час перевезень їх морем, розглянуті у [11]. У роботі наведено математичні моделі, які дозволяють отримати прискорення за основних видів коливань залізничного порома.

Визначенню навантаженості контейнерів-цистерн у складі поїздів комбінованого транспорту під час перевезень на залізничних поромах досі уваги не приділялося.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160182
© А. О. Ловська, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Мета

Основною метою статті є виявлення особливостей визначення стійкості контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи під час перевезення на залізничному поромі. Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати наступні задачі:

1. Провести математичне моделювання динамічної навантаженості контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі.
2. Визначити коефіцієнт стійкості контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи.

Методика

Для визначення динамічної навантаженості контейнера-цистерни під час перевезення у складі комбінованого поїзда на залізничному поромі складено математичну модель (1), яка враховує переміщення системи «залізничний пором – контейнер-цистерна – наливний вантаж» за кутових переміщень відносно поздовжньої осі (рис. 1). Модель враховує, що вагон-платформа, на якому розміщений контейнер-цистерна, жорстко закріплений відносно палуби залізничного порома й здійснює переміщення разом із нею.

Розрахунки проведені стосовно залізничного порома «Герои Шипки», що рухається акваторією Чорного моря. За базову модель вагона-платформи взята модель 13-4012.

Ударна дія морських хвиль на корпус залізничного порома з вагонами, розміщеними на його борту, до уваги не взята. Під час складання моделі враховано трохоїдальний закон руху збуреної дії [10, 12] (морської хвилі) на залізничний пором із вагонами, розміщеними на його палубах (2), і дисипативну складову, яка виникає під час коливань залізничного порома в умовах морської хитавиці. Також взяті до уваги курсові кути морської хвилі відносно корпуса залізничного порома ($\chi = 0^0 - 180^0$ [17]) та вітрове навантаження, що діє на надводну проекцію залізничного порому, вагона-платформи, розміщеного на верхній палубі, і контейнерів-цистерн. Чисельні значення параметрів збуреної дії, які закладені у математичну модель, наведені у табл. 1. При цьому до уваги взяті найбільш несприятливі гідрометеорологічні параметри, характерні для руху залізничного порома морем і наведені у [2, 7].

Частоту морської хвилі визначено з урахуванням курсового кута до корпуса залізничного порома з вагонами, розміщеними на його палубах [1, 14]:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot \upsilon}{k_\lambda \cdot L \cdot \cos\chi},$$

де υ – швидкість руху залізничного порома; k_λ – коефіцієнт, який залежить від форми обводів судна; χ – курсовий кут хвилі відносно корпуса залізничного порома.

Таблиця 1

Чисельні значення параметрів збуреної дії, які закладені у математичну модель

Table 1

Numerical values of the disturbing action parameters laid in the mathematical model

Назва параметра	Чисельне значення
Висота морської хвилі, м	8
Курсовий кут хвилі, град.	0–180
Тиск вітру на надводну проекцію залізничного порому, т/м^2	0,15
Коефіцієнт опору кутовим переміщенням залізничного порому відносно поперечної осі, тсм$^{-1}$	16
Коефіцієнт опору кутовим переміщенням залізничного порому відносно поздовжньої осі, тсм$^{-1}$	0,34

Швидкість руху залізничного порома взята рівною його конструкційній швидкості – 18,6 вузлів (9,57 м/с) та під час руху акваторією моря враховувалася незмінною.

Описання процесу переміщень контейнера-цистерни з наливним вантажем здійснене за методикою, наведеною в [16].

Враховано, що вагон-платформа закріплений відносно палуби за типовою схемою з використанням ланцюгових стяжок із талрепами та упор-домкратами. Щоб уникнути перекочування вагонів відносно рейок, під поверхні ко-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160182
© А. О. Ловська, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

чення коліс установлені гальмівні башмаки, а в поздовжньому напрямку крайні в зчепах вагони з'єднані з тупиковими упорами, обладнаними стандартними автозчепами рухомого складу СА-3. Крім того, з метою загальмовування колісних пар гальмівна система вагона підключена до спеціальних рукавів системи для подачі стисненого повітря [19, 22].

Модель не враховує можливих переміщень вагона-платформи відносно палуби залізничного порома.

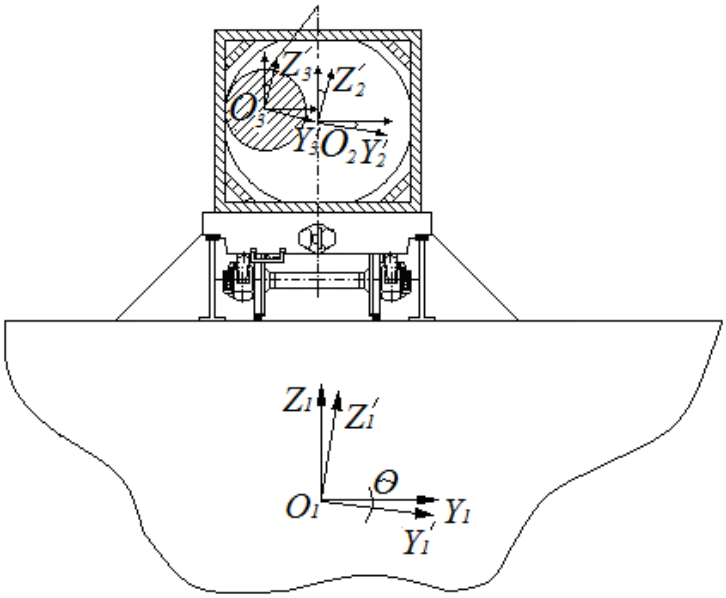


Рис. 1. Схема переміщень контейнера-цистерни з наливним вантажем під час коливань залізничного порома

Fig. 1. Scheme of displacements of a tank-container with liquid cargo during oscillations of a railway ferry

Результати

Математична модель визначення динамічної навантаженості контейнера-цистерни під час перевезення на залізничному поромі:

$$\begin{cases} \left(\dfrac{D}{12\cdot g}(B^2+4z_g{}^2)\right)\ddot{q}+\left(\Lambda_\theta\cdot\dfrac{B}{2}\right)\dot{q}=p'\cdot\dfrac{h}{2}+\Lambda_\theta\cdot\dfrac{B}{2}\cdot\dot{F}(t), \\ \left(I_{\theta i}+\sum\limits_{j=1}^{k}m_{ij}\cdot c_{ij}^2\right)\cdot\ddot{\theta}_2+\sum\limits_{j=1}^{k}m_{ij}\cdot c_{ij}\cdot l_{ij}\cdot\ddot{\theta}_3-g\cdot\left(m_i\cdot z_{ci}+\sum\limits_{j=1}^{k}m_{ij}\cdot c_{ij}\right)\cdot\theta_2=F_k, \\ I_{ij}\cdot\ddot{\theta}_3-m_{ij}\cdot c_{ij}\cdot l_{ij}\cdot\ddot{\theta}_2+g\cdot m_{ij}\cdot l_{ij}\cdot\theta_3=0, \end{cases} \quad (1)$$

де $q_1=\theta_1$, $q_2=\theta_2$, $q_3=\theta_3$ – узагальнені координати, що відповідають кутовому переміщенню відносно поздовжньої осі залізничного порома, контейнера-цистерни й наливного вантажу відповідно; початок системи координат розміщений у центрі мас залізничного порома; D – вагове водовитіснення; B – ширина залізничного порома; h – висота борта залізничного порома; Λ_θ – коефіцієнт опору коливанням;

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160182
© А. О. Ловська, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

z_g – координата центру ваги залізничного порома; p' – вітрове навантаження; $F(t)$ – закон дії зусилля, яке збурює рух залізничного порома з вагонами, розміщеними на його палубах; I_{ij} – момент інерції маятника; m_{ij} – маса *j*-го маятника у *i*-му контейнері-цистерні; c_{ij} – відстань від площини $z_i = 0$ до точки закріплення *j*-го маятника у *i*-му контейнері-цистерні; l_{ij} – довжина *j*-го маятника; I_θ – приведений момент інерції *i*-го контейнера-цистерни та наливного вантажу, що не бере участі в русі відносно котла; z_{ci} – висота центру ваги контейнера-цистерни; m_i – маса тіла, яке еквівалентне *i*-му контейнеру-цистерні з частиною наливного вантажу, що не бере участі в переміщенні відносно котла; F_k – момент сил, що виникає між контейнером-цистерною та вагоном-платформою.

За наливний вантаж узятий бензин. Визначення гідродинамічних характеристик наливного вантажу здійснене з урахуванням максимально допустимої завантаженості котла контейнера-цистерни – 95 % від його загальної місткості відповідно до [18] та обраної, виходячи з умов забезпечення безпеки перевезень морем. Рух наливного вантажу описано сукупністю математичних маятників [16].

Розв’язання математичної моделі здійснено в середовищі програмного забезпечення MathCad [6, 8]. При цьому вона зведена до нормальної форми Коші $\dot{y}(t) = Q(t, y)$.

Вирішення системи диференціальних рівнянь (1) у нормальній формі проведено інтегруванням за методом Рунге–Кутта.

При цьому: $y_1 = \theta_1,\ y_2 = \dot{\theta}_1,$

$y_3 = \theta_2,\ y_4 = \dot{\theta}_2,$

$y_5 = \theta_3,\ y_6 = \dot{\theta}_3.$

Тоді

$$Z(t, y) = \begin{bmatrix} y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ \dfrac{p' \cdot \dfrac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \dfrac{B}{2} \cdot \dot{F}(t)}{I} - \dfrac{\Lambda_\theta \cdot \dfrac{B}{2}}{I} \cdot y_2 \\ \dfrac{-\left(\sum\limits_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij}\right) \dfrac{d}{dt} y_6 + g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum\limits_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij}\right) \cdot y_3}{\left(I_{\theta i} + \sum\limits_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij}^2\right)} + \dfrac{F_k}{\left(I_{\theta i} + \sum\limits_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij}^2\right)} \\ \dfrac{\left(m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij}\right) \cdot \dfrac{d}{dt} y_4 - \left(g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij}\right) \cdot y_5}{I_{ij}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Z = rkfixed\,(Y0, tn, tk, n, Q)$$

де *Y0* – вектор, який містить початкові умови, *tn*, *tk* – величини, які визначають початкову й кінцеву змінну інтегрування, *n* – фіксоване число кроків, *Q* – символьний вектор.

Початкові умови взяті рівними нулю.

Аналітичні вирази для визначення прискорень, які діють на залізничний пором (3), контейнер-цистерну (4) та наливний вантаж (5) наведені нижче:

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{p' \cdot \dfrac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \dfrac{B}{2} \cdot \dot{F}(t)}{I} - \frac{\Lambda_\theta \cdot \dfrac{B}{2}}{I} \cdot y_2, \quad (3)$$

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2019/160182

© А. О. Ловська, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{\left(\frac{g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot y_3}{I_{\theta i} + \sum_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij}^2} + \frac{F_k}{I_{\theta i} + \sum_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij}^2} - \frac{g \cdot y_3}{c_{ij}} \cdot \frac{m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \left(I_{\theta i} + \sum_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right)}{I_{ij} \cdot \left(I_{\theta i} + \sum_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) + \left(m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \right)^2} \right) \cdot I_{ij} + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot y_5}{m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij}}, \quad (4)$$

$$\ddot{\theta}_3 = \frac{g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot y_3}{I_{\theta i} + \sum_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij}^2} + \frac{F_k}{I_{\theta i} + \sum_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij}^2} - \frac{g \cdot y_3}{c_{ij}} \cdot \frac{m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \left(I_{\theta i} + \sum_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right)}{I_{ij} \cdot \left(I_{\theta i} + \sum_{j=1}^{k} m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) + \left(m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \right)^2}. \quad (5)$$

На підставі проведених розрахунків отримано прискорення, які діють на контейнер-цистерну, розміщену на вагоні-платформі під час перевезення на залізничному поромі (рис. 2). При цьому кожному кольору кривої відповідає величина прискорення, яка отримана для певного курсового кута хвилі відносно корпуса залізничного порома з вагонами, розміщеними на ньому (підписи кутів наведені збоку осі ординат).

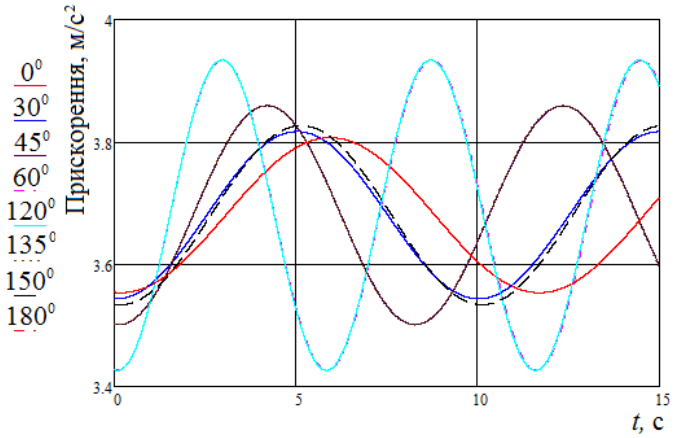


Рис. 2. Прискорення, які діють на контейнер-цистерну

Fig. 2. Accelerations acting on a tank-container

Результати досліджень дозволили зробити висновок, що максимальні прискорення, які діють на контейнер-цистерну, складають близько 3,8 м/с² (рис. 2). З урахуванням горизонтальної складової прискорення вільного падіння, обумовленої кутом нахилу залізничного порома, загальна величина прискорення складе 5,87 м/с² (0,6 g). Тобто величина прискорення, яке діє на контейнер-цистерну, перевищує нормативну для одиниць рухомого складу й вантажів під час перевезень на залізничному поромі, що становить 4,91 м/с² (0,5 g) за кута крену 30º [3]. Отже, за розрахункового кута крену 12,2º, який визначений з урахуванням гідрометеорологічних умов акваторії Чорного моря, величина прискорення вже на 16 % перевищує нормативну.

Для забезпечення стійкості рівноваги контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи потрібно виконувати умову [9]:

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160182
© А. О. Ловська, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

$$k_c = \frac{M_{відн}}{M_{пер}} \geq 1, \quad (6)$$

де $M_{відн}$ – величина відновного моменту; $M_{пер}$ – величина перекидного моменту.

$$M_{пер} = p'_k \cdot \frac{h_к}{2} + M_{бр} \cdot \left(g \cdot \sin\theta + \ddot{\theta}_2\right) \cdot \frac{h_к}{2}, \quad (7)$$

$$M_{відн} = P_{бр} \cdot \cos\theta \cdot \frac{B_к}{2} + $$

$$+ n_ф \cdot \left(M_{бр} \cdot \left(g \cdot \sin\theta + \ddot{q}_k\right)\right) \cdot \frac{h_ф}{2}, \quad (8)$$

де $M_{бр}$ – маса брутто контейнера-цистерни; $P_{бр}$ – вага брутто контейнера-цистерни; $B_к$ – ширина контейнера-цистерни; $n_ф$ – кількість фітингових упорів, на які обпирається контейнер-цистерна за кутових переміщень відносно поздовжньої осі; $h_ф$ – висота фітингового упора.

На підставі проведених розрахунків побудовано графічну залежність коефіцієнта стійкості контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи від кута крену залізничного порома (рис. 3). Крива стійкості позначена синім кольором, лінію тренду (чорний колір) при цьому можна описати рівнянням $y = 2,2896 \cdot e^{-0,175x}$.

Із рис. 3 видно, що стійкість контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи забезпечується за кутів крену залізничного порома до 12^0.

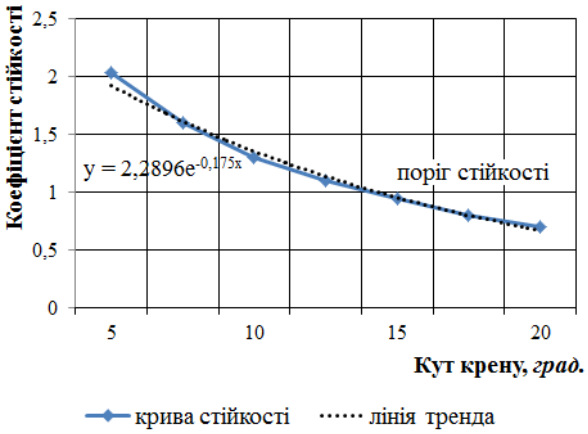


Рис. 3. Залежність коефіцієнта стійкості контейнера-цистерни від кута крену залізничного порома

Fig. 3. Dependence of the stability coefficient of a tank-container on the rolling angle of the railway ferry

Отримані в ході досліджень результати дозволили визначити динамічну навантаженість контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі, під час перевезення залізничним поромом. Визначено кут крену, за якого забезпечується стійкість контейнерів-цистерн відносно рами вагона-платформи під час перевезень на залізничному поромі з урахуванням типової схеми взаємодії контейнерів-цистерн із рамою. Це сприятиме створенню рекомендацій щодо безпечної експлуатації контейнерів-цистерн для комбінованих залізнично-поромних перевезень і розробці нової схеми взаємодії контейнерів-цистерн із рамою вагонів-платформ.

Також отримані результати дозволять на стадії проектування контейнерів-цистерн в умовах вагонобудівних підприємств враховувати уточнені величини навантажень, які діють на них під час експлуатації не тільки відносно магістральних колій, а й на залізничних поромах.

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено математичну модель переміщень контейнера-цистерни, розташованого на вагоні-платформі, під час перевезень на заліз-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160182
© А. О. Ловська, 2019

ничному поромі. Модель враховує коливання наливного вантажу в котлі, яке описувалося маятником, й контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи, обумовлену наявністю зазорів між фітинговими упорами та фітингами.

Результати проведених досліджень можуть бути використані під час проектування контейнерів-цистерн нового покоління з поліпшеними техніко-економічними й екологічними показниками.

Висновки

1. Проведено математичне моделювання динамічної навантаженості контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі, під час перевезення на залізничному поромі. Установлено, що з урахуванням горизонтальної складової прискорення вільного падіння, обумовленої кутом нахилу залізничного порома, загальна величина прискорення, яке діє на контейнер-цистерну, складає 5,87 м/с^2 (0,6 g).

2. Досліджено стійкість контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи, під час перевезення на залізничному поромі. При цьому стійкість контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи забезпечується за кутів крену залізничного порома до 12^0.

3. Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності комбінованих перевезень через міжнародні транспортні коридори.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Благовещенский, С. Н. Справочник по статике и динамике корабля : в 2 т. / С. Н. Благовещенский, А. Н. Холодилин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Судостроение, 1975. – Т. 2 : Динамика (качка) корабля. – 176 с.
2. Ветер и волны в океанах и морях : справ. данные. – Ленинград : Транспорт, 1974. – 359 с.
3. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 54 с.
4. ГОСТ 31232-2004. Контейнеры для перевозки опасных грузов. Требования по эксплуатационной безопасности. – Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2005. – 6 с.
5. Дослідження міцності контейнера-цистерни удосконаленої конструкції при комп'ютерному моделюванні експлуатаційних умов / А. О. Ловська, О. В. Фомін, А. М. Окороков, О. М. Мельничук // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 2 (56). – С. 180–188. doi: 10.15802/stp2015/42177
6. Дьяконов, В. MATHCAD 8/2000 : спец. справ. / В. Дьяконов. – Санкт-Петербург : Питер, 2000. – 592 с.
7. Землезин, И. Н. Методика расчета и исследования сил, действующих на вагон при транспортировке на морских паромах / И. Н. Землезин. – Москва : Транспорт, 1970. – 104 с.
8. Кирьянов, Д. В. Mathcad 13 / Д. В. Кирьянов. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. – 608 с.
9. Ловська, А. О. Визначення навантаженості контейнерів у складі комбінованих поїздів при перевезенні залізничним поромом / А. О. Ловська // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 6 (72). – С. 49–60. doi: 10.15802/stp2017/118993
10. Ловська, А. О. Моделювання навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні у складі комбінованого поїзда на залізничному поромі / А. О. Ловська // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин : зб. наук. пр. – Харків, 2018. – Вип. 33. – С. 28–32. doi: 10.20998/2078-9130.2018.33.151225
11. Ловська, А. О. Особливості математичного моделювання динаміки кузовів вагонів при їх перевезенні на залізничних поромах / А. О. Ловська // Зб. наук. пр. Донец. ін-ту залізн. трансп. – Донецьк, 2014. – Вип. 37 – С. 84–93.
12. Луговский, В. В. Динамика моря: избранные вопросы, связанные с учением мореходности корабля : учебник для втузов / В. В. Луговский. – Ленинград : Судостроение, 1976. – 199 с.
13. Макеев, С. В. Особенности расчета напряженно-деформированного состояния танка-контейнера с учетом реального нагружения в эксплуатации / С. В. Макеев, П. М. Буйленков // Наука–образование–производство: опыт и перспективы развития : сб. материалов XIV Междунар. науч.-техн. конф., посв. памяти Е. Г. Зудова (8–9 февр. 2018 г.) : в 2-х т. – Нижний Тагил, 2018. – Т. 1 : Горно-металлургическое производство. Машиностроение и металлообработка. – С. 174–184.
14. Маков, Ю. Л. Качка судов : учеб. пособие / Ю. Л. Маков. – Калининград : Изд-во ФГОУ ВПО «КГТУ», 2007. – 321 с.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160182
© А. О. Ловська, 2019

15. Мямлин, С. В. Перспективные конструкции контейнеров-цистерн для перевозки светлых нефтепродуктов, аммиака и углеводородных газов / С. В. Мямлин, Ю. В. Кебал, С. М. Кондратюк // Залізн. трансп. України. – 2012. – № 2. – С. 44–46.
16. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку / Г. И. Богомаз, Д. Д. Мехов, О. П. Пилипченко, Ю. Г. Черномашенцева // Динаміка та керування рухом механічних систем : зб. наук. пр. / АНУ, ін-т техн. механіки. – Київ, 1992. – С. 87–95.
17. Наставление по креплению груза для т/х «Петровск». ПР № 002CNF001–ЛМПЛ–805. – Одесса : МИБ, 2005. – 52 с.
18. Правила перевозок опасных грузов. К соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) [Електронний ресурс] // Организация Сотрудничества Железных Дорог (ОСЖД). – 2011. – 531 с. – Режим доступу: http://docs.cntd.ru/document/902061479 – Назва з екрана. – Перевірено : 06.02.2019.
19. Международная паромная переправа Ильичевск – Варна / А. Е. Суколенов, Э. Захариев, И. Г. Гутин [и др.] ; под ред. А. Е. Суколенова. – Москва : Транспорт, 1989. – 103 с.
20. Ловська, А. О. Удосконалення контейнерів-цистерн для перевезення нафтопродуктів шляхом впровадження в їх несучі конструкції круглих труб / А. О. Ловська, О. М. Мельничук, О. В. Фомін // Залізн. трансп. України. – 2015. – № 1. – С. 40–44.
21. Фомін, О. В. Варіаційне описання конструктивних виконань вантажних вагонів / О. В Фомін, А. В. Гостра // Зб. наук. пр. Держ. економ.-технолог. ун-ту трансп. Серія: «Транспортні системи і технології». – Київ, 2015. – Вип. 26-27. – С. 137–147.
22. Шмаков, М. Г. Специальные судовые устройства : справ. пособие / М. Г. Шмаков. – Ленинград : Судостроение, 1975. – 344 с.
23. Bhattacharyya, R. A study on Stress analysis of ISO tank container [Електронний ресурс] / R. Bhattacharyya, A. Hazra // 58th Congress of the Indian Society of Theoretical and Applied Mechanics : Conference Paper. – 2013. – Режим доступу: https://clck.ru/F9TYb – Назва з екрана. – Перевірено : 05.02.2019.
24. Lisowski, E. Transport and storage of LNG in container tanks / E. Lisowski, W. CzyĪycki // Journal of KONES Powertrain and Transport. – 2011. – Vol. 18, No. 3. – P. 193–201.
25. Rzeczycki, A. Strength Analysis of Shipping Container Floor with Gooseneck Tunnel under Heavy Cargo Load / A. Rzeczycki, B. Wisnicki // Solid State Phenomena. – 2016. – Vol. 252. – P. 81–90. doi: 0.4028/www.scientific.net/ssp.252.81
26. Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages / G. Vatulia, A. Falendysh, Y. Orel, M. Pavliuchenkov // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 187. – P. 301–307. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.379
27. Study of the effect of liquid level on the static behavior of a tank wagon / J. O. Trejo-Escandón, A. Leyva-Díaz, P. A. Tamayo-Meza, L. A. Flores-Herrera, J. M. Sandoval-Pineda // International Journal of Engineering Research and Science and Technology. – 2015. – Vol. 4, No. 1. – P. 18–25.
28. Talu, M. The Influence of the Corrosion and Temperature on the Von Mises Stress in the Lateral Cover of a Pressurized Fuel Tank / M. Talu // Hidraulica. – 2017. – Iss. 4. – P. 89–97.
29. Tiernan, S. Dynamic FEA modeling of ISO tank containers / S. Tiernan, M. Fahy // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 124. – Iss. 1-2. – P. 126–132. doi: 10.1016/s0924-0136(02)00196-6

А. А. ЛОВСКАЯ[1*]

[1*]Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КОНТЕЙНЕРА-ЦИСТЕРНЫ ОТНОСИТЕЛЬНО РАМЫ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПАРОМЕ

Цель. Данное исследование направлено на выявление особенностей определения устойчивости контейнера-цистерны относительно рамы вагона-платформы при перевозке на железнодорожном пароме. **Методика.** Для достижения поставленной цели проведено математическое моделирование динамической

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160182
© А. О. Ловська, 2019

нагруженности контейнера-цистерны, размещенного на вагоне-платформе, при перевозке на железнодорожном пароме. Модель учитывает перемещение контейнера-цистерны относительно рамы вагона-платформы и наливного груза в котле, перемещения которого ограничены его стенками. При этом принято допущение, что вагон-платформа, на котором размещен контейнер-цистерна, жестко закреплен относительно палубы железнодорожного парома и осуществляет перемещения вместе с ней. В качестве прототипа выбран контейнер-цистерна типоразмера 1СС, размещенный на вагоне-платформе модели 13-4012. При составлении модели учтено трохоидальный закон движения возмущающего воздействия (морской волны) на железнодорожный паром с вагонами, размещенными на его палубах, и диссипативную составляющую, которая возникает при колебаниях железнодорожного парома в условиях морской качки. Также приняты во внимание курсовые углы морской волны по отношению к корпусу железнодорожного парома и ветровая нагрузка, действующая на надводную проекцию железнодорожного парома, вагона-платформы, расположенного на верхней палубе, и контейнеров-цистерн. Решение дифференциальных уравнений движения осуществлено в среде программного обеспечения MathCad с учетом сведения их к нормальной форме Коши с последующим интегрированием по методу Рунге–Кутта. **Результаты.** Установленные величины ускорений как составляющие динамической нагрузки учтены при исследовании устойчивости контейнера-цистерны относительно рамы вагона-платформы. Получены уточненные величины динамических нагрузок, действующих на контейнер-цистерну, размещенного на вагоне-платформе, при перевозке на железнодорожном пароме. **Научная новизна.** Разработана математическая модель перемещений контейнера-цистерны, размещенного на вагоне-платформе, при перевозке на железнодорожном пароме. **Практическая значимость.** Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании контейнеров-цистерн нового поколения с улучшенными технико-экономическими и экологическими показателями.

Ключевые слова: контейнер-цистерна; динамика; устойчивость; моделирование; нагруженность конструкции; железнодорожно-паромные перевозки

A. O. LOVSKA[1*]

[1*]Dep. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050,
tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

DETERMINATION OF THE TANK CONTAINER STABILITY RELATIVE TO THE FRAME OF A FLAT CAR DURING TRAIN FERRY TRANSPORTATION

Purpose. The research is aimed at revealing the peculiarities of stability determination for a tank container relative to the frame of a flat car during transportation by train ferry. **Methodology.** In order to reach the purpose, the mathematical modelling of dynamic loading of a tank container located on a flat car during the train ferry transportation was conducted. The model takes into account the tank container displacements relative to the flat car frame and liquid cargo in the tank, the displacements of which are limited by the tank's walls. It was assumed that the flat car, with tank container on it, was rigidly fixed relative to the deck of the train ferry and moved together with it. A 1CC type tank container located on a 13-4012 flat car was chosen as a prototype. While designing the model, the following aspects were considered: the trochoidal law of motion of the disturbing action (sea waves) on the train ferry with containers, the dissipative component occurring due to the train ferry oscillations under conditions of sea rolling, the relative bearings of sea waves to the train ferry body, and the wind force to the above-water projection of the train ferry, flat car located on the upper deck and tank containers. The differential equations of motion were solved in the Mathcad with their reduction to the normal Cauchy form with subsequent integration by the Runge–Kutta method. The acceleration values obtained, as the components of the dynamic loading, were considered in the stability research for the tank container relative to the flat car frame. **Findings.** The author obtained the clarified values of dynamic loadings, acting on the tank container located on a flat car during the train ferry transportation. **Originality.** A mathematic model of displacements of a tank container located on a flat car during the train ferry transportation was developed. **Practical value.** The findings of the research can be used at designing tank containers of a new generation with improved technical and economical, as well as ecological indices.

Keywords: tank container; dynamics; stability; simulation; structural loading; train ferry transportation

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160182
© А. О. Ловська, 2019

REFERENCES

1. Blagoveshchenskiy, S. N., & Kholodilin, A. N. (1975). *Spravochnik po statike i dinamike korablya* (Vol. 1-2). Leningrad: Sudostroenie. (in Russian)
2. *Veter i volny v okeanakh i moryakh: spravochnye dannye*. (1974). Leningrad: Transport. (in Russian)
3. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities, 54 GOST 33211-2014 (2016). (in Russian)
4. Konteynery dlya perevozki opasnykh gruzov. Trebovaniya po ekspluatatsionnoy bezopasnosti, 6 GOST 31232-2004 (2005). (in Russian)
5. Lovska, A. O., Fomin, O. V., Okorokov, A. M., & Melnichuk, O. M. (2015). Research of a tank-container strength of improved construction using the computer simulation of operating conditions. *Science and Transport Progress, 2(56),* 180-188. doi: 10.15802/stp2015/42177 (in Ukrainian)
6. Dyakonov, V. (2000). *MATHCAD 8/2000: spetsialnyy spravochnik.* St. Petersburg: Piter, 2000. (in Russian)
7. Zemlezin, I. N. (1970). *Metodika rascheta i issledovaniya sil, deystvuyushchikh na vagon pri transportirovke na morskikh paromakh*. Moscow: Transport. (in Russian)
8. Kiryanov, D. V. (2006). *Mathcad 13*. St. Petersburg: BKhV-Peterburg. (in Russian)
9. Lovska, A. O. (2017). Determination of the loading of containers in mixed trains when transporting by train ferries. *Science and Transport Progress, 6(72)*, 49-60. doi: 10.15802/stp2017/118993 (in Ukrainian)
10. Lovska, A. O. (2018). Simulation of loads for a tank container included in combined trains transported by train ferry. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Dynamics and Strength of Machines, 1(33),* 28-32. doi: 10.20998/2078-9130.2018.33.151225 (in Ukrainian)
11. Lovska, A. O. (2014). Osoblyvosti matematychnoho modeliuvannia dynamiky kuzoviv vahoniv pry yikh perevezenni na zaliznychnykh poromakh. *Zbirnik naukovih prac' of Donetsk Railway Transport Institute*, 37, 84-93. (in Ukrainian)
12. Lugovskiy, V. V. (1976). *Dinamika morya: izbrannye voprosy, svyazannye s ucheniem morekhodnosti korablya: uchebnik dlya vtuzov*. Leningrad: Sudostroenie. (in Russian)
13. Makeev, S. V., & Buylenkov, P. M. (2018). Osobennosti rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tanka-konteynera s uchetom realnogo nagruzheniya v ekspluatatsii. *Nauka–obrazovanie–proizvodstvo: opyt i perspektivy razvitiya: sbornik materialov XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati Ye. G. Zudova (8-9 fevralya 2018 g.)* (Vol. 1-2). Nizhniy Tagil. (in Russian)
14. Makov, Y. L. (2007). *Kachka sudov: uchebnoe posobie.* Kaliningrad: Izdatelstvo FGOU VPO "KGTU". (in Russian)
15. Myamlin, S. V., Kebal, Yu. V., & Kondratyuk, S. M. (2012). Perspektivnye konstruktsii konteynerov-tsistern dlya perevozki svetlykh nefteproduktov, ammiaka i uglevodorodnykh gazov. *Zaliznychnyi transport Ukrainy, 2,* 44-46. (in Russian)
16. Bogomaz, G. I., Mekhov, D. D., Pilipchenko, O. P., & Chernomashentseva, Y. G. (1992). Nagruzhennost konteynerov-tsistern, raspolozhennykh na zheleznodorozhnoy platforme, pri udarakh v avtostsepku. In *Dynamika ta keruvannia rukhom mekhanichnykh system* (pp. 87-95). Kyiv: Institute of Technical Mechanics. (in Russian)
17. Nastavlenie po krepleniyu gruza dlya t/kh «Petrovsk» (2005). PR № 002SNF001–LMPL–805. Odessa: MIB. (in Russian)
18. Pravila perevozok opasnykh gruzov. K soglasheniyu o mezhdunarodnom zheleznodorozhnom gruzovom soobshchenii (SMGS) (2011). *Organisation for Co-operation between Railways (OSJD)*. Retrieved from http://docs.cntd.ru/document/902061479 (in Russian)
19. Sukolenov, A. Y., Zakhariev, E., Gutin, I. G., & Sukolenov, A. Y. (Ed). *Mezhdunarodnaya paromnaya pereprava Ilichevsk – Varna*. Moscow: Transport. (in Russian)
20. Lovska, A. O., Melnychuk, O. M., & Fomin, O. V. (2015). Udoskonalennia konteineriv-tsystern dlia perevezennia naftoproduktiv shliakhom vprovadzhennia v yikh nesuchi konstruktsii kruhlykh trub. *Zaliznychnyi transport Ukrainy, 1*, 40-44. (in Ukrainian)
21. Fomin, O. V., & Hostra, A. V. (2015). Variatsiine opysannia konstruktyvnykh vykonan vantazhnykh vahoniv. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnolohichnoho universytetu transportu. Seriia: «Transportni systemy i tekhnolohii», 26-27*, 137-147. (in Ukrainian)
22. Shmakov, M. G. (1975). *Spetsialnye sudovye ustroystva: Spravochnoe posobie*. Leningrad: Sudostroenie. (in Russian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160182
© А. О. Ловська, 2019

23. Bhattacharyya, R., & Hazra, A. (2013). A study on Stress analysis of ISO tank container. *58th Congress of The Indian Society of Theoretical and Applied Mechanics:* Conference Paper. Retrieved from https://clck.ru/F9TYb (in English)
24. Lisowski, E., & Czyĭycki, W. (2011). Transport and storage of LNG in container tanks. *Journal of KONES Powertrain and Transport, 18(3),* 193-201. (in English)
25. Rzeczycki, A., & Wiśnicki, B. (2016). Strength Analysis of Shipping Container Floor with Gooseneck Tunnel under Heavy Cargo Load. *Solid State Phenomena, 252,* 81-90. doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.252.81 (in English)
26. Vatulia, G., Falendysh, A., Orel, Y., & Pavliuchenkov, M. (2017). Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia Engineering, 187,* 301-307. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.379 (in English)
27. Trejo-Escandón, J. O., Leyva-Díaz, A., Tamayo-Meza, P. A., Flores-Herrera, L. A., & Sandoval-Pineda, J. M. (2015). Study of the effect of liquid level on the static behavior of a tank wagon. *International Journal of Engineering Research and Science and Technology, 4(1),* 18-25. (in English)
28. Talu, M. (2017). The Influence of the Corrosion and Temperature on the Von Mises Stress in the Lateral Cover of a Pressurized Fuel Tank. *Hidraulica, 4,* 89-97. (in English)
29. Tiernan, S., & Fahy, M. (2002). Dynamic FEA modelling of ISO tank containers. *Journal of Materials Processing Technology, 124(1-2),* 126-132. doi: 10.1016/s0924-0136(02)00196-6 (in English)

Надійшла до редколегії: 18.09.2018
Прийнята до друку: 15.01.2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/160182
© А. О. Ловська, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

UDC 629.463.65.015:625.1.032

A. O. SHVETS[1*], O. O. BOLOTOV[2*]

[1*]Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 214 14 19, e-mail angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-5537-6617
[2*]BRL DSRS, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 977 57 08, e-mail bolaks@i.ua, ORCID 0000-0002-0807-0340

INFLUENCE OF LOADING FROM THE AXLE OF A GONDOLA CAR ON ITS DYNAMIC INDICATORS AND RAILWAY TRACK

Purpose. Increasing the maximum loading from the car axle on the rails during transportation of goods and the speed of movement of railway vehicles will enhance the integration processes between the countries. In order to ensure safe and reliable traffic at the railways it is necessary to improve control, quantitative evaluation of the dynamic loading of the rolling stock, which in the process of its operation is a relevant scientific and technical problem. The purpose of this work is to study the influence of the axle loading increase in gondola cars, taking into account the possible speed increase on their main dynamic indicators and indicators of interaction of rolling stock and track. **Methodology**. The study was carried out by the method of mathematical and computer simulation of the dynamic loading of a gondola car using the model of spatial oscillations of the coupling of five cars and the software complex developed in the branch research laboratory of the dynamics and strength of rolling stock (BRL DSRS). The initial data for research are as follows: the movement of gondola car of the model 12-532 with typical bogies of 18-100 at the speeds ranging from 50 to 90 km/h in curves with radii of 350 and 600 m, with superelevation of 130 and 120 mm, respectively. **Findings**. The article analyzes the dynamic qualities of a rolling stock using the example of gondola cars, the calculations are performed using the package of applied programs with sufficient accuracy for practice. During the theoretical studies and simulation, taking into account the processes of freight car oscillation in case of increasing the axle loading, the dependences of the main dynamic parameters, taking into account the movement speed were obtained. **Originality**. Originality of the work results lies in the study of the influence of increasing the axle loading in gondola cars, taking into account the possible movement speed increase on the dynamic loading in order to solve the problem of forecasting the rolling stock dynamics. The results of theoretical studies, taking into account the movement speed in the curved track sections of small and medium radius were obtained for the first time. **Practical value**. The application of these results will contribute to improving the traffic safety of freight cars and will improve the technical and economic performance of railway transport.

Keywords: cargo; gondola cars; dynamic indicators; curved track sections; axle loading; interaction indicators; rolling stock and track; gravity center; movement speed

Introduction

In accordance with the established rules of loading, placing and fastening of cargoes in cars should ensure: movement and operation safety of railway transport; possibility of mechanization of loading and unloading works; preservation of goods and cars.

In addition, one of the main indicators of the efficiency of the car fleet operation is the duration of the loading and unloading operations, which depends on the fitting of freight points at the railway stations and industrial enterprises with modern means of mechanization. The planned reduction of the freight car turnover in 2017-2021, taking into account the improvement of the operation and renovation of the car fleet, is presented in Fig. 1 [3].

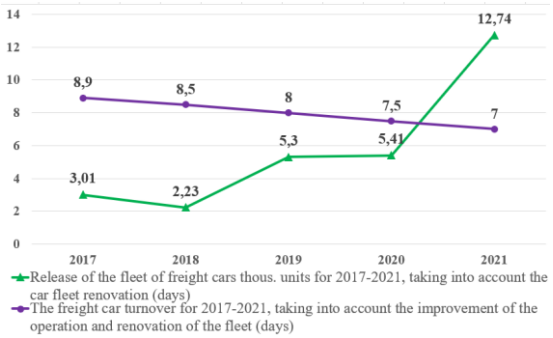


Fig. 1. Reduction of the freight car turnover

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Due to the introduction of new equipment for loading and unloading operations, it is possible to reduce the level of car idle and to minimize it in future (Fig. 2).

Fig. 2. Automated system of the dose loading of broken stone in cars

For example, the automated system of dose loading of broken stone in cars provides [1]:

– dose loading of railway cars;

– uniform loading of cars along the length;

– the exclusion of time and labor costs arising from inadequate loading of cars;

– automated shipping accounting with print output of information and automated control system of enterprise.

Safety performance during transportation of bulk cargo of open storage in accordance with the requirements of the Rules for the transportation of bulk cargo and the Rules for the transportation of goods in open cars remains the main task of the transport industry enterprises. As it is known, depending on the method of loading the gondola cars with bulk cargo, the form of cargo inequalities may be different (Fig. 3). In accordance with clause 5 of the Rules for the transportation of goods in open cars, one should in all cases level the cargo surface [9, 12, 13].

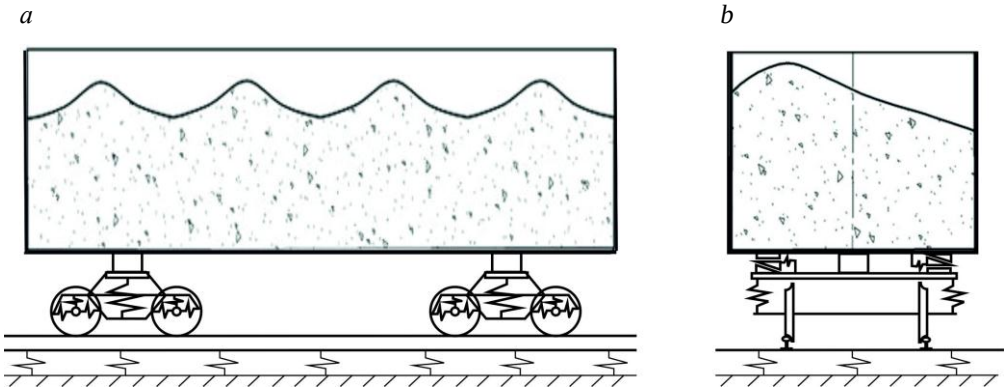


Fig. 3. The form of cargo inequality:
a – longitudinal; *b* – transverse

In order to level the cargo, the most often non-mechanized method is used, which affects the idle increase of gondola cars under freight operations, as well as increase of the total transportation cost. In addition, manual leveling can lead to accidents involving the risk of person`s falling from height.

The leveling construction (Fig. 4) should allow the leveling of the bulk cargo, regardless of the form of its position in the gondola car. The proposed designs of rotary and screw device for the mechanization of bulk cargo leveling in gondola cars have no analogues in domestic and world practice [9].

Fig. 4. The device for bulk cargo leveling in gondola cars of the UkrDURT system

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Each of them has its advantages and disadvantages, namely:

– rotary leveler has a lower mass and a significantly lower cost, but it can only work with cargoes of relatively small bulk density and satisfactory flowability;

– screw leveler, which has greater material consumption and price, makes it possible to mechanize the leveling of heavy cargoes with bad flowability.

In addition, the loading should be carried out in accordance with the current technical specifications. Determination of the displacement of the load gravity center relative to the railway car symmetry axes using the car scales (Figure 5) allows us to quickly detect dangerous deviations in the car stability and thus significantly increase safety during the train movement [4].

Where it is necessary to reduce the labour intensity, minimize the influence of human factor, reduce the time spent for the inspection of cars, the appropriate solution is to automatically scan and check the contents of cars involving operator only in the case of alarm signals from the control system.

Fig. 5. Computerized car scales for weighing in static mode

The hardware-software complex for controlling the car loading is intended for automatic 3D scanning of gondola cars when moving in order to evaluate the level of car volume loading, the uniformity of cargo distribution, cargo volume, detect foreign objects, as well as for other functions in the interests of production services, logistics and safety (Fig. 6) [2].

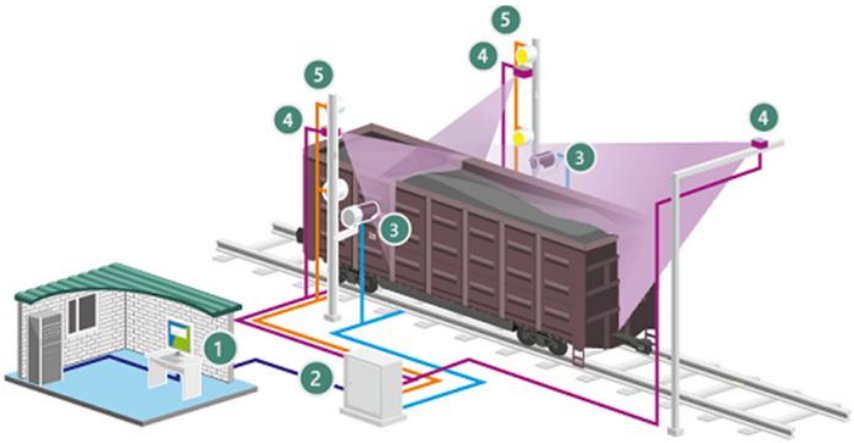


Fig. 6. Hardware-software complex for controlling the car loading:
1 – computer with ARSCIS.Scanner software; *2* –ARSCIS.Scanner box; *3* – video cameras for detection; *4* – scanner of dimensions; *5* – spotlights

Automation of visual control of the car contents provides:

– reducing the time and labor cost for car control operations;

– minimization of human factor influence;

– safety improvement of the railway freight transportations;

– reduction of losses due to underloading/overloading of cars;

– products thievery prevention by railway transport.

The main functions of the hardware and software complex are as follows:

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

– car and cargo scanning using industrial laser sensors;

– construction of a three-dimensional model of the car (and its contents) and its analysis;

– determining the level of car loading;

– detection of foreign objects in an empty car;

– control of the distribution evenness of bulk cargo in a car;

– cargo volume evaluation in a car;

– detection of loading errors (overloading, underloading, unevenness).

The leading domestic developer of unloading systems for unloading bulk cargoes from the railway transport and the largest producer of technological equipment, which is the part of unloading complexes, is Dniprovazhmash PJSC (Fig. 7) [15].

Fig. 7. Stationary rotary car dumper VRS-93, VRS-93-110

Stationary rotary car dumpers, which are produced by Dniprovazhmash PJSC, are intended for unloading of gondola cars with bulk cargo with carrying capacity $60 \div 110$ t by means of gondola cars overturning in a rotary car dumper.

Composite application of modern innovative technologies in railway transport will allow the preservation of cars, reducing their idle time, releasing a significant number of workers from heavy manual operations and obtaining significant economic benefits.

Purpose

The State Administration of Railway Transport of Ukraine established the maximum loading from the car axle on the rails when transporting the freights destinated to individual European countries and border crossings along the track 1520 mm from 20 to 24.5 tons by the telegram dated November 7, 2011, No. CZM-12/2074 according to the Minutes of the meetings on the harmonization of the volumes of the transportation conditions.

Increasing the permissible loading on the car axle, with simultaneous increase in the speed of the railway vehicles, will strengthen the integration processes with the countries of Europe and Asia. The application of modern railway innovative technologies described above makes it possible to increase axle loading, but leads to the need for improved control, quantitative evaluation of the dynamic loading of rolling stock to ensure safe and reliable connection at the railways.

The limit axle loading for freight cars of 23.5 tons per axle was taken into account as one of the main prerequisites for determining the permissible speeds of rolling stock, the order and terms for the designation of repair and track works and labor standards for maintenance of the track and artificial structures. Increasing the axle loading, in turn, leads to the failure rate increase of the rails due to defects of contact-fatigue nature and the deterioration of the track condition. Therefore, in the design process of rolling stock quantitative evaluation of dynamic loadings is a relevant scientific and technical problem [5, 14, 18–22].

The article is aimed to study the influence of increasing the axle loading in gondola cars, taking into account the possible increase in the movement speed on their main dynamic indicators and interaction indicators of track and rolling stock.

Methodology

During operation of trains, primarily the ones with increased length and weight, particular attention is paid to the evaluation of the dynamic performance of vehicles, among which the most important is the indicator characterizing the traffic safety of a vehicle – the stability coefficient against derailment. For this purpose, the mathematical models of spatial oscillations of the car (or group of cars) moving in a train are used.

The models of rolling stock, as a rule, represent the variations of the system of differential equations in the second-order partial derivatives compiled according to the Lagrange–d'Alembert prin-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

ciple, which correspond to the set task. Using such models, the problem can be found analytically. Mathematical modeling makes it possible to determine the dynamic parameters of cars during their movement in straight and curved track sections with real irregularities in the vertical and horizontal planes, taking into account the actual wheel thread and the rail head profile [6, 11, 16, 17].

The oscillations of a single car and its interaction with the rail track are considered using quite full calculation schemes. Fig. 8 shows the calculation scheme of the freight car and shows positive directions for all displacements and rotation angles, and the designation of the system bodies are given in Table 1.

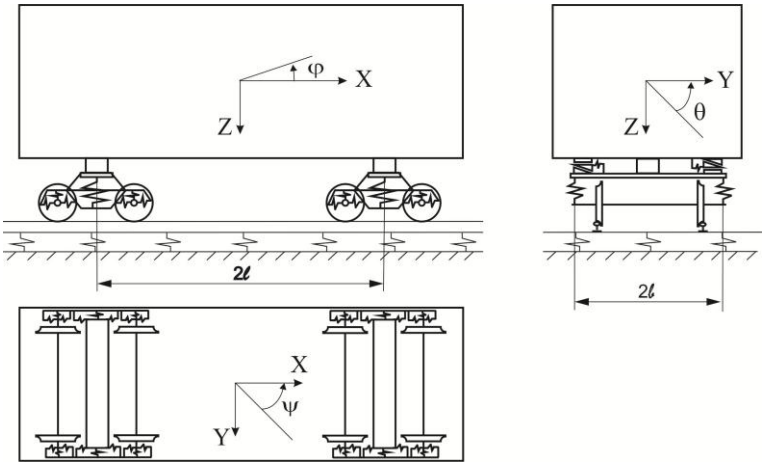


Fig. 8. Calculation scheme of 4-axle gondola car

Table 1

System bodies and their displacements

System bodies	Displacement					
	Linear along the axes			Angle along the axes		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Body	x	y	z	θ	φ	ψ
Bolsters	x_i	y_i	z_i	θ_i	φ_i	ψ_i
Side frames	x_{sij}	y_{sij}	z_{sij}	θ_{sij}	φ_{sij}	ψ_{sij}
Wheel sets	x_{kim}	y_{kim}	z_{kim}	θ_{kim}	φ_{kim}	ψ_{kim}
Rails	–	y_{pimj}	z_{pimj}	–	–	–

In Table 1 the displacements of the gravity center of the body along the corresponding axes are indicated by x, y and z, and rotation angles of the body relative to the main central inertia axes – by θ, φ, ψ. Similar bolster displacements are provided by the index i (i=1, 2 bogie number), side frames – by the index sij (. j=1 .– left, j=2 right side of a car), wheel sets – by the index kim (m=1, 2 – number of wheel set in a bogie), rails at the contact points with the wheels pimj (rail displacements are provided only in two directions – along the axes Y and Y). Displacements of the wheels are indicated by the index imj.

The work [6] proposes a mathematical model describing the spatial oscillations of the car coupling in a train (Fig. 2), one rail carriage of which

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

is considered according to the fullest calculation scheme (called "zero"), and the calculation schemes of neighboring cars, depending on the task setting, are simplified as further is the distance from the "zero" carriage on both sides.

A mechanical system with 58 degrees of freedom is taken as a calculation scheme of the "zero" carriage. The following values are taken as generalized coordinates: $q_1 = z$, $q_2 = \varphi$, $q_3 = \theta$, $q_4 = y$, $q_5 = \psi$, $q_n = \theta_i$ (n=6, 7), $q_n = \psi_i$ (n=8, 9), $q_n = \psi_{sij}$ $(n = 10 \div 13)$, $q_n = y_{sij}$ $(n = 14 \div 17)$, $q_n = z_{sij}$ $(n = 18 \div 21)$, $q_n = \varphi_{sij}$ $(n = 22 \div 25)$, $q_n = \psi_{kim}$ $(n = 26 \div 29)$, $q_n = y_{kim}$ $(n = 30 \div 33)$, $q_n = z_{kim}$ $(n = 34 \div 37)$, $q_n = \theta_{kim}$ $(n = 38 \div 41)$, $q_n = y_{pimj}$ $(n = 42 \div 49)$, $q_n = x_{sij}$ $(n = 50 \div 53)$, $q_n = x_{kim}$ $(n = 54 \div 57)$, $q_{58} = x$.

The cars, adjacent to the "zero" one, are represented by a system with 12 degrees of freedom. In the calculation schemes describing the oscillations of these cars, the main features of freight car bogies are preserved – the side frames lozenging.

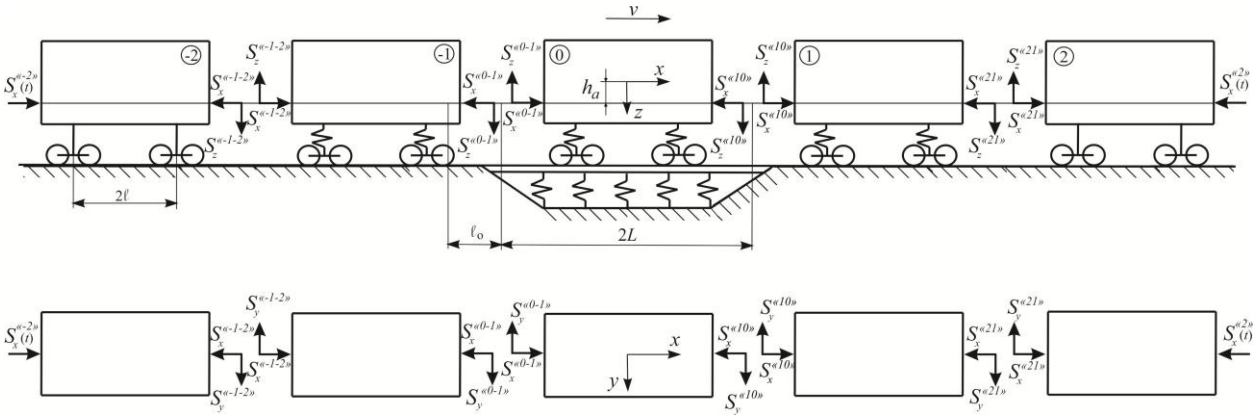


Fig. 9. The forces arising from the action
of longitudinal forces in the auto-couplings of cars

During the study of spatial oscillations of cars adjacent to the «zero» one, considered by the simplified calculation scheme, the following assumptions are introduced. It is assumed that the cars have single-stage spring suspension. Each of them consists of eleven solid bodies: a body, two bolsters, four side frames of the bogie and four wheel sets. Unlike «zero» car, the track under adjacent cars is considered to be absolutely rigid in the vertical direction and elastic in the horizontal transverse direction. This assumption does not lead to increase in the number of degrees of freedom, since the speed of rails displacement in the expressions for transverse forces can be neglected.

The following values are taken as the generalized coordinates for these cars: $q_1^n = z^n$, $q_2^n = \varphi^n$, $q_3^n = \theta^n$, $q_4^n = y^n$, $q_5^n = \psi^n$, $q_k^n = \psi_i^n$ $(k = 6,\ 7)$, $q_k^n = \psi_{si}^n$ $(k = 8,\ 9)$, $q_k^n = y_{si}^n$ $(k = 10,\ 11)$, $q_{12}^n = x^n$,

where i=1, 2; n=1 and -1 – for the «first» and «minus first» cars correspondingly.

Outer cars of coupling, which by analogy we call «second» and «minus second», are considered using even more simplified scheme than the «first» and «minus first» cars. In «second» and «minus second» cars we will take into account only oscillations of bodies, that is, these cars are the systems with six degrees of freedom: $q_1^n = z^n$, $q_2^n = \varphi^n$, $q_3^n = y^n$, $q_4^n = \theta^n$, $q_5^n = \psi^n$, $q_6^n = x^n$,

where n=2 and -2 – for the «second» and «minus second» cars, correspondingly.

As it is known, the traffic safety of trains and preservation of the transported cargoes depend directly on the method of placement and fastening of cargoes. Particular attention is paid to the center of gravity. For stability and safety of transportation, the bulk cargoes in the gondola car bodies should be fully leveled, so that the load on the bogies would be the same and the gravity center is at the

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

intersection of the central longitudinal and transverse lines.

The complement of the mathematical models of spatial oscillations by the initial data with the specified inertial characteristics of the car and cargo elements makes it possible to approximate the results of calculations to the real state of objects and thereby increase the objectivity of mathematical and computer simulation [11, 16, 17].

Different variants of the axle loading of a car in the range from 21.4 tons to 24.5 tons per axle are considered. Initial calculations were made with the axle loading of 21.4 tons per axle. The increase in the axle loading was supposed to be achieved by increasing the load mass in the body, subject to its uniform distribution. In this case, the weight of the cars, the inertia moments I_x, I_y, I_z and the height of the mass center of the body h above the level of rail heads vary. The preparatory calculations using the "Software complex for determining the inertia moments of the car bodies" were carried out. They are given in Table 2 [17].

Table 2

Inertia and mass characteristics of the gondola car during increased loading from the car axle on the rails

P_{st}, t	M_c, t	M_o, t	Inertia moments, $t \cdot m^2$			h, m
			I_x	I_y	I_z	
21.4	85.6	76.5	75	1050	1100	1.84
22.0	88.0	78.9	77.3	1082	1133	1.86
22.5	90.0	80.9	79.5	1113	1166	1.88
23.0	92.0	82.9	81.3	1138.2	1192.4	1.9
23.5	94.0	84.9	83.25	1165.5	1221	1.93
24.0	96.0	86.9	85.2	1192.8	1249.6	1.97
24.5	98.0	88.9	87.15	1220.1	1278.2	2.02

Findings

Calculations can be made with sufficient accuracy for practice, limited to consideration of the movement of a group of five cars (Fig. 2). The research was carried out by the method of mathematical simulation using the model of spatial oscillations of the coupling of five cars and a software complex developed by the BRL DSRS of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Initial data for research: movement of gondola car of the model 12-532 with the typical bogies 18-100 with speeds in the range from 50 to 90 km/h in the curves with radii 350 and 600 m, with superelevation 130 and 120 mm, correspondingly. The rails – P65, wooden sleepers, broken stone ballast [5–8, 16].

In this study, the influence of increase of loading from the car axle on the rails during cargo transportation was considered. The graphs of changes of indicators under analysis when moving in the curved track sections of $R = 600$ and 350 m are presented in Fig. 10–13.

As one can see from Fig. 10 (*a*, *b*), in general, with loading increase from the car axle on the rails the vertical dynamics coefficients increase in the whole range of speeds. The K_{vd} indicators do not exceed the permissible norm both in the curve of $R = 600$ m and in the curve of $R = 350$ m and correspond to the excellent level of assessment $K_{vd} = 0.5$ [8].

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

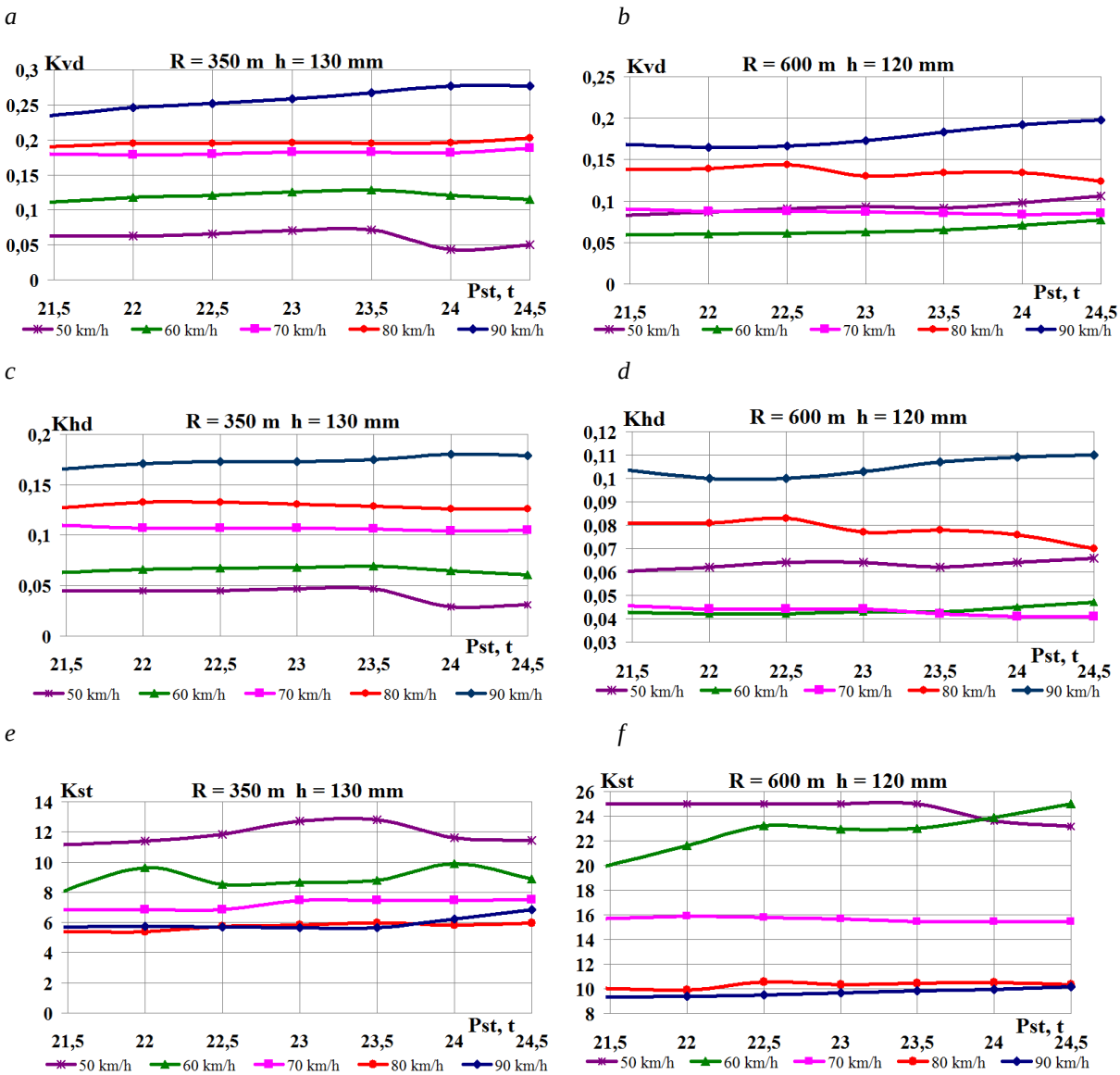


Fig. 10. Dependencde graphs on the axle loading of the car on rails when moving in the corresponding curve: *a, b* – coefficients of vertical dynamics; *c, d* – coefficients of horizontal dynamics; *e, f* – derailment stability coefficient

Fig. 10 (*c*, *d*), presents the coefficients of horizontal dynamics K_{hd} when moving in curves with a radius $R = 350$ m and 600 m, correspondingly. From these figures, one can see that with loading increase from the car axle on the rails, the coefficients of horizontal dynamics K_{hd} slightly change and remain in the curves of $R = 600$ and $R = 350$ m at the excellent level of assessment $K_{hd} = 0.2$ [8].

The derailment stability coefficients in the curves of $R = 350$ and $R = 600$ m (Fig. 10, *d*, *e*) have little dependence on the loading increase from the car axle on the rails and in both cases do not exceed the minimum permissible value $[K_{st}] = 1.3$. On the average the value K_{st} in the curves $R = 350$ m is 52.2% lower than the corresponding values in the curve $R = 600$ m. From the obtained results, it follows that in case of increase of loading from the car axle on the rails, the movement speed has a significant influence on the car stability in the curved track sections.

Fig. 11 shows the coefficients of vertical K_{vdt} and horizontal K_{hdt} dynamics of the track accord-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

ing to the forces of interaction of the wheels and rails, as well as the displacement stability coefficient α_1 of the track panel when moving in the corresponding curved track sections.

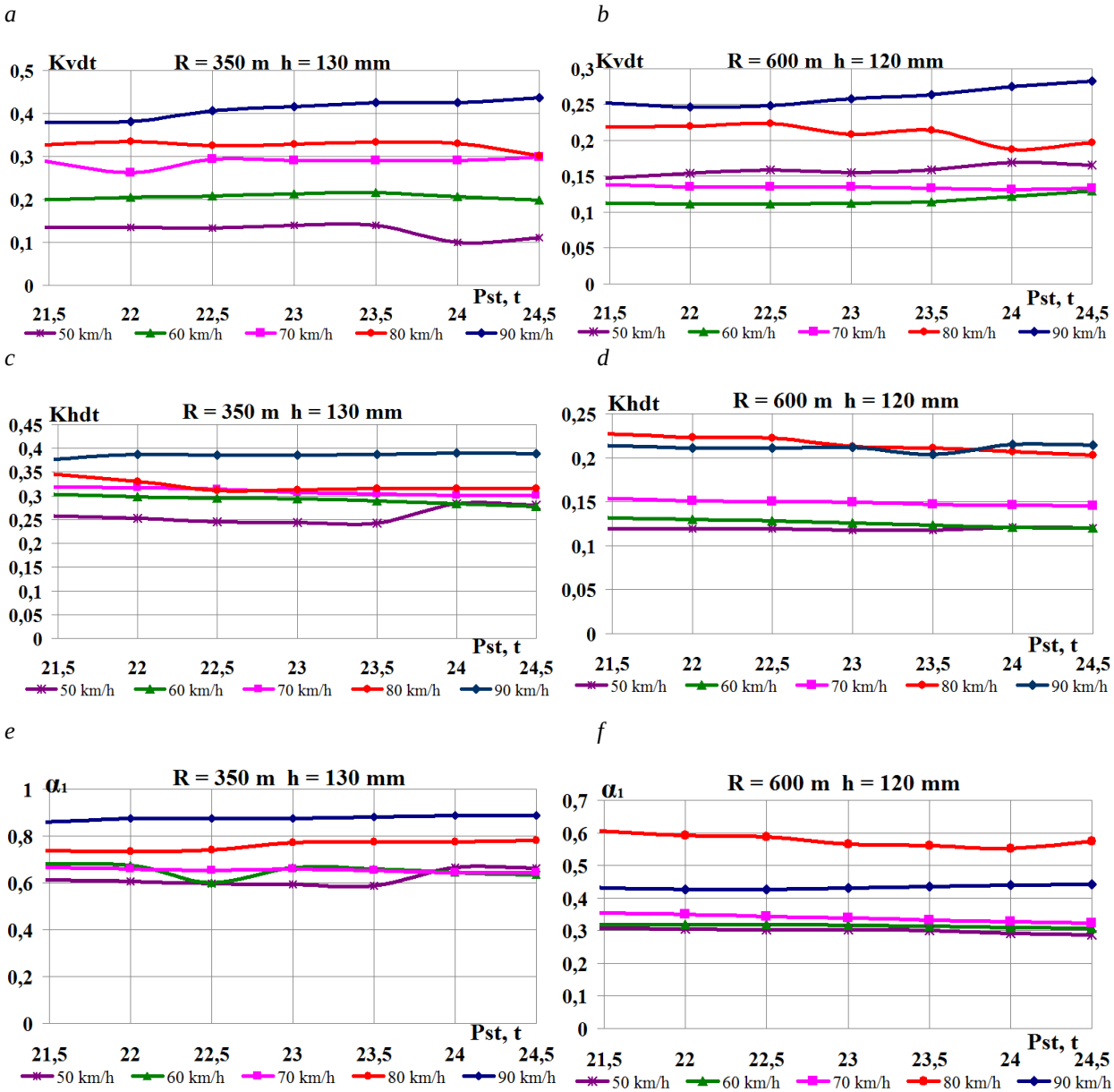


Fig. 11. Graphs of dependence on the axle loading of car on the rails when moving in the corresponding curve:
a, b – coefficient of vertical dynamics of the track for the forces of interaction of wheels and rails;
c, d – coefficient of horizontal dynamics of the track for the forces of interaction of wheels and rails;
e, f – displacement stability coefficient of the track panel

The permissible value of the coefficient of vertical dynamics of the track K_{vdt} is calculated according to the permissible dynamic load per unit length on the railway track from the group of the bogie axles of 168 kN/m and is $[K_{\text{vdt}}] = 0.45$ for this type of rolling stock [7]. The coefficient of vertical dynamics of the track K_{vdt} (Fig. 11, *a*, *b*) does not exceed the permissible value in the curves with radius of $R = 350$ and 600 m.

The coefficient of horizontal dynamics of the track K_{hdt} (Fig. 11, *e*, *f*), which is considered the safety criterion against the track panel displace-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

ment, does not exceed the permissible value $[K_{hdt}] = 0.4$ in the curves with radius of $R = 350$ and 600 m. Only at the speed of 90 km/h in the curve of $R = 350$ m K_{hdt} on average has a value of 0.39 and approaches the maximum permissible value.

The value of the stability coefficient of the track panel α_1 (Fig. 11, *c*, *d*) in the track with broken stone ballast is 0.6-0.9, which is less than the permissible value. Therefore for the track with broken stone ballast at normal movement speeds ($V \le 120$ km/h) one should take $[\alpha_1] = 1.4$ [5, 7].

Fig. 12 shows the speed influence on the interaction indicators of track and rolling stock in the curves of $R = 350$ and $R = 600$ m, correspondingly – the side force acting from the track on the wheel, the edge stress at the rail base, the wear factor of the side edge of the wheel tread.

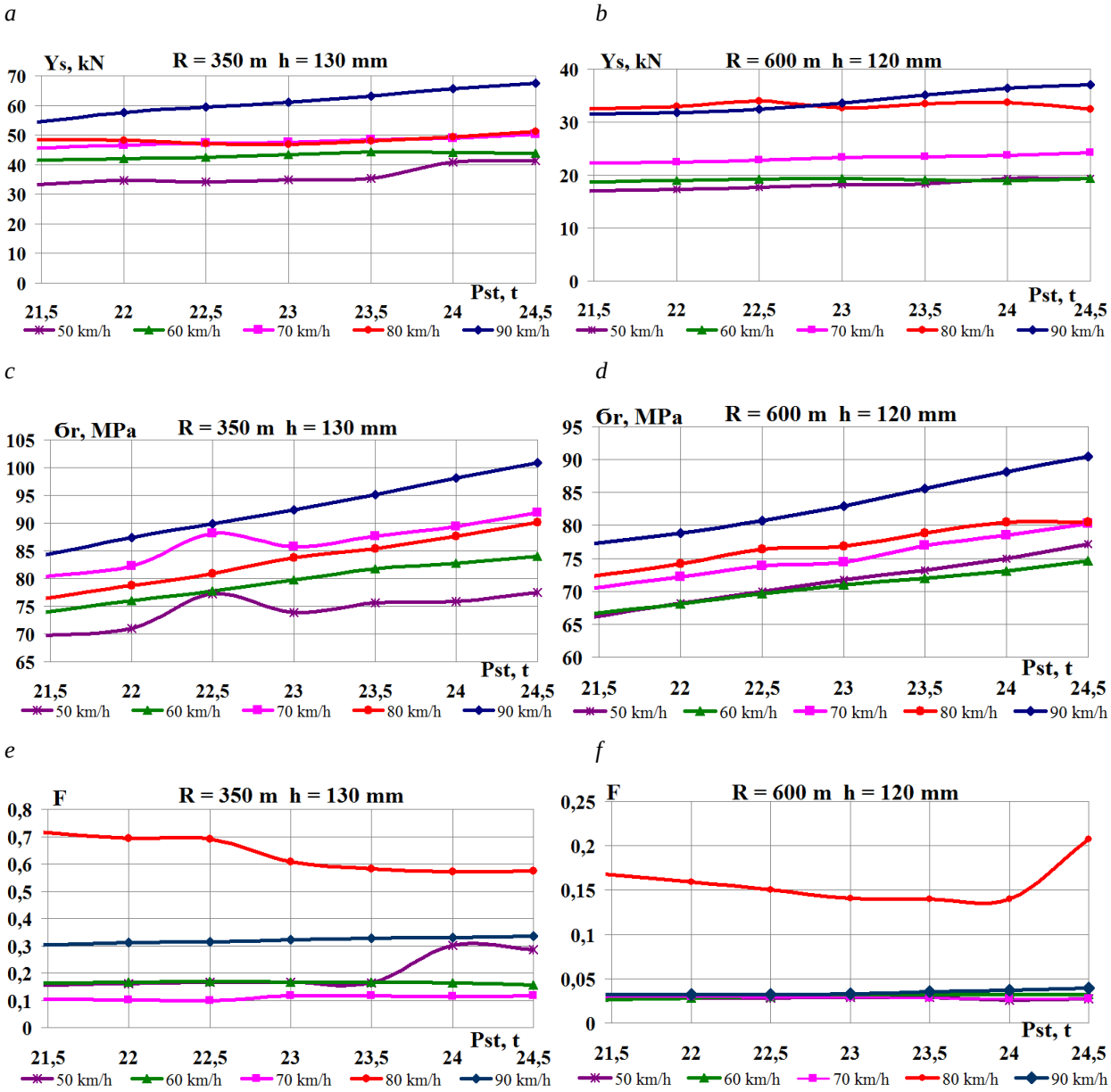


Fig. 12. Graphs of dependence on the axle loading of the car on rails when moving in the corresponding curve: *a*, *b* – side force acting from the track side on the wheel; *c*, *d* – edge stress at the rail base; *e*, *f* – the wear factor of the side edge of the wheel tread

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

The side forces acting from the track on the wheel (horizontal forces) Y_s (Fig. 12, *a*, *b*) increase and, in comparison with the permissible values of 100 kN, have no excess. The values Y_s in the curve of $R = 350$ are on the average 46.1 % higher than the corresponding values in the curve of $R = 600$ m.

The dynamic influence of rolling stock on the track increases with increasing the speeds of train movement, and, as a result, the stresses at the rail base edges increase (Fig. 12, *c*, *d*). The maximum stresses occurring at the edges of the rail bases are used as a criterion for establishing the permissible speeds and should not exceed 215 MPa before the passage of the normative tonnage and 165 MPa after the passage of the normative tonnage for the track with non-heat treated rails P65.

According to the results of calculations, the edge stresses increase with increasing the movement speed and do not exceed the permissible values for both types of rails [5, 7].

As the movement speed increases, for example at the speed of 80 km/h, the wear factor of the side edge of the wheel tread *F* increases significantly (Fig. 12, *e*, *f*) and in the curve of $R = 350$ m it 74.86% exceeds the corresponding value at $R = 600$ m. In turn, *F* increase at the speed of 80 km/h in the curve $R = 350$ m is 66.2% as compared with other speed intervals. The same indicator in the curve $R = 600$ m is 80.5%.

The wear factor of the side edge of the wheel tread *F* is determined as a characteristic equal to the product of the guiding force Y_N on the angle of hunting (climbing) ψ_{ws} of the wheel on the rail. Fig. 13 shows the speed influence on the interaction indicators of rolling stock and track in the curves of $R = 350$ m and $R = 600$ m, correspondingly, guiding force acting on the wheel from the track side on the wheel and the wheel set hunting.

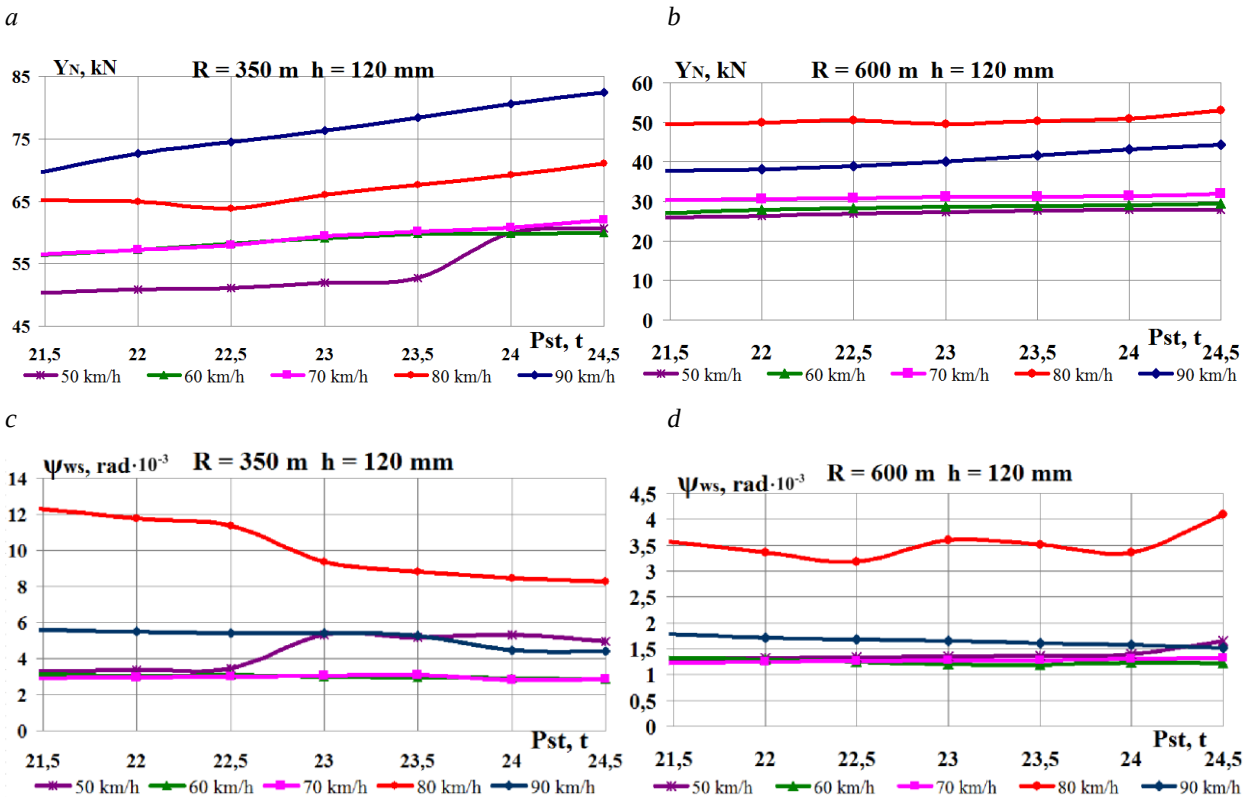


Fig. 13. Graphs of dependence on the axle loading of the car on the rails in the corresponding curve:
a, *b* – guiding force acting from the track side on the wheel; *c*, *d* – wheel set hunting

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Guiding forces acting on the wheel Y_N from the track (Fig. 13, *a*, *b*), significantly increase in the curve of $R = 350$ m with increasing the movement speed. The values Y_N in the curve of $R = 350$ m on the average are 43.6% more than the corresponding values in the curve of $R = 600$ m.

The results of calculations show (Fig. 13, *c*, *d*) that the hunting angle of the wheel set ψ_{ws} at the speed of 80 km/h in the curves of the small and middle radius is significantly differ from the other range of the investigated speeds. The ψ_{ws} values in the curve of $R = 350$ m on average exceed the corresponding value in the curve of $R = 600$ m by 64.9%.

The need to limit the speed of cars on the bogies of the model 18-100 is due to the loss of movement stability, when the dynamic transverse oscillations of the hunting of the car parts stop damping, becoming steady (self-oscillations). The wheel sets after the loss of movement stability continuously oscillate within the rail gap, while the amplitude of self-oscillations may vary within the rail gap, but no oscillation damping is observed. The side frames of the bogie are subject to auto-oscillations of the hunting, since the dynamic movements of the wheel sets are violated predominantly in the antiphase. The car body in turn, starts hunting because of antiphase dynamic displacements of the bogies.

As it is known, the safe train movement speed, which include the cars on the serial bogies of the model 18-100, is determined not by the design speed $.V_d.$, but by the critical one V_{cr}, which is unstable. The critical speed V_{cr} varies according to the following factors [10]:

– the stiffness of the elastic connection between the sidewalls and the wheel sets;

– the car weight – the critical speed of empty cars is lower than that of the loaded ones;

– gravity center of the car – with the increase in the gravity center the critical speed is reduced.

In addition, the critical speed V_{cr} changes during operation depending on the wear of undercarriages, primarily the wheel rims, and the track plan - when passing the curved track sections, the critical speed is higher compared to the value in the straight track sections. At speeds exceeding the critical one, the car loses movement stability. As a result, there are self-oscillations of the lateral swaying of the wheel sets, the bogies and body hunting. There is increase in the horizontal transverse accelerations and frame forces, which worsens the stability coefficient against derailment (Fig. 10, *e*, *f*).

Thus, the movement speed limitation in the curves of small and medium radius, established by the norms, should be observed. It caused by a sharp decrease in the stability coefficient against derailment and increase in the wear factor of the lateral edge of the wheel tread.

Originality and practical value

Originality of the work lies in the study of the influence of increasing the axle loading in gondola cars on their dynamic parameters and interaction indicators of the tracks and rolling stock in order to solve the problem of predicting the rolling stock dynamics and includes the results of theoretical studies taking into account the movement speed in the curved track sections of the small and medium radius.

The obtained results have a practical orientation. During the theoretical studies and after the simulation, taking into account the oscillation processes of the freight car and cargo with increase in the gondola axle loading, dependences of the main dynamic parameters taking into account the movement speed are obtained. Application of the results will increase the traffic safety of freight cars and will improve the technical and economic performance of railway transport.

Conclusions

The article presents analysis of theoretical studies of dynamic qualities of rolling stock on the example of gondola cars, calculations are made using the package of applied programs.

Based on the theoretical study, the following conclusions can be made:

– the movement speed limitation in the curves of the small and medium radius is caused by a decrease in the level of the derailment stability coefficient and increase in the wear factor of the side edges of the wheel tread and should not exceed the values determined by the norms;

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

– the calculations have shown the need to limit the movement speed in the curves of medium radius to 70 km/h, due to the fact that the average weighted speed of trains of 80 km/h is critical for the gondolas on the bogies of the model 18-100, which leads to the loss of stability and increase in the wear factor of the side edge of the wheel tread;

– axle loading increase will increase failure rate of the rails due to defects of contact-fatigue nature, deterioration of the track condition, artificial structures, and the roadbed, which in turn will cause the movement speed limitation of passenger and freight trains, as well as more intense failure of elements of the track superstructure and increase in the annual operating costs.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Автоматизированная система дозированной погрузки щебня в вагоны [Electronic resource]. – Available at: https://clck.ru/F7bWE – Title from the screen. – Accessed : 30.01.2019.
2. Аппаратно-программный комплекс контроля загрузки вагонов «АРСИС.Сканер» [Electronic resource] // ООО «Малленом Системс». – Available at: http://www.mallenom.ru/Docs/ARSCIS.Scanner.pdf – Title from the screen. – Accessed : 30.01.2019.
3. Вагонний парк ПАТ «Укрзалізниця» та взаємодія з приватними власниками рухомого складу / Департамент розвитку і технічної політики (ЦТЕХ) ; кер. ПАТ «Укрзалізниця». – Харків, 2017. – 11 с.
4. Вагонные весы [Electronic resource] // Точное Определение Массы (ТОМ). – Available at: http://tom.odessa.ua/index.php?p=vagon – Title from the screen. – Accessed : 28.01.2019.
5. Даніленко, Е. І. Залізнична колія : підруч. для вищ. навч. закл. : у 2 т. / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 2. – 456 с.
6. Данович, В. Д. Математическая модель пространственных колебаний сцепа пяти вагонов, движущихся по прямолинейному участку пути / В. Д. Данович, А. А. Малышева // Транспорт. Нагруженность и прочность подвижного состава : сб. науч. тр. / Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1998. – С. 62–69.
7. ДСТУ 7571:2014. Рухомий склад залізниць. Норми допустимого впливу на залізничну колію 1520 мм. – Введ. 2014–02–12. – Київ : УкрНДНЦ, 2014. – 33 с.
8. ДСТУ ГОСТ 33211:2017. Вагони вантажні. Вимоги до міцності та динамічних якостей (ГОСТ 33211-2014). – Введ. 2017–07–01. – Київ : УкрНДНЦ, 2017. – 58 с.
9. Засоби для механізації розрівнювання насипних вантажів у напіввагонах / Є. В. Романович, Г. М. Афанасов, Л. М. Козар, В. В. Бут // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2014. – Вип. 148 (1). – С. 116–121.
10. Лазарян, В. А. Устойчивость движения рельсовых экипажей / В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, М. Л. Коротенко. – Киев : Наукова думка, 1972. – 197 с.
11. Определение допустимых сил при оценке устойчивости грузовых вагонов от выжимания в поездах / А. А. Швец, К. И. Железнов, А. С. Акулов, А. Н. Заболотный, Е. В. Чабанюк // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 189–192. doi: 10.15802/stp2016/61045
12. Правила перевезення вантажів навалом і насипом (ст. 37 Статуту) [Electronic resource] : затв. Наказом М-ва транспорту та зв’язку України від 20.08.2001 р. № 542 // Законодавство України. – 2014. – Available at: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0795-01 – Title from the screen. – Accessed : 28.01.2019.
13. Правила перевезення вантажів у вагонах відкритого типу (ст. 32 Статуту) [Electronic resource] : затв. Наказом М-ва транспорту та зв’язку України від 20.08.2001 р. № 542 // Законодавство України. – 2014. – Available at: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0796-01 – Title from the screen. – Accessed : 28.01.2019.
14. Рибкін, В. В. Проведення випробувань з впливу на колію та стрілочні переводи рухомого складу нового покоління з осьовим навантаженням 25 т на вісь / В. В. Рибкін, В. Є. Савлук // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2012. – Вип. 130. – С. 127–131.
15. Транспортно-разгрузочное оборудование [Electronic resource] // Предприятие Днепротяжмаш. – Available at: http://www.dts.dp.ua/ru/factories/dnieprotiazhmash/products/transportno-razghruzochnoie-oborudovaniie – Title from the screen. – Accessed : 28.01.2019.
16. Швець, А. О. Вплив поздовжнього та поперечного зміщення центру ваги вантажу в піввагонах на їх динамічні показники / А. О. Швець // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 5 (77). – С. 115–128. doi: 10.15802/stp2018/146432

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

17. Швець, А. О. Особливості визначення моментів інерції кузовів вантажних вагонів / А. О. Швець // Вісник сертифікації залізничного транспорту. – 2018. – № 5 (51). – С. 20–34.
18. Determination of the issue concerning the lift resistance factor of lightweight car / A. O. Shvets, K. I. Zheliez-nov, A. S. Akulov, O. M. Zabolotnyi, Ye. V. Chabaniuk // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 134–148. doi: 10.15802/stp2015/57098
19. Effect of fracture toughness on vertical split rim failure in railway wheels / T. Kato, Y. Yamamoto, H. Kato, S. Dedmon, J. Pilch // Engineering Fracture Mechanics. – 2017. – Vol. 186. – P. 255–267. doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.09.025
20. Fatigue behavior and microstructural characterization of a high strength steel for welded railway rails / R. Baptista, T. Santos, J. Marques, M. Guedes, V. Infante // International Journal of Fatigue. – 2018. – Vol. 117. – P. 1–8. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.07.032
21. Kurhan, D. Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State / D. Kurhan // Acta Technica Jaurinensis. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 1. – P. 83–96. doi: 10.14513/actatechjaur.v9.n1.400
22. Nikas, D. Evaluation of local strength via microstructural quantification in a pearlitic rail steel deformed by simultaneous compression and torsion / D. Nikas, X. Zhang, J. Ahlström // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 737. – P. 341–347. doi: 10.1016/j.msea.2018.09.067

А. О. ШВЕЦЬ[1*], О. О. БОЛОТОВ[2*]

[1*]Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, ел. пошта angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902
[2*]ГНДЛ ДМРС, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 977 57 08, ел. пошта bolaks@i.ua, ORCID 0000-0002-0807-0340

ВПЛИВ НАВАНТАЖЕННЯ ВІД ОСІ ПІВВАГОНА НА ЙОГО ДИНАМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ТА ЗАЛІЗНИЧНУ КОЛІЮ

Мета. Підвищення максимального навантаження від осі вагона на рейки під час перевезення вантажів і збільшення швидкості руху залізничних екіпажів дозволить посилити інтеграційні процеси між країнами. Для гарантування безпечного й надійного сполучення на залізницях необхідно вдосконалювати контроль, кількісну оцінку динамічної завантаженості рухомого складу, що в процесі його експлуатації складає актуальну науково-технічну задачу. Метою цієї роботи є дослідження впливу збільшення осьового навантаження в піввагонах, з урахуванням можливого підвищення швидкості руху, на їх основні динамічні показники та показники взаємодії рухомого складу з колією. **Методика.** Дослідження проведене методом математичного й комп'ютерного моделювання динамічної завантаженості піввагона з використанням моделі просторових коливань зчепу п'яти вагонів і програмного комплексу, розробленого в галузевій науково-дослідній лабораторії динаміки й міцності рухомого складу (ГНДЛ ДМРС). Вихідні дані для дослідження: рух піввагона моделі 12-532 з типовими візками 18-100 зі швидкостями в діапазоні від 50 до 90 км/год в кривих радіусами 350 і 600 м, із підвищеннями зовнішньої рейки 130 та 120 мм відповідно. **Результати.** У статті проаналізовано динамічні якості рухомого складу на прикладі піввагонів; розрахунки виконано з використанням пакета прикладних програм з достатньою для практики точністю. У ході теоретичних досліджень і моделювання з урахуванням процесів коливання вантажного вагона в разі збільшення осьового навантаження отримано залежності основних динамічних показників від швидкості руху. **Наукова новизна** роботи полягає в дослідженні впливу збільшення осьового навантаження в піввагонах з урахуванням можливого підвищення швидкості руху на їх динамічну завантаженість із метою вирішення задачі прогнозування динаміки рухомого складу. Уперше отримано результати теоретичних досліджень з урахуванням швидкості руху в кривих ділянках колії малого та середнього радіуса. **Практична значимість.** Застосування цих результатів сприятиме підвищенню безпеки руху вантажних вагонів і дозволить поліпшити техніко-економічні показники роботи залізничного транспорту.

Ключові слова: вантаж; піввагони; динамічні показники; криві ділянки колії; осьове навантаження; показники взаємодії; рухомий склад і колія; центр ваги; швидкість руху

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

А. А. ШВЕЦ[1*], А. А. БОЛОТОВ[2*]

[1*]Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, эл. почта angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902
[2*]ОНИЛ ДППС, Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (097) 977 57 08, эл. почта bolaks@i.ua, ORCID 0000-0002-0807-0340

ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ ОТ ОСИ ПОЛУВАГОНА НА ЕГО ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ

Цель. Повышение максимальной нагрузки от оси вагона на рельсы при перевозке грузов и увеличение скорости движения железнодорожных экипажей позволит усилить интеграционные процессы между странами. Для обеспечения безопасного и надежного сообщения на железных дорогах необходимо совершенствовать контроль, количественную оценку динамической загруженности подвижного состава, что в процессе его эксплуатации составляет актуальную научно-техническую задачу. Целью данной работы является исследование влияния увеличения осевой нагрузки в полувагонах, с учетом возможного повышения скорости движения, на их основные динамические показатели и показатели взаимодействия подвижного состава с колеей. **Методика**. Исследование проведено методом математического и компьютерного моделирования динамической загруженности полувагона с использованием модели пространственных колебаний сцепа пяти вагонов и программного комплекса, разработанного в отраслевой научно-исследовательской лаборатории динамики и прочности подвижного состава (ОНИЛ ДППС). Исходные данные исследования: движение полувагона модели 12-532 с типичными тележками 18-100 со скоростями в диапазоне от 50 до 90 км/ч в кривых радиусами 350 и 600 м, с повышениями наружного рельса 130 и 120 мм соответственно. **Результаты**. В статье проанализированы динамические качества подвижного состава на примере полувагонов; расчеты выполнены с использованием пакета прикладных программ с достаточной для практики точностью. В ходе теоретических исследований и моделирования с учетом процессов колебания грузового вагона при увеличении осевой нагрузки получены зависимости основных динамических показателей от скорости движения. **Научная новизна** состоит в исследовании влияния увеличения осевой нагрузки в полувагонах с учетом возможного повышения скорости движения на их динамическую нагрузку с целью решения задачи прогнозирования динамики подвижного состава. Впервые представлены результаты теоретических исследований с учетом скорости движения по кривым участкам пути малого и среднего радиуса. **Практическая значимость.** Применение полученных результатов будет способствовать повышению безопасности движения грузовых вагонов и позволит улучшить технико-экономические показатели работы железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: груз; полувагоны; динамические показатели; кривые участки пути; осевая нагрузка; показатели взаимодействия; подвижной состав и колея; центр тяжести; скорость движения

REFERENCES

1. Avtomatizirovannaya sistema dozirovannoy pogruzki shchebnya v vagony. Retrieved from https://clck.ru/F7bWE (in Russian)
2. Apparatno-programmnyy kompleks kontrolya zagruzki vagonov «ARSIS.Skaner». *OOO «Mallenom Sistems».* Retrieved from http://www.mallenom.ru/Docs/ARSCIS.Scanner.pdf (in Russian)
3. *Vagonnyj park PAT «Ukrzaliznycja» ta vzajemodija z pryvatnymy vlasnykamy ruhomogo skladu.* (2017). Kharkiv: Department of Development and Technical Policy; manager PJSC «Ukrzaliznytsya». (in Ukrainian)
4. Vagonnye vesy. *Tochnoe Opredelenie Massy (TOM).* Retrieved from http://tom.odessa.ua/index.php?p=vagon (in Russian)
5. Danilenko, E. I. (2010). *Zaliznychna koliia: pidruchnyk dlia vyshchykh navchalnykh zakladiv*. (Vol. 1-2). Kyiv: Inpres. (in Ukrainian)
6. Danovich, V. D., & Malysheva, A. A. (1998). Mathematical Model of Spatial Oscillations of the Coupling of Five Cars Moving Along a Rectilinear Section of the Track. *Transport. Stress Loading and Durability of a Rolling Stock* (pp. 62-69). Dnepropetrovsk. (in Russian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

7. Rukhomyj sklad zaliznycj. Normy dopustymogho vplyvu na zaliznychnu koliju 1520 mm. 33 DSTU 7571:2014 (2014). (in Ukrainian)
8. Vahony vantazhni. Vymohy do mitsnosti ta dynamichnykh yakostei, 58 DSTU 33211:2017 (2017). (in Ukrainian)
9. Romanovych, Y. V., Afanasov, H. M., Kozar, L. M., & But, V. V. (2014). Zasoby dlia mekhanizatsii rozrivniuvannia nasypnykh vantazhiv u napivvahonakh. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport, 148(1),* 116-121. (in Ukrainian)
10. Lazaryan, V. A., Dlugach, L. A., & Korotenko, M. L. (1972). *Ustoychivost dvizheniya relsovykh ekipazhey*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
11. Shvets, A. O., Zhelieznov, K. I., Akulov, A. S., Zabolotnyi, O. M., & Chabaniuk, E. V. (2016). Determination the permissible forces in assessing the lift resistant factor of freight cars in trains. *Science and Transport Progress, 1(61),* 180-192. doi: 10.15802/stp2016/61045 (in Russian)
12. Pravyla perevezennia vantazhiv navalom i nasypom (2014). Retrieved from http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0795-01 (in Ukrainian)
13. Pravyla perevezennia vantazhiv u vahonakh vidkrytoho typu (2014). Retrieved from http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0796-01 (in Ukrainian)
14. Rybkin, V. V., & Savluk, V. Y. (2012). Provedennia vyprobuvan z vplyvu na koliiu ta strilochni perevody rukhomoho skladu novoho pokolinnia z osovym navantazhenniam 25 t na vis. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport, 130,* 127-131. (in Ukrainian)
15. Transportno-razgruzochnoe oborudovanie. *Predpriyatie Dneprotyazhmash.* Retrieved from http://www.dts.dp.ua/ru/factories/dnieprotiazhmash/products/transportno-razghruzochnoie-oborudovaniie (in Russian)
16. Shvets, A. O. (2018). Influence of the longitudinal and transverse displacement of the center of gravity of the load in gondola cars on their dynamic indicators. *Science and Transport Progress, 5(77),* 115-128. doi: 10.15802/stp2018/146432 (in Ukrainian)
17. Shvets, A. O. (2018). Specifics of Determining the Moments of Inertia a Freight Wagons Bodies. *Visnyk sertyfikatsii zaliznychnoho transportu, 5(51),* 20-34. (in Ukrainian)
18. Shvets, A. O., Zhelieznov, K. I., Akulov, A. S., Zabolotnyi, O. M., & Chabaniuk, Y. V. (2015). Determination of the issue concerning the lift resistance factor of lightweight car. *Science and Transport Progress, 6(60),* 134-148. doi: 10.15802/stp2015/57098 (in English)
19. Kato, T., Yamamoto, Y., Kato, H., Dedmon, S., & Pilch, J. (2017). Effect of fracture toughness on vertical split rim failure in railway wheels. *Engineering Fracture Mechanics, 186,* 255-267. doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.09.025 (in English)
20. Baptista, R., Santos, T., Marques, J., Guedes, M., & Infante, V. (2018). Fatigue behavior and microstructural characterization of a high strength steel for welded railway rails. *International Journal of Fatigue, 117,* 1-8. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.07.032 (in English)
21. Kurhan, D. (2016). Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State. *Acta Technica Jaurinensis, 9(1*), 83-96. doi: 10.14513/actatechjaur.v9.n1.400 (in English)
22. Nikas, D., Zhang, X., & Ahlström, J. (2018). Evaluation of local strength via microstructural quantification in a pearlitic rail steel deformed by simultaneous compression and torsion. *Materials Science and Engineering: A, 737,* 341-347. doi: 10.1016/j.msea.2018.09.067 (in English)

Received: Sep. 10, 2018
Accepted: Jan. 18, 2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158127
© A. O. Shvets, O. O. Bolotov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

UDC 624.011.1

D. O. BANNIKOV[1*]

[1*]Dep. «Construction Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail dnuzt@diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

OUTLOOKS OF USING DBN B.2.6-161:2017 «WOODEN STRUCTURES» IN DESIGN PRACTICE

Purpose. From 01.02.2018, the new state standards DBN B.2.6-161:2017 were introduced into the wooden structures design practice. They replace the recently prepared codes DBN B.2.6-161:2010, which, in turn, were elaborated to replace the SNiP II-25-80. The author of this publication would like to draw the attention of developers and potential users of the codes DBN B.2.6-161:2017 to the points that are not entirely clear, which at first reading caused him certain difficulties in terms of their practical use. **Methodology**. The practical experience accumulated by the author in the use of normative literature in educational practice, as well as the available experience during laboratory studies with students, made it possible to estimate the recently introduced codes DBN B.2.6-161:2017 from a practical point of view. **Findings.** In general, the new codes, recently introduced into design practice, are progressive both in their content and in terms of their use in construction practice. However, the existing problem areas in these standards, which are considered in this publication, in our opinion, can significantly limit the possibility of their wide practical application. **Originality.** The analysis of recently introduced new standard was carried out by the author of the publication not only in terms of assessing quality requirements and recommendations, but also in terms of the quantitative aspect of the issue. **Practical value.** The author's experience in calculating simple elements and basic types of connections according to the new codes DBN B.2.6-161:2017 indicates that the bearing capacity determined for various cases is lower on average by 1.5 – 3 times than according to the previous codes SNiP II-25-80. From a practical point of view, this revealed discrepancy means that the already constructed structures may require some reinforcement or reconstruction, and new designed structures should have large bearing sections of the elements and, accordingly, large bearing capacity and weight.

Keywords: wooden structures; timber structures; codes; standard; DBN B.2.6-161:2017; DBN B.2.6-161:2010; SNiP II-25-80

Introduction

Recently, a new system of national building codes based on the «State Building Codes» (DBN), which aims to replace the previous system based on the «Construction Standards and Regulations» (SNiP), has been implemented at an accelerated pace. At the same time, unfortunately, the new codes do not always show high quality of their development, thereby can be repeated several times with the introduction of appropriate clarifications, adjustments or even a fundamental change of certain parts of the document.

In some cases, the codes developed in one of the building structure design areas are not entirely consistent, but sometimes even directly contradict the rules of another industry. And by themselves, the new DBNs are not rarely intrinsically controversial and do not fully reflect the state of affairs and the available factual data in a particular area of design. All of this is due to the lack of a single focal point for the development of a national regulatory framework in Ukraine, on the one hand, and the lack of practical testing of building codes before they are put into operation, on the other hand.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158181
© D. O. Bannikov, 2019

Purpose

It is precisely this situation that is observed in the design of wooden building structures. From 01.02.2018 the new state standards DBN B.2.6-161:2017 have been introduced into the practice of designing such structures [4]. They replace the recently drafted codes DBN B.2.6-161:2010 [5], which in turn were elaborated to replace SNiP II-25-80 [9].

Since, unfortunately, nowadays the tradition of accompanying codes with special comments or explanations in which their «bottlenecks» are further disclosed (such as «Manual» [10]), it only remains to the users to interpret them at their discretion. Therefore, the author of this publication would like to draw the attention of developers and potential users of the codes DBN B.2.6-161:2017 to the points that are not entirely clear, which at first reading caused him certain difficulties in terms of their practical use. This is the main purpose of this publication.

Methodology

The author of this publication for more than 15 years has been teaching the discipline «Wooden and Plastic Structures» for the 5th year students (previously – for specialists, now – for masters) of the specialization (specialty) «Industrial and Civil Engineering». Therefore, the accumulated experience in the use of normative literature in educational practice, as well as the available experience during laboratory studies with students, made it possible to estimate the recently introduced codes DBN B.2.6-161:2017 from a practical point of view.

Findings

The development and implementation of the codes DBN B.2.6-161:2017 was carried out by «V.N. Shimanovsky Ukrainian Institute of Steel Construction» LLC with participation of a number of experts of leading universities of Ukraine, in particular KhNUCEA, Lviv Polytechnic National University, KNUCEA. In the previous codes DBN B.2.6-161:2010 the main developer is the State Enterprise «State Research Institute of Building Structures», as well as specialists of the PSACEA. The codes SNiP II-25-80 were developed by specialists from four research institutions in the late 70's of the 20th century.

Immediately I would like to note that the introduced codes DBN B.2.6-161:2017 by their quality of preparation are much more elaborated and have a much smaller number of complicated issues and clear mistakes than the previously abolished codes DBN B.2.6-161:2010.

In general, the new codes DBN B.2.6-161:2017 support the course to harmonize the domestic and European regulatory framework in the field of construction. They use the terminology and the system of designations of characteristics oriented on Eurocode, such as the codes for designing concrete and reinforced concrete structures DBN B.2.6-98:2009 [3], as well as stone and reinforced masonry structures DBN B.2.6-162:2010 [6], and unlike the standards for the design of steel structures DBN B.2.6-161:2017 [8] and aluminum structures DBN B.2.6-165:2011 [7], which use the traditional domestic system of symbols. However, traditional design approaches typical of domestic practice are also preserved. This definitely extends the scope of application of the domestic codes, contributing both to changing the mentality of design engineers and to improving the design process itself. In particular, the main method for calculating the wooden structures in the codes is the method of boundary states. However, the probabilistic method is not even mentioned, even though it is recommended for use in accordance with the requirements of DBN B.1.2-14-2009 [2].

Also, among the positive points I would like to note the introduction of settlement expressions in the work of elements on torsion, as well as a section for evaluating the dynamic characteristics of bending elements, which were not present in the previous codes SNiP II-25-80. Particular attention is paid to modern wood products and its derivatives (LVL, OSB, MDF). Also, the wooden structure work theory with the consideration of nonlinear properties was substantially developed, which the author emphasized in his previous works (see, for example, [11]).

Additionally, the new codes DBN B.2.6-161:2017 regulate the issues related to ensuring the protection of wooden structures from fire, biological pests and corrosion. These issues in the previous codes SNiP II-25-80 were covered in

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158181
© D. O. Bannikov, 2019

a rather narrow way, and there was no explicit separation of constructive protection measures for various external factors.

However, the new codes DBN B.2.6-161: 2017 also have a number of negative points, which I would like to dwell upon in more detail. They are listed in the order according to the recommendations in the code text.

1. The exposure duration load class values given in clause 5.3.2 are not consistent with the classification of loads given in DBN B.1.2-2:2006 [1] both quantitatively and qualitatively. In particular, the order of distribution of load duration is not clear, since, for example, a seismic load can take several minutes, which, as a result, should be attributed to short-term loads. Also, there is the question of limiting the duration of permanent loads for 10 years.

2. The operating classes listed in clause 5.3.3 include a rather narrow temperature-humidity range, as compared to SNiP II-25-80. In turn, a number of calculation characteristics depend on these classes, which cannot be determined for other conditions, for example, conditions of unheated premises or in dry humidity mode, etc.

3. In the previous codes SNiP II-25-80, the specific conditions of the wooden structure work are factored in a number of special coefficients, denoted as *m* (par. 3.2). However, the new codes DBN B.2.6-161: 2017 present the system of only two coefficients – k_h and k_{def}. The first of these is related to the size of the elements, served only as the recommended, actually replaces the four coefficients according to the previous codes for different types of sections. The second coefficient takes into account the rheological properties of wood and actually «replaces» two coefficients according to the previous codes for different types of loads. However, the open question is to take into account certain features of the real conditions of operation of structures. These include, for example, taking into account the impregnation of wood with flame retardants or antiseptics, or an elevated (lowered) operating temperature.

4. Section 9 and, in general, the text of the codes does not set the limits as to the boundary flexibility, at least for compressed elements This is, in the opinion of the author of this publication, is fundamentally wrong, since limitation of flexibility is one of the basic moments when designing structures from any materials [3, 6-8]. In the previous codes SNiP II-25-80, the boundary flexibility is also limited (table 14 [9]).

5. In clause 9.2, when calculating the stretched elements, the area on which all the weakening of the calculated section must be combined is reduced from 20 cm (according to the recommendations of the previous SNiP II-25-80 codes) to 15 cm. There is no justification for such a recommendation, which creates certain difficulties in the calculation of connections with numerical openings, for example, for nail joints.

6. In clause 9.4, when calculating bending elements, a recommendation is made regarding the need to combine all weakening of the cross-section, located at a length of 15 cm in one design section. This is a new requirement, absent in the previous codes SNiP II-25-80. However, such an approach raises a difficult question when calculating, for example, the horizontal element of the skew notch (Annex K). Traditionally, according to domestic professional literature [12, 13], this element is tested by two sections – weakened for central compression and complete for non-center compression. According to the new requirements it follows that the test should be performed only for the cross-section for non-center stretching, which requires additional justification

7. Paragraph 12.5 on the cylindrical nailed connections takes 22 pages out of 78 pages of the text of the codes (28%). For comparison, in the previous codes SNiP II-25-80 this paragraph occupied 4 pages out of 27 pages of the text of the codes (15%). In our opinion, this paragraph in the new codes DBN B.2.6-161:2017 would be expedient to structure, singling out a sequence of determining the bearing capacity of the connections of the type under consideration, the constructive requirements to them, as well as the scope of their application. Instead, all of these recommendations are actually in a mixed style, which makes it very difficult to implement them.

8. Among the standard characteristics of tensile strength listed in Annex B, there is no bearing stress. Instead, a link to the following characteristics is provided in annex K, which is dedicated to the contact connection. Also, according to the author, the codes paid little attention to the contact

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158181
© D. O. Bannikov, 2019

connections, although wooden structures with such connections (especially with skew notches) are found to be in operation not so rarely, for example, in previously constructed structures with wood truss covering.

9. There is a lack of complete information on such constructional elements as the dowel beams, and in particular the connection on the tongue pieces. Certainly, this kind of connections is not widespread and quite effective, however, as in the case of contact connections, similar structures are found in the design practice, even in the modern foreign one [15, 17].

10. Such a widely used in the domestic design practice concept as «wood grade» [12, 13] is mentioned only in one place of the codes (reference appendix G). The linkage of this concept with the classes of timber strength is given without any justification. Also, in our view, it would be advisable to supplement the codes with the recommendations or method for determining the type of wood for practical purposes, since this question is treated fairly freely in the existing professional and reference literature.

11. The transition to the use of strength classes should be accompanied by detailed explanations regarding the methodology for determining these classes for different wood materials, which is completely absent in the codes. In fact, in design practice there is a difficult situation, which is to correctly refer the existing wood or a product thereof to a specific strength class. As far as can be understood from the text of the codes for this purpose, it is necessary to conduct special laboratory tests, during which certain characteristics of strength will be determined. However, the use of the very class of strength with such an approach is simply superfluous.

In this regard, let us dwell separately on the comparison of the characteristics of the calculated strength of wood, which should be determined according to the new codes DBN B.2.6-161:2017 in relation to the previous codes SNIP II-25-80.

Under the new codes, the calculated resistance of wood should be determined by the expression:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} \cdot k_{\text{mod}}, \qquad (1)$$

where f_k – characteristic value of wood resistance by the Appendix B of DBN B.2.6-161:2017; γ_M – material reliability coefficient by the table 6.1 of DBN B.2.6-161:2017; k_{mod} – conversion factor by the table A.1 of the Appendix A of DBN B.2.6-161:2017.

According to the previous codes, the calculated resistance of wood was determined without any additional calculations directly by the Table 3.

We will perform the comparison of the calculated resistance values for the most widespread case of solid softwood, for which γ_M = 1.3 according to the new codes. Let us consider the cases of the most common, in design practice, types of loads by exposure duration – permanent, long-term and short-term. The results obtained are shown in Table 1, where the values for the 1st and 2nd operational classes according to the new codes (operation conditions of A1 and A2 according to the previous codes) were given in the numerator, and in the denominator – for the 3rd operating class according to the new codes (operation conditions of A3 according to the previous codes).

As can be seen from this table, in general, the calculated resistances according to the previous codes are higher than those by the new codes. To quantify this difference the last column «Difference» of Table 1 shows the calculated ratio of the largest value in the corresponding line of wood resistance according to the previous codes to the smallest value according to the new codes within the grades. It is seen that the difference reaches 3 times.

The values of the calculated resistance in Table 1 are given for a constant load, when the coefficient k_{mod} = 0.6 (0.5 for the 3rd operating class) according to the new codes DBN B.2.6-161:2017. For a long-term load this coefficient is equal to k_{mod} = 0.7 (0.55 for the 3rd operating class), and for short-term load k_{mod} = 0.9 (0.70 for the 3rd operating class). This means that for these types of loads, the difference in the values of the calculated resistance will decrease and will reach 2.5 and 2 times, respectively.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158181
© D. O. Bannikov, 2019

Table 1

Estimated resistance of wood (MPa)

Stressed state	DBN B.2.6-161:2017 for strength classes			SNIP II-25-80 for wood grades			Difference (times)
	C30	C27, C24, C20	C18, C16, C14	1st	2nd	3rd	
Bending	13.85 / 11.54	12.46 / 10.38 ÷ 9.23 / 7.69	8.31 / 6.92 ÷ 6.46 / 5.38	16.00 / 14.40 ÷ 14.00 / 12.60	15.00 / 13.50 ÷ 13.00 / 11.70	11.00 / 9.90 ÷ 8.50 / 7.65	1.76 / 1.84
Axial tension	8.31 / 6.92	7.38 / 6.15 ÷ 5.54 / 4.62	5.08 / 6.15 ÷ 3.69 / 3.08	10.00 / 9.00	7.00 / 6.30	–	1.26 / 1.36
Lateral tensions	0.18 / 0.15			–			–
Axial compression	10.62 / 8.85	10.15 / 8.46 ÷ 8.77 / 7.31	8.31 / 6.92 ÷ 7.38 / 6.15	16.00 / 14.40 ÷ 14.00 / 12.60	15.00 / 13.50 ÷ 13.00 / 11.70	11.00 / 9.90 ÷ 8.50 / 7.65	1.71 / 1.84
Lateral compression	1.25 / 1.04	1.20 / 1.00 ÷ 1.06 / 0.88	1.02 / 0.85 ÷ 0.92 / 0.77	1.80 / 1.62			1.96 / 2.10
Shear	0.92 / 0.77			2.40 / 2.16 ÷ 1.60 / 1.44	2.10 / 1.89 ÷ 1.50 / 1.35		2.61 / 2.81

12. Also, there are some issues with respect to terminology, in particular, its coordination, for example, with the existing DBN B.1.2-14:2009 [2] regarding the definition of boundary states, hazardous calculation situations, the use of liability classes and categories, etc.

Another feature of the newly introduced normative document DBN B.2.6-161:2017 is the complete absence of any recommendations regarding the possibilities of calculating wooden structures applying one of the most widely used numerical methods of building mechanics – the finite element method. After all, such calculations have a number of very specific features, such as [14, 16, 18].

Originality and practical value

The analysis of recently introduced new standard in the design of structures made of wood DBN B.2.6-161:2017 was carried out by the author of the publication not only in terms of assessing quality requirements and recommendations, but also in terms of the quantitative aspect of the issue. In particular, the author's experience in calculating simple elements and basic types of connections according to the new codes DBN B.2.6-161:2017 indicates that the bearing capacity determined for various cases is lower on average by 1.5 – 3 times than according to the previous codes SNiP II-25-80. This is due both to the transition to a new system of working condition coefficients and to the application of strength classes for determining the wood resistance. In turn, from a practical point of view, this revealed discrepancy means that already constructed structures may require some kind of reinforcement or reconstruction, in order to comply with the latest standards of DBN B.2.6-161:2017, and on the other hand, the new structures being designed should have larger bearing cross-sections of elements and, accordingly, greater bearing capacity and weight, in comparison with the previous codes SNiP II-25-80.

Conclusions

In general, the new codes DBN B.2.6-161:2017, recently introduced into design practice, are progressive both in their content and in terms of their use in construction practice. However, the existing problem areas in these

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158181
© D. O. Bannikov, 2019

codes, in our opinion, can significantly limit the possibility of their wide practical use. In addition, the bearing capacity of building structures made of wood, designed according to these standards, is several times higher than the one according to the previous ones (SNiP II-25-80), and existing structures may require some kind of reinforcement or reconstruction for compliance with the latest standards (DBN B.2.6-161:2017).

Certainly, other users of the codes may find some other difficulties or «bottlenecks» in the recently introduced new standards, but according to the author, the above is enough for publishing by developers of either special amendments to the codes, or additional comments to their application.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. ДБН В.1.2-2-2006 (зі змінами). Система надійності та безпеки в будівництві. Навантаження і впливи. Норми проектування. – Київ : Держбуд, 2007. – 70 с.
2. ДБН В.1.2-14-2009. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об’єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – Київ : Мінрегіонбуд, 2010. – 46 с.
3. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Київ : Мінрегіонбуд, 2011. – 73 с.
4. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев’яні конструкції. Основні положення. – Київ : Мінрегіон України, 2017. – 111 с.
5. ДБН В.2.6-161:2010. Конструкції будинків і споруд. Дерев’яні конструкції. Основні положення. – Київ : Мінрегіонбуд, 2011. – 102 с.
6. ДБН В.2.6-162:2010. Кам’яні та армокам’яні конструкції. Основні положення. – Київ : Мінрегіонбуд, 2011. – 107 с.
7. ДБН В.2.6-165:2011. Алюмінієві конструкції. Основні положення. – Київ : Мінрегіонбуд, 2012. – 78 с.
8. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – Київ : Мінрегіон України, 2014. – 205 с.
9. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции. Нормы проектирования. – Москва : Стройиздат, 1983. – 31 с.
10. Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80). – Москва : Стройиздат, 1986. – 210 с.
11. Гуслиста, Г. Е. Оцінка важливості врахування нелінійних властивостей системи «споруда–ґрунтовий масив» при визначенні її напружено-деформованого стану / Г. Е. Гуслиста, Д. О. Банніков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 37. – С. 155–160.
12. Клименко, В. З. Конструкції з дерева і пластмас : підручник для вузів / В. З. Клименко. – Київ : Вища школа, 2000. – 304 с.
13. Конструкции из дерева и пластмасс : учеб. для вузов / Ю. В. Слицкоухов, В. Д. Буданов, М. М. Гаппоев, И. М. Гуськов [и др.] ; под ред. Ю. В. Слицкоухова, Г. Г. Карлсена. – Москва : Стройиздат, 1986. – 543 с.
14. Bofang, Zhu. The Finite Element Method: Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering / Zhu Bofang. – Singapore : John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2018. – 843 p. doi: 10.1002/9781119107323
15. Jeska, S. Emergent Timber Technologies: Materials, Structures, Engineering, Projects / S. Jeska, K. S. Pascha. – Basel : Birkhäuser, 2014. – 176 p. doi: 10.1515/9783038216162
16. Liu, G. R. The Finite Element Method. A Practical Course / G. R. Liu, S. S. Quek. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014. – 464 p. doi: 10.1016/C2012-0-00779-X
17. Misztal, B. Wooden Domes. History and Modern Times / B. Misztal. – Cham : Springer, 2018. – 269 p. doi: 10.1007/978-3-319-65741-7
18. Singiresu, S. R. The Finite Element Method in Engineering / S. R. Singiresu. – 6th ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2018. – 782 p. doi: 10.1016/c2016-0-01493-6

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158181
© D. O. Bannikov, 2019

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019, № 1 (79)

Д. О. БАННІКОВ[1*]

[1*]Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта dnuzt@diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДБН В.2.6-161:2017 «ДЕРЕВ'ЯНІ КОНСТРУКЦІЇ» В ПРОЕКТНІЙ ПРАКТИЦІ

Мета. Із 01.02.2018 в практику проектування конструкцій із дерева введені нові державні норми ДБН В.2.6-161:2017. Вони замінюють використовувані донедавна норми ДБН В.2.6-161:2010, які, у свою чергу, були покликані замінити СНиП II-25-80. Автор цієї публікації ставить за мету звернути увагу розробників і потенційних користувачів норм ДБН В.2.6-161:2017 на суперечливі моменти, які викликають певні труднощі їх практичного застосування. **Методика.** Накопичений за час навчальної практики досвід роботи з нормативною літературою, а також наявні напрацювання під час проведення лабораторних занять зі студентами дозволили проаналізувати нещодавно запроваджені норми ДБН В.2.6-161:2017 з практичної точки зору. **Результати.** У цілому введені в практику проектування нові норми є прогресивними як за своїм змістом, так і з точки зору використання. Проте наявні проблемні моменти в цих нормах, які розглянуті в нашій публікації, можуть суттєво обмежувати можливість їх широкого практичного застосування. **Наукова новизна.** Аналіз зазначених норм був виконаний не тільки в частині оцінки якісних вимог та рекомендацій, а й з точки зору кількісної сторони питання. **Практична значимість.** Авторський досвід проведення розрахунків простих елементів та основних видів з'єднань за новими нормами ДБН В.2.6-161:2017 свідчить про те, що визначена для різних випадків несуча здатність виявляється нижчою в середньому в 1,5–3 рази порівняно зі старими нормами СНиП II-25-80. Із практичної точки зору така виявлена розбіжність означає, що вже збудовані конструкції можуть потребувати певного підсилення або реконструкції, а конструкції, які проектують, повинні мати більші несучі перерізи елементів і, відповідно, більшу несучу здатність і вагу.

Ключові слова: конструкції з дерева; дерев'яні конструкції; норми; нормативний документ; ДБН В.2.6-161:2017; ДБН В.2.6-161:2010; СНиП II-25-80

Д. О. БАННИКОВ[1*]

[1*]Каф. «Строительное производство и геодезия», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, эл. почта dnuzt@diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДБН В.2.6-161:2017 «ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ» В ПРОЕКТНОЙ ПРАКТИКЕ

Цель. С 01.02.2018 в практику проектирования конструкций из дерева введены новые государственные нормы ДБН В.2.6-161:2017. Они заменяют используемые до недавнего времени нормы ДБН В.2.6-161:2010, которые, в свою очередь, были призваны заменить СНиП II-25-80. Автор данной публикации ставит своей целью обратить внимание разработчиков и потенциальных пользователей норм ДБН В.2.6-161:2017 на противоречивые моменты, которые вызывают у него определенные сложности их практического использования. **Методика.** Накопленный за время учебной практики опыт работы с нормативной литературой, а также имеющиеся наработки во время проведения лабораторных занятий со студентами позволили проанализировать недавно введенные нормы ДБН В.2.6-161:2017 с практической точки зрения. **Результаты.** В целом введенные в практику проектирования новые нормы являются прогрессивными как по своему содержанию, так и с точки зрения использования. Однако имеющиеся проблемные моменты в этих нормах, которые рассмотрены в данной публикации, могут существенно ограничивать возможность их широкого практического применения. **Научная новизна.** Анализ указанных норм был выполнен не только в части оценки качественных требований и рекомендаций, но и с точки зрения количественной стороны вопроса.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158181
© D. O. Bannikov, 2019

Практическая значимость. Авторский опыт проведения расчетов простых элементов и основных видов соединений по новым нормам ДБН В.2.6-161:2017 свидетельствует о том, что определенная для различных случаев несущая способность оказывается ниже в среднем в 1,5–3 раза по сравнению со старыми нормами СНиП II-25-80. С практической точки зрения такое выявленное расхождение означает, что уже построенные конструкции могут требовать определенного усиления или реконструкции, а проектируемые должны иметь большие несущие сечения элементов и, соответственно, большую несущую способность и массу.

Ключевые слова: конструкции из дерева; деревянные конструкции; нормы; нормативный документ; ДБН В.2.6-161:2017; ДБН В.2.6-161:2010; СНиП II-25-80

REFERENCES

1. Systema nadiinosti ta bezpeky v budivnytstvi. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia, 70 DBN B.1.2-2:2006 (2007). (in Ukrainian)
2. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'iektiv. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruktsii ta osnov, 46 DBN B.1.2-14-2009 (2010). (in Ukrainian)
3. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia, 73 DBN B.2.6-98:2009 (2011). (in Ukrainian)
4. Derev'iani konstruktsii. Osnovni polozhennia, 111 DBN B.2.6-161:2017 (2017). (in Ukrainian)
5. Konstruktsii budynkiv i sporud. Derev'iani konstruktsii. Osnovni polozhennia, 102 DBN B.2.6-161:2010 (2011). (in Ukrainian)
6. Kam'iani ta armokam'iani konstruktsii. Osnovni polozhennia, 107 DBN B.2.6-162:2010 (2011). (in Ukrainian)
7. Aliuminiievi konstruktsii. Osnovni polozhennia, 78 DBN B.2.6-165:2011 (2012). (in Ukrainian)
8. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia, 205 DBN B.2.6-198:2014 (2014). (in Ukrainian)
9. Derevyannye konstruktsii. Normy proektirovaniya, 31 SNiP II-25-80 (1983). (in Russian)
10. *Posobie po proektirovaniyu derevyannykh konstruktsiy (k SNiP II-25-80).* (1986). Moscow: Stro-yizdat. (in Russian)
11. Huslysta, H. E., & Bannikov, D. O. (2011). Otsinka vazhlyvosti vrakhuvannia neliniinykh vlas-tyvostei systemy «sporuda–gruntovyi masyv» pry vyznachenni yii napruzheno-deformovanoho stanu. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 37,* 155-160. (in Ukrainian)
12. Klymenko, V. Z. (2000). *Konstruktsii z dereva i plastmas: pidruchnyk dlia vuziv*. Kyiv: Vyshcha shkola. (in Ukrainian)
13. Slitskoukhov, Y. V., Budanov, V. D., Gappoev, M. M., Guskov, I. M., Makhutova, Z. B., Osvenskiy, B. A., … Filimonov, E. V. (1986). *Konstruktsii iz dereva i plastmass: uchebnik dlya vuzov.* Moscow: Stroyizdat. (in Russian)
14. Bofang, Z. (2018). *The Finite Element Method: Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering.* Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. doi: 10.1002/9781119107323 (in English)
15. Jeska, S., & Pascha, K. S. (2014). *Emergent Timber Technologies*. Basel: Birkhäuser. doi: 10.1515/9783038216162 (in English)
16. Liu, G. R., & Quek, S. S. (2014). *The Finite Element Method. A Practical Course*. Oxford: Butterworth-Heinemann. doi: 10.1016/C2012-0-00779-X (in English)
17. Misztal, B. (2018). *Wooden Domes. History and Modern Times.* Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-65741-7 (in English)
18. Singiresu, S. R. (2018). *The Finite Element Method in Engineering* (6th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann. doi: 10.1016/c2016-0-01493-6 (in English)

Received: Sep. 20, 2018
Accepted: Jan. 16, 2019

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: 10.15802/stp2019/158181
© D. O. Bannikov, 2019

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

М. М. БІЛЯЄВ, Т. І. РУСАКОВА
ВИЯВЛЕННЯ ЗОН ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В МІСТАХ Й ОЦІНКА РИЗИКІВ ХРОНІЧНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ 7

В. В. КОВАЛЕНКО
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ КОНСТРУКЦІЙ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КІЛ НА ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖ НА ЛОКОМОТИВАХ 17

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

О. А. ХОДОСКІНА, Ю. В. МАТЮШКОВА
РОЛЬ ОНОВЛЕННЯ ОПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ В ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ СТАНЦІЇ 26

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

С. П. ОНИЩЕНКО, Ю. О. КОСКІНА
ОЦІНКА ЧАСУ ПРИБУТТЯ СУДНА В ПОРТ 39

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

М. Б. КУРГАН, Д. М. КУРГАН, М. Ю. БРАЖНИК, Д. Л. КОВАЛЬСЬКИЙ
ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СУМІЩЕНОЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ 51

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

І. А. КЛЮШНИК, Т. О. КОЛЕСНИКОВА, О. С. ШАПОВАЛ
ЄДИНА ЦИФРОВА ІНФРАСТРУКТУРА СУЧАСНОЇ НАУКОВОЇ БІБЛІОТЕКИ НА ОСНОВІ WEB-ТЕХНОЛОГІЙ 64

Г. К. КОЖЕВНІКОВ, О. М. ПІГНАСТИЙ
РОЗПОДІЛЕНА ДИНАМІЧНА PDE-МОДЕЛЬ ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЧОЇ ЛІНІЇ 81

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

І. О. ВАКУЛЕНКО, С. В. ПРОЙДАК, Л. І. ВАКУЛЕНКО, М. А. ГРИЩЕНКО
ЗНЕМІЦНЕННЯ ПІД ЧАС НАГРІВАННЯ ЗАГАРТОВАНОЇ СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ 94

МАШИНОБУДУВАННЯ

Л. М. БОНДАРЕНКО, О. П. ПОСМІТЮХА, К. Ц. ГЛАВАЦЬКИЙ
АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПРИВЕДЕНОГО КОЕФІЦІЄНТА ОПОРУ ОБЕРТАННЮ МЕХАНІЗМІВ ПОВОРОТУ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН 102

Р. П. ПОГРЕБНЯК, М. Р. ПОГРЕБНЯК
КІНЕМАТИЧНИЙ СИНТЕЗ КРИВОШИПНО-ПОВЗУНКОВОГО МЕХАНІЗМУ ЗАХОПЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМ ІНДЕКСОМ ПЕРЕДАЧІ РУХУ 117

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

С. А. КОСТРИЦЯ, С. Ю. МОЛЧАНОВ, М. В. КРАМАРЕНКО, О. А. ГРЕЧКІН, Д. В. ЛАКТІОНОВ
ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РАМИ ВІЗКА ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА ДПКР-2 ПІД ЧАС ДІЇ РОЗРАХУНКОВИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ 128

А. О. ЛОВСЬКА
ВИЗНАЧЕННЯ СТІЙКОСТІ КОНТЕЙНЕРА-ЦИСТЕРНИ ВІДНОСНО РАМИ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ ПІД ЧАС ПЕРЕВЕЗЕННЯ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ПОРОМІ 139

А. О. ШВЕЦЬ, О. О. БОЛОТОВ
ВПЛИВ НАВАНТАЖЕННЯ ВІД ОСІ ПІВВАГОНА НА ЙОГО ДИНАМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ТА ЗАЛІЗНИЧНУ КОЛІЮ 151

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Д. О. БАННІКОВ
ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДБН В.2.6-161:2017 «ДЕРЕВ'ЯНІ КОНСТРУКЦІЇ» В ПРОЕКТНІЙ ПРАКТИЦІ 167

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОЛОГИЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Н. Н. БЕЛЯЕВ, Т. И. РУСАКОВА
ВЫЯВЛЕНИЕ ЗОН ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ГОРОДАХ И ОЦЕНКА РИСКОВ ХРОНИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ 7

В. В. КОВАЛЕНКО
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЦЕПЕЙ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПОЖАРОВ НА ЛОКОМОТИВАХ..... 17

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

О. А. ХОДОСКИНА, Ю. В. МАТЮШКОВА
РОЛЬ ОБНОВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ 26

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

С. П. ОНИЩЕНКО, Ю. А. КОСКИНА
ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПРИБЫТИЯ СУДНА В ПОРТ 39

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ

Н. Б. КУРГАН, Д. Н. КУРГАН, М. Ю. БРАЖНИК, Д. Л. КОВАЛЬСКИЙ
ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОВМЕЩЕННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ 51

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

И. А. КЛЮШНИК, Т. А. КОЛЕСНИКОВА, А. С. ШАПОВАЛ
ЕДИНАЯ ЦИФРОВАЯ ИНФРАСТРУКТУРА СОВРЕМЕННОЙ НАУЧНОЙ БИБЛИОТЕКИ НА ОСНОВЕ WEB-ТЕХНОЛОГИЙ 64

Г. К. КОЖЕВНИКОВ, О. М. ПИГНАСТЫЙ
РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ PDE-МОДЕЛЬ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАГРУЗКОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ 81

МАТЕРИАЛОЗНАВСТВО

И. А. ВАКУЛЕНКО, С. В. ПРОЙДАК, Л. И. ВАКУЛЕНКО, Н. А. ГРИЩЕНКО
РАЗУПРОЧНЕНИЕ ПРИ НАГРЕВЕ ЗАКАЛЕННОЙ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 94

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Л. Н. БОНДАРЕНКО, А. П. ПОСМИТЮХА, К. Ц. ГЛАВАЦКИЙ
АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЮ МЕХАНИЗМОВ ПОВОРОТА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН 102

Р. П. ПОГРЕБНЯК, М. Р. ПОГРЕБНЯК
КИНЕМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КРИВОШИПНО-ПОЛЗУННОГО МЕХАНИЗМА ЗАХВАТЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ИНДЕКСУ ПЕРЕДАЧИ ДВИЖЕНИЯ..... 117

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

С. А. КОСТРИЦА, С. Ю. МОЛЧАНОВ, М. В. КРАМАРЕНКО, А. А. ГРЕЧКИН, Д. В. ЛАКТИОНОВ
ОЦЕНКА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА ДПКР-2 ПРИ ДЕЙСТВИИ РАСЧЁТНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК..... 128

А. А. ЛОВСКАЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КОНТЕЙНЕРА-ЦИСТЕРНЫ ОТНОСИТЕЛЬНО РАМЫ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПАРОМЕ 139

А. А. ШВЕЦ, А. А. БОЛОТОВ
ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ ОТ ОСИ ПОЛУВАГОНА НА ЕГО ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ..... 151

ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Д. О. БАННІКОВ
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДБН В.2.6-161:2017 «ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ» В ПРОЕКТНОЙ ПРАКТИКЕ 167

CONTENTS

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

M. M. BILIAIEV, T. I. RUSAKOVA
DETERMINING ZONES OF CHEMICAL POLLUTION IN THE CITIES AND ASSESSMENT OF CHRONIC DISEASES RISKS 7

V. V. KOVALENKO
INFLUENCE RESEARCH OF CHEMICAL COMPOSITION OF HIGH-VOLTAGE CIRCUIT DESIGNS ON THE FIRE BREAK-OUT AT THE LOCOMOTIVES 17

ECONOMICS AND MANAGEMENT

O. A. HODOSKINA, Y. V. MATYUSHKOVA
THE ROLE OF OPERATING SYSTEM UPGRADE IN OPTIMIZING THE OPERATION OF THE RAILWAY STATION 29

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

S. P. ONYSHCHENKO, Y. A. KOSKINA
ESTIMATION OF THE TIME OF THE VESSEL'S ARRIVAL AT PORT 39

RAILROAD AND ROADWAY NETWORK

M. B. KURHAN, D. M. KURHAN, M. Y. BRAZHNYK, D. L. KOVALSKYI
FEATURES OF STRESS-STRAIN STATE OF THE DUAL RAILWAY GAUGE 51

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING

I. A. KLIUSHNYK, T. O. KOLESNYKOVA, O. S. SHAPOVAL
UNIFIED DIGITAL INFRASTRUCTURE OF THE MODERN SCIENTIFIC LIBRARY ON THE BASIS OF WEB TECHNOLOGIES 64

G. K. KOZEVNIKOV, O. M. PIHNASTYI
DISTRIBUTED DYNAMIC PDE-MODEL OF PROGRAM CONTROL BY UTILIZATION OF THE TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF PRODUCTION LINE 81

MATERIAL SCIENCE

I. O. VAKULENKO, S. V. PROIDAK, L. I. VAKULENKO, N. A. GRISCHENKO
SOFTENING OF HARDENED MEDIUM-CARBON STEEL DURING HEATING 94

MECHANICAL ENGINEERING

L. M. BONDARENKO, O. P. POSMITYUKHA, K. T. HLAVATSKYI
ANALYTICAL DETERMINATION OF THE REDUCED ROTATIONAL RESISTANCE COEFFICIENT OF THE CONSTRUCTION MACHINE SLEWING GEAR 102

R. P. POGREBNYAK, M. R. POHREBNIAK
KINEMATIC SYNTHESIS OF CRANK-SLIDER MECHANISM OF THE GRIPPING DEVICE BASED ON THE POWER TRANSMISSION INDEX 117

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

S. A. KOSTRYTSIA, S. Y. MOLCHANOV, M. V. KRAMARENKO, A. A. HRECHKIN, D. V. LAKTIONOV
STRESS-STRAIN STATE ASSESSMENT OF THE BOGIE FRAME OF DPKR-2 DIESEL TRAIN UNDER ACTION OF DESIGN AND OPERATIONAL LOADS 128

A. O. LOVSKA
DETERMINATION OF THE TANK CONTAINER STABILITY RELATIVE TO THE FRAME OF A FLAT CAR DURING TRAIN FERRY TRANSPORTATION 139

A. O. SHVETS, O. O. BOLOTOV
INFLUENCE OF LOADING FROM THE AXLE OF A GONDOLA CAR ON ITS DYNAMIC INDICATORS AND RAILWAY TRACK 151

TRANSPORT CONSTRUCTION

D. O. BANNIKOV
OUTLOOKS OF USING DBN B.2.6-161:2017 «WOODEN STRUCTURES» IN DESIGN PRACTICE 167

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 А4, 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) 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;

4) 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 пропонованих 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),
Дніпровський 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/**

Для нотаток

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наукове видання

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА
№1 (79) 2019
(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова
Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова
Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60 × 84 1/8. Ум. друк. арк. 20,93. Тираж 100 пр. Зам. №02/01

Дніпровський 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
Свідоцтво 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
№ 1 (79) 2019
(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – О. В. Поминова
Компьютерная верстка – О. В. Поминова
Литературная обработка – С. П. Лагдан

Формат 60 × 84 1/8. Ус. печат. лист. 20,93. Тираж 100 экз. Зак. №02/01

Днипровский 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. Днипро, пр. Д. Яворницкого, 60
Свидетельство субъекта издательского дела серия ДК № 397 от 03.04.2001 г.

♦ ♦ ♦ ♦ ♦

Scientific Edition

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.
VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACÌONAL'NOGO UNÌVERSITETU ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU
=
SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS
No. 1 (79) 2019
(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova
Desktop publishing – O. V. Pominova
Redaction – S. P. Lahdan

Format 60 × 84 1/8. Conventional printed sheet 20,93. Circulation 100. Order no. 02/01

Dnipro 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

ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2019. 1 (79). 1-180